

Table des Matières

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

INTRODUCTION GENERALE

1

Chapitre 1 : Les sédiments de barrages: Contexte général et bibliographique

1.1	Introduction	4
1.2	Définition des sédiments de dragage	4
1.3	Définition du dragage	4
1.4	Composition et domaine de valorisation des sédiments de dragage	5
1.4.1	Eléments de nature minérale	5
1.4.2	Eau dans les sédiments	6
1.4.3	Matières organiques dans les sédiments	7
1.4.4	Polluants dans les sédiments	8
1.4.4.1	Métaux lourds	8
1.4.4.2	Micropolluants organiques	10
1.4.4.3	Eléments nutritifs	11
1.5	Problèmes posés par la sédimentation	11
1.6	Techniques de dévasement	12
1.6.1	Soutirage	13
1.6.2	Dragage	13
1.6.2.1	Types de dragage	14
1.7	Conclusion	17

Chapitre 2 : Valorisation des sédiments

2.1	Introduction	18
2.2	Valorisations des sédiments de dragage	18
2.3	Valorisation des sédiments en technique routière	19
2.3.1	Définition d'une structure de chaussée	19
2.3.2	Différentes types de structures des chaussées	22
2.3.3	Description des matériaux de chaussée	23
2.3.4	Les familles de granulats	24
2.3.5	Matériaux hors normes	26
2.3.6	Matériaux recyclés	27
2.3.7	Paramètres de classification des sols en domaine routier	27
2.3.8	Les paramètres de comportement mécanique du sol en domaine routier	29
2.3.9	Synthèse bibliographique des études faites sur la valorisation des sédiments en domaine routier	30
2.4	Valorisation des sédiments dans le béton et mortier	31
2.5	Valorisation des sédiments dans la fabrication du ciment	34
2.6	Valorisation des sédiments comme couche étanche pour un bassin de lagunage	36

2.7	Valorisation des sédiments dans l'industrie des matériaux rouges	37
2.8	Conclusion	39
Chapitre 3 : Traitement des sols par utilisation des fibres		
3.1	Introduction	41
3.2	Les fibres	41
3.3	Types de fibres	41
3.3.1	Les fibres naturelles	44
3.3.2	Les fibres artificielles	46
3.4	Comportement mécanique des sols traités aux fibres	48
3.4.1	Travaux de Marandi et al.2008	48
3.4.2	Travaux de Abessolo et al.2020	50
3.4.3	Travaux de Ghavami et al.1999	53
3.4.4	Travaux de Millogo et al.2014	54
3.4.5	Travaux de Cai et al.2006	55
3.4.6	Travaux d'Al-Akhras et al.2008	56
3.4.7	Travaux de Boukemmoum et Nouaouria (2019)	58
3.4.8	Travaux de Santhi et al.2009; Maity et al. 2011	59
3.4.9	Travaux de Gray et Al-Refeai. (1986)	62
3.4.10	Travaux de Sivakumar babu et al. (2008), Ahmad et al. (2010)	63
3.5	Conclusion	64
Chapitre 4 : Traitement des sols en Algérie par les fibres du palmier dattier et les fibres en caoutchouc		
4.1	Introduction	66
4.2	Traitement par les fibres du palmier dattier	66
4.2.1	Le palmier dattier	66
4.2.2	La composition des fibres du palmier dattier	67
4.2.3	Les fibres de palmier dattier	69
4.2.4	Traitement des sols algériens par les fibres du palmier dattier	70
4.2.4.1	Travaux de Taallah et al.2014	70
4.2.4.2	Travaux de Kazi-Tani (2016)	72
4.2.4.3	Travaux de Zamoum (2019)	74
4.3	Traitement par les fibres en caoutchouc	77
4.3.1	Définition et types du caoutchouc	77
4.3.2	Propriétés du caoutchouc	78
4.3.3	Caractéristiques des fibres de caoutchouc	79
4.3.4	Traitement des sols algériens par les fibres en caoutchouc.	80
4.3.4.1	Travaux de Bekhiti et al.2016	80
4.3.4.2	Travaux de Layeb et Halbaoui (2017)	82
4.3.4.3	Travaux de Meddah et Merzouk (2016)	83
4.4	Conclusion	83
	CONCLUSION GENERALE	85
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	87

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Les sédiments de barrages: Contexte général et bibliographique

Figure 1.1	Degré de décontamination en fonction de la granulométrie du matériau (Alzieu et al. 2003).	6
Figure 1.2	Dragage hydraulique	15
Figure 1.3	Dragage mécanique	16
Figure 1.4	Dragage à l'Américaine	16

Chapitre 2 : Valorisation des sédiments

Figure 2.1	Schéma d'une structure de chaussée type	20
Figure 2.2	Organigramme de fonctionnement d'une couche de forme	21
Figure 2.3	Structure type d'une chaussée souple	22
Figure 2.4	Structure type d'une chaussée semi-rigide	22
Figure 2.5	Structure type d'une chaussée rigide	23
Figure 2.6	Mise en œuvre d'une couche de fondation en sable traité	25
Figure 2.7	Classification des matériaux selon la norme NF P11-300, GTR2000	28
Figure 2.8	Critère de l'IPI pour les différentes couches de chaussée (Norme NF P 98 115)	30
Figure 2.9	Blocs de bétons réalisés avec des sédiments non-immérgeables traités (droite : Port de Dunkerque, gauche : Rade de Toulon)	34
Figure 2.10	Couche d'argile dans un bassin de lagunage	37
Figure 2.11	Briques et tuiles	38
Figure 2.12	Briques fabriquées avec un taux de substitution de 70% de sédiments	38
Figure 2.13	Schéma général du processus de fabrication des briques (Remini, 2006)	39

Chapitre 3 : Traitement des sols par utilisation des fibres

Figure 3.1	Types de fibres	43
Figure 3.2	Fibres animales	44
Figure 3.3	Fibres minérales	44
Figure 3.4	Fibres végétales	45
Figure 3.5	Fibres de tiges	45
Figure 3.6	Fibres de surface	46
Figure 3.7	Fibres des pneus de caoutchouc	46
Figure 3.8	Fibres de caoutchouc découpées en morceaux	47
Figure 3.9	Fibres de verre de type Cemfil (A.R)	47
Figure 3.10	Fibres de palmier dattier typiques de la palmeraie de Bam (Iran) (Marandi et al.2008).	48
Figure 3.11	Courbes de compactage du sol (limon-sableux) avec et sans renforcement des fibres du palmier dattier (Marandi et al.2008).	49
Figure 3.12	Effets de la teneur et longueur des fibres du palmier dattier sur la variation de la résistance à la compression (UCS) du sol traité (Marandi et al.2008)	49

Figure 3.13	Variation des indices CBR _{im} d et CBR _{im} m pour le sol traité à des teneurs et longueurs variables des fibres du palmier dattier (Marandi et al.2008).	50
Figure 3.14	Fibres végétales de Bambou épluché et défibré (Abessolo et al.2020)	51
Figure 3.15	Variations de la densité et la porosité des BTC avec la teneur et la longueur des fibres végétales de Bambou (Abessolo et al.2020)	51
Figure 3.16	Variations des résistances à la compression et à la flexion des BTC avec la teneur et la longueur des fibres végétales de Bambou (Abessolo et al.2020)	52
Figure 3.17	Variation du taux d'absorption des BTC avec la teneur et la longueur des fibres végétales de Bambou (Abessolo et al.2020)	53
Figure 3.18	Les fibres de sisal et de noix de coco	53
Figure 3.19	Influence d'ajout des fibres de sisal et de noix de coco sur la résistance mécanique du sol (Ghavami et al.1999)	54
Figure 3.20	Les fibres d'hibiscus cannabinus (kénaf)	54
Figure 3.21	Effets d'introduction des fibres végétales (type kénaf) sur la résistance à la compression et à la flexion (Millogo et al.2014)	55
Figure 3.22	Fibres de polypropylène	55
Figure 3.23	Formes de ruptures d'échantillons d'argile avec 8% de chaux et trois dosages en fibres après 7 jours (Cai et al.2006) : (a) 0%, (b) 0.05%, (c) 0.15%, (d) 0.25%	56
Figure 3.24	Fibres de nylon et de palmier	57
Figure 3.25	Effets de teneur en fibres de nylon et de palmier sur le potentiel et la pression de gonflement de l'argile à des rapports d'aspect (L/d) variables (Al-Akhras et al.2008)	57
Figure 3.26	Effet de la fraction d'argile sur le pourcentage de réduction dans la pression de gonflement à 5% de teneur en fibres et des rapports d'aspect (L/d) différents (Al-Akhras et al.2008)	58
Figure 3.27	Fibres de sisal (Boukemmoum et Nouaouria (2019))	59
Figure 3.28	Effets du traitement du sédiment Ain Dalia avec les fibres de sisal (Boukemmoum et Nouaouria (2019))	59
Figure 3.29	Variation de la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale d'une argile (At) traitée avec des fibres végétales de type sisal (Santhi et al. 2009)	60
Figure 3.30	Variation de la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage et de la longueur des fibres de jute (Maity et al. 2011)	60
Figure 3.31	Variation de l'indice CBR avec le pourcentage et la longueur des fibres (Santhi et al. 2009; Maity et al. 2011)	62
Figure 3.32	Effets des fibres végétales de type roseaux sur les courbes triaxiaux contrainte-déformation pour un sable sec (Gray et Al-Refeai 1986)	63
Figure 3.33	Fibres de drupes de palmier et de coir	63
Figure 3.34	Effets des fibres de coir sur la cohésion l'angle de frottement (Sivakumar babu et al. 2008)	64
Figure 3.35	Effets des fibres de drupes de palmier à huile sur la cohésion et l'angle de frottement (Ahmad et al. 2010)	64

Chapitre 4 : Traitement des sols en Algérie par les fibres du palmier dattier et les fibres en caoutchouc

Figure 4.1	Des palmiers dattiers	67
Figure 4.2	Structure générale d'un palmier dattier	69
Figure 4.3	Section du tronc du palmier dattier	69
Figure 4.4	Lif autour du tronc du palmier dattier	70
Figure 4.5	Fibres de surface de palmier dattier mâle (life) (FSPDM) (Taallah et al.2014)	70

Figure 4.6	Effet des fibres FSPDM sur la résistance à la compression du BTC pour une contrainte de compactage de 10 MPa (Taallah et al.2014)	71
Figure 4.7	Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression sèche du BTC à base de 5% de ciment (Taallah et al.2014)	71
Figure 4.8	Variation des résistances à la compression et à la traction avec la teneur en fibres FSPDM et en ciment (Taallah et al.2014)	72
Figure 4.9	Les fibres végétales (Paille, Halfa, Noyaux de datte et Régime de palmier (grappe))	72
Figure 4.10	Effets du type et de la teneur des fibres végétales sur la résistance à la compression des adobes de terre (Kazi-Tani, 2016)	73
Figure 4.11	Traitement chimique à base de NaOH de la fibre du palmier dattier (Zamoum, 2019)	74
Figure 4.12	Effets de la fibre du palmier dattier sur la portance du sol (Zamoum, 2019)	74
Figure 4.13	Effets de la fibre du palmier dattier sur les paramètres mécaniques du sol (Zamoum, 2019)	75
Figure 4.14	Arbre à caoutchouc (<i>Hevea brasiliensis</i>)	76
Figure 4.15	Fibres de caoutchouc des pneus usés (1), poudre de caoutchouc (2 et 3)	76
Figure 4.16	Effet de la teneur des fibres en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement des deux argiles (Bekhiti et al.2016)	77
Figure 4.17	Les fibres de caoutchouc et de verre utilisées dans le traitement des BTC (Layeb et Halbaoui, 2017)	78
Figure 4.18	Effets de la teneur des fibres (caoutchouc-verre) sur la résistance à la compression et à la traction du BTC (Layeb et Halbaoui 2017)	81
Figure 4.19	Fibres de caoutchouc et mélange du sable de dune avec ces fibres à différents pourcentages (Meddah et Merzoug 2016)	81
Figure 4.20	Effets des fibres de caoutchouc sur les courbes de cisaillement aux deux états de densité du sable (Meddah et Merzoug 2016)	82
Figure 4.21	Effet des fibres de caoutchouc sur l'angle de frottement interne du sable dense (SD) et lâche (SL) (Meddah et Merzoug 2016)	83

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : Les sédiments de barrages: Contexte général et bibliographique

Tableau 1.1	Classification granulométrique (Alzieu et al. 2003).	5
Tableau 1.2	Source de pollutions par les métaux lourds (Alzieu et al. 2003).	9
Tableau 1.3	Origine des micropolluants dans les sédiments (Ngoc Thanh, 2009).	11

Chapitre 3 : Traitement des sols par utilisation des fibres

Tableau 3.1	Propriétés physique et mécanique de certaines fibres	42
Tableau 3.2	Propriétés physiques et techniques des fibres de caoutchouc	47
Tableau 3.3	Propriétés physico-mécaniques de la fibre de verre A.R	48
Tableau 3.4	Effets d'ajouts des fibres polypropylène sur les propriétés mécaniques (UCS, potentiel de gonflement et potentiel de retrait) (Cai et al.2006)	56

Chapitre 4 : Traitement des sols en Algérie par les fibres du palmier dattier et les fibres en caoutchouc

Tableau 4.1	Propriétés physiques des fibres de caoutchouc de pneu usées (Bekhiti, 2019)	80
Tableau 4.2	Propriétés chimiques des fibres de caoutchouc de pneu usées (Bekhiti, 2019)	80
Tableau 4.3	Caractéristiques mécaniques des fibres de caoutchouc	80

LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

(GTR) : guide technique routier

(BTC) : Blocs de Terre Comprimée

(OPN) : l'Optimum Proctor Normal

VBS : Essais de bleu de méthylène.

IP : Indice de plasticité.

Lp : Limite de plasticité.

UU : Essais triaxial non consolidés-non drainés.

CU : Essais triaxial consolidés-non drainés.

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.

(RCS) : résistance à la compression sèche.

(RCH) : résistance à la compression humide

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'envasement des barrages constitue sans doute la conséquence la plus grave de l'érosion hydrique où le potentiel hydraulique perd annuellement environ 30 millions de mètres cubes, selon les sources hydrauliques. Cette quantité est jugée énorme pour certaines retenues de barrages. Les effets néfastes de ce phénomène sont nombreux, pouvant aller de la réduction considérable de la capacité d'emmagasinement et de stockage du barrage, jusqu'à la dégradation nette de la qualité de l'eau du barrage.

La majorité des spécialistes s'accordent à dire que les pays du Maghreb, d'ici 2025, connaîtront des problèmes aigus d'eau. Autant, dès maintenant, penser à une stratégie globale de préservation de nos barrages contre ce grave problème de l'envasement, qui nécessite d'être pris en considérations et prévoir tous les moyens nécessaires pour lutter contre ce phénomène comme les chasses, le dragage, le soutirage des courants de densité, la surélévation, ou mieux encore l'utilisation nouvelle des barrières végétales.

L'extraction de ces sédiments d'envasement des barrages est tellement onéreuse qu'il serait souhaitable de les exploiter dans la valorisation en différents domaines du Génie-Civil et des travaux publics, afin d'amortir leurs coûts d'extraction. Il est alors plus judicieux de mener une réflexion pour une utilisation rationnelle de ces sédiments de dragage.

Sauf que l'utilisation de ces sédiments à leur état naturel n'est pas favorisée en vue des propriétés mécaniques faibles caractérisant ces matériaux à cet état brut. Pour cela, un traitement leur est préconisé en vue d'améliorer leurs performances mécaniques.

Le traitement par utilisation des fibres demeure une action intéressante et innovante. En effet, la nécessité d'utiliser des terrains de plus en plus médiocres dans le domaine de la construction en Génie-Civil n'a fait que croître au cours de ces dernières années. D'une part, le développement des grandes agglomérations urbaines qui a progressivement imposé de réaliser dans les zones de terrains en place présentant de faibles résistances mécaniques, l'implantation de constructions diverses et d'autre part, le sol, matériau peu coûteux, est devenu de plus en plus un matériau de construction où l'on cherche pour des raisons économique souvent, à pouvoir l'exploiter dans le domaine de la construction.

Renforcer les sols avec des fibres est devenue une méthode très répandue dans leurs traitements. En effet, l'utilisation de ces fibres de différentes variétés ont montré leur intérêt comme une solution innovante pour les problèmes d'ingénierie en géotechnique.

Ce travail s'inscrit dans la recherche d'une méthodologie de traitement des sédiments dragués des retenues par utilisation des fibres en vue de les exploiter comme matériau constitutif dans les couches de structure routière.

Pour cela, une synthèse bibliographique est présentée dans ce mémoire donnant un état de l'art sur le traitement des sols de natures diverses par utilisation des fibres de différentes catégories de familles.

Ce mémoire est donc constitué en plus de cette introduction générale de quatre (04) chapitres suivants :

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

Le deuxième chapitre expose un état de l'art sur la valorisation des sédiments de dragage dans le domaine de la construction.

Le troisième chapitre présente une synthèse bibliographique succincte sur les travaux de recherche utilisant les fibres comme renfort dans le traitement des sols.

Le quatrième chapitre expose une analyse des travaux de recherche nationaux utilisant les fibres végétales de type palmier dattier et les fibres synthétiques de type caoutchouc, comme renfort dans le traitement des sols.

Finalement, une conclusion générale achèvera ce mémoire, contenant une analyse de l'essentiel des résultats bibliographiques trouvés.

Chapitre 1 :

Les sédiments de barrages: Contexte général et Bibliographique

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente un état des connaissances générales concernant les sédiments de dragage. Cette partie d'étude permettra de décrire la problématique de gestion des sédiments dragués, les différents constituants et les polluants existants dans ces matériaux, afin de mieux comprendre leurs comportements et anticiper les problèmes qui peuvent être posés dans le processus de valorisation.

1.2. Définition des sédiments de dragage

Selon le dictionnaire de géologie, les sédiments sont définis comme un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses de matières précipitées ayant séparément subi un certain transport. Les particules de sédimentation peuvent provenir de l'érosion des roches, des sols ou résulter d'une précipitation chimique (précipitation des sels Comme les chlorures, les sulfates) et biochimique (accumulation de squelettes d'organismes vivants, des coquilles). Les sédiments transportés dans l'eau jouent un rôle important dans le transport et le devenir des polluants. En effet, les substances toxiques peuvent se fixer aux particules de sédiments ou être absorbées par celles-ci, puis transportées et déposées dans un autre milieu. L'accumulation de sédiments dans des cours d'eau ou des lacs peut faire diminuer la profondeur de l'eau, ce qui rend la navigation difficile voire même impossible. Il se peut qu'il faille draguer une partie des sédiments pour assurer l'accès à un cours d'eau ou un port, ce qui peut libérer des contaminants dans l'environnement. C'est pourquoi, le prélèvement des sédiments pose un problème majeur pour les responsables des ports et des voies navigables (Pouhet, 2015).

1.3. Définition du dragage

On appelle dragage l'opération qui consiste à extraire les matériaux situés sur le fond d'un plan d'eau. L'objectif peut être de réaliser des travaux de génie portuaire (creusement de bassins ou de chenaux), d'entretenir les chenaux fluviaux ou maritimes empruntés par les navires lorsqu'ils ont été comblés par les sédiments, d'effectuer des opérations de remblaiement pour reconstituer les plages ou gagner des terres sur la mer ou d'extraire des granulats marins pour répondre aux besoins du secteur de la construction (Pouhet, 2015).

L'appellation ainsi de « sédiments de dragage » correspond aux boues formées par sédimentation dans les cours d'eau, les plans d'eau, les canaux, les barrages et les ports

fluviaux ou maritimes. L'opération de dragage qui consiste à retirer une partie de ces sédiments, est souvent nécessaire afin de rétablir un tirant d'eau pour la navigation ou pour prévenir les risques d'inondation. Les sédiments de dragage sont un mélange de sables, de limons et d'argiles (hors déchets anthropiques, tels que des pneus, bouteilles, carcasses de voitures/vélos et par opposition aux graves et cailloux extraits des lits de rivières comme matériaux, dans le cadre du code minier).

On distingue les sédiments marins, extraits des ports et des estuaires, les sédiments continentaux, extraits des cours d'eau, canaux, plans d'eau, retenues d'eau et zones portuaires fluviales.

Entre 1990 et 2000, les motivations de dragage des sédiments continentaux ont été : le maintien de la navigation (51% des 1483 opérations de dragage et 43% du volume de sédiments dragués), la lutte contre les inondations (23% des opérations et 32% du volume), le maintien de la bonne qualité environnementale des sites (18% des opérations et 12% du volume), l'exploitation (7% des opérations et 10% du volume) et le tourisme (1% des opérations et 3% du volume) (Dubois, 2006).

1.4. Composition et domaine de valorisation des sédiments de dragage

La composition des sédiments de dragage est variée étant donné qu'ils sont formés—de la constitution des éléments de nature minérale, de l'eau et des matières organiques ainsi que leurs influences sur les propriétés géotechniques du sédiment (Alzieu et al. 2003).

1.4.1. Eléments de nature minérale

Les éléments de nature minérale influencent essentiellement sur les caractéristiques physiques et mécaniques des sédiments. Ils sont classés en fonction de leur taille, on distingue ainsi : les argiles, les limons, les sables, les graviers et les cailloux (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 Classification granulométrique (Alzieu et al. 2003).

Dénomination	Argile	Limon	Sable	Gravier	Cailloux
Diamètre (mm)	$d < 0,002$	$0,002 < d < 0,063$	$0,063 < d < 2$	$2 < d < 20$	$d > 20$

Les résultats de l'analyse granulométrique contaminants en fonction de la distribution granulométrique sont des indicateurs pour la décontamination. Par exemple, les travaux de recherche menant à la caractérisation des sédiments du port de Hambourg ont démontré que la fraction grossière de ces sédiments comportait une contamination pratiquement nulle alors

que la fraction fine (argile et limon) contenait presque la totalité de la contamination. De même, les analyses réalisées sur des sédiments d'une zone portuaire de Montréal ont démontré qu'environ 70% des contaminants inorganiques présents étaient situés dans la portion fine ($< 45\mu\text{m}$). La figure ci-dessous montre que dans le cas de contaminants inorganiques, la décontamination dépend étroitement de la granulométrie du matériau.

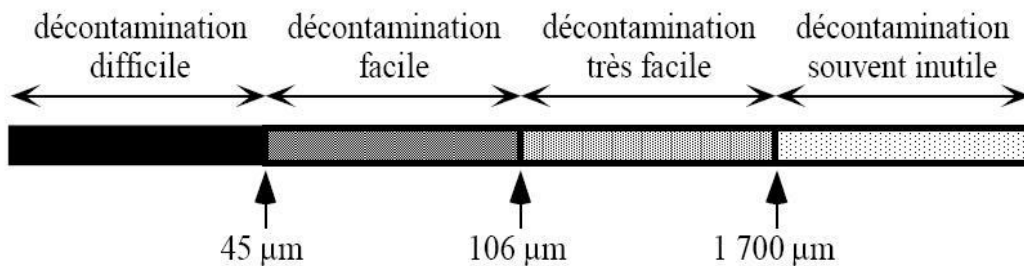


Figure 1.1. Degré de décontamination en fonction de la granulométrie du matériau (Alzieu et al. 2003).

L'origine de la composition minérale est diverse, on peut citer ci-dessous selon leur provenance :

- Les cailloux et les graviers sont des sédiments terrigènes, c'est-à-dire, issus de l'érosion des sols. Leur composition pétrographique dépend de la nature des terrains érodés.
- Les sables renferment essentiellement du quartz avec présence ou non de micas, voire de feldspaths. Ils comportent souvent des minéraux lourds dont la nature dépend des formations érodées. On trouve également des sables calcaires.
- Les particules les plus fines, limons, boues et vases, sont composées de minéraux argileux d'origine terrigène, et aussi des squelettes d'organismes d'origine endogène (Alzieu et al. 2003 ; Zerzouri 2015).

1.4.2. Eau dans les sédiments

La teneur en eau dans les sédiments est très variable (de l'ordre de 100% à 300%), où elle dépend de la méthode de dragage et de la position du dépôt. Généralement, on peut distinguer l'eau libre, capillaire, colloïdale et l'eau pelliculaire.

- L'eau libre n'est pas liée à la matrice solide et peut donc circuler librement entre les particules. Elle s'élimine facilement par une simple décantation.

- L'eau capillaire est liée à la matrice solide par des forces de capillarité qui créent entre les grains des forces d'attraction. Elle s'élimine par des procédés mécaniques de séparation solide-liquide (filtration).
- L'eau colloïdale permet l'hydratation des colloïdes. De même que l'eau capillaire, elle peut être éliminée par des procédés mécaniques de séparation solide-liquide.
- L'eau absorbée et pelliculaire est liée à la surface des particules et constitue un film autour d'elles. Cette dernière n'est séparable de la matrice solide que par des moyens thermiques.
- L'eau de constitution entre dans les formules chimiques des substances pour former les substances hydratées. Comme l'eau pelliculaire, elle peut être éliminée uniquement par des moyens thermiques (Essaidi, 2013).

1.4.3. Matières organiques dans les sédiments

L'origine des matières organiques est très diverse, il s'agit soit de débris végétaux, soit des micro-organismes, ou encore des colloïdes humiques. La composition de ces matières est généralement identique à un sédiment de cours d'eau et elle est constituée d'environ 60% de composés humiques. On peut considérer que la fraction organique comprend deux catégories :

- Les substances non humiques : ce sont des composés relativement simples et de structure connue appartenant à la chimie classique: agents pathogènes, acides organiques, acides aminés, protéines, glucides.
- Les substances humiques: constituent une famille de macromolécules organiques d'origine naturelle. Elles proviennent de l'évolution des matières organiques fraîches sous des processus chimiques et enzymatiques. Elles peuvent constituer entre 85 et 90% de la fraction organique totale du sol.

Selon la solubilité qui est en fonction du pH, on peut différencier trois fractions dans les substances humiques : Les acides humiques insolubles dans l'acide mais solubles en milieu alcalin et les acides fulviques solubles dans les acides et les bases. Ils peuvent constituer jusqu'à 85 % du carbone organique total. L'humine est insoluble dans les acides et les bases.

Au niveau de la structure, il n'existe pas de séparation nette entre ces trois fractions, mais plutôt une transformation continue évoluant dans le sens suivant:

Acides fulviques → acides humiques → humines

Dans le corps des sédiments, les substances humiques se regroupent avec les particules minérales pour former des associations organon-minérales selon deux façons :

- Soit par simple physisorption de la substance humique (liaisons hydrogènes), ce qui favorise l'agglomération des particules entre elles.
- Soit par complexations mixte d'un même ion métallique entre le composé organique et la particule minérale (argile). Ce complexe est suffisamment stable pour dissocier l'ion métallique de la particule minérale. Cela entraîne une dissolution de la particule si l'ion métallique fait partie d'une structure assurant la cohésion de la particule minérale (Zerzouri, 2015).

1.4.4. Polluants dans les sédiments

Les activités anthropiques autour d'une rivière, comme les activités industrielles, les surfaces agricoles, les zones de baignade et de pêche engendrent des nuisances et des pollutions par des composés de nature organique (HAP, PCB, TBT,...) et inorganique (métaux) qui vont s'accumuler dans les sédiments (Alzieu et al., 2003).

1.4.4.1. Métaux lourds

Les métaux peuvent provenir en partie de l'altération de la roche mère du sous-sol. Cependant la plupart du temps leur origine est liée à l'activité humaine : stockage de déchets industriels et urbains, pratiques agricoles, pollution due aux retombées atmosphériques par l'utilisation de combustibles fossiles, d'essences au plomb, de poussières des industries métallurgiques, d'incinération des ordures ménagères.

Les sources détaillées de la pollution par des métaux lourds sont synthétisées dans le tableau 1.2 suivant :

Tableau 1.2. Source de pollutions par les métaux lourds (Alzieu et al., 2003).

Métaux	Sources de polluants
Cadmium	Engrais phosphatés; industries de traitement de surface des métaux; industrie de stabilisation des matières plastiques; fabrication des accumulateurs et des radiateurs automobiles; fabrication de colorants.
Cuivre	Fils électriques; radiateurs automobiles; appareils de chauffage; traitements de surface.
Zinc	Produits pharmaceutiques ou domestiques; conduites d'eau; peintures; piles; galvanisation; traitements de surface.
Nickel	Fabrication d'aciers et d'alliages spéciaux; recouvrement de surface par électrolyse; hydrogénation des huiles et substances organiques; fabrication de peintures; de laque et de produits cosmétiques.
Mercur	Fabrication et l'usage de catalyseurs; de fongicides; de pigments et composés mercuriels; les piles au mercure; la fabrication de chlore par électrolyse sur cathode de mercure; le traitement des minerais non ferreux; l'incinération de déchets et la combustion du charbon.
Chrome	Extraction de la chromite, minerai de fer et de chrome; la métallurgie ; la technologie des matériaux réfractaires et l'industrie de traitement de surface.
Plomb	Fabrication de batteries; peintures; additifs pour l'essence; industries pharmaceutiques et sidérurgiques; ateliers photographiques; télévisions.
Sélénium	Fabrication de peintures et colorants; verre; semi-conducteurs; insecticides; alliages.
Arsenic	Extraction, transport et traitement métallurgique; rejets urbains; combustion du charbon; production de trioxyde d'arsenic pour les pesticides en agriculture et les traitements des bois.

La plupart des métaux sont indispensables au métabolisme. Une fois, un seuil de tolérance dépassé, les métaux sont considérés comme toxiques. Ils sont alors incompatibles avec les phénomènes vitaux et certains d'entre eux ont des propriétés cancérogènes et mutagènes. Parmi eux, le mercure (Hg), le plomb (Pb), l'arsenic (As) et le cadmium (Cd) sont les plus toxiques sur la santé humaine. Par exemple : le mercure a un effet négatif sur les reins, le système nerveux et il est un agent tératogène. Le plomb retarde le développement de

l'intelligence chez l'enfant par altération probable de la neurotransmission glutaminergique, impliquée dans la mémorisation et l'apprentissage. L'arsenic peut engendrer l'apparition de taches de pigments sur la peau, ainsi que le cancer de la peau, des poumons, de la vessie ou des reins. Le cadmium métallique et ses composés sont classés cancérigènes chez l'homme (selon le Centre international de recherche sur le cancer) (Tran, 2009).

1.4.4.2. Micropolluants organiques

Ce sont les produits actifs organiques susceptibles d'avoir une action toxique à des concentrations infimes. Ils représentent le troisième grand groupe de contaminants (les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les poly-chloro-biphényles (PCB), les tributyl-étain (TBT). Les HAP ont une structure chimique comportant plusieurs noyaux. Ils constituent une large classe de contaminants en fonction du nombre de noyaux aromatiques dans leur particule. Ils ont une faible solubilité dans l'eau, mais une forte affinité pour les solvants organiques et une adsorption élevée sur les matières en suspension et sur les colloïdes.

En raison de ces propriétés, les HAP présentent une forte affinité pour se concentrer dans les sédiments et les organismes vivants. Les PCB désignent un ensemble de composés organochlorés ayant pour formule chimique $C_{10}H_{(10-n)}Cl_n$. Ils constituent 209 congénères (CB) qui se différencient par le nombre d'atomes de chlore fixé sur la molécule. Il y a presque 20 ans, les PCB ont été retirés du marché. Toutefois, sur les 120 millions de tonnes de PCB produits dans le monde, environ 40 millions de tonnes se trouvent dispersés dans l'environnement. Le milieu aquatique, par son rôle de réceptacle, est un compartiment privilégié d'accumulation des PCB (environ la moitié des PCB présents dans l'environnement). Les TBT font partie de la famille des composés organostanniques ou étain organique (MBT, DBT, TBT). Ils sont très toxiques pour les mollusques à des concentrations extrêmement faibles. Pour des teneurs voisines du ng/l, il a été observé des modifications significatives de la sexualité des gastéropodes. Sur le Tableau 1.3 ci-dessous, l'agence de l'eau Artois Picardie en collaboration avec le Pôle de Compétence des sites et sols pollués ont cité certaines sources principales de micropolluants organiques (Tran, 2009).

Tableau 1.3. Origine des micropolluants dans les sédiments (Tran, 2009).

Micropolluants	Sources
HAP	Biosynthèse par des organismes vivants; Pyrolyse des matières organiques à haute température ; Usines de production d'Aluminium; Raffineries de pétrole; Rejets urbains; Utilisation des carburants fossiles (charbon, pétrole)
PCB	Pertes lors du remplissage et retraitement de systèmes clos (transformateurs, condensateurs); Activités liées à la récupération des matériaux ferreux; Rejets urbains et décharges de matériel usagé (additifs dans les peintures, les encres et les apprêts destinés aux revêtements muraux).
TBT	Matière active des peintures antisalissure de bateau

1.4.4.3. Eléments nutritifs

Il s'agit essentiellement du phosphore et des composés azotés comme l'ammoniaque qui constitue un véritable engrais pour les plantes aquatiques. Un certain nombre de sources naturelles et anthropiques contribuent aux apports de nutriment. Il s'agit notamment des apports d'eau usée, de l'agriculture, ainsi que des émissions dues au brûlage des combustibles et aux véhicules automobiles par exemple (Essaidi, 2013).

1.5. 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 (Remini et Remini, 2003).

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 débitante, et rendent difficile leur exploitation ayant à même un impact sur la qualité de l'eau.

• 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

La sédimentation des retenues a un impact sur la sécurité des barrages, 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 $1,8 \text{ t/m}^3$.

• 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.

• 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.

• 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.

1.6. 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, le sédiment aura des caractéristiques différentes selon ces 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).

1.6.1. Soutirage

Le moins coûteux moyen reste l'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange du barrage, appelé par « technique de soutirage » (Remini et Remini, 2003).

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.

1.6.2. 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.

On définit ainsi 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. Ainsi le dragage peut 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 de la 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 sédiments ont été extraits de nos barrages où un nombre important de ces barrages ont été récupérés par la technique de dragage et leur durée de vie se trouvent prolongée de plusieurs années (Remini et Remini, 2003).

1.6.2.1. Types de dragage

Différentes techniques de dragage ont été développées est courant de les classer selon leur principe général de fonctionnement en trois catégories :

- **Dragage hydraulique**

Cette technique nécessite une drague suceuse refouleuse et une conduite flottante et terrestre pour l'évacuation du produit dragué (sédiment et eau) jusqu'à la zone de rejet. La figure 1.2 montre cette technique de dragage.

Les matériaux sont désagrèges 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.

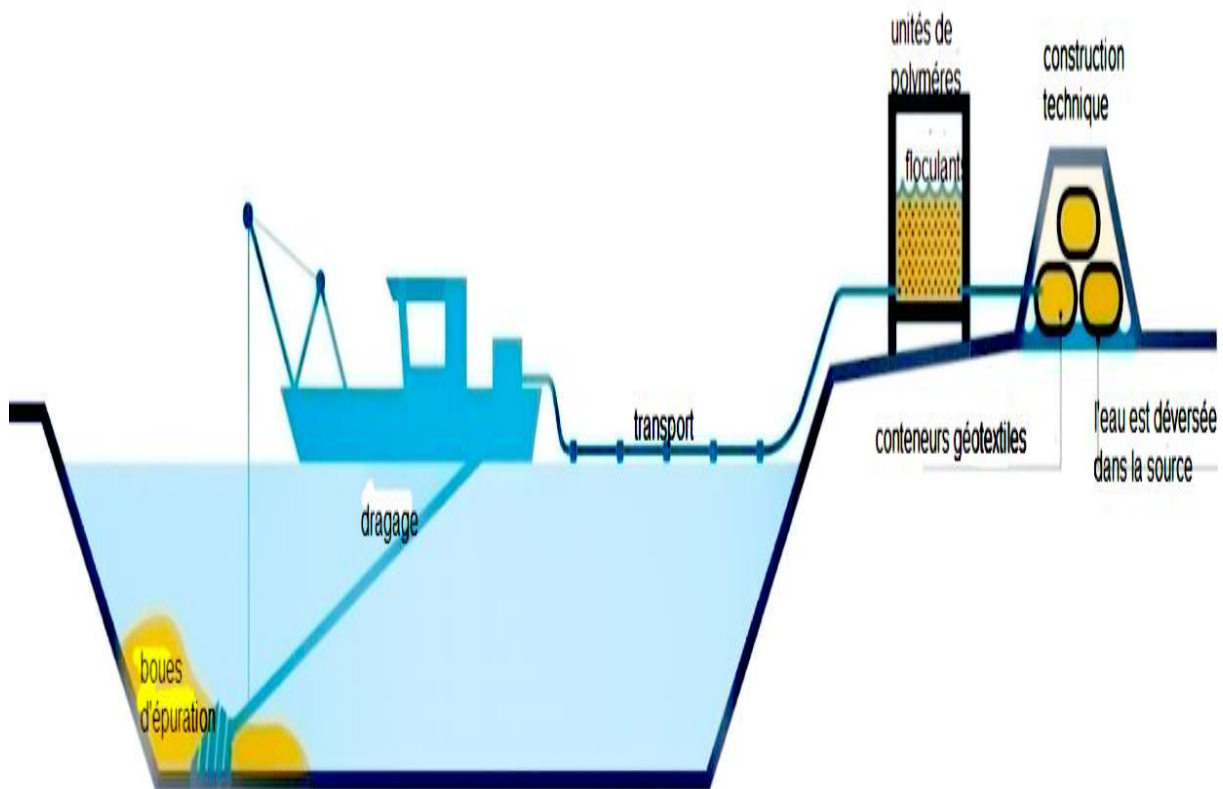


Figure 1.2 Dragage hydraulique (BOUKEMMOUM N., NOUAOURIA A. (2019))

- **Dragage mécanique**

Il consiste au dragage par des moyens comme le montre la figure 1.3:

- **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.

Néanmoins, 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 sédiments de la retenue en utilisant un volume d'eau minimum ;
- La définition et la 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 1.3 Dragage mécanique (BOUKEMMOUM N., NOUAOURIA A. (2019))

- **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 1.4. 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. Il se pratique pour des fleuves et rivières à fort débit.



Figure 1.4 Dragage à l'Américaine (BOUKEMMOUM N., NOUAOURIA A. (2019))

1.7. Conclusion

La sédimentation est un phénomène naturel très complexe qu'il faut étudier de l'amont à l'aval du barrage car 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 où 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 du sédiment pour le choix des moyens de vidange

Chapitre 2 :

Valorisation des sédiments de dragage

2.1. Introduction

Les granulats sont les matières premières les plus consommées dans le monde, l'utilisation rationnelle et le développement des matériaux dans le domaine du génie-civil constituent à l'heure actuelle une préoccupation majeure des producteurs et des utilisateurs, principalement dans les domaines de la construction. Les objectifs visés ont pour but l'amélioration de la qualité, de la disponibilité et de la diversité des matériaux répondant aux exigences d'utilisation. Il est donc nécessaire et urgent de valoriser les matériaux de substitution, les matériaux locaux, les sédiments de dragage, les sous-produits et déchets existants. Il faut aussi développer davantage les produits nouveaux et innovants.

Dans ce chapitre, on présente un état de l'art sur la méthodologie générale de valorisation des sédiments qui a pour but d'utiliser ces sédiments dans une formulation de matériau de construction.

2.2. Valorisations des sédiments de dragage

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 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. D'après Diagana (1997), les principaux traitements qui ont été expérimentés ou qui sont réellement opérationnels dans le monde actuellement sont :

- la séparation granulométrique par hydro-cyclone (port de Hambourg)
 - le recyclage des boues à des fins agricoles et urbaines (port de Rotterdam)
 - la méthode d'empreinte (port de Stein)
- Parmi ces exemples, le recyclage des boues du port de Rotterdam est remarquable. Les deux tiers environ des matériaux dragués sont transportés par des chalands qui les refoulent sur des sites de déversement situés dans les polders de bas niveau autour de Rotterdam. L'intérêt est double

: débarrasser le port des boues et utiliser ces matériaux à des fins utiles telles que la création de zones urbaines et industrielles, terrains de récréations aux alentours des grandes concentrations urbaines, zones agricoles

2.3. Valorisation des sédiments en technique routière

Les sédiments de dragage peuvent être valorisés en tant qu'élément présent dans une couche de structure de chaussée.

2.3.1. Définition d'une structure de chaussée :

La structure d'une chaussée routière est constituée de plusieurs couches de matériaux superposées, mises en œuvre sur un sol terrassé (sol support). Son rôle est de supporter les sollicitations du trafic dans les meilleures conditions de sécurité et de confort.

Au sens géométrique :

C'est la surface aménagée de la route, sur laquelle circulent les véhicules.

Au sens structural :

Structure multicouches qui 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).

Le rôle de la chaussée est de répartir la pression par la pneumatique pour l'amener à un niveau compatible avec ce qui peut être supporté par le sol support. Dans le dimensionnement de la chaussée on utilise la structure multicouche constituée de trois parties principalement qui ont chacune un rôle bien défini.

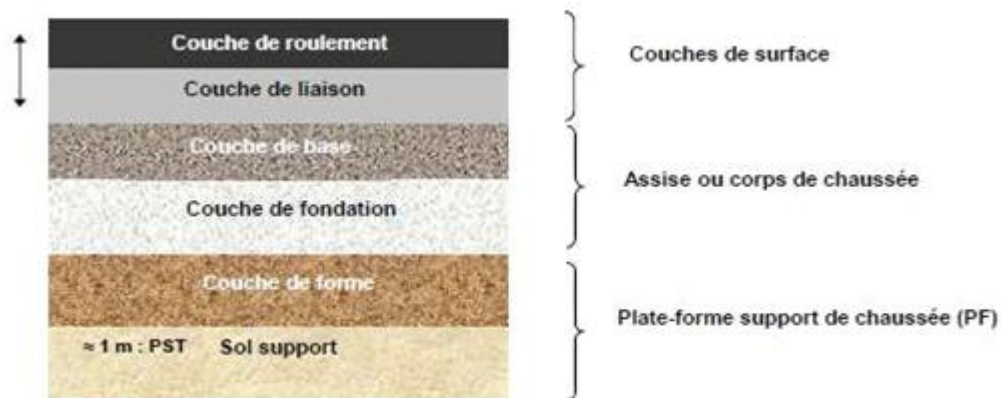


Figure 2.1 : Schéma d'une structure de chaussée type.

Le sol support est surmonté par une couche de forme. C'est la couche de transition entre le sol support et le corps de chaussée mais le choix de cette couche de forme se fait essentiellement en fonction des impératifs de chantier, cette couche peut être constituée de matériaux en place ou rapportés, traités ou non traités. L'ensemble sol support et couche de forme représente la plate forme support de la chaussée.

La couche de forme joue, suivant les cas, un ou plusieurs des rôles suivants :

- Pendant la phase des travaux, elle protège le sol support, établit une qualité de nivellement et permet la circulation des engins pour l'approvisionnement des matériaux et la construction des couches de chaussée (réglage convenable des couches de chaussée).
- Vis à vis du fonctionnement mécanique de la chaussée (Figure 2.2), elle permet de rendre plus homogènes (homogénéisation de la portance du support qui permet donc de concevoir des chaussées d'épaisseurs constantes) et éventuellement d'améliorer les caractéristiques dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place (amélioration de la portance) ainsi que les protéger du gel (protection des sols contre les intempéries, les effets thermiques).

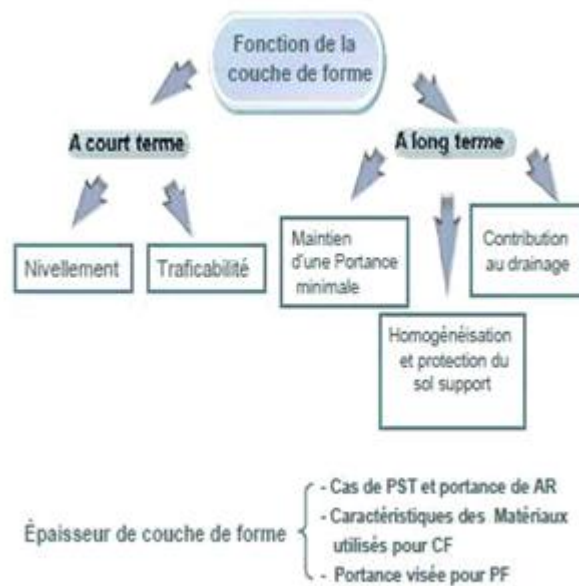


Figure 2.2 : Organigramme de fonctionnement d'une couche de forme.

La couche d'assise, ensemble des couches de fondation et de base qui forment le corps de chaussée proprement dit qui a le rôle de réception des charges produites par le trafic et les répartit sur la plate forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible . La couche de base, plus proche de la surface de la chaussée, subit des contraintes et des déformations notables ; il est donc nécessaire qu'elle présente des caractéristiques mécaniques plus élevées que celles de la couche de forme.

Enfin, la couche de surface se compose de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison, elle a deux fonctions :

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

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

2.3.2. Différentes types de structures des chaussées :

Selon le fonctionnement mécanique de la chaussée, on distingue généralement trois différents types de structures suivantes :

- Chaussées souples.
- Chaussées semi rigides.
- Chaussées rigides.

Chaussées souples :

C'est une structure de très faible rigidité, fortement dépendante de celle du sol et de ses variations dont les efforts verticaux sont transmis au support avec une faible diffusion latérale. Les matériaux utilisés dans la structure sont les bitumes, grave non traitée (GNT) (Figure 2.3).

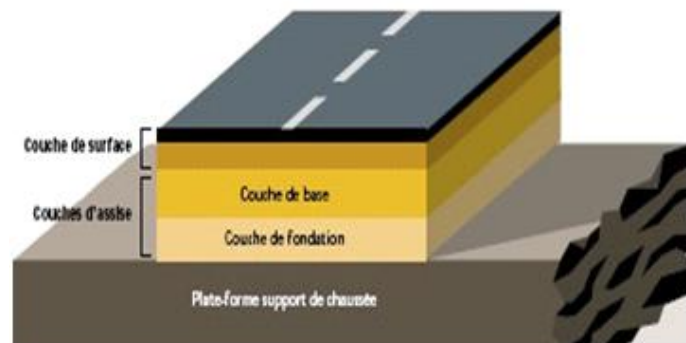


Figure 2.3 : Structure type d'une chaussée souple.

Chaussées semi-rigides :

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques, disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm (Figure 2.4).

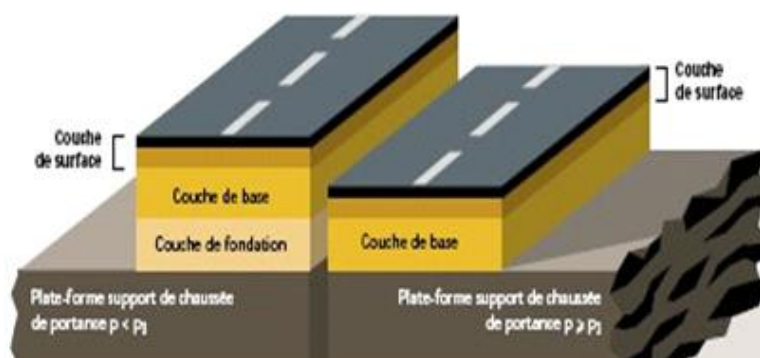


Figure 2.4 : Structure type d'une chaussée semi-rigide.

Chaussées rigides :

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide. En règle générale, cette chaussée comporte, à partir du sol, les couches suivantes (Figure 2.5):

- Une couche de forme.
- Une couche de fondation.
- Une couche de roulement en béton de ciment.

La dalle en béton de ciment peut aussi être réalisée directement sur l'arase terrassement ou sur la plate forme support de la chaussée.

Dans la chaussée rigide, la couche de surface et la couche de base sont confondues.

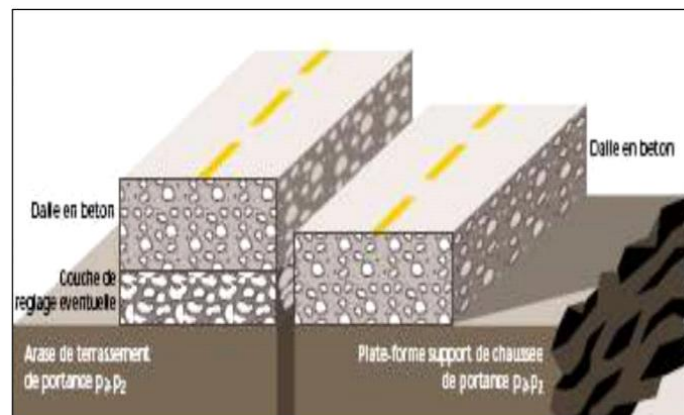


Figure 2.5 : Structure type d'une chaussée rigide.

2.3.3. Description des matériaux de chaussée :

Dans ce chapitre regroupant les différents matériaux de chaussée, dont on décrit les éléments de définition et de comportement communs propres à chaque matériau.

- Matériaux définis par des normes :

Pour les matériaux de chaussée couverts par des normes, on fait un bref rappel des prescriptions se rapportant aux constituants et au mélange.

- Matériaux rocheux classe R (NF P 11-30) :

Matériau naturel, comportant une structure qui ne peut être désagrégée par simple trituration, ou par l'action d'un courant d'eau. Leur utilisation implique une désagrégation mécanique préalable par minage ou emploi d'engin d'extraction de forte puissance. Les matériaux rocheux sont distingués à de grandes familles :

- Les matériaux rocheux issus des roches magmatiques et métamorphiques.

- Les matériaux rocheux issus des roches sédimentaires (tel que les roches argileuses, roches carbonatées et roches siliceuses).

- **Matériaux rocheux évolutif :**

C'est un matériau dont les paramètres de nature, de comportement mécanique et /ou d'état, changent notablement au cours des opérations d'extraction, de transport, de réglage et de compactage et /ou dans le temps pour les matériaux en contact avec les agents météorologiques (air, eau, gel, dégel).

- **Hérisson :**

C'est un ensemble de grosses pierres disposées à la main sur chant et calées entre elles par des éclats de pierre, constituant une couche de chaussée.

- **Macadam :**

C'est un ensemble de pierres cassées, de granularité serrée, constituant une couche de chaussée de faible épaisseur, pour faciliter le compactage, on utilise parfois un apport de sable argileux très mouillé, pour améliorer le produit en faisant aussi parfois appel à des techniques de pénétration ou de percolation.

Pour caractériser un massif rocheux en vue de son emploi en remblai ou en couche de forme, on procède successivement en deux étapes :

- Identification de la nature pétrographique de la roche.
- Détermination des paramètres d'état et des caractéristiques mécaniques du matériau.

2.3.4. Les familles de granulats :

Les granulats sont identifiés , par leur origine, leur nature pétrographique selon, leur angularité :

- **Fillers** : $0 < D < 2\text{mm}$ avec au moins 70 % de passant à $63\ \mu\text{m}$.
- **Sables** : $0 < D < 6,3\ \text{mm}$, les sables ont en outre 65 % des éléments supérieurs à $80\ \mu\text{m}$. Ils peuvent être naturels ou issus d'une chaîne d'élaboration (sables boules résultant du criblage primaire d'un tout venant, ou sable de concassage). Ils se différencient par un grand nombre de paramètres : granularité, composition minéralogique et forme des grains, caractéristiques des fines, on désigne plusieurs types de sable traité (Figure 2.6) :

- **Sable ciment** : Sable traité au ciment.
- **Sable enrobé** : Enrobé destiné à retarder la remontée des fissures et constitué d'un mélange à chaud de sable de granularité 0/3 à 0/6.
- **Sable bitume SB** : Produit de sable avec de bitume non normalisé utilisé pour la réalisation d'assises de chaussées.
- **Sable traité aux liants hydrauliques STLH** : Sable traité au ciment, au laitier ou à un mélange cendres volantes + chaux, afin d'améliorer la stabilité immédiate (aptitude à supporter les opérations de mise en œuvre, notamment le passage des engins de compactage), et les performances mécaniques (aptitude à résister aux sollicitations du trafic).



Figure 2.6 : Mise en œuvre d'une couche de fondation en sable traité.

- **Graves** : 0/D ou $D > 6,3$ mm, Il y a plusieurs types de graves :
- **Grave traité** : Ce mélange se fait le plus souvent dans une centrale de malaxage, mais parfois sur place, au pulvérisateur mélangeur.
 - **Grave maigre** : c'est un grave dans laquelle la proportion de particules fines est insuffisante pour donner de la plasticité à son mortier.
 - **Grave non traité** : c'est un mélange de granulats naturels ou artificiels, à granularité continue, de cailloux, de graviers et de sable, avec parfois une addition de particules plus fines pour une bonne tenue de l'assise.
 - **Grave -cendres volantes-chaux** : c'est un mélange de granulats, de cendres volantes silico- alumineuses, de chaux et d'eau, fabriqué en centrale. Elle est utilisée dans la confection des assises de chaussées et des plates formes de travaux routiers.

- **Grave bitume** : c'est un enrobé préparé à partir d'un mélange de liant hydrocarboné, de granulats et / ou additifs minéraux ou organiques, dosés, chauffés et malaxés dans une installation appelée centrale d'enrobage. Il est destiné à la réalisation des assises dans le cadre de travaux neufs ou de renforcements de chaussées, on distingue les GB 0 /14 et les GB 0 /20.
- **Grave liant spécial routier** : c'est un mélange de granulats, de liant spécial (hydraulique), retardateur de prise et d'eau, fabriqué en centrale. Elle est utilisée dans la confection des assises de chaussées et des plates formes de travaux routiers.
- **Grave cendres volantes hydrauliques** : c'est un mélange de granulats et de cendres volantes hydrauliques, éventuellement retardateur de prise, et d'eau fabriqué en centrale. Elle est utilisée dans la confection des assises de chaussées et des plates formes de travaux routiers.
- **Grave-pouzzolanes-chaux** : c'est un mélange de granulats, de pouzzolanes, de chaux et d'eaux, fabriquées en centrale. Elle est utilisée dans la confection des assises de chaussées et des plates-formes de travaux routiers.
- **Gravillons** : d / D ou $d \geq 1$ et $D \leq 125$ mm, gravillon concassé : classe granulaire normalisé produite par les ballastières d / D ou $d \geq 5$ mm et $D \leq 50$ mm (gravillon roulé ou concassé).

2.3.5. Matériaux hors normes :

Les conditions économiques et les ressources locales peuvent conduire à rechercher l'emploi de matériaux non codifiés par une norme ou dont l'une au moins des caractéristiques n'est pas en conformité avec les exigences des normes. Ce sont notamment :

- Sables ou sols provenant de gisements naturels et non élaborés.
- Matériaux issus de dragage, sous-produits industriels, matériaux de démolition quelle que soit leur origine, les granulats hors normes doivent faire l'objet d'une étude complète de formation et de détermination des propriétés mécaniques . L'étude doit en particulier couvrir la page de variation probable des caractéristiques physiques et mécaniques compte tenu des constituants et des conditions de mise en œuvre. La descension d'emploi de ces matériaux est à prendre par référence aux catégories de

matériaux normalisés les plus proche du point de vue de la composition et du comportement.

2.3.6. Matériaux recyclés :

À l'échelle internationale, la technique routière se préoccupe depuis un certain temps de l'utilisation des matériaux recyclés d'origines diverse .la tradition du recyclage et de la valorisation confrontée à la nécessité de trouver des granulats en grande quantité est à faible coût.

L'utilisation des matériaux recyclés présente des avantages dans le cadre du « développement durable » tel que :

- Epargner les gisements de matériaux naturels (contribuer aux économies des matériaux traditionnels).
- Préserver le cadre de vie par la réduction du volume de sédiments de dragage et les décharges (contribuer à la protection de l'environnement en fournissant un débouché à ces déchets et sous produits, évitant ainsi leur mise en dépôt).
- Gain en transport par la réutilisation de « matériaux environnants ».

2.3.7. Paramètres de classification des sols en domaine routier:

Les différentes fractions du sol sont classées à partir de la norme NF P 11-300 et le guide technique routier GTR . Cette classification est comme suit (Figure 2.7) :

- Classe A : Sols fins.
- Classe B : Sols sableux et graveleux avec fines.
- Classe D : Sols insensibles à l'eau.

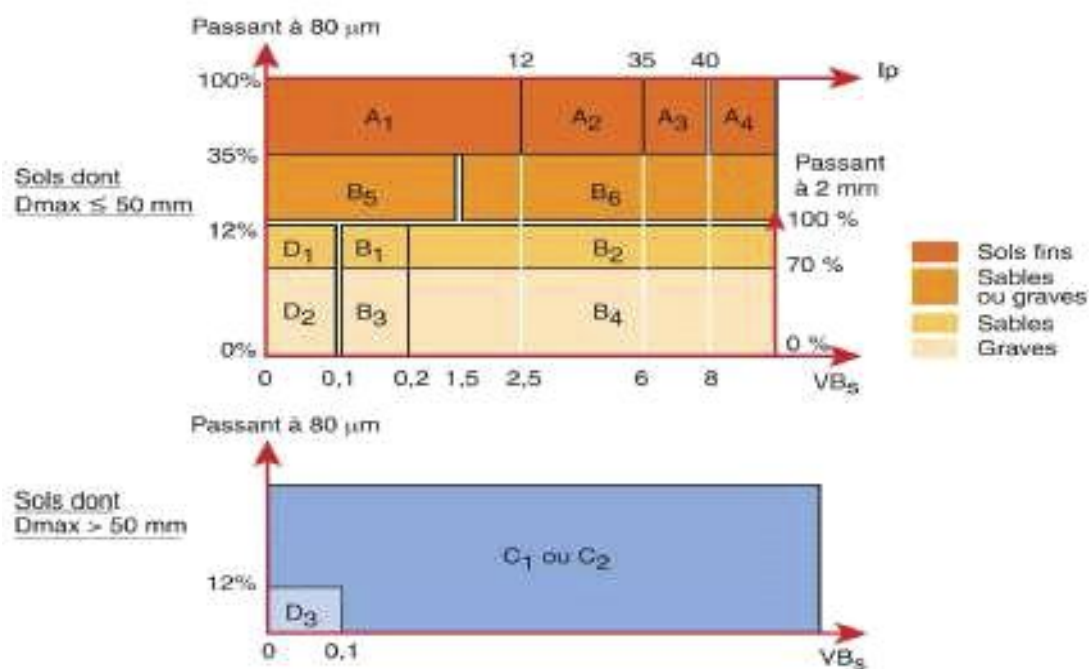


Figure 2.7: Classification des matériaux selon la norme NF P11-300, GTR2000.

Les sols sont ainsi classés d'après leur nature, leur état et leur comportement mécanique ; ils sont dépendant suivant les paramètres ci-dessous :

- **La granularité** : Elle est déterminée par l'analyse granulométrique et plus particulièrement par le D_{max} , le tamis à $80 \mu\text{m}$, et le coefficient d'uniformité C_u .
- **Le D_{max}** : Il permet de distinguer les sols fins, sableux et graveleux ($D_{max} \leq 50\text{mm}$), des sols grossiers comportant des éléments blocaille ($D_{max} > 50\text{mm}$), et ainsi pour distinguer les sols pouvant être malaxés intimement avec un liant et pour évaluer l'épaisseur des couches élémentaires. C'est un paramètre important à connaître pour apprécier la validité des essais de laboratoire.
- **Le tamis à $80 \mu\text{m}$** : Ce paramètre permet de distinguer les sols riches en fines des sols sableux et graveleux, et dans une large mesure d'évaluer leur degré de sensibilité à l'eau, qui permet d'orienter en grande partie le choix du produit du traitement.
- **Le coefficient d'uniformité de Hazen (C_u)** : Cette caractéristique sert à connaître l'étalement de la granulométrie ($C_u < 2$ granulométrie uniforme, $C_u > 2$ granulométrie étalée) et aussi ce coefficient donne des informations qualitatives sur les valeurs des dosages qui seront nécessaires pour atteindre un le niveau de résistance souhaitable

- **L'argilosité**

L'indice de plasticité (Ip) : C'est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols. Son interprétation est d'autant plus fiable que la proportion pondérable de la fraction 0 / 400 μm (fraction servant à l'essai) contenue dans le sol étudié est importante et que l'argilosité de cette fraction est grande.

La valeur du bleu de méthylène (VBS) : Il s'agit d'un autre paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol . Ce paramètre représente la quantité du bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol, ou autrement dit une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

- **Teneur en matières organiques :**

Les sols peuvent contenir des matières organiques surtout ceux présente en surface, celles-ci consomment énormément de produit de traitement et diminuent l'acidité du milieu. Le classement du Guide Technique Routier (GTR) permet de placer, dans un premier temps, le matériau en classe F, classe correspondant aux matériaux naturels renfermant de la matière organique.

2.3.8. Les paramètres de comportement mécanique du sol en domaine routier :

L'état hydrique est très important pour le déroulement de l'ensemble du processus de traitement. Il influe sur le choix des produits de traitement, leur dosage, leur prise et sur les conditions de mise en œuvre.

Les paramètres utilisés pour caractériser l'état hydrique d'un sol sont :

- **L'indice de consistance I_c :** La position de sa teneur en eau naturelle par rapport à ses limites d'Atterberg permet de prévoir la consistance du sol.
- **L'indice portant immédiat (IPI) :** Cet indice exprime la valeur du poinçonnement immédiat sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor Normal ou Modifié. Ce paramètre permet d'estimer la stabilité du matériau c'est à dire de caractériser l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins de chantier. Selon les recommandations de la norme française (NF P 98 115), afin d'assurer la circulation normale des machines sur le chantier, les valeurs souhaitables de IPI ne doivent pas être inférieure à 35% pour la couche fondation et 45% pour la couche de base ; Toutefois, cette norme définit également des valeurs limites

inférieures à 25% et 35% pour les mêmes couches citées ci-dessus (Figure 2.8).

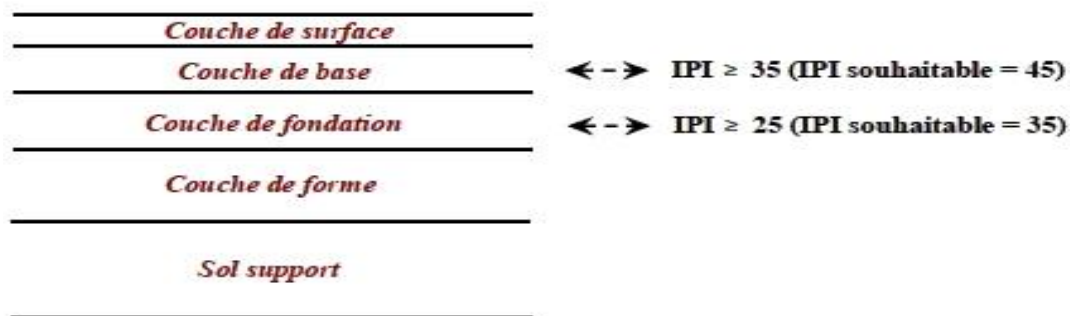


Figure 2.8 : Critère de l'IPI pour les différentes couches de chaussée (Norme NF P 98 115).

2.3.9. Synthèse bibliographique des études faites sur la valorisation des sédiments en domaine routier:

1. Bourabah (2012), dans l'étude de la valorisation des sédiments de dragage du barrage de Cheurfas (Algérie) avait indiqué que l'ajout d'un matériau granulaire conduit à une amélioration de la densité sèche et une réduction de la teneur en eau optimales. La teneur en matières organiques (MO) n'influe pas sur la compacité du matériau, par contre elle agit défavorablement sur sa portance. D'autre part, l'ajout de liants hydrauliques comme stabilisateur chimique agit en grande partie sur la portance du matériau qui se trouve nettement améliorée pour une utilisation comme couche de fondation et de base.
2. Boutouil et Saussaye (2011), ont étudié l'exploitation des sédiments de dragage marins du port d'Ouistreham (Calvados, France) dans des applications géotechniques. Ces sédiments ont été traités aux liants hydrauliques et par ajout de correcteurs granulométriques, caractérisés par deux types de sables, concassés et roulés.
Selon Boutouil et Saussaye (2011), ce traitement effectué a conduit à une amélioration de la résistance à la compression uniaxiale d'un facteur de plus de 40% après utilisation du sable concassé et 28 jours de cure, tandis qu'aucune différence n'a été observée sur la résistance à la traction indirecte entre les deux sables.
3. Mekerta et al.2009, ont analysé le traitement chimique à différents dosages en chaux et en ciment des sédiments de dragage du barrage de Fergoug (Algérie) pour une utilisation en structure routière.

Selon Mekerta et al.2009, le traitement des sédiments aux liants a montré que plusieurs paramètres influencent le comportement mécanique, à savoir les paramètres liés aux conditions de réalisation, comme la teneur en eau, le malaxage et l'énergie de compactage ; ainsi que des paramètres qui doivent rester dans une fourchette serrée pour conduire à des densités suffisantes, afin d'éviter l'apparition de déformations permanentes lors de sa mise en œuvre. Le traitement des sédiments à la chaux a montré une augmentation de la cohésion et de l'angle de frottement interne. D'autre part, le traitement avec le ciment a indiqué que les paramètres mécaniques des sédiments traités ne sont pas proportionnels à la quantité de ciment ajouté. Le comportement mécanique du nouveau matériau est influencé par les réactions chimiques internes.

4. Rekik 2008 a étudié le comportement en compressibilité de deux sédiments marins avant et après traitement avec 2, 5 et 10% de ciment après 7 et 28 jours de cure. Les résultats ont montré une augmentation de la pression de préconsolidation, une diminution de la compressibilité, une accélération de la phase de consolidation et une réduction de la compression secondaire. Selon Rekik 2008, les propriétés des sédiments après traitement sont d'autant plus intéressantes que la teneur en matières organiques (MO) soit faible où le traitement au ciment permet la solidification du matériau et une amélioration de son comportement mécanique.

2.4. Valorisation des sédiments 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 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 du béton à base de sédiments. Plusieurs chercheurs se sont intéressés dans ce domaine dont on peut citer :

1. Achour (2013) qui a étudié la durabilité de deux blocs en béton à base de sédiment marin où son 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.

Les résultats de ces travaux ont montré que le béton à 12,5 % de sédiments présente des performances mécaniques plus élevées que celui de 20 %. L'augmentation du taux d'incorporation du sédiment dans le béton à 20 % a rendu la carotte plus déformable, une diminution du module d'élasticité statique de l'ordre de 4 GPa a été constatée ; cette diminution peut s'expliquer par le changement de la microstructure ainsi que l'augmentation de la porosité et l'hétérogénéité du béton à 20 % par rapport à celles de 12,5 %. Il a été également constaté que l'augmentation du taux d'incorporation du sédiment est accompagnée d'une augmentation de la porosité du béton. Ainsi, le béton à base de 12,5 % de sédiments présente de bonnes performances mécaniques et microstructurales et révèle des qualités comparables à un béton ordinaire.

2. Agostini (2006) avait étudié des sédiments contaminés où dans son travail, il avait 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 mortiers 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 et 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, où ils 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 ont montré que l'introduction des sédiments traités dans les mortiers ont 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 avoisine les 33%. Hors de cette zone, la résistance diminue, mais elle est encore plus grande que celle du mortier de référence. À cette fin, 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%.

3. Ben Allal 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%.
4. Belas et al. (2011) ont valorisé le sédiment issu du barrage de Fergoug (Algérie) en tant que matériau de construction entrant dans la composition des bétons en l'utilisant, après calcination pour le rendre active, en dosages définis substituables au ciment (10, 15 et 20% de sédiment 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. Les résultats de cette étude ont montré que les résistances mécaniques des bétons à base de 0, 10 et 15 % de sédiment restent très proches. Quant au béton contenant 20 % de sédiments, ses résistances évoluent de manière ascendante à moyen terme, et probablement il continuera son ascension à long terme.

À noter aussi 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 (Figure 2.9).



Figure 2.9 Blocs de bétons réalisés avec des sédiments non-immersibles traités (droite : Port de Dunkerque, gauche : Rade de Toulon)

2.5. Valorisation des sédiments dans la fabrication du ciment

Plusieurs chercheurs 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 sédiments de dragage utilisés 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.

La composition chimique des sédiments (principalement de la silice, quartz, calcite,...) rappelle celle de la matière brute utilisée pour la fabrication du clinker. L'idée est que l'on peut les utiliser dans l'industrie cimentaire. Or très peu d'études existent sur ce sujet. C'est en 2004 que l'étude de cette solution a débuté par Dalton et al. (2004) cité dans (Dang., 2011) où ils ont fabriqué du clinker en présence de sédiments et ceci à deux niveaux : au niveau du

laboratoire (bench scale) et au niveau semiindustriel (pilot scale), la référence étant le ciment Portland ordinaire industriel (full scale).

Les essais au laboratoire (bench scale) consistaient en la fabrication de quatre (04) types d'échantillons en augmentant la proportion en matière contaminée : 0% (l'échantillon de référence), 1,49%, 6,63%, 12,3% en masse. Les échantillons ont été calcinés à 1450°C et puis refroidis. Ils ont été ensuite broyés en poudre fine comme le ciment et puis analysés. Trois variables ont été étudiées : teneur en sédiment, technique de mélange et processus de cuisson. Les essais « pilot scale » ont été réalisés avec 6,5% de sédiment (en masse sèche) dans un four rotatif sous une température maximale de 1350°C. Les auteurs concluent sur la possibilité d'utiliser le sédiment comme matière première pour la fabrication du ciment Portland en remplacement des cendres volantes et de la bauxite. Le taux de substitution en sédiment dépendra alors de sa teneur en SiO₂. La teneur élevée en chlorure libre dans le sédiment ne fait pas augmenter la concentration en chlorure du produit final (ciment).

Dang (2011) a étudié la possibilité d'utilisation des sédiments provenant du piège de Lyvet aménagé sur la Rance et de la baie de Mont Saint Michel. Après une caractérisation physico-chimique des sédiments bruts faisant appel à diverses techniques (DRX, ATG-ATD, MEB...), un traitement thermique à 650°C et 850°C a été adopté. Ce traitement permet d'éliminer des matières organiques et d'activer des argiles. Les sédiments traités ont été ensuite ajoutés selon différents dosages (8, 16, 33% par rapport à la masse sèche du liant) à du ciment Portland ordinaire afin de développer de nouveaux liants de type ciments Portland composés. Ces nouveaux liants ont ensuite été caractérisés (temps de prise, pouzzolanité, résistance en compression, module d'Young, perméabilité au gaz, etc.). Les résultats ont montré que même si les nouveaux liants ne présentent pas de caractère de pouzzolanité selon la norme NF EN 196-5, ils développent des propriétés mécaniques et de transfert intéressantes par rapport à un ajout inerte. La classe de résistance de ces liants a été déterminée selon la norme NF EN 196-1. Les résultats ont montré que les sédiments calcinés à 650°C pourraient être utilisés jusqu'à 35% pour obtenir des liants de classe 42,5, alors que les sédiments calcinés à 850°C ne vérifient que la classe 32,5.

Semcha (2006) a étudié la possibilité de réutilisation de sédiments prélevés à l'état solide, dans la zone de rejet sur Oued El Hammam (en aval du barrage de Fergoug) ainsi que dans la région de la Macta dans la fabrication du ciment.

Les cimenteries algériennes utilisent, pour la production d'un ciment composé de type CEM II de classe élevée, une pouzzolane naturelle. L'étude a amené à la conception d'une pouzzolane artificielle par traitement thermique (750°C) de la fraction argileuse des sédiments issus du barrage de Fergoug. Des micro-éprouvettes de pâte durcie ont été fabriquées et soumises à des essais de compression uniaxiale afin d'en estimer leur réactivité pouzzolanique. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus avec la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, dans les mêmes conditions expérimentales. La comparaison des résultats obtenus sur les deux matériaux étudiés permettent de retenir en conclusion les principaux éléments suivants :

- Ces deux matériaux peuvent trouver des applications aussi bien pour la production de ciment composé de type CEM II, que pour la fabrication de liants pouzzolaniques,
- Un meilleur comportement est observé pour la pouzzolane de synthèse à base de sédiment calciné, dépassant celle obtenue avec de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.

Les deux procédés traduisent un véritable intérêt économique.

2.6. Valorisation des sédiments comme 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 (Figure 2.10).

Ce dernier est imperméable mais coûte très cher. L'utilisation des sédiments de dragage peut servir à minimiser le coût de réalisation et joue 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 publics. Les déchets sont remblayés dans des bassins qui doivent être étanches pour protéger les eaux souterraines.

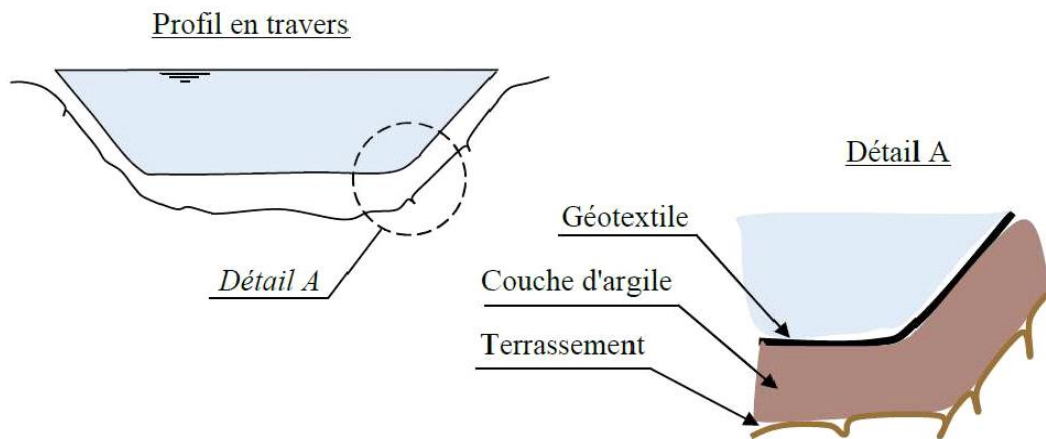


Figure 2.10 Couche d'argile dans un bassin de lagunage

2.7. Valorisation des sédiments dans l'industrie des matériaux rouges

Les matériaux rouges sont essentiellement les briques et les tuiles (Figure 2.11), des éléments utilisés couramment pour les planchers, les conduites de fumée, les bardages, les carreaux rustiques, etc.

Les mélanges de production des matériaux rouges sont composés de calcaire, feldspath et d'autres ajouts, de l'argile et du sable.

Comme la nature des sédiments de dragage est la plupart une argile, il peut être utilisé comme matière première dans l'industrie des matériaux rouges. Selon sa composition minéralogique et chimique, le sédiment est utilisé seul ou en le 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 2.12 montre l'aspect des briques obtenues en substituant 70% de l'argile utilisée par les sédiments de dragage.



Figure 2.11. Briques et tuiles



Sédiment de Larache



Sédiment de Tanger

Figure 2.12. Briques fabriquées avec un taux de substitution de 70% de sédiments

Remini (2006) a étudié la possibilité d'utilisation des échantillons de sédiments prélevés au niveau de la conduite de vidange de 11 barrages algériens. Cette étude s'est orientée vers l'utilisation des sédiments pour la fabrication de la brique. Le processus de la fabrication est schématisé selon la figure 2.13 suivante :

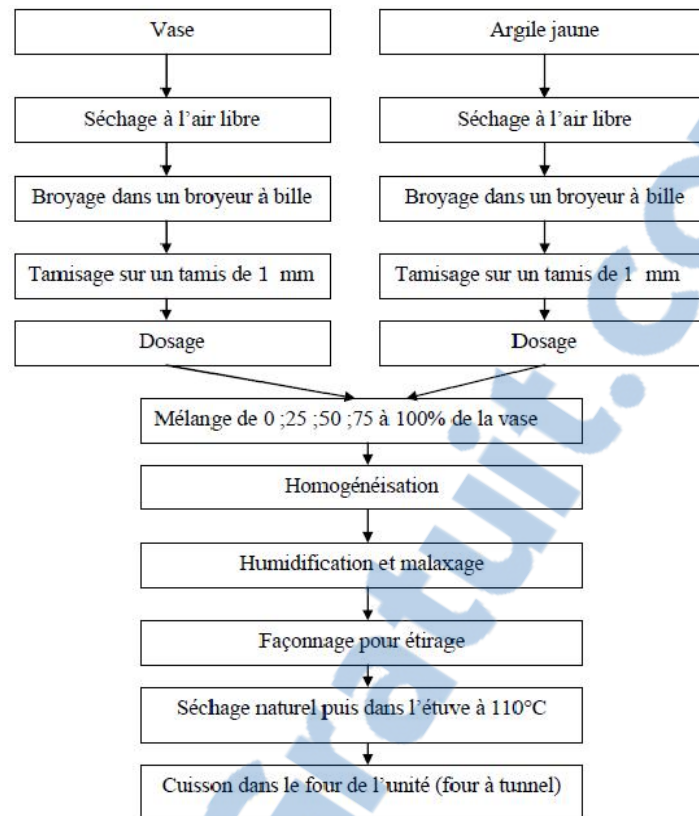


Figure 2.13. Schéma général du processus de fabrication des briques (Remini, 2006)

Les résultats obtenus par Remini (2006) sont très encourageants pour l'utilisation des sédiments de dragage comme matière première pour la fabrication de la brique, puisqu'ils présentent les mêmes caractéristiques que celle de l'argile jaune utilisée par l'ensemble des briqueteries d'Algérie.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE

2.8. 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 le sédiment issu du dragage dans le milieu naturel comme un déchet, il serait judicieux de lui trouver une valeur pour le réutiliser dans le domaine du génie civil.

D'après les travaux déjà réalisés dans ce domaine, le traitement et l'étude des sédiments en vue de leurs valorisations ont donné de très bons résultats où la réutilisation de ces matériaux 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 de l'autre côté.

Chapitre 3 :

Traitement des sols par utilisation des fibres

3.1. Introduction

Renforcer les sols avec des fibres est devenue une méthode très répandue dans le traitement des sols. En effet, l'utilisation de ces fibres de différentes variétés ont montré leur intérêt comme une solution intéressante et innovante dans les problèmes d'ingénierie en géotechnique.

On présentera dans ce chapitre, une revue sur les principaux types de fibres utilisées dans la construction ainsi que leurs caractéristiques à la fois physique et mécanique.

Une synthèse bibliographique est présentée ensuite permettant de décrire les principales constatations et conclusions obtenues sur l'étude du comportement mécanique des sols traités par ces fibres de nature diverses.

3.2. Les fibres

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériau qui a été introduite dans le commerce pour de nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique et artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille, etc.), leur dimension (macro ou micro-fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour une application donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite.

3.3 Types de fibres

Plusieurs types de fibres sont utilisés dans la construction ; qui peuvent être classées par famille (Figure 3.1) :

1. La famille des fibres naturelles : Cette famille se compose des fibres animales, végétales et minérales.
2. La famille des fibres synthétiques (artificielles) : Cette famille comprend les fibres organique et inorganique.

Le tableau 3.1 résume quelques propriétés de ces fibres où il met en évidence leurs natures et propriétés physique et mécanique variées.

Tableau 3.1 Propriétés physique et mécanique de certaines fibres

Fibre	Diamètre en μm	Masse volumique (g/cm^3)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction (GPa)	Allongement à la rupture (%)
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

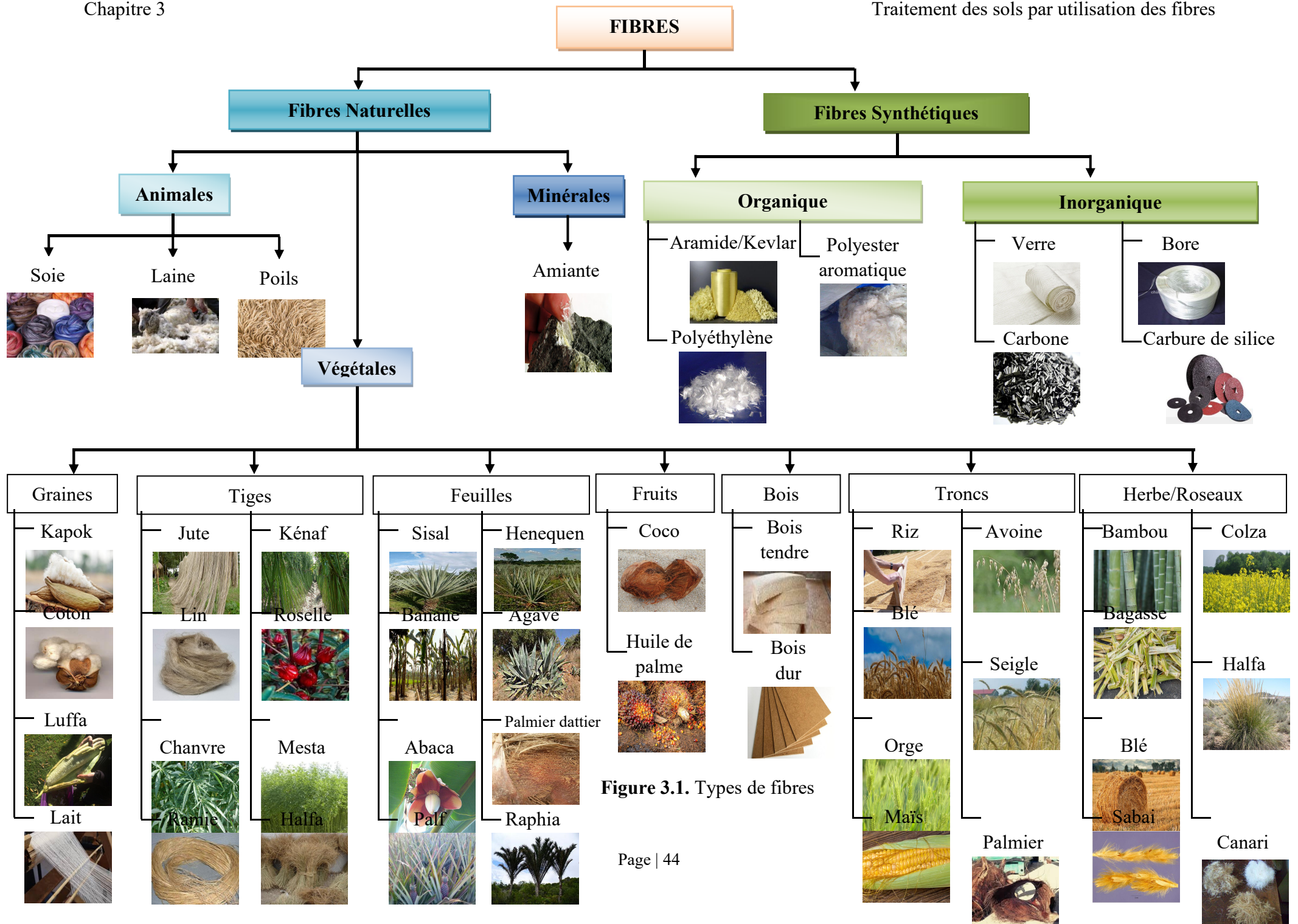


Figure 3.1. Types de fibres

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

- **Les fibres animales**

Ces fibres sont composées de substances organiques, ou protéiniques, se présentant sous forme de poils ou de plumes ou de soies tel que : la laine, le crin, la bourre, les velours, l'édredon, etc. (Figure 3.2).



Figure 3.2. Fibres animales.

- **Les 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" (Figure 3.3).



Figure 3.3. Fibres minérales.

- **Les fibres végétales**

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétale dans la construction remonte à la période où l'on fabriquait des briques renforcées par la paille ou des roseaux (Figure 3.4). Dans le temps moderne (depuis l'année 70), le premier composite liant avec les fibres végétales 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.



Figure 3.4. Fibres végétales.

Ces fibres végétales sont classées en sept (07) groupes (Figure 3.1): les fibres de graines, tiges, feuilles, fruits, bois, troncs et herbe/roseaux

a. Les fibres de feuilles : Ces fibres sont dures et rigides où les plus cultivées sont: la fibre de Sisal, de Henequen et d'Abaca. Plusieurs chercheurs 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 Kenaf, d'Urena et de Chanvre (Figure 3.5).



Figure 3.5. Fibres de tiges.

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. Ces fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres dont on peut citer 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 (Figure 3.6).

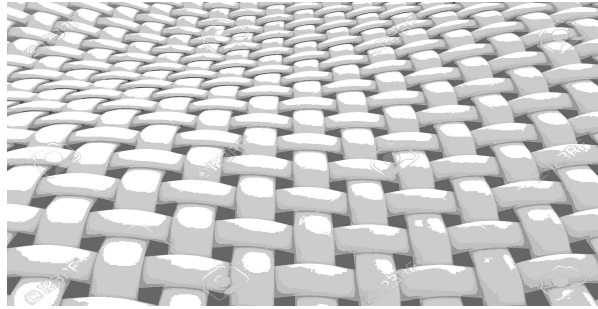


Figure 3.6. Fibres de surface.

3.3.2. Les fibres artificielles

Ce type de fibres comprend la famille des fibres métallique et organique (Figure 3.1).

- **Les fibres organiques**

C'est le cas des fibres de caoutchouc par exemple. 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 des pneus de caoutchouc extraites des roues des voitures sont introduites pour une utilisation dans plusieurs domaines dans la construction (Figure 3.7).



Figure 3.7. Fibres des pneus de caoutchouc

Ces 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 peut varier de 20 à 40 mm. Leur épaisseur et largeur varient de 0,25 mm à 0,35 mm respectivement (Figure 3.8). Les spécifications du produit de ce type de fibres sont données dans le tableau (3.2) suivant:

Tableau 3.2. Propriétés physique et mécanique des fibres de caoutchouc

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

**Figure 3.8.** Fibres de caoutchouc découpées en morceaux.

- **Les fibres de verre**

Le verre utilisé comme renfort dans les composites se présente généralement sous forme de fils (simples, tressés, tissés, etc.). Ces fibres de verre sont produites essentiellement sous deux formes (Figure 3.9) : 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 3.9.** Fibres de verre de type Cemfil (A.R)

Le tableau 3.3 indique les propriétés physico-mécaniques de la fibre de verre A.R.

Propriétés	Fibre A.R
Masse volumique (densité) ρ	2,68 g/cm ³
Contrainte à rupture en traction : Filament vierge	3000 Mpa
Module d'élasticité en traction	73 000 Mpa
Allongement à rupture	4,3 %
Coefficient de dilatation linéique α (entre 20 et 100°C)	5.10 ⁻⁶ m/m/°C
Comportement au feu	Incombustible
Point de ramollissement	773°C

Tableau 3.3 : Propriétés physico-mécaniques de la fibre de verre A.R

3.4. Comportement mécanique des sols traités aux fibres

Plusieurs études de traitement des sols par utilisation des fibres ont été abordées ces dernières années. Nous présentons dans cette partie un état de l'art des principales constatations et conclusions obtenues sur ce comportement mécanique des sols traités par ces fibres de nature diverses :

3.4.1. Travaux de Marandi et al.2008

Marandi et al.2008 ont étudié l'effet du traitement d'un sol limoneux-sableux par utilisation des fibres du palmier dattier. Ces fibres végétales de teneur variant de 0,25% à 2,5% et de longueurs (20mm et 40mm) ont été obtenues en enfilant de longs filaments de palmiers provenant principalement de la palmeraie de Bam (Iran). Ces fibres ont été enfilées en morceaux et étirées à des dimensions variables (Figure 3.10).

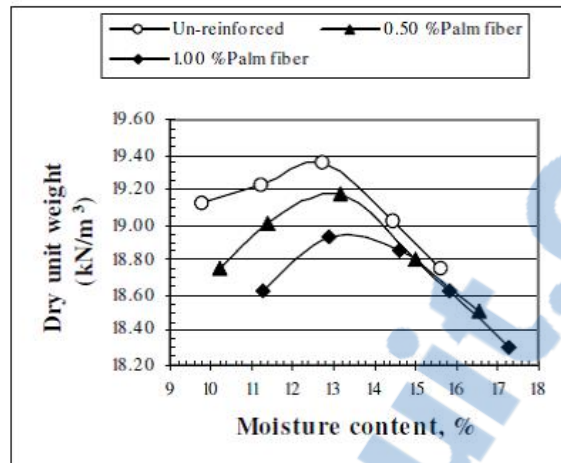


Figure 3.10. Fibres de palmier dattier typiques de la palmeraie de Bam (Iran) (Marandi et al.2008).

Différents essais mécaniques ont été effectués sur des mélanges (sol-fibres) à ces teneurs et longueurs variables où l'analyse des résultats obtenus a permis de conclure que :

- L'augmentation de la teneur en fibres du palmier dattier, réduit notablement la densité

sèche maximale et accroît sensiblement la teneur en eau optimale (Figure 3.11).

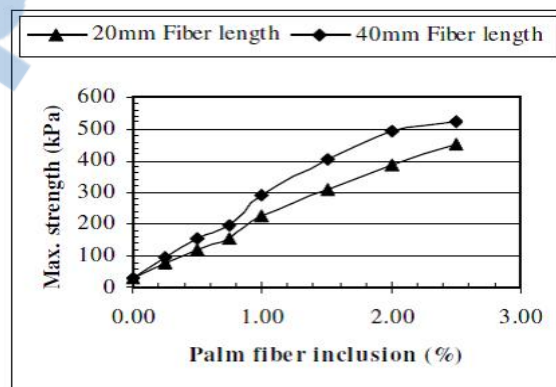


Dry unit weight = Poids volumique sec Moisture content = teneur en eau

Figure 3.11. Courbes de compactage du sol (limon-sableux) avec et sans renforcement des fibres du palmier dattier (Marandi et al.2008).

Selon Marandi et al.2008, cette diminution de la densification est probablement attribuée aux filaments de fibres qui ont moins de poids spécifique que les particules granulaires du sol traité où ces fibres empêchent ces particules de sol de s'accoler entre eux. Tandis que l'augmentation de la teneur en eau optimale est attribuée au fait que les fibres ont une capacité d'adsorption en eau élevée par rapport au sol traité.

- Une augmentation de la résistance à la compression (UCS) avec l'accroissement des fibres du palmier dattier en teneur et en longueur (Figure 3.12).

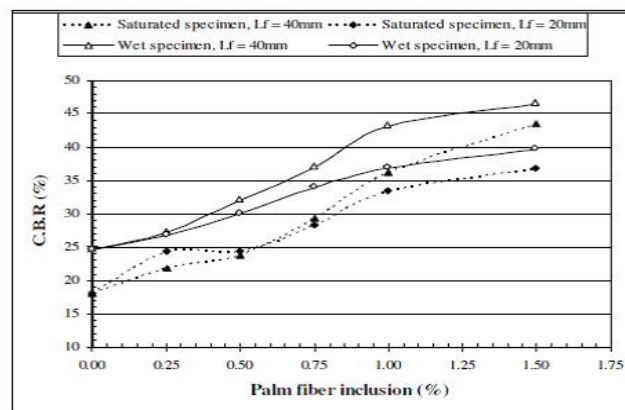


Max. strength = La résistance à la compression (UCS) Palm fiber inclusion = Teneur en fibres

Figure 3.12. Effets de la teneur et longueur des fibres du palmier dattier sur la variation de la résistance à la compression (UCS) du sol traité (Marandi et al.2008).

Selon Marandi et al.2008, l'inclusion des fibres a un effet positif sur la résistance à la compression (UCS) et augmentera donc la ductilité du sol traité.

- En termes de portance, l'augmentation de la teneur et la longueur des fibres accroît efficacement les valeurs des indices CBR immédiat (CBR_{imd}) et CBR immersion (CBR_{imm}) (Figure 3.13). Cette augmentation moyenne entre les échantillons saturés et humides, pour des longueurs de fibre de 20 mm et 40 mm, est de 18% et 24,8% respectivement. Des différences similaires ont été trouvées entre les résultats pour les échantillons humides avec augmentation, pour des longueurs de fibres de 20 mm et 40 mm, respectivement de 8,6% et 2,9%. Ainsi; l'agrandissement de la longueur de la fibre augmente effectivement le CBR, et cette tendance augmente d'avantage avec l'inclusion de pourcentage de fibres. En revanche, la saturation des échantillons diminue considérablement les valeurs CBR.



Saturated specimen = Echantillon saturé

Wet specimen = Echantillon humide

Palm fiber inclusion = Teneur en fibre du palmier

Figure 3.13: Variation des indices CBR_{imd} et CBR_{imm} pour le sol traité à des teneurs et longueurs variables des fibres du palmier dattier (Marandi et al.2008).

3.4.2. Travaux de Abessolo et al.2020

Abessolo et al.2020 ont étudié l'influence de la longueur et de la teneur en fibres végétales de Bambou (*Bambusa vulgaris*) (Figure 3.14), sur les propriétés physicomécaniques et hygroscopiques des Blocs de Terre Comprimée (BTC). Leur étude s'est focalisée sur la densité, la porosité, la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le taux d'absorption d'eau.



Figure 3.14. Fibres végétales de Bambou épluché et défibré (Abessolo et al.2020)

Trois teneurs en fibres (0,5 : 0,75 et 1%) ont été utilisées avec une variation de la longueur des fibres de 4 à 6 cm. Selon les résultats d'Abessolo et al.2020, l'ajout des fibres végétales de Bambou réduit la densité des blocs de terre comprimée (BTC) et augmente leur porosité (Figure 2). Plus les fibres sont longues et nombreuses, moins le BTC est dense. Ce phénomène peut être attribué selon Abessolo et al.2020 à l'augmentation du réseau poreux dans les blocs (Figure 3.15).

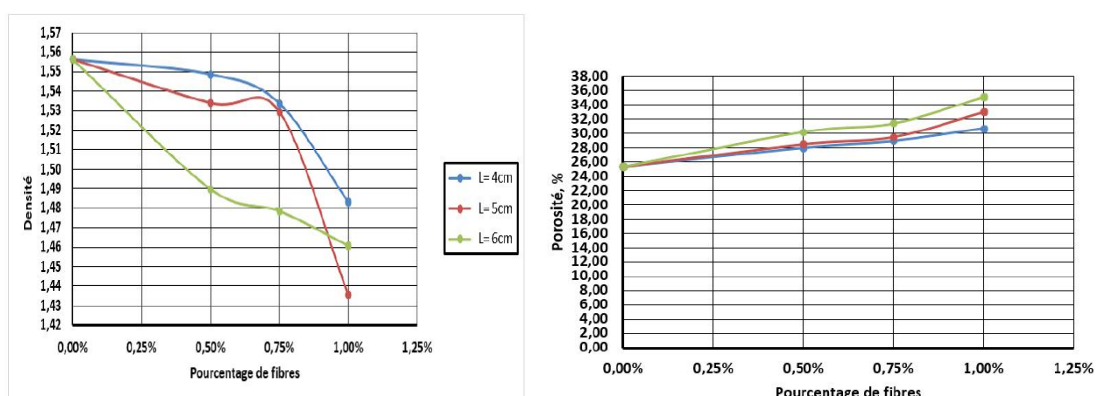


Figure 3.15. Variations de la densité et la porosité des BTC avec la teneur et la longueur des fibres végétales de Bambou (Abessolo et al.2020)

Les résistances à la flexion et à la compression sont améliorées par l'ajout des fibres en teneur et en longueurs (Figure 3.16). Cependant, les taux et longueurs élevés des fibres ont un effet négatif sur la résistance à la compression des BTC, et plutôt positif sur la résistance à la flexion. Ceci serait la conséquence d'une part, de la porosité croissante et donc de la densité décroissante des BTC qui vont de pair avec l'augmentation à la fois du taux de fibres et de leur longueurs (Taallah 2014, Vodounon et al.2018) et d'autre part, l'augmentation de la

quantité des fibres entraîne une résistance croissante à la fracture des blocs de terre.

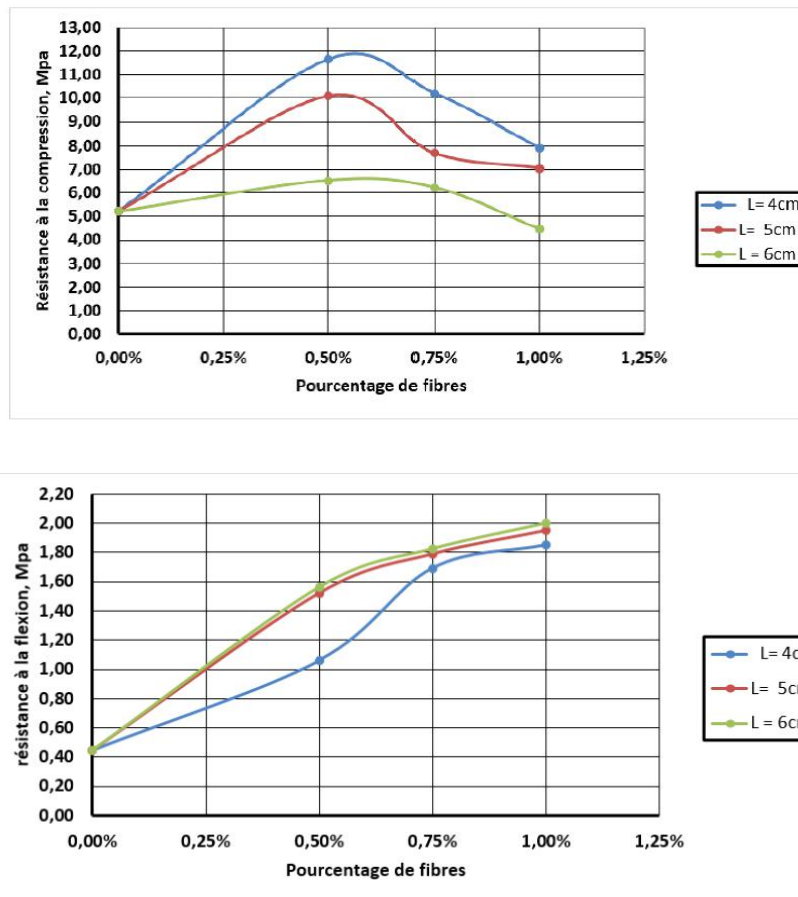


Figure 3.16. Variations des résistances à la compression et à la flexion des BTC avec la teneur et la longueur des fibres végétales de Bambou (Abessolo et al.2020)

D'autre part, cet ajout des fibres végétales de Bambou dans les BTC augmente leur taux d'adsorption, qui croîtra avec l'augmentation en quantités et en taille des fibres (Figure 3.17). Ce phénomène qui conduit à la diminution de la résistance et de la durabilité des blocs de terre. Ceci dit que les propriétés mécaniques des BTC s'améliorent avec l'ajout des fibres de Bambou, mais augmente leur sensibilité à l'eau. Ce phénomène qui selon Abessolo et al.2020 peut être attribué à la capacité d'absorption d'eau des fibres.

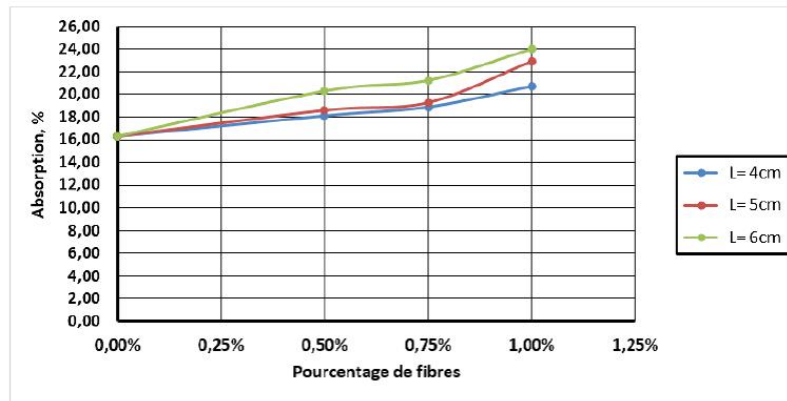


Figure 3.17. Variation du taux d'absorption des BTC avec la teneur et la longueur des fibres végétales de Bambou (Abessolo et al.2020)

3.4.3. Travaux de Ghavami et al.1999

Ghavami et al.1999 ont étudié l'effet de traitement d'un sol par utilisation des fibres de sisal et de noix de coco (Figure 3.18). L'analyse des résultats obtenus (Figure 3.19), a montré que la rupture d'un sol naturel et non traité aux fibres est rapide et brutale ; à la différence de celle du sol traité aux fibres, où des déformations apparaissent sur les échantillons après que la charge de rupture soit atteinte. Ce qui indique que l'inclusion des fibres améliore la ductilité et par conséquent la résistance mécanique à la compression du sol.

Ceci peut être attribué selon Ghavami et al.1999 à la répartition des forces internes de la matrice du sol vers les fibres de renforcement.



Fibre de sisal



Fibre de noix de coco

Figure 3.18. Les fibres de sisal et de noix de coco

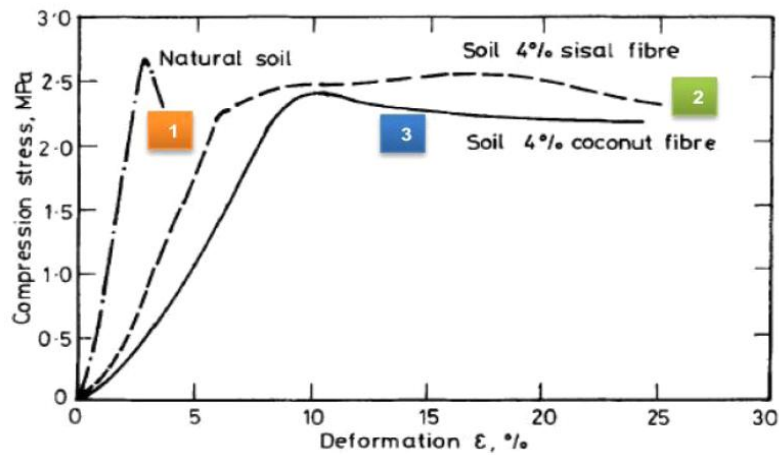


Figure 3.19. Influence d'ajout des fibres de sisal et de noix de coco sur la résistance mécanique du sol (Ghavami et al.1999).

Namango (2006) a montré que dans certaines limites, il ya une augmentation considérable de la résistance à la compression, et à la flexion à l'état sec avec l'augmentation des fibres de sisal, de poudre de manioc et de teneurs en ciment, et qu'en dehors de ces valeurs limites, la présence de fibres de sisal a un effet défavorable sur la résistance du bloc de terre comprimée.

3.4.4. Travaux de Millogo et al.2014

Millogo et al.2014 se sont intéressés à la stabilisation d'un sol latéritique par utilisation de fibres d'hibiscus cannabinus (kénafe) (Figure 3.20) en vue de constituer des blocs de terre comprimée (BTC) non traité de stabilisant chimique. Ces BTC ont été renforcés avec des fibres de teneurs allant de 0,2 à 0,8% en poids et de longueurs variables de 30mm et 60mm.



Figure 3.20. Les fibres d'hibiscus cannabinus (kénafe)

Les résultats obtenus ont montré que la présence des fibres végétales de kénafe améliore les caractéristiques physique et mécanique des blocs où l'important effet a été observé pour les BTC renforcés avec 30mm de longueur de fibre (Figure 3.21). Selon Millogo et al.2014, cette

amélioration des propriétés mécaniques est attribuée au non propagation de fissures qui est due à la présence des fibres dans la matrice d'argile où l'impact de présence de ces fibres sur la résistance à la flexion est positif en raison de leur résistance à la traction élevée et de leur adhérence à la matrice argileuse.

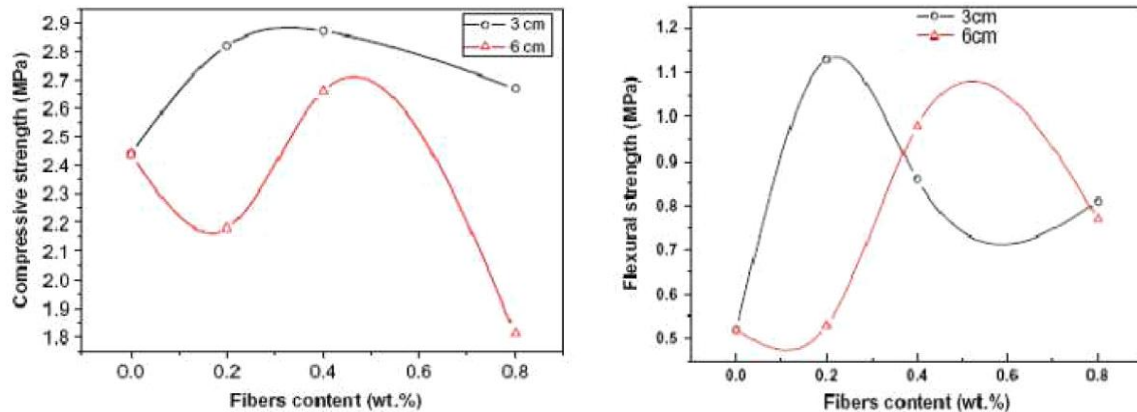


Figure 3.21. Effets d'introduction des fibres végétales (type kénaf) sur la résistance à la compression et à la flexion (Millogo et al.2014).

3.4.5. Travaux de Cai et al.2006

Les fibres artificielles comme les fibres de polypropylène (Figure 3.22) ont été utilisées par Cai et al.2006 pour le renforcement de sols argileux de Nanjing (Chine), afin de réduire la fragilité du sol stabilisé à la chaux uniquement. Pour cela, des essais mécaniques (compression UU, cisaillement direct et essais de gonflement-retrait) ont été effectués sur neuf groupes de mélanges (sol-chaux-fibres), étudiés à 03 pourcentages différents de teneur en fibres (0.05%, 0.15% et 0.25%) et 03 pourcentages de chaux (2%, 5% et 8%).



Figure 3.22. Fibres de polypropylène

Il a été constaté que la teneur en fibres, la teneur en chaux et la durée de cure ont une influence significative sur les propriétés mécaniques du sol traité où les fibres de

polypropylène peuvent améliorer la résistance à la compression et le potentiel de retrait mais entraîne une réduction du potentiel de gonflement (Figure 3.23) et tableau 3.4.

L'augmentation de la durée de cure améliore aussi les paramètres de résistance à court et long terme. Ceci peut être expliqué selon Cai et al.2006 que la présence de fibres de polypropylène contribue à l'interaction physique entre la fibre et le sol tandis que l'utilisation de la chaux engendre une réaction chimique entre la chaux et le sol qui changera considérablement la structure du sol.

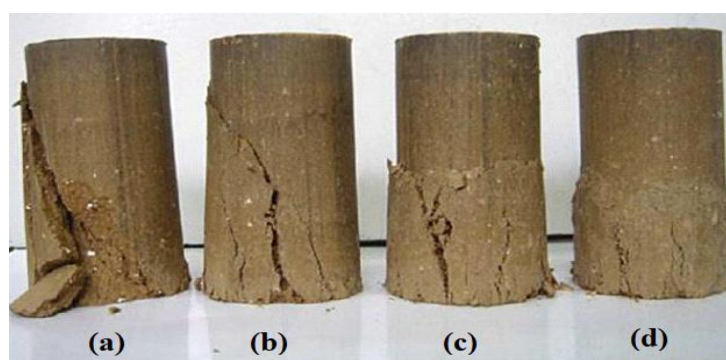


Figure 3.23. Formes de ruptures d'échantillons d'argile avec 8% de chaux et trois dosages en fibres après 7 jours (Cai et al.2006) : (a) 0%, (b) 0.05%, (c) 0.15%, (d) 0.25%.

Unconfined compressive strength and swelling–shrinkage potentials of specimens								
Serial number	Fibre content (%)	Lime content (%)	Unconfined compressive strength (MPa)			Swell Percentage (%)	Shrinkage percentage (%)	Shrinkage coefficient
			7 days	14 days	28 days			
1	0.05	2	0.24	0.28	0.35	0.37	1.60	0.072
2	0.05	5	0.43	0.49	0.84	0.19	1.27	0.054
3	0.05	8	0.41	0.47	0.74	0.13	1.24	0.051
4	0.15	2	0.27	0.30	0.36	0.35	1.69	0.084
5	0.15	5	0.46	0.51	0.87	0.16	1.30	0.063
6	0.15	8	0.44	0.50	0.76	0.09	1.25	0.054
7	0.25	2	0.28	0.34	0.39	0.21	1.80	0.102
8	0.25	5	0.53	0.58	0.88	0.10	1.40	0.068
9	0.25	8	0.50	0.56	0.79	0.06	1.37	0.056
10	0	8	0.31	0.38	0.66	0.07	1.15	0.042
11	0	0	– ^a /0.09 ^b			11.48	2.12	0.159
12	0.25	0	– ^a /0.12 ^b			8.41	2.15	0.161

^a The specimen collapsed after soaking in water and hence no value could be obtained.

^b The value was gained without the specimen's immersion in water and curing before testing.

7 days

Tableau 3.4. Effets d'ajouts des fibres polypropylène sur les propriétés mécaniques (UCS, potentiel de gonflement et potentiel de retrait) (Cai et al.2006)

3.4.6. Travaux d'Al-Akhras et al.2008

L'influence des fibres de nylon et de palmier (Figure 3.24) ont été étudiés par Al-Akhras et al.2008 sur un sol argileux à des teneurs et des rapports d'aspect (longueur (L)/diamètre (d) de la fibre) différents.

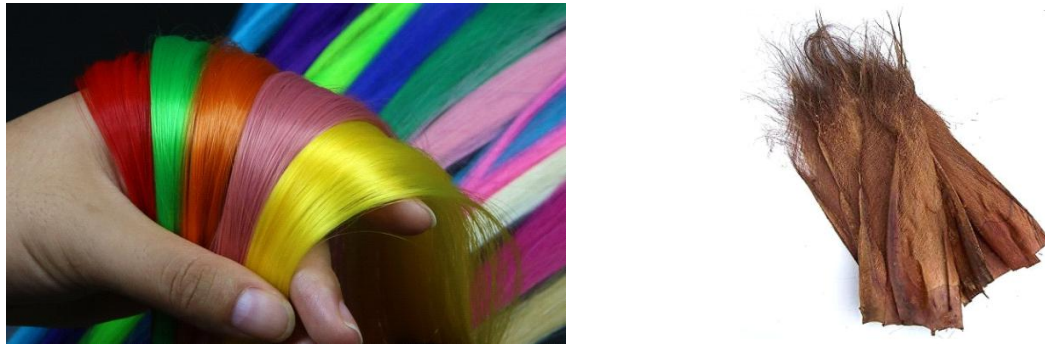


Figure 3.24. Fibres de nylon et de palmier

Il a été constaté que le potentiel de gonflement diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres (Figure 3.25). Cette diminution est passée de 21% pour le sol argileux non traité à une moyenne de 5,25% et 4,62% pour celui-ci traité aux fibres de nylon et de palmier, respectivement. La teneur en fibres de 5% conduit au potentiel de gonflement minimum.

De plus, Al-Akhras et al.2008 ont constaté que le potentiel de gonflement diminue avec la diminution du rapport d'aspect des fibres où la valeur minimale du potentiel de gonflement est obtenue pour des fibres ayant un rapport d'aspect (L/d) de 25.

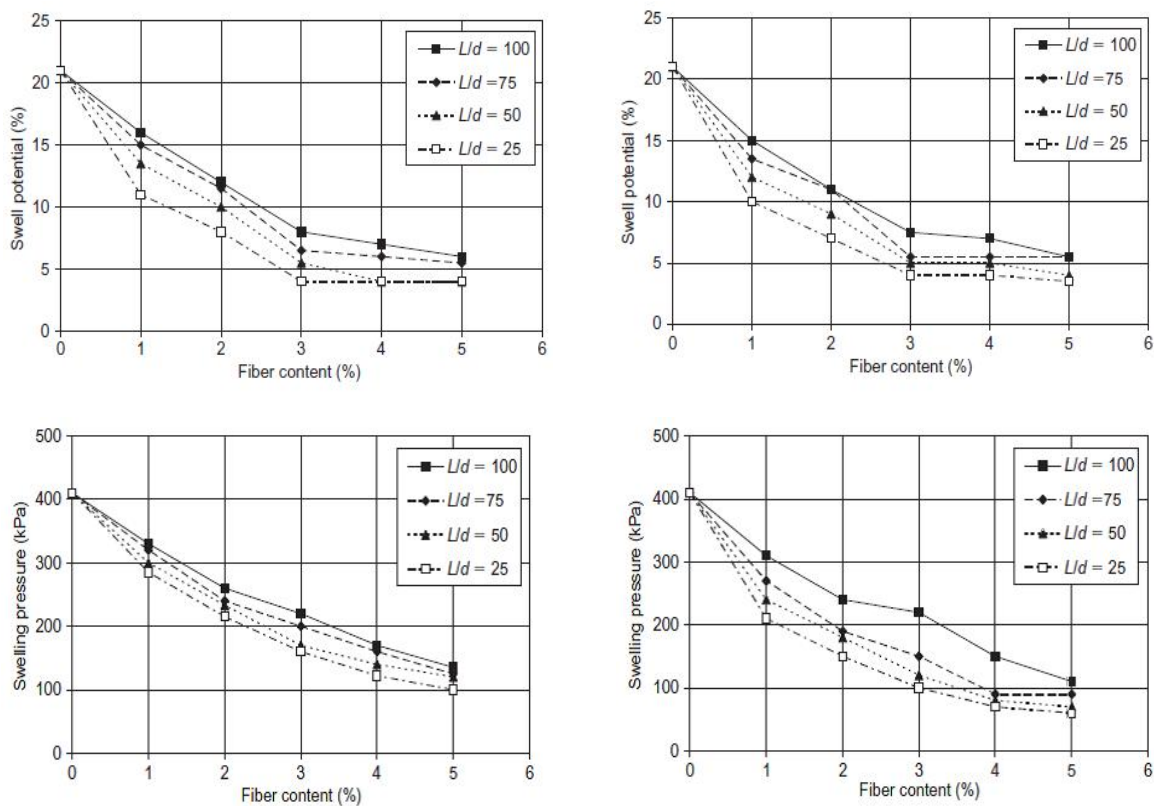


Figure 3.25. Effets de teneur en fibres de nylon et de palmier sur le potentiel et la pression de gonflement de l'argile à des rapports d'aspect (L/d) variables (Al-Akhras et al.2008)

D'autre part, la pression de gonflement a diminué de manière significative avec l'augmentation de la teneur en fibres (Figure 3.25). Cette pression de gonflement minimum (5% de fibres) a été observée à 120 et 82,5 kPa pour cette argile traitée aux fibres de nylon et de palmier, respectivement.

Ainsi, les sols argileux mélangés avec des fibres ont montré que la pression et le potentiel de gonflement sont nettement inférieurs avec ceux des sols argileux sans fibres. Al-Akhras et al.2008 ont montré aussi que le pourcentage de réduction de la pression de gonflement augmente avec celui de la fraction argileuse. Il est de 66% à 76% pour un sol argileux traité avec des fibres de nylon à un rapport d'aspect de 25 et de 52% à 67% pour un sol argileux traité avec des fibres palmier avec un rapport d'aspect de 100 (Figure 3.26). Ceci peut être attribué au fait qu'à mesure que la fraction d'argile augmente, la pression de gonflement augmente de manière significative. Par conséquent, les fibres ont contribué plus efficacement lorsque la fraction argileuse est grande.

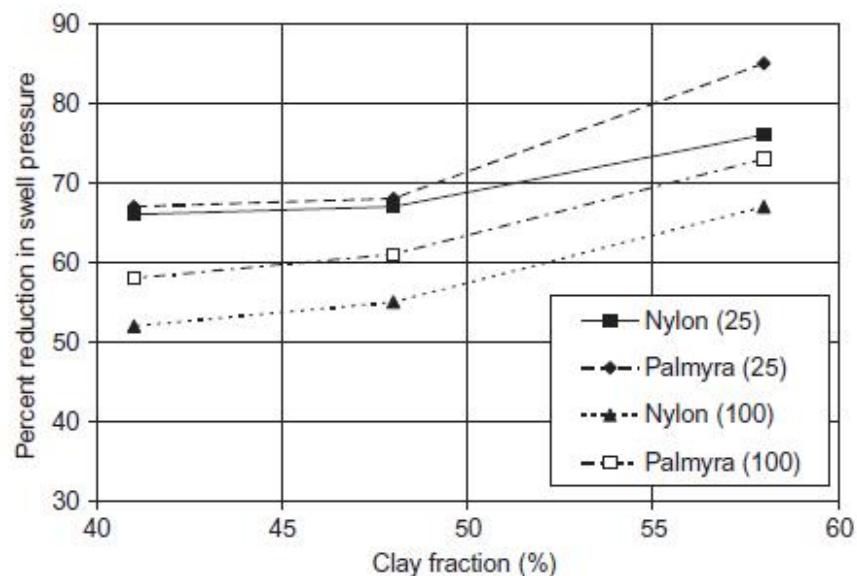


Figure 3.26. Effet de la fraction d'argile sur le pourcentage de réduction dans la pression de gonflement à 5% de teneur en fibres et des rapports d'aspect (L/d) différents (Al-Akhras et al.2008)

3.4.7. Travaux de Boukemmoum et Nouaouria (2019)

Boukemmoum et Nouaouria (2019) ont étudié le traitement du sédiment du barrage de Ain Dalia (Souk Ahras) par les fibres de sisal (Figure 3.27). Des essais triaxiaux UU ont été

réalisés sur des mélanges sédiments-fibres-sable normalisé. L'identification géotechnique de ce sédiment a montré que c'est un sol argileux de classe A2 selon VBS et A3 selon l'IP.



Figure 3.27. Fibres de sisal (Boukemmoum et Nouaouria (2019))

Selon Boukemmoum et Nouaouria (2019), le traitement du sédiment avec les fibres de sisal indique que les paramètres mécaniques (cohésion et angle de frottement interne) commencent à s'améliorer à partir de la teneur en fibres de 2% (Figure 3.28).

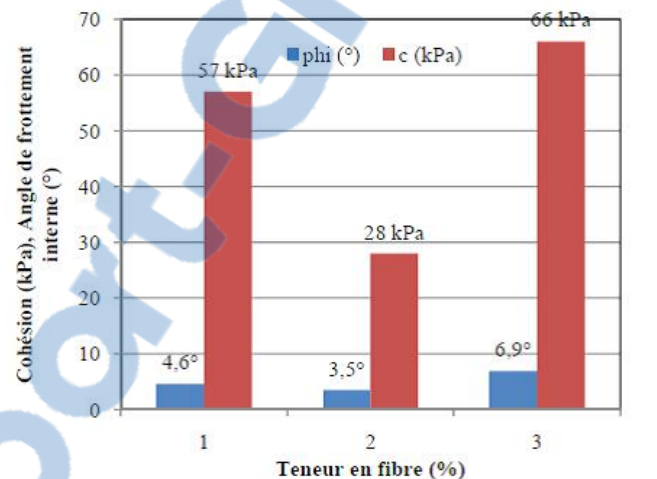
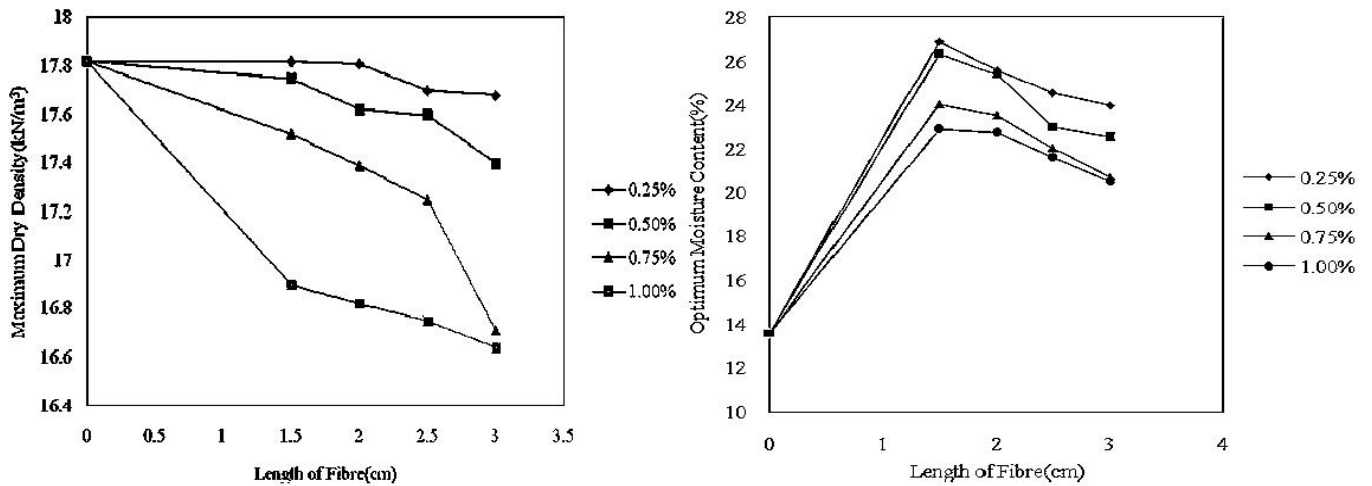


Figure 3.28. Effets du traitement du sédiment Ain Dalia avec les fibres de sisal (Boukemmoum et Nouaouria (2019)).

3.4.8. Travaux de Santhi et al.2009; Maity et al. 2011

Santhi et al (2009) ont réalisé des essais de compactage à l'Optimum Proctor Normal (OPN), sur une argile très plastique (At) mélangée avec les fibres végétales de type sisal en variant leurs longueurs (1,5 - 3 cm de longueur) et leurs pourcentages de (0,25 - 1 %). Ces auteurs ont trouvé que l'augmentation de la longueur et la teneur en fibres diminuent la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale (Figure 3.29).



Maximum dry density = la densité sèche maximale

Length of fibre = longueur de la fibre

Optimum moisture content = teneur en eau optimale

Figure 3.29. Variation de la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale d’une argile (At) traitée avec des fibres végétales de type sisal (Santhi et al. 2009).

D’autre part, Maity et al. 2011 ont étudié sur deux types de sable mélangés avec (0,5 – 2%) des fibres végétales de type jute (Figure 3.30) qui ont trouvé que la densité sèche maximale (MDD) diminue et la teneur en eau optimale (OMC) augmente avec l’ajout des fibres. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Marandi et al.2008.

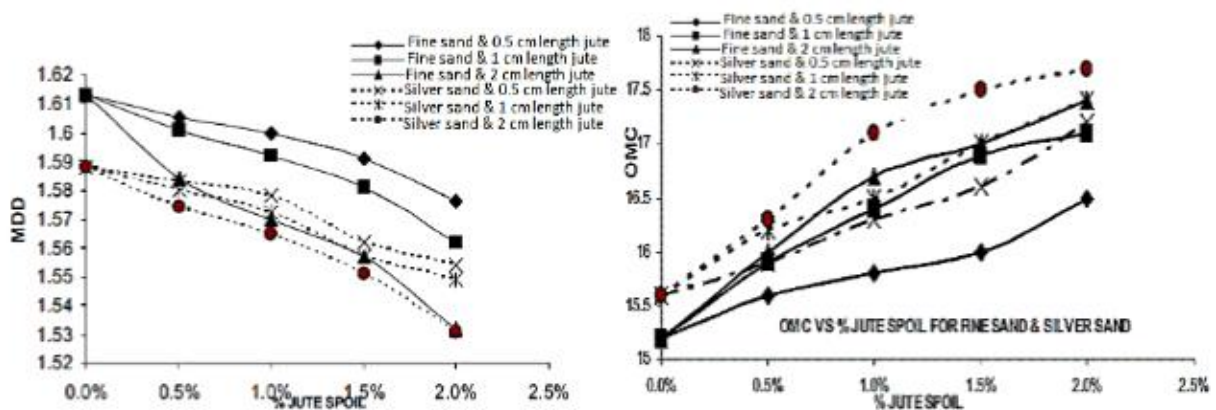


Figure 3.30. Variation de la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage et de la longueur des fibres de jute (Maity et al. 2011)

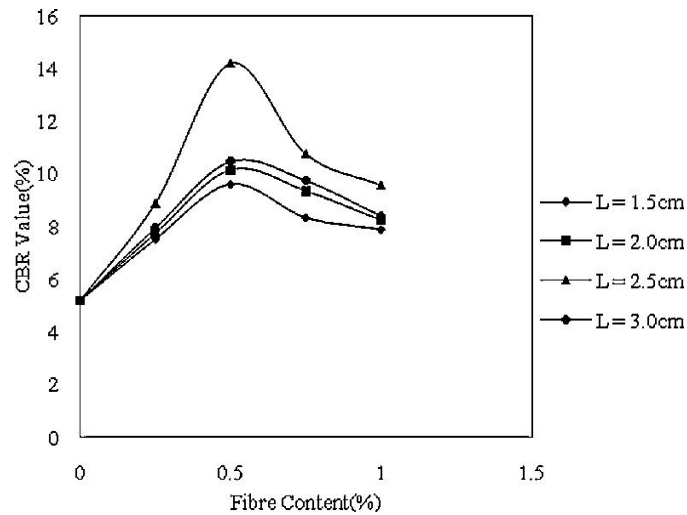
Cette diminution de la densité sèche a été expliquée par le faible poids spécifique des filaments de fibres en comparaison avec les grains du sol et les fibres empêchent les particules de sol de s’approcher les unes des autres.

L'augmentation de la teneur en eau optimale remarquée par (Marandi et al. 2008 ; Maity et al. 2011) est très probablement due à la capacité d'absorption d'eau supérieure des fibres (caractère hydrophile des fibres) par rapport au sol.

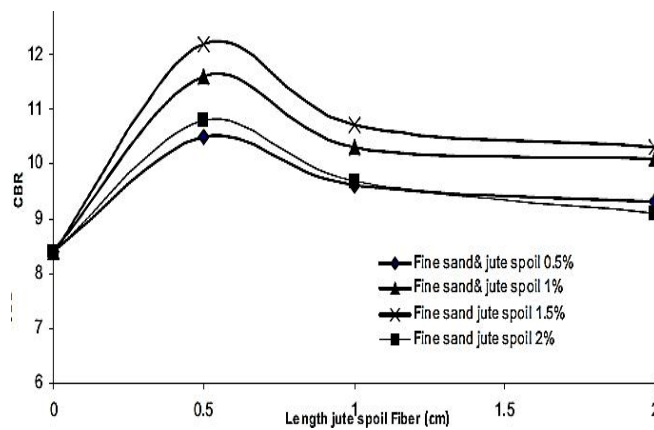
Santhi et al. (2009) expliquent que la diminution de la teneur en eau optimale observée peut être due à la présence d'une teneur en eau en fibres de sisal. L'addition des fibres de 1,5 cm a conduit à une augmentation de la teneur en eau par rapport à celle du sol brut, tandis que l'augmentation supplémentaire de la longueur de la fibre provoque une diminution de la teneur en eau. L'inclusion initiale de fibre à 0,25% a provoqué une augmentation soudaine de la teneur en eau par rapport du sol seul, et une nouvelle augmentation de la teneur en fibres réduit la teneur en eau. Mais dans tous les cas la teneur en eau est supérieure à celle du sol brut. Cela peut être la raison de l'augmentation initiale de la teneur en eau lorsque les fibres ont été introduites dans le sol.

Il a été remarqué donc que les caractéristiques de compactage sont très influencées par l'incorporation des fibres dans la matrice du sol dont leur influence dépend de plusieurs paramètres tels que : la nature du sol ; le type des fibres et leurs morphologies variées ainsi que les pourcentages et les longueurs des fibres utilisées.

Par ailleurs, des essais de portance (CBR) ont été réalisés par ces auteurs en vue d'étudier l'effet des fibres végétales sur la capacité portante des sols (Figure 3.31). Santhi et al (2009) ont remarqué que la valeur de l'indice CBR du sol renforcé avec les fibres de sisal est approximativement trois fois plus grande que celle du sol brut tandis que Maity et al. 2011 ont trouvé une augmentation de l'ordre de 41,2 % de la valeur de l'indice CBR pour le sable fin renforcé avec 1,5 % de la fibre de jute de 5 mm.



Fibres de sisal (Santhi et al.2009)



Fibres de jute (Maity et al.2011)

Figure 3.31. Variation de l'indice CBR avec le pourcentage et la longueur des fibres (Santhi et al. 2009; Maity et al. 2011)

3.4.9. Travaux de Gray et Al-Refeai. (1986)

Gray et Al-Refeai. (1986) ont réalisé des essais triaxiaux sur un sable sec renforcé par des fibres végétales (roseaux) en variant la teneur en fibres dans la matrice du sable de (0,21 à 0,5 et 1%). Les résultats de leurs essais ont permis de constater qu'en augmentant le pourcentage des fibres, une amélioration de la résistance et une augmentation de la déformation axiale à la rupture est remarquée avec une diminution de la résistance résiduelle (Figure 3.32).

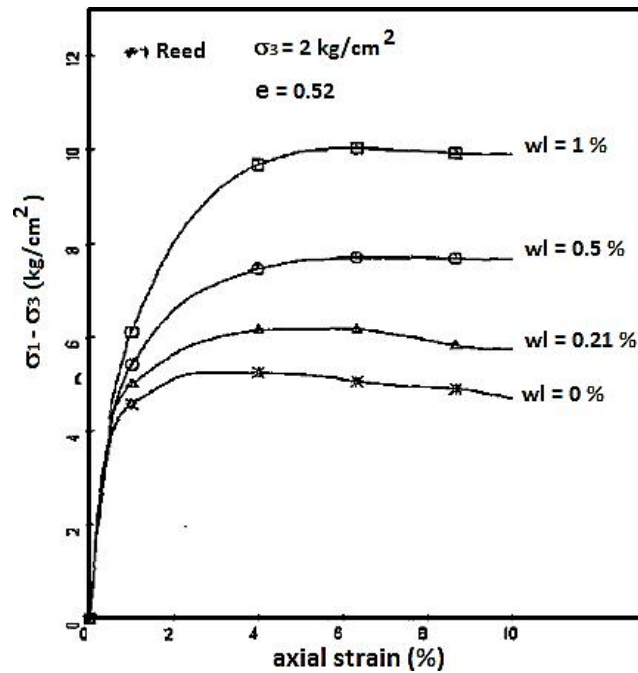


Figure 3.32. Effets des fibres végétales de type roseaux sur les courbes triaxiales contrainte-déformation pour un sable sec (Gray et Al-Refeai 1986)

3.4.10. Travaux de Sivakumar babu et al. (2008), Ahmad et al. (2010)

Sivakumar babu et al. (2008) et Ahmad et al. (2010) ont réalisé des essais triaxiaux en condition (CU) sur des sols sableux de type (SL), renforcés respectivement par des fibres de coir et des fibres de drupes de palmier à huile (Figure 3.33).



Fibres de drupes de palmier



Fibres de coir

Figure 3.33. Fibres de drupes de palmier et de coir

Selon ces chercheurs, l'ajout des fibres dans la matrice du sol augmentera ces propriétés mécaniques (cohésion et son angle de frottement). Une relation non proportionnelle entre l'angle de frottement et la cohésion a été observée où la diminution de l'angle de frottement est compensée par une augmentation de la cohésion (Figure 3.34 et 3.35).

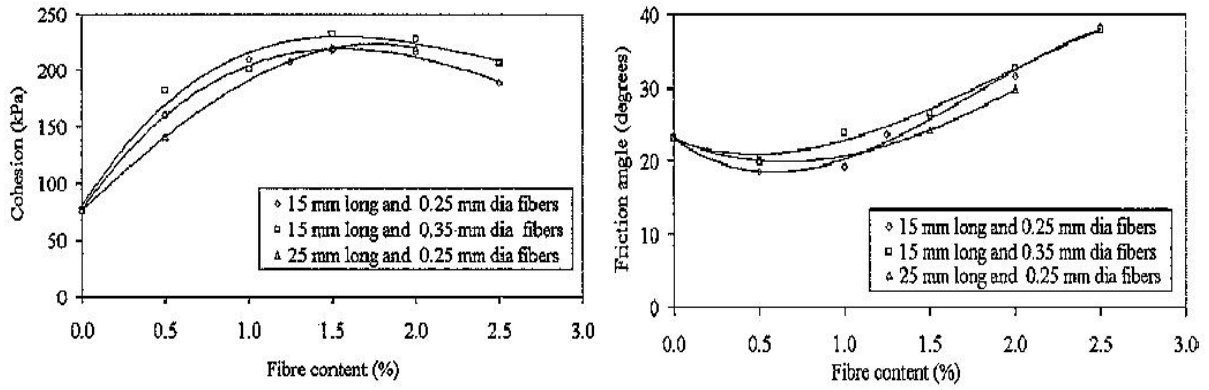


Figure 3.34. Effets des fibres de coir sur la cohésion l’angle de frottement (Sivakumar babu et al. 2008)

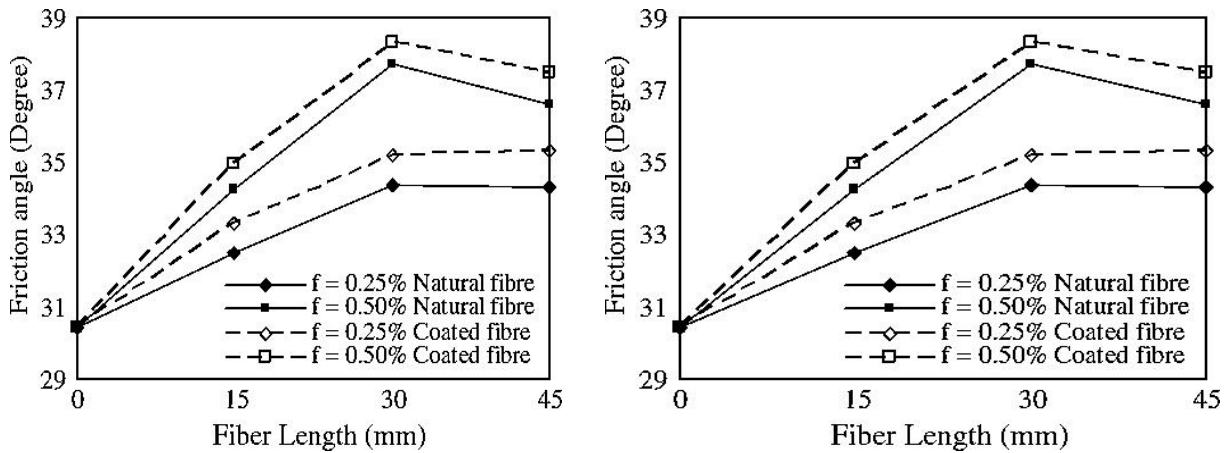


Figure 3.35. Effets des fibres de drupes de palmier à huile sur la cohésion et l’angle de frottement (Ahmad et al. 2010)

3.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une synthèse bibliographique succincte des travaux de recherche utilisant les fibres comme renfort dans le traitement des sols. Différentes familles de fibres ont été exploitées afin d’améliorer les caractéristiques mécaniques des sols telles que leur résistance au cisaillement, à la compression et leur potentiel de gonflement et de compressibilité. À travers ces travaux de la littérature nous avons mis en évidence la complexité et la particularité du renforcement du sol à l’aide des fibres. Cette complexité qui est liée aux propriétés intrinsèques de chaque type de fibres.

Chapitre 4 :

Traitement des sols en Algérie par les fibres du palmier dattier et les fibres en caoutchouc

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présentera un état de l'art sur certains travaux de recherche qui se sont intéressés sur l'utilisation de deux types de fibres dans le traitement des sols en Algérie, à savoir :

- Les fibres végétales dont on prendra le cas des fibres du palmier dattier.
- Les fibres artificielles dont on prendra le cas des fibres de caoutchouc.

Les différentes caractéristiques décrivant ces deux types de fibres sont présentées dans ce chapitre.

4.2. Traitement par les fibres du palmier dattier

Le début de XXIème siècle a marqué le retour des industries aux fibres végétales. Avec l'intérêt croissant à l'environnement et l'encouragement des gouvernements et des institutions à l'investissement durable, la tendance est de s'orienter vers ce type de fibres écologiques et fonctionnelles. Ce retour est d'autant plus important, que les ressources pétrolières sont de plus en plus rares et coûteuses.

4.2.1 Le palmier dattier

Le palmier dattier est typiquement cultivé dans les oasis sahariennes. Celui-ci originaire d'Afrique du Nord, est amplement cultivé de l'Arabie jusqu'au Golf Persique, où il forme la végétation caractéristique des oasis. Il est cultivé en outre aux Canaries, dans la Méditerranée septentrionale et dans la partie méridionale des Etats-Unis. C'est une plante sensible au froid, qui pousse sur des terrains de n'importe quelle nature, pourvu qu'ils soient fertiles et bien drainés. Dans les régions à climat doux, il est cultivé en plein air, en position ensoleillée, utilisé surtout comme plante ornementale pour son allure élancée et son feuillage (Sbiai, 2011).

Il existe plus de 2600 espèces de palmiers. On pourrait croire que c'est un arbre qui possède un tronc alors que c'est un monocotylédone qui ne contient pas de bois ni de tronc mais possède un stipe. De plus, c'est une plante dioïque contenant donc des palmiers mâles et des palmiers femelles. Le palmier est très élancé, présentant généralement une hauteur entre 15 et 25 mètres et peut atteindre parfois 30 mètres, couvert de manière visible par les gaines des feuilles tombées. Les feuilles, réunies en un nombre de 20 à 30 maximum, forment une

couronne apicale clairsemée (Figure 4.1). Elles sont pennées, longues jusqu'à 6m; les feuilles supérieures sont ascendantes, les basales recourbées vers le bas, avec des segments coriaces, linéaires, rigides et piquants, de couleur verte.



Figure 4.1. Des palmiers dattiers.

4.2.2 La composition des fibres du palmier dattier

Le palmier dattier se constitue principalement de 10 composantes à savoir (Figure4.2) (www.relais-sciences.org/odj/doc/palmier_dattier) :

1. Palmes

Les palmes sont les feuilles du palmier. Elles sont finement découpées et longues de 4 à 7 mètres. Les feuilles âgées peuvent rester contre le stipe quelques mois voire plusieurs années avant de tomber. L'ensemble des feuilles au sommet du stipe est appelé couronne ; elle peut faire de 6 à 10 mètres d'envergure.

2. Jeune palme

La jeune palme est enroulée pendant toute sa croissance comme les brins d'herbe ou les feuilles de bambous.

3. Régime de dattes

Un régime de dattes est la partie qui supporte les fruits du palmier. On parle aussi de régime pour les bananes. Il est accroché au palmier par la hampe, qui est d'ailleurs tellement résistante qu'elle doit être sciée pour être décrochée. Il peut contenir plus de 1000 fruits.

4. Dattes

Ces fruits sont des baies de forme ovale de 3 cm de long. La chair très sucrée entoure la graine. Récoltées en automne, leur couleur varie du rouge lumineux au jaune lumineux selon

les variétés; elles seront ensuite séchées au soleil. Un palmier dattier peut produire de 10 jusqu'à 100 kg par an.

5. Gourmand

Un gourmand est une branche secondaire qui se développe sur une branche principale d'une plante. Il faut généralement les supprimer car comme leur nom l'indique, ils sont gourmands et épuisent inutilement la plante.

6. Stipe

Le stipe rappelle le tronc des arbres, mais il est en fait composé de fibres végétales des anciennes feuilles. Son diamètre peut varier légèrement selon les conditions climatiques.

7. Cicatrices annulaires

On a l'impression que le palmier a un «tronc recouvert d'écailles». Ces cicatrices annulaires correspondent au point d'attache de la feuille ancienne une fois le pétiole (support de la feuille) tombé. Elles permettent au grimpeur de s'y accrocher pour atteindre les dattes.

8. Rejet

Le rejet est une jeune pousse du végétal, dont il est possible de planter pour obtenir un nouveau palmier. Celui-ci sera choisi par l'homme parmi une sélection des meilleurs palmiers.

9. Bulbe

Se situant à la base du stipe, le bulbe constitue la réserve du palmier. De là, part le système racinaire d'où émergent les racines primaires courtes de moins d'un mètre, et longues de plus de 20 mètres.

10. Racines

Elles sont nombreuses et profondes jusqu'à 20 mètres ; elles sont capables d'aspirer 500 litres d'eau par jour.

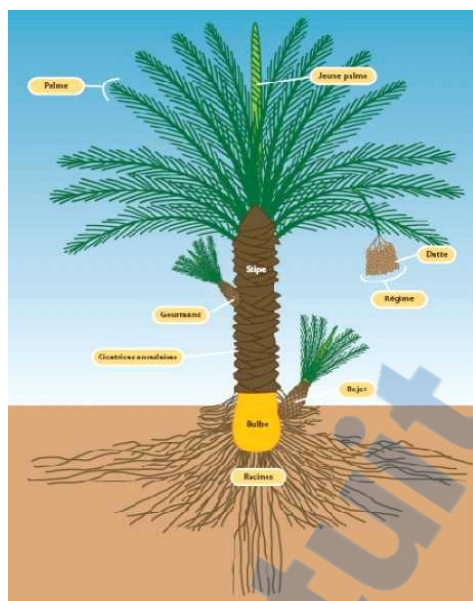


Figure 4.2. Structure générale d'un palmier dattier
(www.relais-sciences.org/odj/doc/palmier_dattier)

4.2.3. Les fibres de palmier dattier

Les palmiers dattiers ont une structure fibreuse, avec quatre types de fibres (Kriker, 2005):

- Les fibres de feuilles dans le pédoncule ;
- Les fibres de baste dans les tiges ;
- Les fibres de bois dans le tronc (Figure 4.3) ;
- Les fibres de surface autour du tronc (appelées localement : lif ou leaf) (Figure 4.4).



Figure 4.3. Section du tronc du palmier dattier



Figure 4.4. Lif autour du tronc du palmier dattier

4.2.4. Traitement des sols algériens par les fibres du palmier dattier

4.2.4.1. Travaux de Taallah et al.2014

Taallah et al.2014 ont étudié l'effet d'introduction des fibres de palmier dattier mâle (Figure 4.5) et la contrainte de compactage sur les propriétés mécaniques et la sensibilité à l'eau de blocs de terre comprimée (BTC).

Une série de BTC ont été confectionnée en utilisant un mélange composé de 70% de sol (provenant de la région de Biskra (Algérie) et qui contient un taux important de gypse, quartz et calcite) et 30% de sable concassé, stabilisé avec trois teneurs en ciment (5%, 6.5% et 8%) et quatre teneurs en fibres de surface de palmier dattier mâle (life) (FSPDM).



Figure 4.5. Fibres de surface de palmier dattier mâle (life) (FSPDM) (Taallah et al.2014)

Selon Taallah et al.2014, l'incorporation des fibres FSPDM conduit à une amélioration, de la résistance à la compression sèche pour les BTC renforcés avec 0,05% de fibres et stabilisés avec 8% en ciment avec une contrainte de compactage de 10 MPa (Figure 4.6). L'augmentation de la contrainte de compactage conduit à une augmentation de la résistance à

la compression sèche (RCS) du BTC (Figure 4.7).

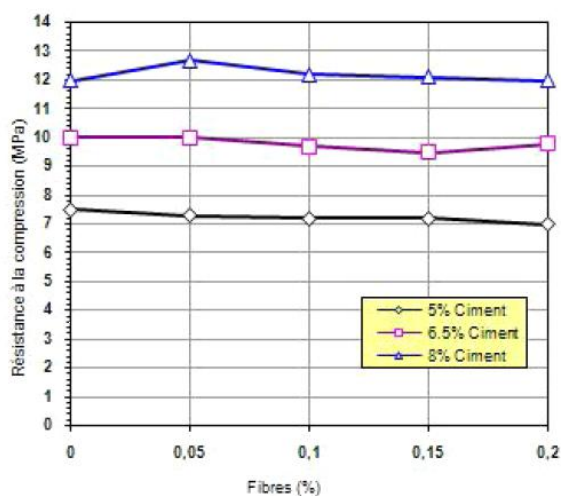


Figure 4.6. Effet des fibres FSPDM sur la résistance à la compression du BTC pour une contrainte de compactage de 10 MPa (Taallah et al.2014).

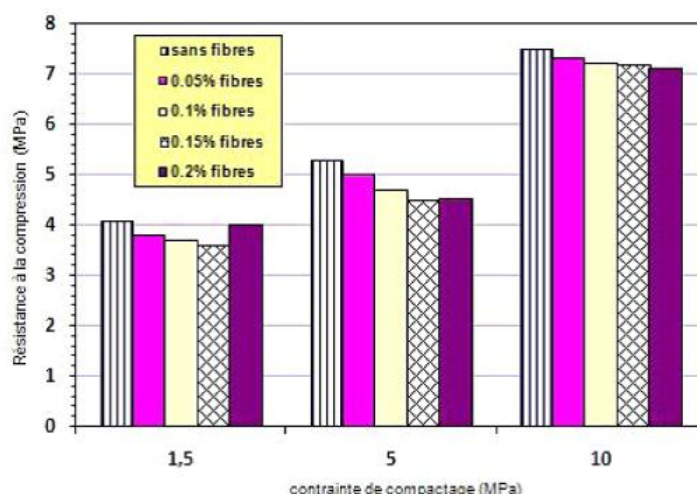


Figure 4.7. Effet de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression sèche du BTC à base de 5% de ciment (Taallah et al.2014).

Néanmoins, l'ajout des fibres a un effet négatif sur la résistance à la compression sèche ou humide ainsi qu'à la résistance à la traction (Figure 4.8). La différence entre la résistance à la compression sèche et humide est d'environ 50% (5% de ciment), 45% (6,5% de ciment) et 30% (8% de ciment). Ceci montre que plus la teneur en ciment est grande, moins sera la différence entre la résistance humide et sèche. Le plus grand rapport (RCS/RCH) est de 1,87 pour 0,2% en fibres et 5% en ciment. Ce rapport qui n'a pas dépassé la valeur limite de 2,

recommandée par plusieurs chercheurs.

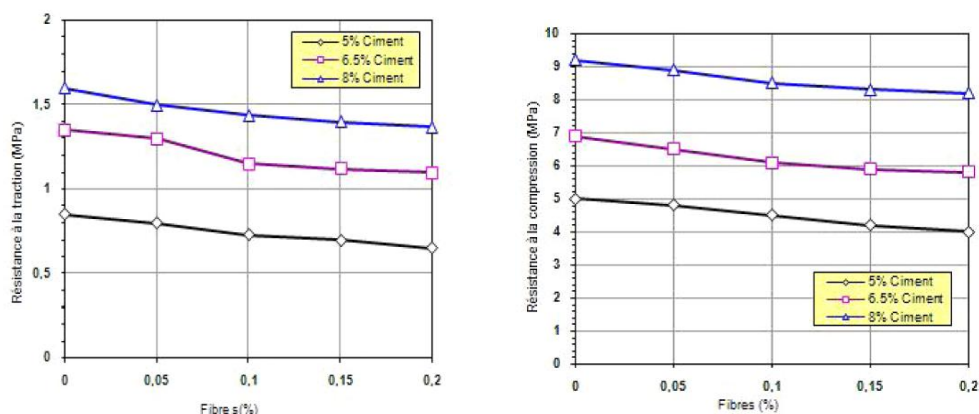


Figure 4.8. Variation des résistances à la compression et à la traction avec la teneur en fibres FSPDM et en ciment (Taallah et al.2014).

4.2.4.2. Travaux de Kazi-Tani (2016)

Quatre (04) types de fibres végétales ont été étudiés par Kazi-Tani (2016) dans le traitement des briques en terre (Adobe) de la région d'Adrar. Ces fibres végétales caractérisées par la paille, Halfa, noyaux de datte et régime de palmier (grappe) (Figure 4.9) de 4 cm de dimensions ont été introduites à deux teneurs variables (3% et 5%) dans un mélange d'argile-sable-eau.



Paille



Halfa



Noyaux de datte



Régime de palmier (grappe)

Figure 4.9. Les fibres végétales (Paille, Halfa, Noyaux de datte et Régime de palmier (grappe))

Des essais mécanique et thermique ont été réalisés sur ces formulations d'adobe traités où il a été constaté que l'introduction des fibres influe négativement sur la résistance à la compression pour les briques de terre renforcées des fibres de noyaux et de régime de dattes, contrairement aux adobes traités des fibres de paille et de Halfa (Figure 4.10). Selon Kazi-Tani (2016), cette augmentation de la résistance peut être attribuée au rôle joué par les fibres de paille et de Halfa en tant que matériau reprenant les efforts de traction ainsi qu'à la bonne liaison entre la terre avec ces fibres. Les adobes renforcés des fibres de paille donnent la résistance mécanique la plus grande par rapport aux autres fibres qui peut être due à la disposition multidimensionnelle des fibres de paille qui confère une bonne adhérence entre le matériau être avec ce type de fibre.

Néanmoins, l'augmentation du taux de fibres quelque soit son type influe négativement sur la résistance mécanique.

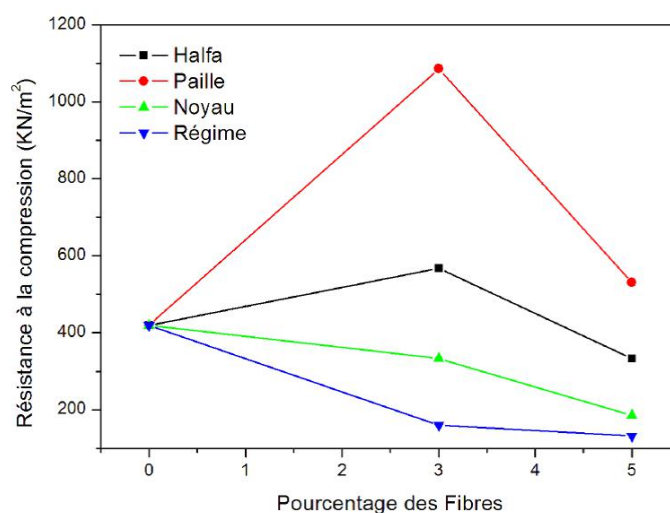


Figure 4.10. Effets du type et de la teneur des fibres végétales sur la résistance à la compression des adobes de terre (Kazi-Tani, 2016).

4.2.4.3. Travaux de Zamoum (2019)

Zamoum (2019) ont étudié l'effet de la teneur en fibres du palmier dattier additionnées avec différents pourcentage (3%, 5% et 7%) sur les caractéristiques mécaniques d'un sol fin

prélevé de la commune de Tidjellabine (Boumerdes).

Ce sol fin est de type A2 selon le guide des terrassements routiers GTR. Les fibres végétales testées sont issues des feuilles des palmiers dattiers (Figure 4.11). Ces feuilles sont jetées ou brûlées chaque année après la récolte des palmiers. Cette ressource naturelle mérite d'être valorisée avec un simple traitement chimique à base de NaOH (Figure 4.11).



Avant traitement chimique



Après traitement chimique

Figure 4.11. Traitement chimique à base de NaOH de la fibre du palmier dattier (Zamoum, 2019)

Le traitement du sol par ajout de ces fibres traitées chimiquement a montré que la valeur de l'indice CBR à 95% de l'OPM s'améliore avec l'ajout de la fibre en teneur croissante (Figure 4.12).

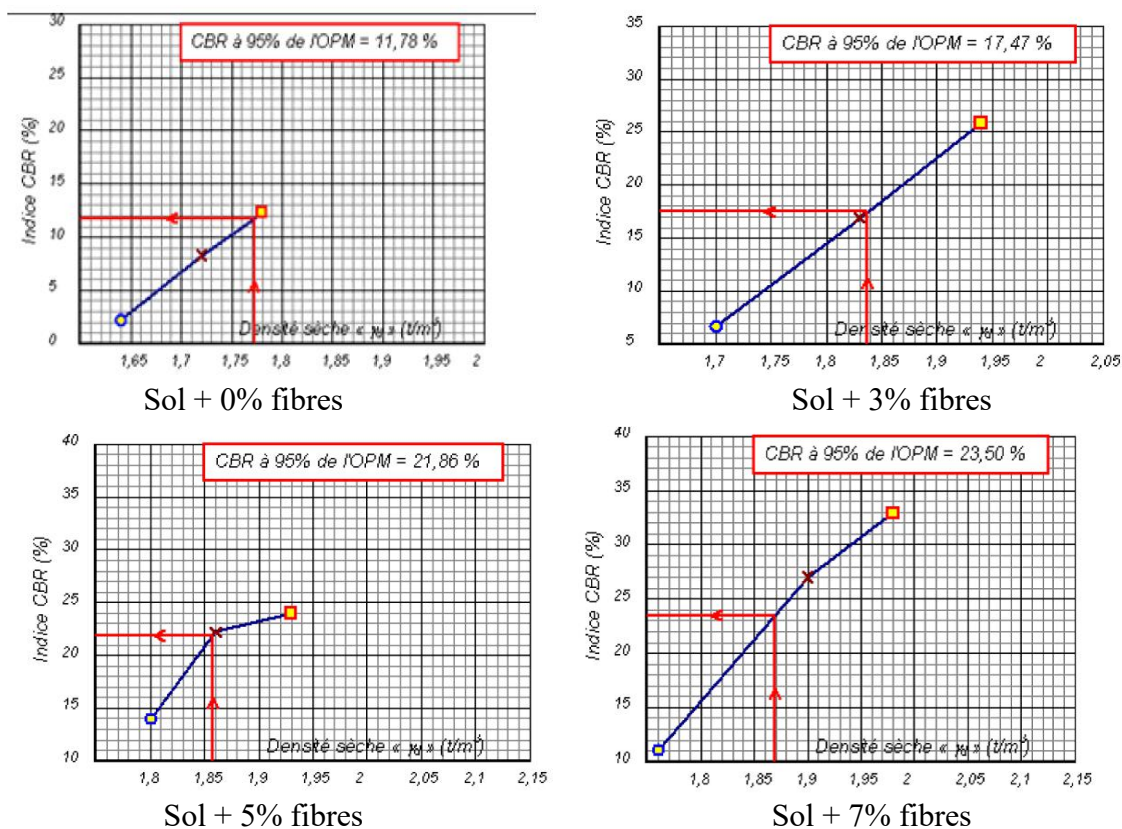


Figure 4.12. Effets de la fibre du palmier dattier sur la portance du sol (Zamoum, 2019).

D'autre part, selon Zamoum (2019), l'utilisation de la fibre de dattier, comme ajout avec le sol étudié influence positivement les caractéristiques mécaniques du sol où une amélioration de ces paramètres a été bien remarquée (Figure 4.13).

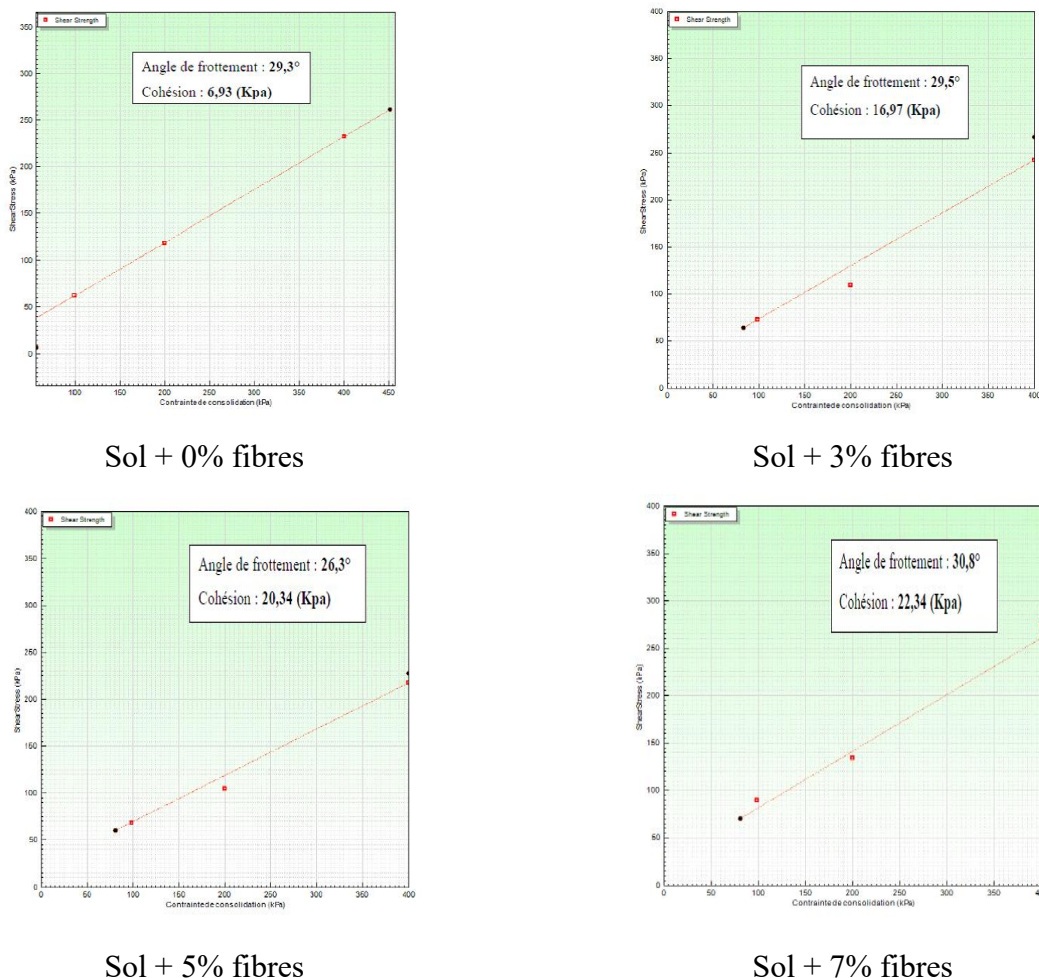


Figure 4.13. Effets de la fibre du palmier dattier sur les paramètres mécaniques du sol (Zamoum, 2019).

4.3. Traitement par les fibres en caoutchouc

Les fibres artificielles sont parmi les types de fibres les plus utilisées dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Elles regroupent les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier, les fibres des pneus de caoutchouc et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction.

4.3.1. Définition et types du caoutchouc

Le terme «caoutchouc» vient du mot indien caoutchouc (bois qui pleure) et rappelle ainsi l'origine du caoutchouc naturel, précurseur des élastomères d'aujourd'hui. Le caoutchouc à

l'état naturel, se présente sous la forme d'une suspension colloïdale de latex secrétée par les plantes à caoutchouc. Les plus importantes de ces plantes sont l'Hévéa basiliens, arbre de la famille des euphorbiacées et d'autres espèces du même genre (Figure 4.14).

Les caoutchoucs, appelés aussi de manière plus scientifique les élastomères, appartiennent à la famille des polymères. Ils ont pour spécificité d'être thermoplastiques (600 à 1000% d'allongement). Une déformation importante peut leur être appliquée et une fois cette contrainte retirée, ils retrouvent leur forme initiale. Ils possèdent une grande plage thermique d'utilisation, entre -50°C environ. Ils sont amortissants ou résilients. Dans le langage courant, le terme caoutchouc recouvre à la fois le caoutchouc naturel et les caoutchoucs synthétiques. (Ihcene, 2008).



Figure 4.14. Arbre à caoutchouc (*Hevea brasiliensis*)

4.3.2. Propriétés du caoutchouc

Les caoutchoucs possèdent de très nombreuses propriétés. Ils sont notamment élastiques, étanches antivibratoires. La combinaison de ces trois propriétés leur assure un spectre d'utilisation extrêmement large. Les trois principales propriétés des caoutchoucs : élasticité, étanchéité et amortissement.

- **Elasticité**

La propriété d'élasticité peut être très facilement illustrée par quelques applications grand public : l'élastique de bureau ou le saut à l'élastique. L'élasticité se caractérise par la capacité d'un matériau à se déformer sous contrainte et à reprendre sa dimension initiale lorsque cesse la contrainte. Les caoutchoucs ne sont pas les seuls matériaux élastiques, mais ils sont les seuls à offrir une telle capacité de déformation. Ainsi, un ressort d'acier n'accepte guère de

subir un allongement de plus de 10%. En revanche, les caoutchoucs peuvent s'allonger couramment jusqu'à 500% et dans certains cas, jusqu'à 1000%. On parle alors d'hyper-élasticité. (Labouazda, 2011).

De surcroît, les caoutchoucs conservent leurs propriétés d'élasticité à très basse température. Leur transition vitreuse, c'est-à-dire la température à laquelle ils se rigidifient se situe, en règle générale, aux alentours de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Labouazda, 2011).

Exemples d'application : joints de portière d'automobile, flexibles, profilés pour portes et fenêtres, balles de tennis ou de golf, gants, etc.

- **Étanchéité**

La seconde des grandes propriétés des caoutchoucs est l'étanchéité. Les caoutchoucs sont ainsi imperméables à l'air, aux gaz et à l'eau. Ils ont également une grande capacité à filtrer le bruit (Labouazda, 2011).

- **Amortissement**

Le caoutchouc possède également la capacité d'amortir les chocs ou de filtrer les vibrations. Il s'agit là de deux propriétés extrêmement importantes dans le monde des transports (automobile, aéronautique, aérospatial, ferroviaire...), dans celui de l'industrie (production d'énergie, machine/outil, etc.) ou encore du BTP (appuis de pont, plots antisismiques, etc.). (Labouazda, 2011).

Exemples d'application : pneumatique (amortissement des irrégularités de la route), pièces antivibratoires (filtration des vibrations en provenance du moteur ou des organes de liaison au sol).

4.3.3. Caractéristiques des fibres de caoutchouc

Les fibres de caoutchouc de pneus sont constituées d'un mélange complexe d'élastomères, le polyisoprène, le polybutadiène et de styrène-butadiène. L'acide stéarique (1,2%), l'oxyde de zinc (1,9%), une huile de dilution (1,9%) et du noir de carbone (31,0%) sont également aussi des éléments importants de pneus (Amari, 1999; Alamo, 2011). Certains paramètres à la fois physiques, chimiques et mécaniques du comportement de fibres de caoutchouc des pneus usés sont donnés dans les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3.

Tableau 4.1. Propriétés physiques des fibres de caoutchouc de pneu usées (Bekhiti, 2019).

Propriétés physiques	Valeurs
Densité sèche	0.44
Spécifique gravité	0.83
Longueur (mm)	3 à 10 mm
Diamètre (mm)	0.45mm
Taux de fibres d'acier	0%
Taux de fibres textiles	Inférieur à 2%

Tableau 4.2. Propriétés chimiques des fibres de caoutchouc de pneu usées (Bekhiti, 2019).

Matériaux/Élément	Valeurs
Caoutchouc (%)	48
Noir de carbone (%)	31
Oxide zinc (%)	1.9
Soufre (%)	1.2
Additifs (%)	15

Tableau 4.3. Caractéristiques mécaniques de fibres de caoutchouc.

Propriétés mécaniques	Valeurs
Résistance à la traction (MPa)	16 - 20
Allongement (%)	400 - 500

4.3.4. Traitement des sols algériens par les fibres en caoutchouc

4.3.4.1. Travaux de Bekhiti et al.2016

Bekhiti et al.2016 ont étudié l'utilisation des fibres de caoutchouc des pneus usagés afin de réduire le potentiel de gonflement des argiles. Deux types de sols argileux ont été étudiés, l'argile de Ayaida (Oran) classifiée en tant qu'argile CL et la bentonite de Maghnia (Tlemcen) classifiée en tant qu'argile CH.

Les fibres synthétiques utilisées sont des fibres de caoutchouc issu des pneus usés qui se composent essentiellement de caoutchouc synthétique ou naturel, de noir de carbone et d'oxyde de silicium, ainsi que d'acier et de tissu (Figure 4.15).

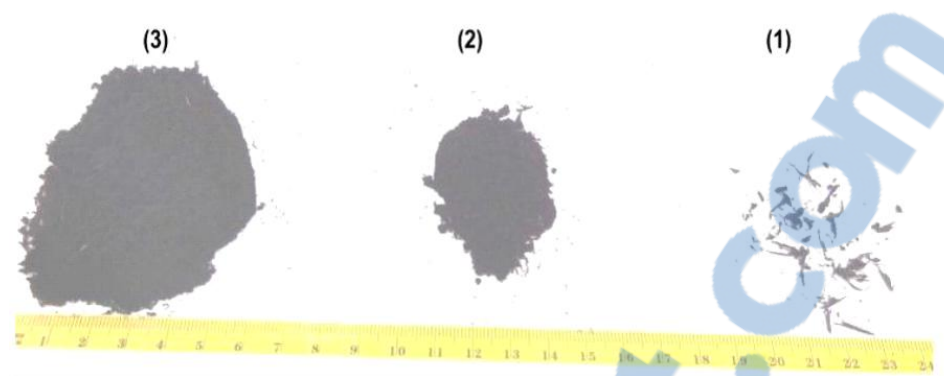
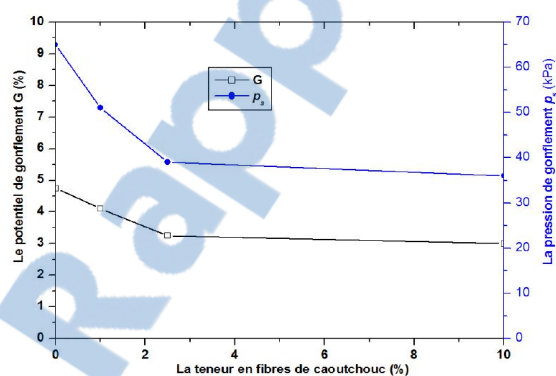


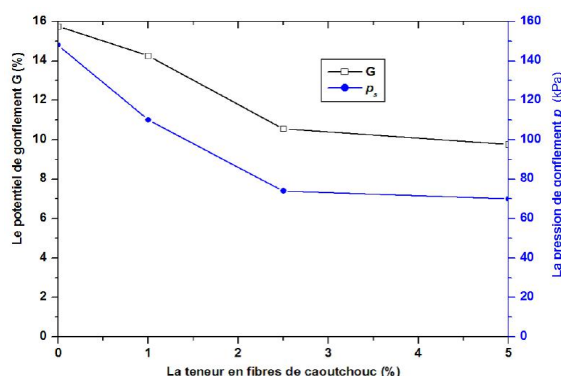
Figure 4.15. Fibres de caoutchouc des pneus usés (1), poudre de caoutchouc (2 et 3)

L'analyse des essais de compressibilité effectués sur des mélanges argile-fibres a montré selon Bekhiti et al.2016 que d'une part, l'utilisation des fibres de pneus usés à des teneurs croissantes réduit considérablement le potentiel de gonflement des deux sols argileux (Figure 4.16). Plus le taux de poudre de caoutchouc augmente plus le gonflement de l'argile diminue.

Pour la bentonite de Tlemcen, le taux de gonflement maximal selon Bekhiti et al.2016 est de 15,75%. Une fois mélangée à des fibres de caoutchouc, le taux de gonflement diminue à 3,25% pour un taux de fibres de 50% avec une réduction d'environ 79%. Pour l'argile d'Oran, le taux de gonflement maximal noté est de 4,75% avec une réduction de gonflement allant de 13,68% pour un taux de fibres de 10% à une réduction de 77,89% pour un taux des fibres de 50%.



a. Argile de Ayaida (Oran)



b. Bentonite de Maghnia (Tlemcen)

Figure 4.16. Effet de la teneur des fibres en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement des deux argiles (Bekhiti et al.2016).

D'autre part, la pression de gonflement diminue aussi avec la teneur en fibres de caoutchouc pour les deux sols argileux (Figure 4.19). Ceci peut être attribué au remplacement de l'argile par les fibres de caoutchouc des pneus usés, et la résistance offerte par les fibres jaillissant par le contact de l'argile-fibre (Trouzine et al. 2012).

4.3.4.2 Travaux de Layeb et Halbaoui (2017)

Layeb et Halbaoui (2017) ont étudié l'effet de l'utilisation de la fibre de caoutchouc par rapport à la fibre de verre sur les propriétés mécaniques de bloc de terre comprimée. Ces fibres employés (Figure 4.17) à des teneurs variables ont été associées à des liants lors de ce traitement, composés de chaux (12%) et de ciment (10%). Ces BTC sont constitués d'un sol granulaire de la région de Djelfa, choisi sur la base de sa disponibilité et de son abondance dans la région. Une stabilisation de ce sol granulaire par le biais d'un sable de dune a été effectuée en vue d'une correction de la courbe granulométrique, rendant ainsi le mélange final (sol-sable de dune) dans le fuseau recommandé pour la fabrication des BTC.



Fibre de caoutchouc



Fibre de verre (type Cemfil AR)

Figure 4.17. Les fibres de caoutchouc et de verre utilisées dans le traitement des BTC (Layeb et Halbaoui, 2017).

Des mesures de la résistance à la compression des BTC aux états sec et humide par le biais de l'essai de compression simple et de la résistance à la traction sèche en utilisant l'essai de traction par fendage ont été effectuées.

Selon Layeb et Halbaoui (2017), la résistance à la compression à 28j augmente avec la teneur en fibres de verre et de caoutchouc (Figure 4.18). Cette augmentation atteint un seuil de 0,2% qui au-delà duquel une diminution de cette résistance est observée jusqu'à 0,3%.

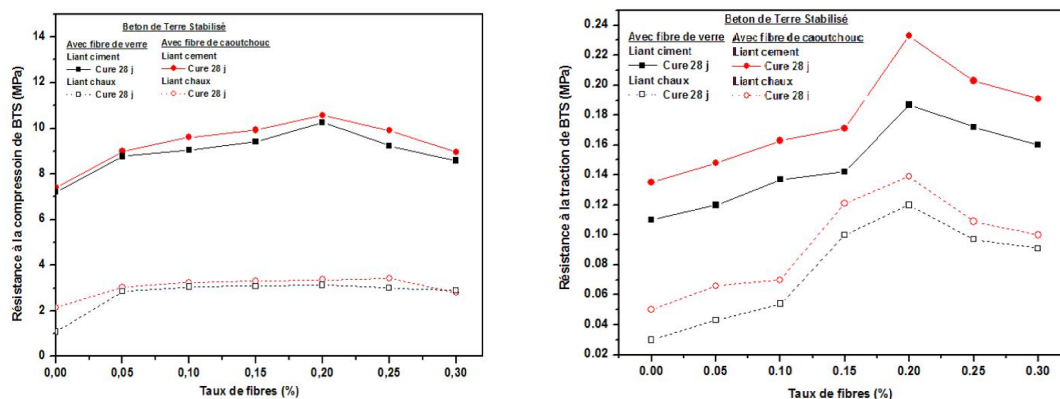


Figure 4.18. Effets de la teneur des fibres (caoutchouc-verre) sur la résistance à la compression et à la traction du BTC (Layeb et Halbaoui 2017).

L'ajout des fibres de caoutchouc sur les BTC, conduit à une légère augmentation des résistances à la compression et à la traction par rapport à celles des fibres de verre (Figure 4.18).

Selon Layeb et Halbaoui (2017), la présence des fibres dans les BTC sous une contrainte importante rendent le mélange trop élastique après chargement, en particulier pour les fibres de caoutchouc. Ceci entraîne une augmentation du réseau dans les blocs de terre stabilisé, ce qui se répercute favorablement sur la résistance.

4.3.4.3 Travaux de Meddah et Merzoug (2016)

Meddah et Merzoug (2016), ont étudié l'utilisation des fibres de caoutchouc incorporés sous formes aléatoires et des teneurs variables (0,25% à 2%) dans un sable de dune de la ville de Boussaâda (M'SILA) (Figure 4.19).

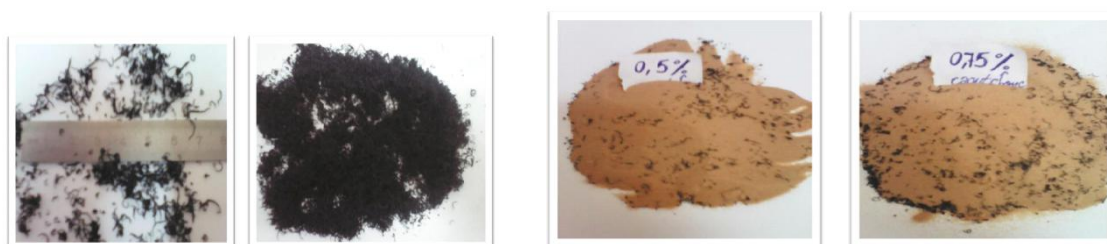


Figure 4.19. Fibres de caoutchouc et mélange du sable de dune avec ces fibres à différents pourcentages (Meddah et Merzoug 2016).

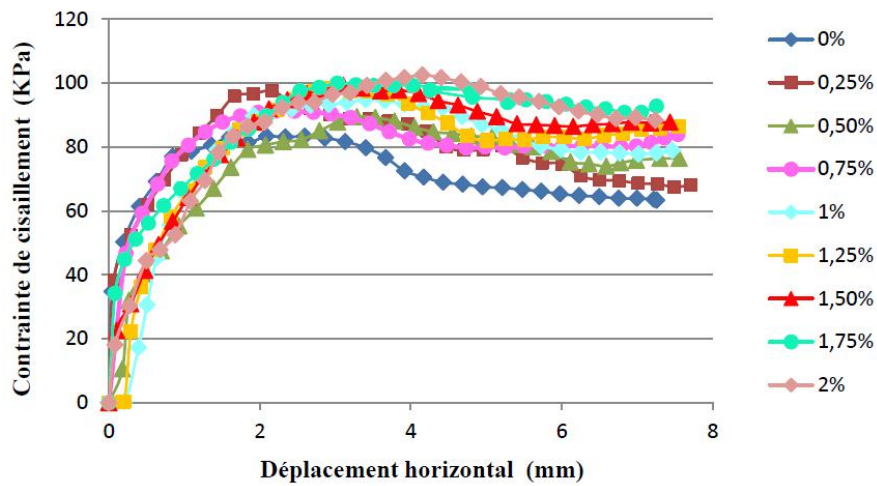
L'étude des caractéristiques de résistance au cisaillement direct de ce sable fibré aux états lâche et dense a été effectuée dans leur programme expérimental.

Selon Meddah et Merzoug (2016), l'inclusion des fibres de caoutchouc dans un sol sableux

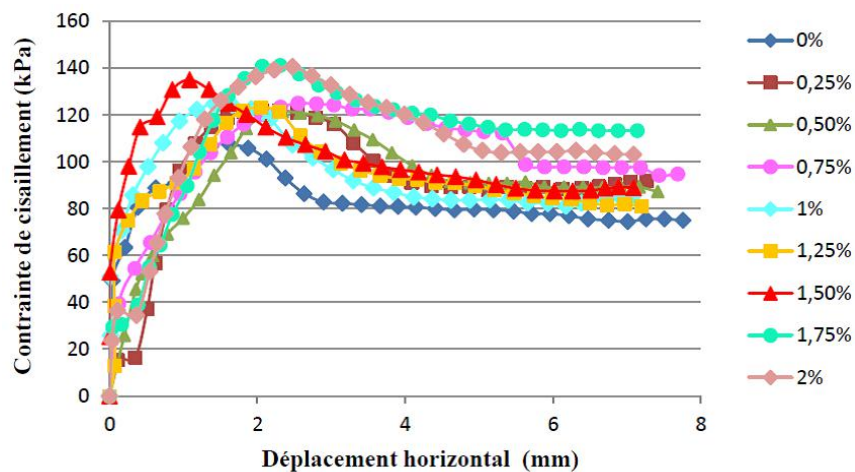
permet d'améliorer la résistance au cisaillement et d'apporter plus de ductilité au sable (Figure 4.20).

Les déformations s'évaluent plus lentement en présence des fibres caoutchouteuses, ce qui signifie que l'existence des fibres dans le sable réduit la cinétique de développement des déformations et rendra la rupture plus ductile. Cette dernière propriété qui est souhaitable dans les ouvrages géotechniques.

Cette présence des fibres sur les courbes de cisaillement est plus apparente pour le cas du sable dense que celui du sable lâche (Figure 4.20). Ceci est cohérent puisque le mécanisme du comportement des sols sableux est basé sur l'état de densification du squelette granulaire.



Sable lâche cisailé à une contrainte normale de 100 kPa



Sable dense cisailé à une contrainte normale de 100 kPa

Figure 4.20. Effets des fibres de caoutchouc sur les courbes de cisaillement aux deux états de densité du sable (Meddah et Merzoug 2016).

L'augmentation du dosage de caoutchouc dans le sable change significativement la pente de la courbe intrinsèque (Figure 4.21). Ce changement est plus remarqué pour le sable dense que celui à l'état lâche. En effet, le mécanisme de d'enchevêtrement-désenchevêtrement du squelette granulaire conditionne le comportement mécanique des sols sableux, plus ce dernier est serré plus le frottement est grand et par conséquent la résistance est élevée. L'existence de la fibre selon Meddah et Merzoug 2016 dans le squelette granulaire empêche le déplacement relatif entre les grains créant ainsi un frottement supplémentaire.

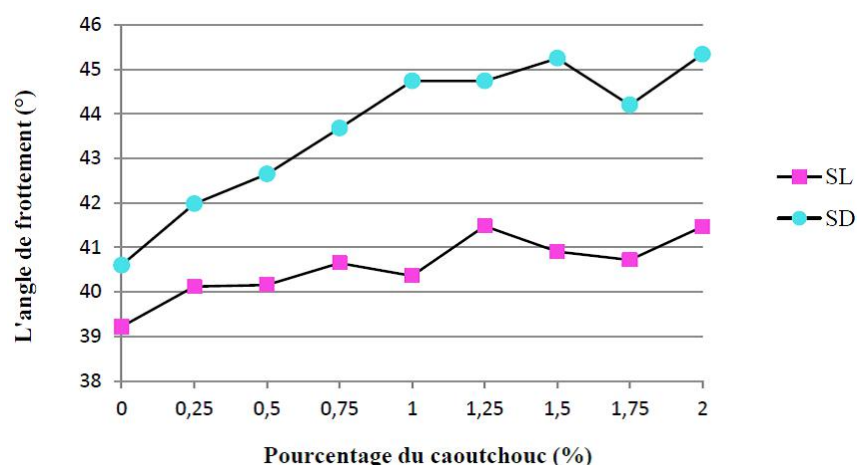


Figure 4.21. Effet des fibres de caoutchouc sur l'angle de frottement interne du sable dense (SD) et lâche (SL) (Meddah et Merzoug 2016).

4.4. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une synthèse bibliographique succincte des travaux de recherche en Algérie utilisant les fibres végétales de type palmier dattier et les fibres synthétiques de type caoutchouc, comme renfort dans la matrice du sol. Différents modes de traitement ont été exploités en introduisant ces deux types de fibres dans le sol en vue d'améliorer ces caractéristiques mécaniques telles que leurs résistances au cisaillement, à la compression ainsi que leur potentiel de gonflement et de compressibilité.

L'utilisation de ces fibres du palmier dattier et de caoutchouc a permis d'aboutir selon certaines recherches aux conclusions suivantes :

1. L'incorporation des fibres du palmier dattier conduit à une amélioration de la résistance à la compression sèche pour les BTC. Cette amélioration qui s'intensifie avec l'augmentation de la contrainte de compactage. Néanmoins, l'augmentation du taux de fibres quelque soit son

type influe négativement sur la résistance mécanique.

D'autre part, l'évolution du comportement thermique des adobes traités aux fibres a révélé que la conductivité thermique diminue avec l'ajout des fibres où son intensité varie considérablement avec le type de fibres. Ainsi, l'adobe armé de fibres possède une meilleure propriété thermique que l'adobe non fibré.

2. L'utilisation des fibres en caoutchouc de pneus usés à des teneurs croissantes réduit considérablement le potentiel de gonflement des sols argileux. Plus le taux de poudrette de caoutchouc augmente plus le gonflement de l'argile diminue. D'autre part, la pression de gonflement diminue aussi avec la teneur en fibres de caoutchouc. Ceci peut être attribué au remplacement de l'argile par les fibres de caoutchouc des pneus usés, et la résistance offerte par les fibres jaillissant par le contact de l'argile-fibre.

3. La résistance à la compression à 28j augmente avec la teneur en fibres de caoutchouc. Cette augmentation atteint un seuil qui au-delà duquel une diminution de cette résistance est observée. La présence de ces fibres caoutchouteuses dans les BTC sous une contrainte importante rend le mélange trop élastique après chargement. Ceci entraîne une augmentation du réseau dans les blocs de terre stabilisé, ce qui se répercute favorablement sur la résistance.

4. L'inclusion des fibres de caoutchouc dans un sol sableux permet d'améliorer la résistance au cisaillement et d'apporter plus de ductilité au sable. Les déformations s'évaluent plus lentement en présence de ces fibres caoutchouteuses, ce qui signifie que l'existence des fibres dans le sable réduit la cinétique de développement des déformations et rendra la rupture plus ductile. Cette dernière propriété qui est souhaitable dans les ouvrages géotechniques.

À travers ces travaux de la littérature nous avons mis en évidence l'intérêt et la particularité du renforcement du sol à l'aide de ces fibres végétale et synthétique. Cette particularité est liée aux propriétés intrinsèques de chaque type de fibres.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire entrent dans le cadre général de la valorisation sédiments dragué des barrages en Algérie. Notre contribution est essentiellement centrée sur les possibilités de la réutilisation dans le domaine des travaux routiers.

L'envasement des retenues de barrages en Algérie a pris une ampleur importante, limitant ainsi leur capacité (diminution importante du volume d'eau stockée). Le désenvasement est un moyen de lutte contre l'envasement néanmoins les conséquences engendrées sont le dépôt sédimentaire et les problèmes liés à son stockage.

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. De nombreux sous-produits industriels ou déchets ont trouvé des applications dans les matériaux routiers, après une éventuelle opération de traitement . Ainsi, il est possible de bénéficier de ces expériences et des méthodologies développées en laboratoire pour l'étude de la valorisation des sédiments dans les matériaux routiers.

L'utilisation des fibres comme technique de renforcement des sols en général et des sédiments en particulier est devenue une méthode très répondue.

Sur la base de la recherche bibliographique effectuée dans cette étude, on peut conclure ce qui suit :

1. Différentes familles de fibres sont utilisées dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols en particulier la résistance au cisaillement, à la compression ainsi que le potentiel de gonflement et de compressibilité.
2. L'incorporation des fibres du palmier dattier conduit à une amélioration de la résistance à la compression sèche pour les BTC. Cette amélioration qui s'intensifie avec l'augmentation de la contrainte de compactage. Néanmoins, l'augmentation du taux de fibres quelque soit son type influe négativement sur la résistance mécanique.
3. L'évolution du comportement thermique des sols traités aux fibres a révélé que la conductivité thermique diminue avec l'ajout des fibres où son intensité varie considérablement avec le type de fibres.
4. L'utilisation des fibres en caoutchouc de pneus usés à des teneurs croissantes réduit

considérablement le potentiel de gonflement des sols argileux. Plus le taux de poudrette de caoutchouc augmente plus le gonflement de l'argile diminue. D'autre part, la pression de gonflement diminue aussi avec la teneur en fibres de caoutchouc. Ceci peut être attribué au remplacement de l'argile par les fibres de caoutchouc des pneus usés, et la résistance offerte par les fibres jaillissant par le contact de l'argile-fibre.

5. La résistance à la compression à 28j augmente avec la teneur en fibres de caoutchouc. Cette augmentation atteint un seuil qui au-delà duquel une diminution de cette résistance est observée. La présence de ces fibres caoutchouteuses dans les BTC sous une contrainte importante rend le mélange trop élastique après chargement. Ceci entraîne une augmentation du réseau dans les blocs de terre stabilisé, ce qui se répercute favorablement sur la résistance.
6. L'inclusion des fibres de caoutchouc dans un sol sableux permet d'améliorer la résistance au cisaillement et d'apporter plus de ductilité au sable. Les déformations s'évaluent plus lentement en présence de ces fibres caoutchouteuses, ce qui signifie que l'existence des fibres dans le sable réduit la cinétique de développement des déformations et rendra la rupture plus ductile. Cette dernière propriété qui est souhaitable dans les ouvrages géotechniques.

À travers cette analyse obtenue des travaux de la littérature, nous avons mis en évidence l'intérêt et la particularité du renforcement du sol à l'aide de ces fibres à la fois végétale et synthétique. Cette particularité qui est d'autant plus liée aux propriétés intrinsèques que chaque type de fibre présente.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABESSOLO D., BIWOLE A.B., FOKWA D., GANOU KOUNGANG B.M. et NYOUMA YEBGA B. (2020). Effets de la longueur et de la teneur des fibres de bambou sur les propriétés physicomécaniques et hygroscopiques des Blocs de Terre Comprimée (BTC) utilisés dans la construction. *Afrique SCIENCE* 16(4), 13-22, ISSN 1813-548X

ACHOUR R. (2013). 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.

AGOSTINI F. (2006). Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 2006.

AL-AKHRAS N. M., ATTOM M.F., AL-AKHRAS K.M., MALKAWI A.I.H. (2008) : Influence of fibers on swelling properties of clayey soil. *Geosynthetics International*, 2008, 15, No. 4, 304-309

ALVISET L. (1994). Matériaux de Terre Cuite "Techniques de l'Ingénieur" 1994.

ALZIEU C., ANDRAL C., BASSOULLET P. et BOUTIER B. (2003). Bioévaluation de la qualité environnemental des sédiments portuaires et des zones d'immersion. Plouzane édition Ifremer, 2003, 247p.

BEKHITI M., TROUZINE H., BELABDELOUAHAB F. (2016). Influence des fibres de caoutchouc sur le potentiel de gonflement des argiles. Journée d'étude scientifique et technique sur les produits géosynthétiques. Ouargla (Algérie).

BELAS N., BELARIBI O., MEBROUKI A., BOUHAMOU N. (2011). Valorisation des sédiments de dragage dans les bétons, INVACO2 : Séminaire International, Innovation & Valorisation en Génie Civil & Matériaux de Construction, Rabat – Maroc / 23-25 Novembre 2011.

BENALLAL L. AMMARI M., FRAR I., AZMANI A., BELMOKHTAR N. (2011). Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc). *Revue PARALIA*, Volume 4 pp 5.1-5.13, 2011.

BENASLA M. (2015). 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.

BOUKEMMOUM N., NOUAOURIA A. (2019). Valorisation des sédiments de barrages. Cas du barrage de Ain Dalia (Souk Ahras). Mémoire de Master en Génie-Civil, Université de Guelma (Algérie)

BOURABAH M.A. (2012). Comportement mécanique des sols fins. Application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière. Thèse de Doctorat en Génie-Civil, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.

BOUTOUIL M., SAUSSAYE L. (2011). Influence de l'ajout d'un correcteur granulométrique sur les propriétés des sédiments traités aux liants hydrauliques. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. V.15 (2).

CAI Y., SHI B., CHARLES W.W., TANG C. (2006). Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology*, 87(2006) , pp. 230-240

KRIKER A., MEKHERMECHE A. (2015). Thermal study of earth bricks reinforced by date palm fibers. *International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15, Energy Procedia 74*, 919-925

DUBOIS V. (2006). Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins», thèse de doctorat, Université d'Artois, 2006.

ESSAIDI N. (2013). Formulation de liant aluminosilicaté de type géopolymère à base de différentes argiles Tunisiennes », thèse de doctorat, Limoges, 2013.

GHAVAMI K., FILHO R.D.T., BARBOSA N.P. (1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cem Concr Compos*; 21(1):39–48.

GRAY, D. H., AL-REFEAI, T. (1986). Behavior of fabric – versus fiber reinforced sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 112, No 8, pp 804-820.

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

KAZI-TANI (2016). Comportement thermique et mécanique des adobes traités aux fibres végétales. Mémoire de Master en Génie-Civil, Université d'Adrar (Algérie)

LAYEB A., HALBAOUI A. (2017). Caractérisations physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneus usés-verre). Mémoire de Master en Génie-Civil, Université de DJELFA, 2017

MAITY, J., CHATTOPADHYAY, B. C., MUKHERJEE, S.P. (2011). Variation of compaction characteristics of sand randomly mixing with various natural fibers », Proceedings of Indian Geotechnical Conference, December 15-17, Kochi, No. H -287.

MARANDI S.M., BAGHERIPOUR M.H., RAHGOZAR R. et ZARE H. (2008). Strength and Ductility of Randomly Distributed Palm Fibers Reinforced Silty-Sand Soils. American Journal of Applied Sciences 5 (3): 209-220.

MEDDAH A., MERZOUK K. (2016). Caractérisation d'un sol sableux contenant des fibres caoutchouteuses. Mémoire de master en Génie-Civil, Université de M'SILA, 2016

MEKERTA B., SEMCHA A., BENAÏSSA A., KAZI-AOUEL-BENSLAFA F. (2009). Comportement mécanique des sédiments de dragage pour leur valorisation en technique routière. SBEIDCO-1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, 12-14 October 2009, ENSET Oran, Algérie.

MILLOGO Y., MOREL J-C, AUBERT J.E., GHAVAMI K. (2014) Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. Constr Build Mater; 52:71–78.

NAMANGO (2006). Development of cost-effective earthen building material for housing wall construction : Investigations into the properties of compressed earth blocks stabilized with sisal vegetable fibers. Cassava Powder and Cement Compositions. A Doctoral Dissertation, Brandenburg Technical University, Cottbus, Germany.

POUHET R (2015). Formulation and durability of metakaolin-based geopolymers, thèse de doctorat, Toulouse , 2015.

REKIK B. (2008). Compressibilité d'un sédiment de dragage traité au ciment à forts rapports E/C. Xèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, 14-16 Octobre 2008, Sophia Antipolis, France.

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

REMINE B (2006). 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.

SIVAKUMAR BABU, G. L., VASUDEVAN, A. K. (2008). Strength and stiffness response of coir fiber – reinforced tropical soil. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 20, No9, pp 571 -577.

TAALLAH B., GUETTALA A., KRIKER A. (2014). Effet de la teneur en fibres de palmier dattier et de la contrainte de compactage sur les propriétés des blocs de terre comprimée. Courrier du savoir – n°18, pp.45-51.

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

TROUZINE H., BEKHITI M., ASROUN N. (2012). Effects of scrap tire rubber fibre on swelling behaviour of two clayey soils in Algeria. Geosynthetics International, 19, N°2, 2012

ZAMOUM L. (2019). Etude de l'impact du renforcement de la couche de forme dans les chaussées par des biomatériaux–fibre de Dattier. Mémoire de Master Professionnel en Sciences de la terre. Université de Khemis Miliana (Algérie).

ZERZOURI M. (2015). Valorisation de quelques argiles Marocaines pour l'élaboration de matériaux géopolymères. Mémoire de fin d'études, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès (Maroc).