



Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd
Faculté de Technologie
Département d'hydraulique



Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de :
Doctorat en Sciences en hydraulique
Option : Science hydraulique

Sous le Thème :

**Comportement Mécanique De La Boue D'extraction Du
Barrage Koudiet Meddaouar Pour Son Utilisation Dans Le
Domaine Industriel**

Présentée par :

BENAICHA Amar Chérif

Devant le jury composé de :

M. LAHBARI Nouredine	Prof.	Université de Batna 2	Président
M. FOURAR Ali	Prof.	Université de Batna 2	Rapporteur
M. MAMEN Belgacem	MCA	Université de Khenchela	Examineur
M. BOUTRID Abdelaziz	MCA	Université de Khenchela	Examineur
M. YAHIAOUI Djarir	MCA	Université de Batna2	Invité

Octobre 2021

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à M. FOURAR Ali, professeur à l'université Mostefa Ben Boulaïd – Batna 2- qui m'a fait l'honneur de diriger ce travail. Il a été la personne qui m'a initié au travail de recherche. A travers nos discussions, souvent longues mais toujours fructueuses, il m'a amené à avoir un regard critique sur un nombre des phénomènes, qui paraissaient souvent être des évidences. Je tiens à leur assurer de mon profond respect et sympathie.

Dans les mêmes expressions de remerciements, je suis très reconnaissant envers les personnes qui sans son intervention le travail de thèse n'aura jamais eu lieu, je l'ai nommée les frères, Docteur Mansouri Tarek, Docteur Saadi Mohamed et Docteur YAHIAOUI Djarir.

Je tiens également à remercier M.LAHBARI Noureddine, Professeur à l'université Mostefa Ben Boulaïd – Batna 2- d'avoir présidé le jury.

Je remercie Monsieur MAMEN Belgacem Maitre de conférence à l'université de Khenchela et Monsieur BOUTRID Abdelaziz Maitre de conférence à l'université de Khenchela, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Enfin, je remercie, ma famille et mes proches pour leur soutien et leurs encouragements, sans lesquels je n'aurais jamais pu arriver au bout de mes projets.

Dédicaces

En signe de respect et de reconnaissance,

Je dédie ce modeste travail à

La mémoire de mon père

Ma mère

Ma femme

Mes enfants

A mes frère et mes sœurs, à

Tous mes amis (es).

Mes collègues, et à tous

Personne ayant contribué à ce travail de près ou de loin

Résumé

La sédimentation des réservoirs des barrages est un problème complexe qui comporte plusieurs dimensions dont les taux de remplissage et les caractéristiques des sédiments accumulés. L'apport des sédiments depuis les bassins fluviaux est singulièrement élevé dans cette région par le fait de son climat semi-aride et en raison surtout de la faible protection végétale. La quantité de vase accumulée depuis la construction de ce barrage est estimée à 6 millions de m³. Cet engorgement limite donc sévèrement sa capacité de stockage et, par voie de conséquence, sa durée d'exploitation. L'extraction des sédiments accumulés dans la retenue du barrage, est impérative donc, sous peine de le voir périr à moyen terme. Ces sédiments sont, en revanche, d'une grande valeur géotechnique et mécanique. Les résultats des essais conduits au laboratoire nous ont permis d'identifier les différents sédiments d'un point de vue physique et géotechnique. Ces matériaux doivent bien entendu répondre à certains critères rigoureux, en termes de résistance mécanique, de durabilité et d'impact environnemental. L'engorgement des barrages Algériens est un phénomène notoire où plus de 65 Mm³/an de sédiments se déposent chaque année dans ces retenues. Les conséquences inhérentes à ce grave problème ont été catastrophiques, incluant une réduction considérable de 43 à 84% de la capacité d'emmagasinement et de stockage des barrages et une nette détérioration de la qualité des eaux pouvant avoir pour résultat la détérioration du fonctionnement des écosystèmes et conduire à des changements irréversibles. La vase présente en abondance dans les barrages Algériens peut constituer donc une ressource potentielle à exploiter judicieusement vers l'amélioration des performances des matériaux de construction. Cette étude a pour objectif d'évaluer la faisabilité de la valorisation des vases en analysant les connaissances des sédiments du barrage de **Koudiat Medouar**. La démarche expérimentale que nous avons adoptée nous a permis de déterminer les caractéristiques des matériaux nécessaires pour la réalisation des briques en terre comprimée (BTC) conformément aux recommandations des guides techniques de construction.

Mots clés : sédiments, comportement mécanique, brique, écosystème.

Abstract

Sedimentation of dam reservoirs is a complex problem with several dimensions including filling rates and characteristics of the accumulated sediments. The supply of sediments from river basins is particularly high in this region due to its semi-arid climate and especially due to the poor vegetation protection. The quantity of silt accumulated since the construction of this dam is estimated at 6 million m³. This siltation therefore severely limits its storage capacity and consequently its operating life. The extraction of the sediments accumulated in the dam's reservoir is therefore imperative, on pain of seeing it perish in the medium term. These sediments are, however, of great geotechnical and mechanical value. The results of the tests conducted in the laboratory have enabled us to identify the different sediments from a physical and geotechnical point of view. The results of the laboratory tests allowed us to identify the different sediments from a physical and geotechnical point of view. These materials must of course meet certain rigorous criteria in terms of mechanical strength, durability and environmental impact. The silting up of Algerian dams is a notorious phenomenon where more than 65 Mm³/year of sediments are deposited each year in these dams. The consequences of this serious problem have been catastrophic, including a considerable reduction of 43 to 84% in the storage capacity of the dams and a marked deterioration in water quality that can result in the deterioration of ecosystem functioning and lead to irreversible changes. The silt present in abundance in Algerian dams can thus constitute a potential resource to be judiciously exploited towards the increase in the performance of construction materials. The objective of this study is to evaluate the feasibility of the valorization of silt by analyzing the knowledge of the sediments of the Koudiat Medouar dam. The experimental approach that we adopted allowed us to determine the characteristics of the materials necessary for the realization of compressed earth bricks (CEB) in accordance with the recommendations of the technical guides of construction.

Ky words: sediments, mechanical behavior, earth bricks, ecosystem.

المخلص

يعتبر الترسيب في السدود مشكلة معقدة لها أبعاد متعددة منها معدلات الملاء وخصائص الرواسب المتراكمة. تعتبر مدخلات الرواسب من أحواض الوديان عالية بشكل خاص في هذه المنطقة بسبب مناخها شبه الجاف وبصورة أساسية بسبب ضعف الغطاء النباتي. كما تقدر كمية الرواسب المتراكمة منذ إنشاء هذا السد بحوالي 6 ملايين متر مكعب، وبالتالي فإن هذه الرواسب تحد بشدة من قدرته التخزينية، وبالتالي من العمر التشغيلي. لذلك فإن استخراج الرواسب المتراكمة في خزان السد أمر حتمي، تحت طائلة رؤيتها تتلاشى على المدى المتوسط. ومع ذلك، فإن هذه الرواسب ذات قيمة جيوتقنية وميكانيكية كبيرة. سمحت لنا نتائج الاختبارات التي أجريت في المختبر بتحديد الرواسب المختلفة من وجهة نظر فيزيائية وجيوتقنية. يجب أن تلبى هذه المواد بالطبع معايير صارمة معينة من حيث المقاومة الميكانيكية والمتانة والأثر البيئي. يعتبر ترسيب الطمي في السدود الجزائرية ظاهرة سيئة السمعة حيث يتم ترسيب أكثر من 65 مليون متر مكعب / سنة من الرواسب كل عام في هذه الخزانات. كانت العواقب الكامنة في هذه المشكلة الخطيرة كارثية، بما في ذلك انخفاض كبير من 43 إلى 84% من سعة التخزين والتخزين للسدود وتدهور ملحوظ في جودة المياه مما قد يؤدي إلى تدهور أداء النظم البيئية. تغييرات لا رجوع فيها. وبالتالي يمكن أن يشكل الطمي الموجود بكثرة في السدود الجزائرية مورداً محتملاً يمكن استغلاله بحكمة من أجل تحسين أداء مواد البناء. الهدف من هذه الدراسة هو تقييم جدوى استعادة الطمي من خلال تحليل معرفة رواسب سد **كوديية مدوار** بتمقاد - باتنة-. سمح لنا النهج التجريبي الذي اعتمدهنا بتحديد خصائص المواد اللازمة لإنتاج الطوب الترابي المضغوط (BTC) وفقاً لتوصيات أدلة البناء الفنية.

الكلمات المفتاحية: الرواسب، السلوك الميكانيكي، الطوب، النظام البيئي.

Table des matières

Remerciement	I
Dédicaces	II
Résumé/ Abstract/ملخص	III
Table des matières	IV
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XIII
Notations et symboles	XIV
Introduction Générale	01
Chapitre 1 : Etat des lieux de valorisation des sédiments	
1.1. Introduction	06
1.2. Etat de l’art	06
1.3. Conclusion	11
Chapitre 2 : Problématiques de l’envasement et dragage des barrages	
2.1. Introduction	13
2.2. Problématique de l’envasement	13
2.3. Causes et origines des sédiments	14
2.4. Facteurs induisant l’envasement des barrages	15
2.4.1. Processus naturels	15
2.4.2. Vitesse de chute d’une particule élémentaire	22
2.4.3. Influence de la concentration des particules	23
2.4.4. Bilan des échanges érosion –sédimentation	23
2.4.5. Tassement des vases	24
2.5. Transport fluvial des sédiments	27
2.5.1 La matière en suspension (MES)	28
2.5.2 La charge de fond.	28
2.6. L’alluvionnement dans les réservoirs et les moyens de lutte contre ce phénomène	34
2.6.1. Les facteurs conditionnels de l’engravement des réservoirs	34
2.6.2. Mécanisme de formation des dépôts dans le réservoir	35
2.6.3. Taux et rythmes de sédimentation à l’échelle mondiale	36
2.6.4 Analyse des données de sédimentation pour les barrages affectés.	37
2.6.5. Étude des taux de sédimentation	37

Table des matieres

2.6.6. Dépôts formés par les matériaux charriés	39
2.6.7. Dépôts formés par les matériaux transportés en suspension	39
2.7. Méthodes de calcul	40
2.8. Opérations de dragage	41
2.8.1 Typologie des opérations de dévasement	41
2.8.2. Particularités des dragages de travaux neufs	42
2.8.3 Techniques de dragage des sédiments	43
2.9 Conclusion	49
Chapitre 3: Problématiques de l'envasement et dragage des barrages	
3.1. Introduction	52
3.2. Caractéristiques physiques	52
3.2.1 Eléments constitutifs d'un sol	52
a) Les paramètres dimensionnels	55
Poids volumique humide (spécifique ou total)	55
Poids volumique sec	56
Poids volumique des particules solides (ou poids spécifique)	56
Poids volumique de l'eau	56
Poids volumique déjaugé	56
Quelques ordres de grandeurs pour masse volumiques de certains sols	57
b) Paramètres adimensionnels	57
Teneur en eau (w)	57
Indice des vides (e)	58
c) Dénomination des sols	58
d) Identification des sols au laboratoire	59
d.1 Analyse granulométrique d'un sol	59
L'analyse granulométrique par tamisage	60
L'analyse granulométrique par sédimentation.	60
Analyse granulométrique par tamisage (NF P94-056)	60
L'analyse granulométrique par sédimentation (NF P94-057)	60
L'interprétation des courbes granulométriques	62
Coefficient d'uniformité et coefficient de courbure d'une courbe granulométrique	63
d.2. Identifications propres aux sols fins	64
- Consistance des sols fins (Limites d'Atterberg) (NF P 94-051)	64
L'état solide	65
L'état semi-solide	65

Table des matieres

L'état plastique	65
L'état liquide	65
Les limites d'Atterberg	66
La limite de retrait (W_r) (NF P94-051)	66
La limite de plasticité (W_p) (NF P94-051)	67
La limite de liquidité (w_L) (NF P 94-051)	67
Méthode du cône de pénétration (NF P 94-052-1)	68
Indice de plasticité IP (NF P94-051)	69
Indice de consistance I_c	70
Indice de liquidité IL	71
d-3 Classification des sols	71
Identification visuelle d'un sol	71
Classification LPC modifiée	72
Classification des sols pour les terrassements routiers (GTR) (NF P 11-300).	75
Classification triangulaire	76
e) Les argiles	77
e.1. L'activité des argiles	77
e.2. Structure des argiles	78
e.3. Trois principaux types d'argile sont distingués	79
e.4. Activité des argiles	80
f) Les Minéraux	80
f.1. Famille de la kaolinite	81
f.2. Famille de l'halloysite	81
f.3. Famille l'antigorite	82
f.4. Famille de la berthierine	82
3.3 Caractéristiques chimiques	83
3.3.1 Analyse chimique par fluorescence des rayons X	83
3.3.2 Valeurs au bleu de méthylène (VBS) (<i>Norme NF P94-068</i>)	84
3.3.3 Les métaux lourds	85
- Impact des métaux lourds sur l'environnement et sur la santé	86
3.3.4 Potentiel hydrogène (pH)	86
a. Indicateur coloré	87
b. Mesure au papier pH	87
c. Mesure au pH-mètre	87
3.3.5 Détermination du taux de carbonates de calcium	88
a. Principe	88
b. Préparation de l'échantillon	88
c. Analyse préliminaires	88

d. Le Calcul de la teneur en carbonate de l'échantillon	89
3.3.6 Caractéristiques microscopiques	89
3.3.7. Caractéristiques rhéologiques	90
3.4. Conclusion	90
Chapitre 4 : PROCEDURES EXPERIMENTALES ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS	
4.1. Introduction	93
4.2. Présentation de la zone d'étude	94
4.3. Méthodologie	95
4.4. Matériels et matériaux	96
4.4.1 Opérations d'échantillonnage des sédiments	96
a- Conditions d'échantillonnage	96
b- Mesures de paramètres environnementaux	97
c- Épaisseur prélevée	97
d- Outil opérateur d'échantillonnage	98
e- Protocole d'échantillonnage sur site	98
f- Conditionnement des échantillons	99
g- Constitution de l'échantillon composite	100
h- Conservation et transport de l'échantillon	101
i- Traçabilité documentaire des opérations d'échantillonnage	101
4.4.2 Matériaux	102
4.4.2.1 les sédiments de dragage	102
a- Analyses physiques	103
a.1 Analyse granulométrique.	103
a.2 Les limites d'Atterberg	105
b. Analyses chimiques	107
b.1 La spectrométrie de fluorescence X (FRX)	107
b.2. Préparation de l'échantillon.	107
4.3.2.2 Le Ciment	109
4.3.2.3 La chaux	111
4.3.2.4 La poudre de verre	112
4.3.2.5 Les fibres de verre	113
4.3.2.6 L'eau	114
4.4. Procédures De L'expérimentation	115
4.4.1 Préparation des briques en terre compressée	115
4.4.2 Optimisation de la teneur en eau	117

| Table des matieres

4.4.3 Codage des mélanges	117
4.4.4 Cure des briques en terre compressée	118
4.5. Résistance à la compression	119
4.6. Résistance à la flexion	120
4.7. Résultats et discussion	121
4.7.1. Effet de la résistance à la compression avec différents mélanges	121
4.7.2. Effet de la résistance à la flexion avec différents mélanges	127
5. Conclusion	133
Conclusion Générale et Perspectives	
Conclusion Générale	135
Perspectives	137
Références Bibliographiques	139

Liste des Figures

Numéro	Intitulé	Page
Chapitre II : Problématiques de l'envasement et dragage des barrages		
Figure 2.1	Modes de transport solide	19
Figure 2.2	Mode d'envasement	27
Figure 2.3	Mode d'envasement par le courant de turbidité	28
Figure 2.4	Modèles servant à échantillonner la charge de fond	29
Figure 2.5	Effets en amont des réservoirs dans la zone ennoyée	32
Figure 2.6	Effets en aval des réservoirs	32
Figure 2.7	Mécanismes de sédimentation des barrages	33
Figure 2.8	Répartition régionale des différents barrages selon la commission internationale des grands barrages	36
Figure 2.9	Vitesse de sédimentation et surface du bassin-versant	38
Figure 2.10	Opération de dragage du barrage de Fom el Gherza	41
Figure 2.11	Photo d'une drague aspiratrice en fonction	43
Figure 2.12	Refoulement de matériaux dragués dans le puits d'une drague	44
Figure 2.13	Drague hydraulique à tête désagrégatrice	44
Figure 2.14	Fonctionnement d'une drague aspiratrice en marche sur les fonds	45
Figure 2.15	Fonctionnement d'une drague aspiratrice stationnaire	45
Figure 2.16	Fonctionnement d'une drague a godet montés en chaîne	46
Figure 2.17	Fonctionnement d'une drague a godet Articulé fixé à l'extrémité d'un bras orientable	46
Figure 2.18	Fonctionnement d'une drague niveleuse	47
Figure 2.19	Dragage par injection d'eau	48
Figure 2.20	Dragage par rotodévasage	49
Chapitre III : Problématiques de l'envasement et dragage des barrages		
Figure 3.1	Portion de sol constitué de grains solides (s) entourés de vides remplis d'air (A) et d'eau (W).	53
Figure 3.2	Description d'un sol ; états de saturation	53
Figure 3.3	Diagramme des phases	54
Figure 3.4	Distributions granulométrique	60
Figure 3.5	Analyse granulométrique par sédimentologie	61
Figure 3.6	Composants d'un sol	62
Figure 3.7	Courbe granulométrique.	62

Figure 3.8	Interprétation des courbes selon les coefficients C_u et C_c	64
Figure 3.9	Exemples de quelques courbes granulométriques.	64
Figure 3.10	Etats de consistance.	66
Figure 3.11	Etats de consistance des sols fins.	66
Figure 3.12	Détermination de la limite de plasticité.	67
Figure 3.13	Coupelle de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité W	67
Figure 3.14	Courbe représentative de relation entre la teneur en eau et le nombre de coups.	68
Figure 3.15	Cône de pénétration pour la détermination de WL .	69
Figure 3.16	Relation entre la teneur en eau et l'enfoncement du cône	69
Figure 3.17	Abaque de plasticité de Casagrande	70
Figure 3.18	Les grandes familles de la classification LCPC modifiée	72
Figure 3.19	Diagramme de classification de Casagrande	73
Figure 3.20	Diagramme de plasticité des sols fins	74
Figure 3.21	Classification des sols grossiers	74
Figure 3.22	Structure générale de la classification GTR pour les terrassements routiers	76
Figure 3.23	Diagramme triangulaire de classification	77
Figure 3.24	Activité de certains minéraux argileux mélangés à du sable de quartz (D'après Skempton, 1953).	78
Figure 3.25	Echelle d'activité des minéraux argileux	78
Figure 3.26	Schéma de la structure générale d'une argile	79
Figure 3.27	Structure de la kaolinite et l'halloysite	82
Figure 3.28	Essai Proctor	83
Figure 3.29	Échelle pH	87
Figure 3.30	Fonctionnement du MEB	90

Chapitre IV : PROCEDURES EXPERIMENTALES ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

Figure 4.1	plan de situation du barrage et réseau hydrographique	94
Figure 4.2	Organigramme de la méthodologie de travail	96
Figure 4.3	Drague manuelle (type Cemagref)	98
Figure 4.4	Bennes de type Eckman (à gauche) et Van Veen (à droite)	98
Figure 4.5	Points de prélèvements	102
Figure 4.6	Instrument de prélèvement	102
Figure 4.7	Opérations de séchage et broyage des sédiments	103
Figure 4.8	Courbe granulométrique des sédiments	104
Figure 4.9	Courbe granulométrique des sédiments	104

Figure 4.10	limite de liquidité (WL)	105
Figure 4.11	abaque de Casagrande	106
Figure 4.12	courbe de Proctor	106
Figure 4.13	séchage de la vase au four	107
Figure 4.14	broyage de l'échantillon	107
Figure 4.15	élimination de la matière organique	108
Figure 4.16	image de préparation de l'essai FRX	108
Figure 4.17	Image des résultats FRX	108
Figure 4.18	représentation graphiques des concentrations des minéraux	109
Figure 4.19	image du ciment utilisé CEM I 42.4N	110
Figure 4.20	image de la chaux utilisée	111
Figure 4.21	image des bouteilles avant et après broyage	113
Figure 4.22	image de la fibre de verre utilisé	114
Figure 4.23	Malaxage de sédiments dans un seau	116
Figure 4.24	Moule utilisé 100x200x60 mm ³	116
Figure 4.25	Dame adapté au moule pour compactage	117
Figure 4.26	Procédure de moulage et coffrage de BTC	119
Figure 4.27	Schéma du principe de l'essai de compression	120
Figure 4.28	Schéma du montage de flexion 3 points	121
Figure 4.29	Image de l'écrasement de la brique en BTC (compression)	121
Figure 4.30	Résultats de compression argile/ciment portland	122
Figure 4.31	Résultats de compression argile/chaux	122
Figure 4.32	Résultats de compression argile/poudre de verre	122
Figure 4.33	Résultats de compression argile/fibre de verre	123
Figure 4.34	déférence de résultats de compression argile/ ciment et argile/chaux	123
Figure 4.35	Résultats de compression argile/ciment/ poudre de verre	124
Figure 4.36	Résultats de compression argile/ciment/ fibre de verre	124
Figure 4.37	Résultats de compression argile/chaux/ poudre de verre	125
Figure 4.38	Résultats de compression argile/chaux/ fibre de verre	125
Figure 4.39	Résultats de compression de différents mélanges	126
Figure 4.40	Image de l'écrasement de la brique en BTC (Flexion)	127
Figure 4.41	résultats de Flexion argile/ciment	127
Figure 4.42	résultats de Flexion argile/chaux	128
Figure 4.43	résultats de Flexion argile/poudre de verre	128
Figure 4.44	Résultats de Flexion argile/ciment	128
Figure 4.45	Déférence de résultats de flexion argile/ ciment et argile/chaux	129

Figure 4.46	Résultats de flexion de différents mélanges	129
Figure 4.47	Résultats de Flexion argile/ciment/fibre de verre	130
Figure 4.48	Résultats de Flexion argile/chaux/poudre de verre	130
Figure 4.49	Résultats de Flexion argile/chaux/fibre de verre	130
Figure 4.50	Résultats de flexion de différents mélanges	131

Liste des Tableaux

Numéro	Intitulé	Page
Chapitre II : Problématiques de l'envasement et dragage des barrages		
Tableau 2.1	Etat d'envasement de quelque barrage algérien (Source: ANBT 2021)	15
Tableau 2.2	Ouvrages traitant la thématique du transport sédimentaire	30
Tableau 2.3	Répartition des barrages étudiés par taux de sédimentation	37
Chapitre III : Problématiques de l'envasement et dragage des barrages		
Tableau 3.1	Valeurs types pour certains sols connus d'après Hansbo (1975)	57
Tableau 3.2	Valeurs d'indice des vides pour les différents types de sol	58
Tableau 3.3	Classification d'Atterberg	59
Tableau 3.4	Classification du MIT	59
Tableau 3.5	Appellation des sols selon leurs proportions.	63
Tableau 3.6	Classes de granulométrie de sols.	63
Tableau 3.7	Classification de l'argilite suivant l'indice de plasticité.	70
Tableau 3.8	Ordres de grandeur	70
Tableau 3.9	Etat du sol selon Ic	71
Tableau 3.10	Activité des minéraux argileux	78
Tableau 3.11	Classification des sols	85
Tableau 3.12	Utilisation actuelle courante des métaux dans l'industrie (abondance moyenne de chaque élément dans la croûte terrestre)	86
Tableau 3.13	Quantité d'échantillon nécessaire	88
Chapitre IV : PROCEDURES EXPERIMENTALES ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS		
Tableau 4.1	Diamètre des particules par l'analyse sédimentométrie	104
Tableau 4.2	Prospérités physique de la vase	105
Tableau 4.3	Résultats de spectrométrie de fluorescence X (FRX)	109
Tableau 4.4	présente la composition chimique du ciment.	111
Tableau 4.5	composition chimique de la chaux	111
Tableau 4.6	Résistance à la compression des chaux hydrauliques et naturelles	112
Tableau 4.7	Formulation des mélanges testés	118

Notations et symboles

Chapitre II : Problématiques de l'envasement et dragage des barrages

BTC	Brique en terre compressée
Q_s	Débit solide
V_p	Volume de précipitation
C_d	Coefficient de traîné
ρ_s	la masse volumique du solide
ρ	la masse volumique du fluide
C_v	Concentration volumique
W_c	Vitesse de chute d'une particule élémentaire isolée
W_c'	Vitesse de chute dans une eau chargée
w	La vitesse de chute
u^*	La vitesse de cisaillement sur le fond
C_s	La concentration de sable à l'équilibre
s	La densité des sédiments.
ν	La viscosité cinématique de l'eau.
k_s	La rugosité équivalente.
T	Le nombre de Van Rijn

Chapitre III : Problématiques de l'envasement et dragage des barrages

V_a	Volume de l'air.
V_w	Volume de l'eau.
V_s	Volume des grains solides.
V_v	Volume des vides.
W_w	Poids de l'eau.
W_s	Poids des grains solides.
W	Poids (N)
M	Masse (kg)
g	Accélération gravitationnelle = 9.81 m/s ²
γ	Poids volumique
ρ	Masse volumique
PH	Poids volumique humide
γ_d	Poids volumique du sol sec
γ_{sat}	Poids volumique du sol saturé
M_w	Masse d'eau.
M_s	Masse des particules solides.
MPa	Méga pascal
kN.	Kilo newton
D	Diamètre de la sphère (mm).
v	Vitesse de chute de la sphère (cm/min).
D_{rs}	Densité relative de la sphère.
D_{rl}	Densité relative du liquide.
η	Viscosité dynamique du liquide.
C_c	Coefficient de courbure

Wr	La limite de retrait
Wp	La limite de plasticité
WL	La limite de liquidité
IP	Indice de plasticité
Ic	Indice de consistance
IL	Indice de liquidité
Gb	grave propre bien graduée
Gm	grave propre mal graduée
Gl	grave limoneuse
Ga	grave argileuse
Sb	sable propre bien gradué
Sm	sable propre mal gradué
Sl	sable limoneux
Sa	sable argileux.
FRX	fluorescence des rayons X
VBS	Valeurs au bleu de méthylène
pH	Potentiel hydrogène
MEB	La microscopie a balayage électronique

Chapitre IV : PROCEDURES EXPERIMENTALES ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

SiO ₂	Le quartz
CaCO ₃	Carbonates
AL ₂ O ₃	Alumine
CPA	Le Ciment Portland Artificiel
LHF	Laitiers de Haut Fourneau
CV	Les Cendres Volantes
Z	Pouzzolanes
SF	La Fumée de Silice
CPA	Ciment Portland Artificiel
C	Clay (argile)
PC	Portland cement (ciment portland)
L	Lime (chaux)
GF	Glass fiber (fibre de verre)
GP	Glass powder (poudre de verre)

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les barrages de stockage sont exposés à une perte de capacité due au phénomène d'envasement. Un phénomène qui peut s'exprimer par d'autres termes tels que, l'alluvionnement des barrages et la décantation des particules transportées par les cours d'eau que ce soit par charriage ou en suspension. Il est la conséquence naturelle de la dégradation des bassins versants.

Ce phénomène constitue actuellement une préoccupation aux exploitants et aux responsables de la mobilisation des ressources hydrauliques, devant les difficultés trouvées pour la maîtrise de l'alluvionnement des barrages en Algérie, l'analyse d'état d'envasement est obligatoirement demandée pour définir le degré de gravité au niveau des barrages. Les présentes approches de quantification visent à fournir aux exploitants et aux projeteurs la situation présente et future de nos barrages.

Eventuellement toute analyse d'état s'appuie sur l'analyse des levés bathymétriques, ou sur les prélèvements d'échantillons d'apports solides. Tout en développant les facteurs dont dépendent ces derniers, ainsi que leurs dépôts. L'analyse statistique des données du barrage de Koudiet Medaoaur faisant l'objet de cette étude qui nous a conduit à penser à la valorisation de ces sédiments dragués pour éventuelle utilisation dans diverses activités de développement d'infrastructures, telles que la mise en valeur des terres, la construction de bâtiment, des routes... , car nul barrage ne peut être à l'abri de ce phénomène d'envasement.

Les objectifs assignés à la présente thèse et d'étudier le comportement mécanique des sédiments de dragage du barrage Koudiet Medaouar pour son utilisation dans le domaine industriel (fabrication des briques en terre comprimées) , Les sédiments extraite du barrage, a été prélevé à l'aide d'une barque et un préleveur de boue confectionné au laboratoire de mécanique université de Batna dans quatre endroits du barrage Afin de déterminé les propriétés physiques et chimiques de cette vase.

Les résultats obtenus, montrent que certains des mélanges (vase , ciment, chaux , fibre de verre et la poudre de verre) présentent des résultats très intéressants sous les différents essais de compression et flexion, vérifiant les conditions des normes en vigueur et permettant par conséquent leur utilisation dans le domaine de construction par la confection des briques en terre comprimées (BTC) .

La présente thèse est scindée en quatre chapitres avec une introduction générale et une conclusion ainsi que des perspectives

En première partie, une recherche bibliographique sur l'état des lieux de l'envasement des barrages et l'influence sur la capacité utile des infrastructures hydrauliques des pays du Maghreb et la réduction de la réserve de stockage, un état de l'art sur la valorisation des sédiments de dragage dans les différents secteurs de construction, les différents domaines de valorisation. Ces travaux traitent la valorisation des sédiments de dragage dans le domaine de la fabrication des briques, en technique routier et dans les mortiers, la fabrication du ciment. Afin d'améliorer la qualité de certains matériaux de construction avec les avantages économiques et environnementaux.

Le deuxième chapitre concerne la description et la problématique et l'origine de l'envasement des barrages, l'alluvionnement dans les réservoirs des barrages et les moyens de lutte contre ce phénomène, les mécanismes de formation des dépôts dans le réservoir ainsi que les techniques de dragage et le transport des sédiments. Ainsi que les processus de dragage, les modalités de dragage

Le troisième chapitre présente une étude sommaire sur les caractéristiques et traitement des sédiments de dragages, les analyses physiques (masse volumique, Teneurs en eau, analyse granulométrique, limite d'Atterberg, Valeur au bleu de méthylène), analyses chimiques (pH, Analyse minéralogique par fluorescence des rayons X, teneurs en matières organiques). Les matériels et méthodes de recherche de ces caractéristiques sont décrits. La maîtrise des sédiments de dragage des barrages dans leur globalité nécessite de connaître leur fiche descriptive avant de les valoriser.

Quatrièmement, dans ce chapitre nous avons présenté la zone d'étude ou des prélèvements de la vase du barrage effectué, ainsi que la méthodologie de travail durant cette expérimentation. Une première partie, pour les matériaux sélectionnés et les matériels utilisés pour cette étude, donc il s'agit de l'argile extraite du barrage Koudiet Medaouar pour son utilisation dans la fabrication des briques de terre compressée (BTC) avec ou sans ajout, les caractérisations géotechnique, chimique et minéralogique l'argile utilisées dont des combinaisons et des mélanges ont été choisis avec des liants hydrauliques (ciment et chaux hydraulique), fibre de verre et poudre de verre, afin de classer les plus efficaces en fonction des objectifs que nous visons (résistance à la compression et à la flexion). Enfin, les compositions des différents mélanges. La deuxième est consacrée aux démarches et protocoles de confection des spécimens avec ou sans renforcement, enfin les résultats et discussion présentés sous forme de courbes avec des interprétations des résultats.

Introduction Générale

Comme à l'accoutumé, ce travail de recherche se termine par les principales conclusions pouvant être déduites de cette étude ainsi que les perspectives pour des travaux ultérieurs dans ce domaine.

Chapitre I

Etat des lieux de valorisation des sédimentsen produits de construction

CHAPITRE 1 : ETAT DES LIEUX ET VALORISATION DES SEDIMENTS EN PRODUITS DE CONSTRUCTION

1.1. Introduction :

L'envasement des réservoirs des barrages est un phénomène naturel qui réduit la capacité de stockage et la durée d'exploitation des barrages. Cette perte de capacité par sédimentation dépend principalement de la vitesse de décapage par érosion des bassins versants, du couvert végétal, du relief et du climat. La capacité utile des infrastructures hydrauliques des pays du Maghreb diminue de 0,65%/an (B. Remini et al) [2]. L'envasement des réservoirs est le facteur le plus important de la perte de capacité. La réduction de la réserve de stockage des ouvrages hydrauliques n'a cessé de croître ces dernières années pour des raisons d'origine naturelle, favorisées par l'agressivité du climat, l'alternance de périodes sèches et humides, la fragilité des formations géologiques et l'absence d'une couverture végétale suffisante.

L'alluvionnement des barrages est l'une des conséquences les plus dramatiques de l'érosion hydrique ; environ 180 millions de tonnes sont annuellement arrachées aux bassins versants par le ruissellement dans le nord de l'Algérie Demmak [3]. En Algérie, par exemple, l'érosion spécifique dans 30 bassins versants étudiés varie entre 30 et 3350 t/Km² par an, selon B.Remini et al. La réduction de la capacité de stockage hydraulique en Algérie, suite à l'envasement, est estimée annuellement à environ 65 Mm³ (B. Remini et al) [1]. Pour faire face à cette situation, des mesures palliatives ont été préconisées, telles que l'extraction et l'exportation des sédiments qui se sont accumulés par décantation dans la retenue pour des applications liées à diverses activités de développement d'infrastructures, comme la récupération des terres, la construction de bâtiments, etc. (Rakshith et al) [4].

1.2. Etat de l'art :

La récupération des sédiments après le dragage présente plusieurs avantages économiques et environnementaux. Tout d'abord, elle améliore la gestion des déchets de sédiments de dragage, ensuite, elle apporte une solution innovante au problème de la rareté des ressources en matériaux de construction (Ahmed Loudinia et al) [5]. Dong Xing Wanga et al [6] ont étudié la caractérisation de base des sédiments marins dragués, l'effet du ciment et de la chaux

sur les limites d'Atterberg, ainsi que les propriétés mécaniques de ces sédiments traités afin d'évaluer leur faisabilité dans les chaussées. Baptiste Anger et al [7] ont mené une étude sur la faisabilité de l'utilisation des sédiments de barrage comme additif dans le béton. Ils ont conclu que les sédiments fins de barrage étudiés ne permettent pas d'obtenir des performances équivalentes à celles des ajouts calcaires ou siliceux normalisés. Néanmoins, leur incorporation dans le béton est possible, en ajoutant des adjuvants pour limiter l'apport en eau. Antonio Federico et al [8] ont publié les résultats préliminaires d'une recherche expérimentale sur les effets de la stabilisation artificielle avec du ciment et/ou de la chaux qui sont dragués dans le port de Taranto (Italie) afin d'évaluer les propriétés physiques et le comportement en compression des sédiments argileux naturels dragués à partir des approches, expérimentale et théorique combinées.

Quintilio Piattoni et al [9]. Décrit le comportement mécanique de briques produites à partir d'une boue traitée par compactage manuel avec différentes fractions volumiques de terre, de sable grossier et de fibres de paille courtes. A travers l'approche de l'utilisation des sédiments comme matériau de terrassement Jaesung Park et al [10] ont évalué l'utilisation potentielle des sols dragués comme matériau de terrassement et ont trouvé que les sols dragués ont une stabilité suffisante comme nouveau matériau de terrassement. Y.K.Wu et al [11] ont effectué un travail dont le but est de déterminer aléatoirement le comportement mécanique de l'argile limoneuse renforcée de fibres de sisal du district de Qingdao (Chine). Ils révèlent qu'une amélioration de 20% de la résistance est obtenue, ainsi qu'une réduction du risque de déformation du sol grâce à l'ajout de cette fibre.

Q. Enrico et L. Stefano [12] ont tenté de caractériser les propriétés mécaniques telles que l'ouvrabilité, la compression et le module de Young de ce type de brique d'adobe. Dix mélanges différents d'adobe (argile, mélangée d'eau et d'une faible quantité de paille hachée ou d'un autre liant) qui ont été utilisés pour fabriquer des briques de boue anciennes avec une armature de paille et avec du sable grossier comme stabilisateur, comme le faisaient les Romains, en utilisant un sol argileux. W. Maherzia et al [13] ont effectué des essais de durabilité (mesure du gonflement volumique et de la résistance à la traction, des observations microstructurales par microscopie électronique) pour identifier les paramètres essentiels de valorisation du matériau de sous-couche routière. Les résultats obtenus montrent un potentiel encourageant quant à l'utilisation de mélanges traités contenant des sédiments dragués et du sable comme matériau de substitution. Les propriétés physico-mécaniques de ces sédiments ont-elles aussi été améliorées par M. Boutouil, L. Saussaye [14] en utilisant des ajouts

correctifs avec un traitement à base de ciment CEMII/B-M (S-LL) 32.5 R et de sables selon différentes formulations à des sédiments fins non contaminés dragués dans le port de Ouistreham (Calvados, France). Les résultats montrent qu'un dosage en ciment de 10% combiné à une diminution de la teneur en matière organique et en argiles, éléments perturbateurs du traitement de solidification au ciment, améliorent les propriétés géotechniques et mécaniques des sédiments dragués traités. Afin de contrebalancer les fractions perturbatrices, M. Amar et al [15] ont réalisé un traitement approprié des sédiments de dragage en vue de leur utilisation dans des matrices cimentaires avec des taux de substitution de l'ordre de 10 % à 20 %. Le procédé envisagé consistait en la calcination directe des matières premières dans un four à 750°C. Ceci a permis d'améliorer certaines propriétés physico-chimiques consistant à éliminer la matière organique. Ils ont constaté que les mortiers à base de sédiments calcinés dragués présentaient une amélioration mécanique et environnementale remarquable par rapport au mortier témoin.

Bouhamou. N et al [16] ont montré qu'il est possible de fabriquer du béton avec différents dosages en vase ayant des propriétés auto-compactantes par rapport au béton vibré traditionnel. Quatre échantillons ont été utilisés avec des variations du pourcentage (0%, 10%, 20% et 30%) de limon calciné provenant du barrage de Chorfa (Algérie) pour fabriquer aussi du béton. A cet effet, B.Serbah et al [17] ont également étudié l'influence de l'ajout de liants hydrauliques et aériens (ciment, chaux) sur les caractéristiques mécaniques de ces sédiments de dragage pour la réalisation de couches de chaussée, trois liants ont été testés et permettant d'envisager l'utilisation des sédiments traités pour former une couche de chaussée. Le traitement donne une excellente résistance à la compression et des résultats satisfaisants en ce qui concerne le gonflement. F. Hamouche, R. Zentar [18] ont exploré, dans le cadre de la proposition d'une méthode de caractérisation de la matière organique simple, adaptée aux sédiments, la possibilité de valoriser les sédiments de dragage dans le secteur des travaux routiers. J.Couvidat et al [19] en visant à évaluer le comportement environnemental des mortiers réalisés avec des sédiments de dragage, le sable naturel utilisé comme agrégat de référence a été entièrement remplacé par des sédiments de dragage bruts et altérés. Ils ont conclu que leur formulation est réutilisable dans des applications non structurelles, telles que la base des chaussées et le revêtement des murs.

A. Loudini et al [20] ont examiné des sédiments marins dragués prélevés dans le port marocain, traités avec un liant hydraulique (ciment Portland). Une formulation du mélange a été définie pour effectuer des tests de comportement mécanique sur leurs échantillons. Ils

révèlent que les expériences montrent que les sédiments de dragage traités avec du ciment Portland peuvent être utilisés comme couche de base routière. D'autres travaux de recherche ont été réalisés par B. Rekik, M. Boutouil [21] pour valoriser les sédiments de dragage dans la réalisation de travaux de terrassement, et évaluer le comportement de compactage et de compressibilité de l'échantillon de sédiment traité au ciment. Ils ont également effectué des essais de propriétés géotechniques ainsi que des analyses de la microstructure du matériau. Leurs résultats montrent que le sédiment traité au liant hydraulique a un potentiel d'utilisation comme matériau de remblai grâce à l'amélioration de sa capacité portante et de sa teneur en eau. Il en est de même pour réduire la compressibilité dans un contexte de valorisation des boues issues des opérations de dragage des bassins du port d'Oran, et de ceux du barrage de Bouhanifia, qui sont situés dans l'ouest algérien H. Marouf et al [22]. En plus de l'étude sur l'utilisation du limon dans le bâtiment, ces auteurs ont étudié les possibilités d'utilisation des vases dans le bâtiment. Des tests de durabilité ont été réalisés sur plusieurs échantillons de vase provenant des barrages à différentes températures et pourcentages d'eau. Il s'est avéré qu'il y a une prédominance de sédiments sableux, non récupérables, qu'ils ont ciblés. Aussi une satisfaction en termes de résistance mécanique et de durabilité pour une température de cuisson de 850°C et un pourcentage d'eau de 20% a été obtenue.

A. Larouci et al [23] ont identifié des tendances et des corrélations entre les propriétés géotechniques et ont analysé la capacité des liants et ainsi valoriser les sédiments, afin d'analyser le comportement mécanique des sédiments. Les essais comprennent des mesures de la résistance à la compression non confinée. Les résultats obtenus montrent que les sédiments du barrage de Fergoug (Algérie) n'atteignent pas les performances mécaniques requises par les ouvrages géotechniques et de sécurité. M. El-Attar et al [24] ont montré que jusqu'à 50% de poussière de four à ciment (CKD) pouvait être utilisée dans la fabrication des briques économiques et écologiques aux propriétés acceptables. Cependant, il est préférable d'utiliser la poussière de four à ciment avec du ciment résistant aux sulfates plutôt qu'avec du ciment Portland ordinaire. Cette approche permettra de réduire les risques environnementaux liés à l'élimination de la poussière de four, et contribuera au développement durable en utilisant la poussière de four dans la fabrication de briques.

C.Zhou [25] a étudié les briques perméables écologiques à haute performance en utilisant trois types de débris communs (boue de dragage, verre usagé, porcelaine jetée) comme matières premières. La structure de ces briques est composée d'un grand vide reliant les petits pores, ce qui permet d'obtenir un équilibre optimal entre la perméabilité à l'eau et la résistance à la compression. Le grand vide est formé par l'accumulation de porcelaine rejetée, et les petits pores sont produits par la combustion de la matière organique dans la boue de dragage. Les effets de la gradation des agrégats, de la teneur en agrégats, des rapports de poids entre la boue de dragage et les déchets de verre, de la pression de formage et de la température de frittage sur la porosité, la perméabilité et la résistance à la compression des briques perméables préparées. D. Bernardi et al [26] ont trouvé que les bio-briques peuvent avoir de meilleures propriétés mécaniques et que ces bio-briques sont comparables à celles traitées avec des ajouts tels que le ciment et la chaux hydraulique. Afin d'améliorer la qualité de certains matériaux de construction, F. Messina et al [27] ont étudié deux déchets de sédiments argileux et de boues provenant de stations de traitement des eaux dans le but de les valoriser dans des éléments de construction préfabriqués. C.W.Tang [28] a observé que les briques traitées par de la poudre de verre provenant de déchets de cristaux liquides de transition à couche mince (TFT-LCD) avec des sédiments de dragage étaient conformes aux briques de construction normalisées. Amine el Mahdi Safhi [29], a mené une étude sur trois mélanges différents qui ont été préparés avec 0%, 10%, et 20% de ciment remplacé par du limon traité, les tests ont montré que les mélanges avaient des caractéristiques d'auto-consolidation acceptables. L'étude réalisée par Zohra Bounouara et al, sur les boues extraites du barrage de Bouhanifia (Ouest de l'Algérie). Les matériaux extraits ont été traités avec différents pourcentages de bentonite (2, 4, 6, 8 et 10%). Pour saisir l'effet de la concentration en bentonite sur les caractéristiques géotechniques et hydrauliques des sédiments, ils ont constaté que les sédiments préparés avec de la bentonite peuvent être utilisés comme barrière argileuse pour une décharge de déchets dangereux [30]. Les caractéristiques des matériaux de construction cimentaires basés sur les sédiments dragués du barrage de Chorfa (Algérie), les sédiments frais et durcis et l'empreinte carbone des mortiers, pour appréhender le comportement potentiel des sédiments carbonisés sur les propriétés des mélanges cimentaires ont également été étudiés par Rachid-Hadj Sadok et al [31]. Vingt échantillons de sédiments dragués dans le port de Sfax ont été analysés par diffraction des rayons X et ont montré des pourcentages de sulfate et de chlorure de sodium dans les sédiments bruts. Les sédiments dessalés ont été ajoutés à du sable et activés avec du laitier de haut fourneau et de la chaux. Les mélanges de 58% de sable et 30% de sédiments bruts, activés avec 9% de laitier de haut

fourneau et 3% de chaux, ont donné la valeur recherchée pour l'utilisation du mélange dans la couche de base de la chaussée. Afin de valoriser les sédiments dans les sous-couches routières, Slama.A et al [32]

1.3. Conclusion

L'alluvionnement des barrages, fleuves, oued ou ports, est un problème complexe et multidimensionnel (écologique, environnementale, et de gestion), a cet effet le dragage est une solution efficace, toutefois il engendre des quantités énormes de sédiments à évacuer ou à stocker. De nombreuses transformations interviennent une fois les matériaux dragues. La gestion d'un sédiment de dragage nécessite de prendre en compte plusieurs paramètres pour assurer le choix d'une filière adaptée. Ce traitement accorde en outre d'envisager une valorisation de ces sédiments dans les domaines industriels tel que le génie civil comme dans les techniques routières, bétons, briques, terre cuite, céramique etc Cet objectif de valorisation est aujourd'hui au cœur des problématiques de développement durable, car il permet la réduction du volume des déchets stockés et la protection de l'environnement. La réutilisation de ces matériaux vient amortir le coût économique de gestion depuis le dragage jusqu'à l'usage final. Après certains traitements des sédiments, leurs caractérisations pouzzolaniques peuvent servir comme ajout dans les matrices cimentaires. Ceci représente une voie privilégiée de leur valorisation surtout dans le bâtiment.

Chapitre II

Problématique de l'envasement et dragage des barrages

CHAPITRE 2 : PROBLEMATIQUE DE L'ENVASEMENT ET DRAGAGE DES BARRAGES

2.1. Introduction

La mobilisation et l'exploitation des eaux de surface sont des pratiques anciennes. Les aménagements hydrauliques sont exposés dans leur totalité à des alluvionnements plus ou moins accélérés.

La capacité de stockage des retenues des barrages se trouve alors sujette à une réduction progressive au cours du temps. Cette perte de capacité, parfois élevée, dépasse les prévisions de l'alluvionnement de la retenue. Les retenues des barrages Algériens perdent annuellement des proportions alarmantes de leur capacité par alluvionnement.

2.2. Problématique de l'envasement

Les barrages en Algérie sont constitués de bassins versants qui se caractérisent par des reliefs relativement jeunes dominés par des sols vulnérables à l'érosion et par des couverts forestier et végétal sporadiques. À ces conditions naturelles s'ajoute le caractère violent des pluies torrentielles qui s'abattent de façon régulière, surtout à la fin des saisons sèches sur l'Algérie provoquant l'érosion des sols et le transport des matériaux (charriés et en suspension). De ce fait, les retenues des différents ouvrages hydrauliques sont toutes confrontées à plus ou moins long terme à l'alluvionnement.

Cette charge solide confère aux eaux de crues une densité plus élevée que celle des eaux stockées dans les retenues, créant ainsi un courant de turbidité qui se propage dans le réservoir quand les conditions morphologiques du fond de la retenue n'entravent pas son écoulement. Les particules solides se déposent progressivement avec la réduction de la vitesse du courant de turbidité. Ce dernier transporte les particules fines jusqu'aux ouvrages annexes du barrage, y compris les ouvrages de dévasement. Ainsi, une partie des apports solides des eaux de crue peut être soutirée au cours des opérations de dévasement. Des soutirages efficaces permettent de réduire le taux d'alluvionnement des barrages, renforcer leur capacité de stockage et augmenter leur durée de vie.

Les activités curatives sont pratiquées au niveau des retenues de barrages. Ce sont des opérations de dévasement procédant par des méthodes mécaniques (dragage) pour excaver la vase surtout par des méthodes hydrauliques.

Ces dernières permettent le soutirage de la vase au moyen d'ouvrage de vidange disposés au fond du lit de l'oued et équipés de vannes de chasse et de vannes de vidange de fond.

L'évacuation de la vase est opérée selon différents procédés :

- Chasses de dégravage
- Evacuation par les courants de densités
- Surélévation de barrage
- Construction de barrage de remplacement
- Dragage

2.3. Causes et origines des sédiments

L'érosion hydrique, comme noté ci-devant est la principale cause de l'envasement d'une retenue de barrage. Le processus de l'érosion est très complexe, car il est régi par différents facteurs physiques naturels tels que l'agressivité climatique, la topographie, la lithologie et le couvert végétal. Ce processus naturel se trouve souvent accentué par l'action humaine dont les impacts sur la dégradation des forêts sont très importants, à travers le défrichement des forêts, le surpâturage et la mise en culture de terrains à fortes pentes. L'essentiel des transports solides atterrissant dans les retenues de barrages ne vient pas de l'effet direct des précipitations. En effet, les précipitations interviennent sous forme de gouttes dont la majeure partie n'a pas l'énergie suffisante pour altérer la cohésion des agrégats terreux. Par contre, le ruissellement diffus qui balaie le terrain par des chenaux divagant possède un pouvoir érosif considérable. Ainsi, les pertes en terre ont pour origine principale les affouillements du réseau hydrographique provenant des ravinements bad-lands et des sapements des berges. Les orages d'été entraînent des quantités de terres non négligeables qui se déposent au pied des versants et des parties amont de réseau hydrographique. Ces atterrissements intermédiaires sont repris au moment des crues d'automne et d'hiver. Ce processus, dépôt-reprise, est très complexe et très variable. La complexité et la variabilité de ce processus sont accentuées par l'irrégularité de régime hydrologique interannuel des bassins versants. En Algérie, où le régime climatique est dominé par la succession des saisons sèches et humides, l'essentiel des apports d'eau au niveau de la quasi-totalité des barrages provient des crues violentes et rapides et souvent très chargées en sédiments.

Les chiffres exposés ci-dessous, illustrent de façon très démonstrative l'ampleur du problème en Algérie.

La réduction des potentialités hydrauliques de l'Algérie par suite de l'envasement est estimée annuellement à près de 20 millions de m³. Le tableau (2-1) montre l'état d'envasement de quelques barrages algériens en exploitation.

Tableau 2.1. Etat d'envasement de quelque barrage algérien (Source: ANBT 2021)

BARRAGE	LOCALISATION	TYPE	ANNEE MISE EAU	CAPACITE INITIALE Hm ³	CAPACITE DERNIER LEVE Hm ³	SUPERFICIE DE LA RETENUE Km ²	SURFACE B.V Km ²	APPORT MOY-ANN HM ³ /AN	ENVAS. ANNUEL Hm ³ /AN
OUED-FODDA	CHLEF	POIDS	1932	228,00	102,85	6,8	800	120	2,66
GHRIB	AIN-DEFLA	ENR.	1939	280,00	115,32	12,1	2800	148,5	3,2
F- EL -GHERZA	BISKRA	POIDS	1950	47,00	14,89	3,3	1300	21,3	0,8
SARNO	S.B.ABBES	TERRE	1954	22,00	21,25	2,5	264	12	0,12
KSOB	MSILA	VOUTES	1940/S 1977	29,50	12,34	2,4	1500	53	0,3
ZARDEZAS	SKIKDA	POIDS	1945/S 1974	31,00	18,68	1,9	345	53	0,4
DJORF-TORBA	BECHAR	POIDS	1969	350,00	260,25	56,7	22000	200	1,3
FERGOUG	MASCARA	TERRE	1970	18,00	3,12	2,3	420	56	1,5
BENI-AMRANE	BOUMERDES	ENR.	1988	16,00	11,85	/	3710	414	4,1
GARGAR	RELIZANE	TERRE	1988	450,00	358,28	21	2900	185	4,5
CHEURFAS II	MASCARA	BETON	1992	82,00	70,21	4,5	4190	57	0,36
BABAR	KHENCHELA	TERRE	1995	41,00	38,01	3,8	567	19,5	0,682
F.D.GAZELLES	BISKRA	TERRE	2000	55,50	54,74	5,94	1660	20,6	0,3
TAKSEBT	TIZI-OUZOU	TERRE	2001	175,00	181,02	5,28	448	196	0,265
BENI-HAROUN	MILA	BCR	2003	960,00	997,9	37	7250	780	6
KOUDIAT MEDOUAR	BATNA	TERRE	2003	69,10	74,32	7,03	590	30	0,023

Le phénomène de l'envasement en Algérie change considérablement d'une région à une autre. Ceci est dû à la variation des facteurs conditionnant l'érosion et le transport solide. Le tableau (2.1) expose l'état de l'envasement de quelques barrages algériens.

2.4. Facteurs favorisant l'envasement des barrages :

2.4.1. Processus naturels

L'envasement des retenues est le résultat d'un processus complexe qui se caractérise par trois étapes successives : érosion, transport et sédimentation.

a) *Erosion des Sols* :

L'érosion des sols est l'enlèvement des particules solides de ces sols par le fait de la précipitation. Ce phénomène est le premier processus conduisant vers l'envasement des retenues. C'est un phénomène complexe, très répandu dans la zone méditerranéenne, touchant particulièrement :

Les pays du Maghreb arabe dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol.

Le calcul du transport solide et la prévision du volume d'envasement nécessitent une bonne compréhension des phénomènes et de leur genèse, et plus particulièrement celui de l'érosion des sols.

L'érosion est donc, dans son acception la plus stricte, le processus qui contribue au détachement de matériaux d'une surface en raison de l'impact des gouttes de pluie, de l'écoulement de surface ou du vent [33]. Une étude précise du phénomène permet donc de déterminer quels sont les facteurs majeurs de la dégradation des sols et d'étudier l'influence respective de ces derniers. Les scientifiques disposent de plusieurs moyens pour tenter de quantifier, avec plus ou moins de précision, les volumes en jeu en produisant des résultats représentatifs d'une surface et d'une durée variable en fonction de la méthode adoptée. Il est largement reconnu que les aléas climatiques et les changements d'occupation du sol peuvent agir comme facteurs déclenchants dans l'augmentation de l'érosion des sols et de la sédimentation. Les effets néfastes incluent un appauvrissement des sols, une augmentation de la sédimentation des réservoirs, une déstabilisation des chenaux fluviaux et une perte des habitats aquatiques [34 ; 35 ; 36].

a.1) Modèles empiriques pour l'estimation des taux d'érosion des sols

Ayant identifié très tôt l'enjeu économique de la conservation des sols, de nombreux travaux ont essayé de quantifier l'érosion des sols à travers le développement de modèles à partir des paramètres réunis sur le terrain. Il existe ainsi une multitude de modèles dont nous allons brièvement présenter les plus couramment utilisés dans les travaux récents concernant l'érosion des sols [37].

a.2) USLE (Universal Soil Loss Equation, Wischmeier, Smith, 1978)

USLE est une équation empirique développée à partir d'études portant sur de nombreux bassins-versants aux États-Unis. Elle est fondée sur un grand nombre de mesures de terrain et prévoit alors l'érosion annuelle moyenne pour des parcelles de terrain ou des champs mais en négligeant la sédimentation. L'équation de base est une simple multiplication d'un certain nombre de paramètres que sont l'érosivité des pluies et des sols, la topographie et le couvert végétal. Comme le montrent (Haan et al. 1994) [38], les différents facteurs peuvent être cependant calculés de plusieurs manières en fonction du terrain d'étude, comme dans sa version révisée (RUSLE, Renard et al., 1997) [39]. C'est actuellement le modèle le plus répandu dans les travaux portant sur la quantification de l'érosion des sols.

a.3) RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation, Renard et al., 1995)

L'équation RUSLE est basée sur la même formule qu'USLE, mais présente plusieurs améliorations dans la détermination des paramètres. Elle inclut une approche variable dans

le temps pour le facteur d'érodibilité des sols ; une approche comportant des sous-facteurs pour évaluer le facteur d'occupation des sols ; une nouvelle équation pour refléter la longueur et le degré de pente ; et de nouvelles valeurs concernant les pratiques agricoles [40].

a.4) Erosion plot et 3 NBEP (Non imposed Boundary Erosion Plots)

Ces deux méthodes sont issues de mesures directes faites sur des parcelles représentatives et apportent des informations quantitatives sur l'érosion des sols du terrain ayant fait l'objet de ces mesures [41].

a.5) AGNPS (Agricultural Non Point Source Pollution Model, RA. Young et al., 1987)

Le modèle AGNPS a été développé pour l'analyse de la pollution des sources dans les champs agricoles. Il estime la qualité de l'écoulement d'eau en surface et la compare à la qualité prévue par d'autres stratégies de gestion des sols. AGNPS est un modèle basé sur des événements simples, bien que des versions fondées sur des simulations continues soient en cours de développement. AGNPS emploie un ensemble d'équations modifiées d'USLE dans la détermination des facteurs d'érosion [42].

a.6) ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation, Beasley et al., 1977)

Le modèle hydrologique ANSWERS est un modèle distribué et événementiel conçu pour simuler les processus d'écoulement, d'érosion et de transport des sédiments dans un bassin-versant agricole. Le modèle définit successivement l'interception de la pluie par la végétation, l'infiltration et la détention superficielle, le ruissellement en nappe et, enfin, l'écoulement concentré dans le réseau hydrographique. En parallèle, le détachement des particules par la pluie puis le transport de ces particules, leur dépôt ou leur reprise en charge sont également simulés. Le fonctionnement hydrogéologique est caractérisé par une loi de récession uniforme pour l'ensemble du bassin-versant. La présence de retenues d'eau ou d'aménagements hydro-agricoles peut être prise en compte. Les facteurs d'érosion dans ANSWERS sont semblables à ceux du modèle CREAMS [43].

a.7) WEPP (Water Erosion Prediction Project, Nearing et al., 1989)

WEPP est un modèle continu de simulations qui peut également être employé pour des événements simples sur de grandes surfaces. Mais puisque s'agissant d'un modèle continu, celui-ci fait appel à bien plus de paramètres, inutiles dans le cadre des modèles basés sur un événement unique. Par exemple, on doit ainsi tenir compte ici de la gestion et des

changements des propriétés des sols au cours de la saison. Le nombre minimum de paramètres d'entrée exigés pour utiliser ce modèle est approximativement d'une centaine [44].

Toutes ces approches permettent :

- de quantifier le phénomène d'érosion sous de multiples conditions du milieu naturel ;
- de comparer la valeur conservatrice des méthodes et pratiques préconisées ;
- de mesurer ainsi le bénéfice tiré de l'application des méthodes de lutte ;
- de déterminer au final quels sont les systèmes de conservation les mieux adaptés pour répondre aux problèmes se posant dans la mise en valeur d'un lieu aux caractères géographiques, pédologiques et économiques donnés.

Malgré l'intérêt précoce porté à l'érosion des sols, ces techniques et méthodes présentent des faiblesses, où les résultats peuvent alors apparaître hypothétiques pour certaines régions du monde. Il faudra donc interpréter avec précaution ces résultats. En effet, chacun de ces modèles a été développé et testé dans un contexte particulier et des superficies différentes. Les observations concernent habituellement la perte de sol de petites parcelles de terrain rarement uniformes et normalement protégées en surface [42 ;46]. Bien que les résultats de telles expériences soient utiles dans des hypothèses sur les effets des traitements intrinsèques, des difficultés surgissent lorsque ces mêmes résultats ont besoin d'être transférés à d'autres échelles comme des champs, des versants ou des bassins-versants plus vastes [47] . En effet, les résultats pour les moyens et grands bassins-versants sont trop influencés par les variations spatiales de la géologie, du relief et des précipitations [48 ; 49], pour rendre aisée l'évaluation de l'effet du changement d'occupation des sols. Les résultats de ces études sont alors à prendre avec précaution, en tenant compte du fait qu'elles ne sont que très peu représentatives d'un bassin-versant dans son intégralité. Aussi, la majeure partie des recherches sur l'érosion en conditions tropicales humides a été réalisée à partir d'USLE, or ces prévisions souffrent d'incertitudes au niveau des résultats [50]. C'est notamment le cas de la valeur du facteur de protection P pour les terrasses [51] qui tend à surestimer la quantité prévue d'érosion du sol dans de telles conditions [52] . Aussi, les bancs de terrasses construits sur les pentes raides génèrent des problèmes significatifs quant au calibrage et à l'utilisation des équations de ce type [53] .

L'étude de la sédimentation dans les réservoirs de barrages permet alors de rendre compte des volumes érodés en amont des ouvrages et ainsi fournir des valeurs permettant d'évaluer la cohérence des résultats des travaux sur l'érosion des sols.

Faute de pouvoir calculer de manière exacte le débit solide en fonction du temps et de de la granulométrie des matériaux du transport solide, il est souvent fait recours aux mesures in situ. Celles-ci portent essentiellement sur la suspension, et le transport de fond, ce dernier type de mesure restant toutefois peu utilisé. Cet inconvénient n'a que peu d'influence sur la détermination des courants de densité, étant donné que les matériaux transportés par charriage et saltation se déposent dans la zone du delta du bassin et n'ont dès lors plus d'incidence sur la densité des courants de fond.

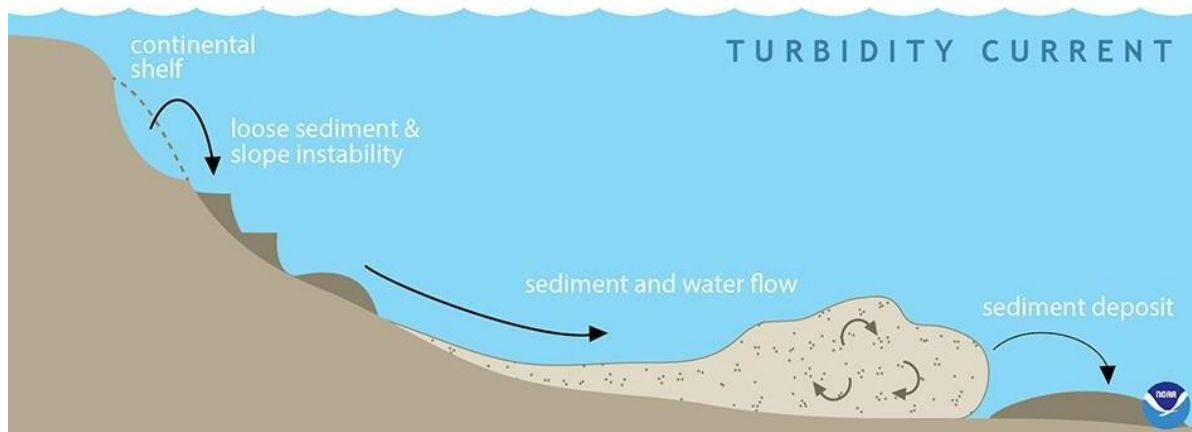


Figure 2.1. Mode d'envasement par le courant de turbidité [56]

Les dépôts de sédiments dans un réservoir sont ainsi composés de :

- La matière solide transportée par charriage, qui se dépose en forme de delta à l'entrée du réservoir selon son degré de remplissage.
- La matière en suspension transportée par des courants de turbidité qui se dépose d'une manière encore à préciser dans le reste du réservoir, voir figure (2.3)

Ce sont donc essentiellement les mesures de la charge en suspension des affluents qui permettent d'évaluer la charge d'un courant de densité dans le réservoir.

Ces charges sont de 0.7 à 36.4 g/l [0.026 à 1.374 %] en Algérie et de 0.3 à 27.8 g/l [0.011 à 1.049%] aux Etats-Unis, selon Thévenin 1960, [54] . Marzouki 1992 [57], mentionne des observations faites sur 17 barrages en Maroc allant jusqu'à 144 g/l [5.434 %], avec des moyennes de 3 à 21 g/l [0.113 à 0.792 %]. Des concentrations de sédiments jusqu'à 400 g/l [15.094 %] ont été mesurées dans la rivière jaune en Chine, valeur donnée par Hu 1995 [58].

Les dépôts sédimentaires qui se trouvent dans les réservoirs peuvent être retirés, soit :

- en recourant à une énergie externe comme dans le cas d'une excavation mécanique de dragage, soit :
- en tirant avantage du potentiel disponible de l'eau arrêtée ou en écoulement, par le moyen de

purges ou de vidanges.

Grossièrement, deux types d'exploitation sédimentologie d'un réservoir peuvent être distingués.

- ✓ La régulation pluriannuelle ou saisonnière, où les sédiments peuvent se déposer librement dans le barrage et sont évacués à intervalle régulier par une vidange partielle ou totale du bassin. C'est ce principe qui est appliqué actuellement dans la plupart des grands réservoirs. Cette méthode est souvent à l'origine de dégâts dans le cours d'eau aval et nécessite l'arrêt de l'exploitation normale du réservoir pendant l'opération qui peut durer plus ou moins longtemps. Elle permet normalement d'équilibrer le volume de sédiments à long terme à un niveau acceptable.
- ✓ La régulation événementielle en situation de crue, où les sédiments sont évacués à l'instant de leur arrivée dans le lac par des moyens appropriés comme le passage par un évacuateur de fond accompagné éventuellement d'un abaissement du plan d'eau. Le principe est de réduire au minimum possible le taux de rétention des sédiments pendant la période des fortes crues caractérisées par des apports solides considérables, en maintenant le taux de rétention de l'eau élevé pendant le reste du temps. La dérivation en cas de crue d'un affluent chargé en sédiments permet d'atteindre le même résultat. Cette méthode s'avère particulièrement utile pour les réservoirs situés sur des cours d'eau à grande variation de charge en suspension, où une seule crue peut transporter plus de 90% de la charge solide annuelle totale. Cette méthode permet de limiter au minimum le volume de sédiments accumulés et de garantir à long terme l'équilibre du cours d'eau.

Ce sont essentiellement les techniques de purge par les organes de vidange qui permettent la régulation sédiment logique d'un réservoir. L'enlèvement des dépôts par l'ouverture de la vanne inférieure d'un barrage est une méthode pratiquée dans le monde entier avec un succès très variable. L'efficacité de la chasse dépend en grande partie du niveau d'eau au moment de l'opération. Pour ne pas abaisser le niveau d'eau au moment de la chasse, elle est effectuée en charge et son effet est limité à une zone proche de l'entrée de la vidange de fond.

Une fois la vanne ouverte, une dépression en entonnoir se développe rapidement autour de l'entrée de la vidange de fond. Aussitôt que les pentes du cratère atteignent l'angle de talus naturel des sédiments, la capacité d'extraction des sédiments devient nulle.

Le soutirage des courants de densité par la vidange de fond constitue un cas spécial de purge à lac plein. Souvent considéré comme un moyen très rentable de dévasement, son application efficace nécessite des organes spécialement conçus, permettant d'évacuer de grandes

quantités d'eau pendant des durées adaptées à celles des crues. La formation et le maintien des courants de densité dans le réservoir peuvent être plus ou moins favorables à ce type d'opération.

La purge peut être très efficace lorsqu'elle se pratique parallèlement à l'abaissement du niveau d'eau. L'efficacité est en relation inverse avec la hauteur d'eau. Par une évacuation continue des dépôts sédimentaires, il est possible d'éroder un canal qui peut même atteindre l'ancien lit fluvial si les conditions favorables suivantes sont réunies :

- Abaissement complet du niveau d'eau.
- Débit de chasse suffisant.
- Durée adéquate de l'opération.

L'érosion suit en général le profil longitudinal du réservoir, mais son action latérale est assez faible. En renforçant l'opération sur les côtés à l'aide d'engins mécaniques, l'efficacité de l'extraction peut s'étendre à tout le réservoir.

L'efficacité d'une opération de vidange complète peut encore être améliorée si on dispose d'un réservoir à l'amont qui permet des lâchers d'eau pendant la vidange. La réalisation d'une chasse pendant une crue aurait un effet similaire, toutefois sans contrôle ni du débit ni de la durée.

Le traitement théorique de la chasse dans un réservoir présente de grandes difficultés vu les mécanismes complexes d'écoulement d'eau et de sédiments. Toute analyse implique nécessairement des simplifications importantes. Il est possible de minimiser les pertes d'eau avec une vidange à un niveau d'eau le plus haut possible sans pour autant perdre trop d'efficacité. L'exploitant doit donc rechercher le niveau d'eau optimal dans le réservoir (Drawdown Water Level). A profondeur d'eau non nulle et en supposant que le débit liquide soit constant pendant la vidange, l'écoulement atteindra sa vitesse minimale près du barrage, vitesse déterminante pour l'efficacité de la chasse.

Une méthode simple pour estimer l'efficacité d'une chasse est présentée par Scheuerlein 1992 [59] . Elle est basée sur une analyse unidimensionnelle pour un réservoir en forme simplifiée de prisme. L'analyse permet de trouver le niveau d'eau optimal dans le réservoir pour une vidange efficace en fonction d'une vitesse critique de mise en mouvement des sédiments de granulométrie spécifiée.

Le siphonnement est une autre méthode intéressante pour retirer les dépôts sédimentaires d'un réservoir sans recourir à une source d'énergie externe. Comme pour l'opération de purge, c'est la différence de pression entre le niveau du réservoir et celui de la vanne inférieure qui fournit l'énergie. Contrairement à la purge, l'étendue du siphonnement peut être augmentée

par l'utilisation d'un tuyau flexible rattaché à la vidange de fond et muni d'une tête aspirante à son autre extrémité.

2.4.2. Vitesse de chute d'une particule élémentaire

Dans une eau calme, une particule élémentaire est soumise à trois forces : force de gravité (proportionnelle à la masse de la particule), poussée d'Archimède, résistance opposée du fluide au mouvement de la particule.

Suivant le mouvement relatif du fluide par rapport à la particule, l'écoulement sera laminaire (régime de Stokes), semi-turbulent (régime d'Allen) ou turbulent (régime de Newton-Rittinger). Ces différents régimes correspondent à des nombres de Reynolds différents.

La vitesse de chute dépend de la force hydrodynamique de résistance, définie comme suit :

$$T=3\pi\mu dW, \quad (2.1)$$

pour un régime laminaire

$$T=C_d\rho AW^2, \quad (2.2)$$

pour un régime turbulent et transitoire :

$$Re=Wd/\nu, \quad (2.3)$$

avec W : vitesse de chute, d : diamètre de la particule, ν : viscosité cinématique de l'eau (égale à 20°C à $10^{-6}m^2/s$ et 3,5 °C à $1,6 \cdot 10^{-6}m^2/s$), C_d : coefficient de traînée.

a)- Ecoulement laminaire (loi de Stokes $d < 0,12mm$) $Re < 1$

$$W=Kd^2=\frac{(\rho_s-\rho)}{18\rho}d^2g/\nu \quad (2.4)$$

où ρ_s et ρ étant respectivement la masse volumique du solide et du fluide (en kg/m^3 ou en g/cm^3).

b)- Ecoulement semi turbulent (sables $0,12 < d < 2mm$) $1 < Re < 500$

Dans ce régime l'établissement des lois définissant la vitesse de chute rencontre des difficultés, mais il existe plusieurs lois telles que la loi de Contrarov (1969):

$$W = 0,0811 \log \left(83 \left(\frac{3,7d}{d_m} \right)^{1,0037T} \right) \frac{g^{2/3} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{2/3}}{\nu^{1/3}} d \quad (2.5)$$

Où T : température, d_m : diamètre maximal = 1.5mm, notons que les résultats expérimentaux restent les plus représentatifs de la vitesse de chute dans un régime semi-turbulent où cette vitesse est donnée par la relation $W=Kd$.

De nombreuses mesures ont été faites au LCHF « laboratoire central d'hydraulique de France » sur des matériaux naturels et artificiels ayant des gammes de densités comprises entre 2.6 et 1.045, des abaques ont été élaborés permettant d'avoir directement les vitesses de chute.

c)- *Ecoulement turbulent (galets $d > 2\text{mm}$) $Re > 500$*

$$W = Kd^{1/2} \text{ avec : } K = 70 \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^{1/2} \text{ (en CGS)} \quad (2.6)$$

2.4.3. Influence de la concentration des particules

La vitesse de chute des particules supérieures à 100microns (0.1mm) diminue lorsque la concentration de la suspension augmente. Des formules et des graphiques en été établis, dont :

a)- *Formule de Famularo (1962)* [60]

$$\frac{W'}{W_c} = 1 + 1,30G^{1/3} \quad (2.7)$$

b)- *Formule de Burgers (1941)* [61]

$$\frac{W'}{W_c} = 1 + 6,88C_v \quad (2.8)$$

où C_v : concentration volumique.

W_c : vitesse de chute d'une particule élémentaire isolée.

W' : vitesse de chute dans une eau chargée.

D'après Gandin le rapport entre les deux vitesses $\frac{W'}{W_c}$ est donné par un graphe.

Notons que sur des éléments très fins (poudres, limons, vases et argiles) que le phénomène est plus complexe par suite de la floculation qui active la vitesse de sédimentation à certaines concentrations.

2.4.4. Bilan des échanges érosion –sédimentation :

Le terme source représentant le bilan des processus d'érosion et de dépôt des sédiments en suspension selon Jobson et Sayre 1970 [62] et Celik et Rodi 1988 [63] est pris égal à :

$$S = \alpha w(cs - c) \quad (2.9)$$

w : est la vitesse de chute.

Ce terme source dépend des conditions hydrodynamiques (hauteur, vitesse) et à la fois du coefficient α et de la concentration de sable à l'équilibre c_s . Les variations de α sont en général négligeables. Le coefficient α est en effet souvent pris égal à 1, valeur testée par Van Rijn 1985 [64], ou utilisée comme constante homogène de calage (Naceur2000) [65]. Nous avons, en ce qui nous concerne, choisi d'utiliser le coefficient α donné par la formule de Lin et al. (1983).

$$\alpha = \frac{1}{3} \left(\frac{h}{2d_{50}} \right)^{w/ku^\psi} \quad (2.10)$$

avec ψ , un coefficient empirique pris égal à 10, $k = 0.40$, constante de Von Karman et u^* la vitesse de cisaillement sur le fond: $u^* = \frac{\sqrt{g}}{c_k} u$.

Le coefficient de rugosité de Chézy est soit une constante, prise égale à $60 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$, soit calculé par la formule suivante : $Ch = 18 \log(12h/3d_{90})$.

$$c_s = \frac{d_{50}}{k_s} \frac{T^{1,5}}{D^{0,3}} \quad (2.11)$$

$$D_* = d_{50} \left(\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (2.12)$$

c_s : la concentration de sable à l'équilibre donnée par Van Rijn 1984 [67].

s : la densité des sédiments.

ν : la viscosité cinématique de l'eau.

k_s : la rugosité équivalente.

T : le nombre de Van Rijn exprimé par la formule suivante :

$$T = \frac{\tau_c - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} = \rho \frac{u_c^2 - u_{cr}^2}{u_{cr}^2} \quad (2.13)$$

La vitesse de chute est calculée par la formule suivante :

$$w = \frac{10\nu}{d_{50}} \left(\sqrt{1 + 0.01(s-1)gd_{50}^3} - 1 \right) \quad (2.14)$$

2.4.5. Tassement des vases

a) Sédiments grossiers (sable, graviers, cailloux) :

Les sédiments grossiers du type sables, galets et graviers, une fois déposés sur les fonds ne se tassent pratiquement pas ; s'ils subissent une 'remise en place' et une imbrication entre eux, on peut admettre toutefois qu'ils restent quasi stables dans le temps.

b) Sédiments fins (limons-vases-argiles) :

Les éléments fins par contre sont essentiellement variables dans le temps et se tassent en perdant leur eau interstitielle. Ils se consolident et passent d'un état fluide à un état plastique, puis solide.

Après leur dernière phase de décantation gravitaire, à vitesse entravée, les flocons de vase vont commencer, sous l'évacuation de couches déposées au-dessus à se tasser en évacuant progressivement leur eau interstitielle.

Dans ces domaines de tassement, la variation de la concentration t_s répond à l'expression suivante:

$$t_s = \alpha \cdot \text{Log}t + \beta \quad (2.15)$$

Où

t : le temps par (heure).

α = facteur qui dépend principalement du diamètre des particules augmentant avec la taille des particules.

β = facteur lié au milieu aqueux.

Le tassement des sédiments dans un milieu aqueux dépend de très nombreux paramètres : nature et dimension des particules, influence du milieu aqueux, conditions de sédimentation (hauteur, concentration initiale, température).

✓ Influence de la nature et de la dimension des particules : Le tassement des vases, boues ou limons dépend de la dimension, de la forme et de la charge électrique des particules solides formant les dépôts. D'une façon générale la concentration moyenne du culot de tassement en eau douce naturelle, sera d'autant plus importante que le diamètre des particules élémentaires sera plus grand.

On peut estimer pour les sédiments inférieurs à 10μ que cette concentration moyenne augmente pratiquement linéairement en fonction du diamètre d (en microns) des particules selon des expressions de la forme suivante :

- Après 6 mois de tassement : $t_s \text{ (g/l)} = 300 + 80d$.
- Après 10 jours de tassement : $t_s \text{ (g/l)} = 200 + 75d$.
- Après 10 heures de tassement : $t_s \text{ (g/l)} = 150 + 50d$.

Dans tous les cas, la concentration moyenne du culot de tassement variera comme il a été dit, en fonction du logarithme du temps t : $t_s = \alpha \text{ log}t + \beta$

La valeur du facteur α est une fonction croissante du diamètre qui atteint des valeurs d'autant faibles que l'on passe de la phase de tassement par décantation des flocons, aux phases d'élimination de l'eau interstitielle et de l'eau fixée aux micelles :

- Décantation des blocs : $\alpha=0,01+0,05d$
- Elimination des eaux interstitielles : $\alpha'=0,01+0,015d$.
- Elimination des eaux fixées aux micelles : $\alpha''=0,01+0,001d$.

✓ Influence de la hauteur de la suspension : un dépôt de sédiments très fins tend d'autant plus rapidement vers une asymptote de tassement que l'épaisseur initiale du dépôt sera faible ; si l'épaisseur initiale du dépôt est faible, les eaux s'évacueront rapidement des couches sous-jacentes et les vases se tasseront très vite alors que le processus est inverse si les dépôts sont répartis sur de grandes hauteurs.

b) Transports solides:

Ce phénomène est le principal élément moteur après l'érosion, conduisant au processus d'envasement des barrages. Ce processus fait le lien entre les sols du bassin versant et la retenue du barrage. Il est défini par un écoulement diphasique caractérisé d'une phase liquide (eau) et d'un autre solide (granulats, sol).

Dans les cours d'eau naturels, les particules solides vont être transportées en suspension ou en charriage (Figure 2.2).

Dans le transport en suspension les particules solides élémentaires se déplacent en suspension au sein de l'écoulement avec la même vitesse que celle du fluide, où la turbulence maintient les éléments fins en suspension.

Dans le transport par charriage une partie des gros granulats se déplace sur le fond des lits des cours d'eau, soit par glissement (ou roulement), soit par saltation.

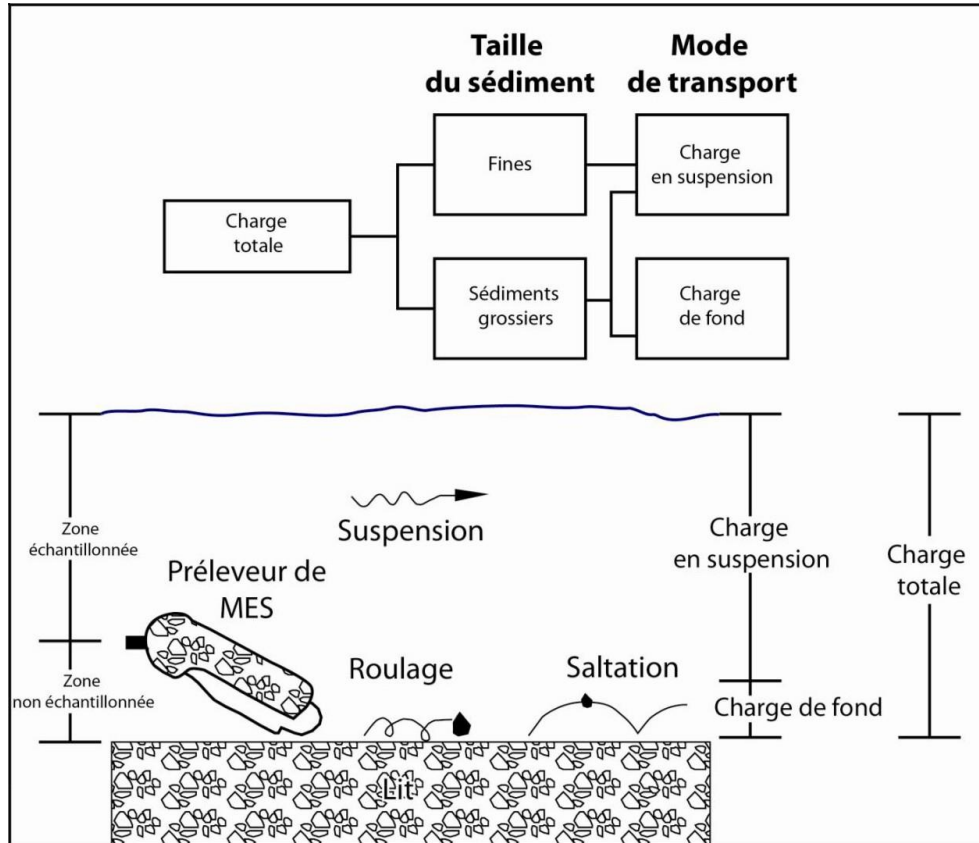


Figure 2.2. charge en suspension et la charge de fond [35].

2.5. Transport fluvial des sédiments

Après la phase de détachement des matériaux sur les versants, ces derniers sont pris en charge par les cours d'eau qui les transportent vers l'aval. Les caractéristiques de ces sédiments en transfert constituent ainsi un facteur essentiel à la détermination des mesures les plus adéquates à leur gestion. On distingue deux types de charge inhérents à la taille des éléments les constituants, à la matière en suspension (MES) et à la charge de fond.

a. L'importance de la connaissance des propriétés des sédiments

Plusieurs éléments sont à prendre en considération pour avoir une bonne approche des sédiments en transfert qui se déposent dans les réservoirs. La classification de taille des sédiments est le premier d'entre eux (Figure 2.2). Selon ce critère il est possible de différencier le mode de transport, à savoir en surface ou en fond du lit. Les sédiments en transport par l'eau peuvent être classés en sept catégories, allant de l'argile aux blocs. Ainsi la taille des sédiments en transport dans l'eau est le paramètre essentiel à leur étude. De nombreuses classifications nationales existent pour décrire la taille caractéristique de chaque grain. Nous utiliserons dans cette recherche la classification française.

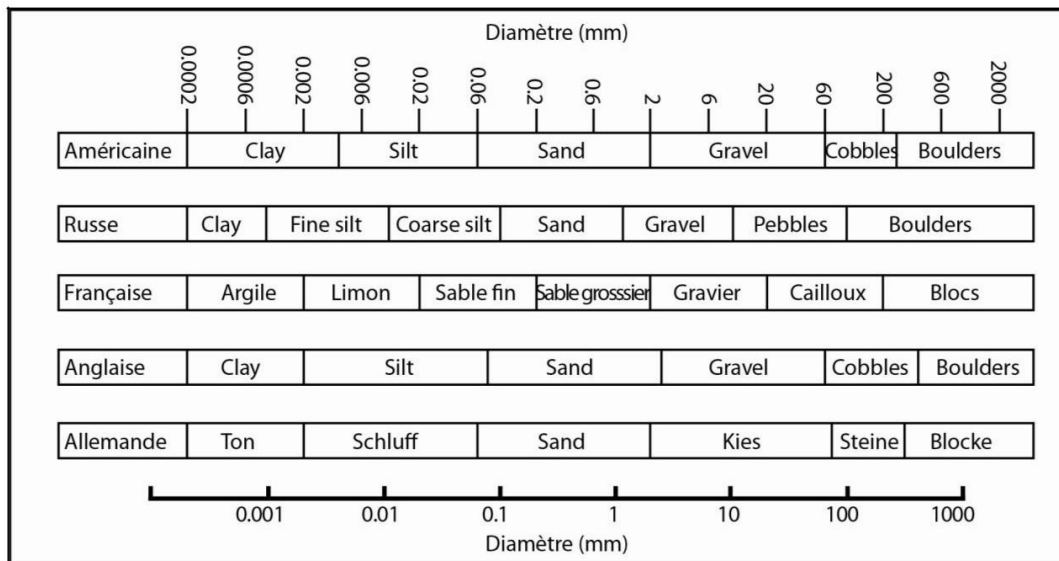


Figure 2.3. Comparaison des classifications nationales de tailles des particules [35].

2.5.1 La matière en suspension (MES)

La MES ne concerne que les éléments les plus fins des matériaux transportés généralement en suspension, par les cours d'eau sans réelle interaction avec le fond du lit (Figure 2.2). Ces derniers se trouvent dans la tranche supérieure de la lame d'eau et connaissent un déplacement rapide. Les éléments en suspension constituent la fraction la plus importante des sédiments en transfert mais ne représentent qu'une faible proportion de la masse totale en déplacement (environ 10%).

La charge fine en transport constitue indubitablement la partie la plus importante des sédiments qui vont s'accumuler dans les réservoirs de barrages.

2.5.2 La charge de fond.

La seconde partie des matériaux pris en charge par les cours d'eau concerne la charge de fond. Dans une grande majorité des cours d'eau la charge de fond correspond à une petite fraction (moins de 15%) de la charge totale [35]. Leur déplacement est plus lent que les sédiments en suspension mais peut devenir plus rapide lors d'épisodes de crue.

Ces sédiments plus grossiers, une fois piégés dans le réservoir, vont être plus difficilement remobilisables lors des lâchés d'eau et constituent alors une perte nette de la capacité des réservoirs.

Ces derniers restent difficilement quantifiables du fait de leur déplacement en fond de lit. De nombreux moyens existent pour échantillonner la charge de fond, chacun ayant un degré d'efficacité propre en fonction de la condition du lit et du débit. Aussi, certains matériaux peuvent être collectés par inadvertance. Le modèle Helley Smith (modèle C dans la figure 2.4) [36] est le plus souvent utilisé (Emmet, 1981). Il consiste en un filet attaché à un orifice en métal, placé à contre courant, servant à piéger les matériaux. Un chronomètre pour enregistrer le temps de mesure y est aussi associé, en sachant que plus la durée d'échantillonnage sera longue, plus l'échantillon sera représentatif des conditions sédimentaires réelles. Tout comme les échantillons de MES, l'échantillonnage doit s'effectuer à intervalle régulier. Une fois l'échantillon collecté, on pourra alors peser ce dernier afin d'en déterminer la masse de sédiment par unité de temps. La figure 2.4, présente différents modèles servant à échantillonner la charge de fond. De nombreux ouvrages traitent de la question et s'interrogent sur les différentes méthodes de prélèvement [37 ; 38].

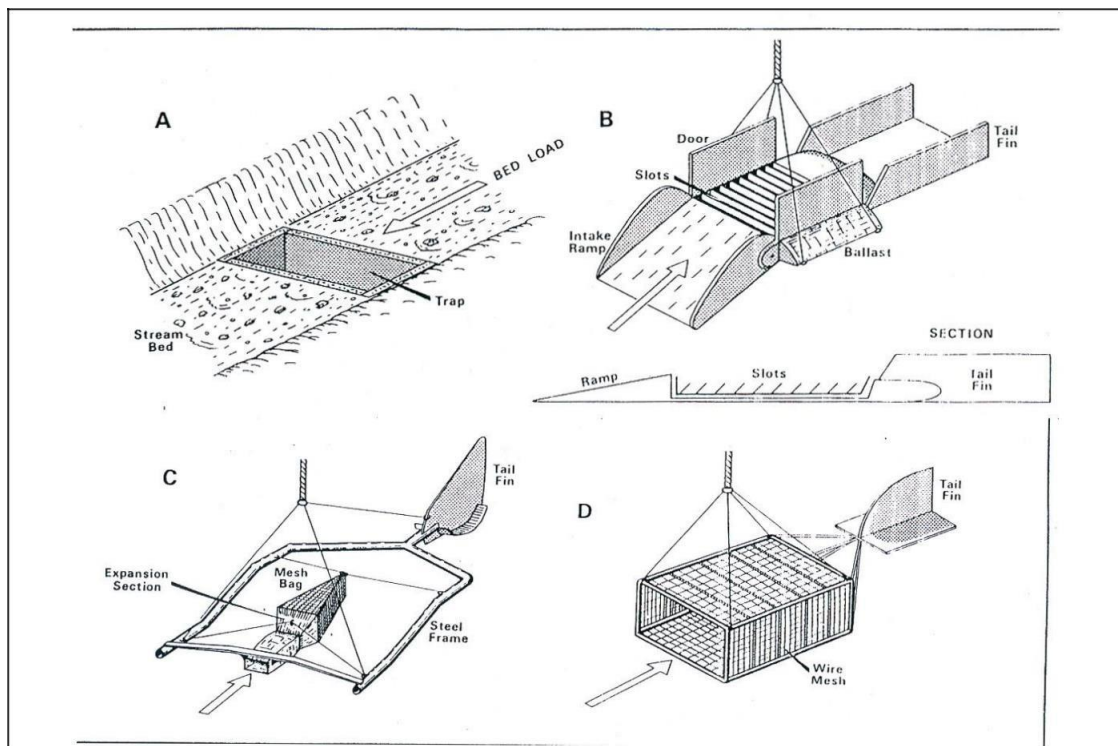


Figure 2.4. Modèles servant à échantillonner la charge de fond [35].

d) Sédimentation et envasement.

La sédimentation dans les réservoirs – étant le résultat d'une interruption du transfert des flux liquides – modifie la morphologie des cours d'eau par le dépôt de matériaux temporaires ou définitifs. Ces transferts sédimentaires sont donc sources de nombreux problèmes qu'il est

essentiel d'analyser avec précision pour obtenir des prévisions réalistes. Il s'agit de pouvoir évaluer correctement les lâchés d'eau nécessaires à l'évacuation de la charge de fond et ainsi de déterminer les conditions d'érosion et de dépôts de ces derniers tout au long du cours d'eau. En effet, la prise en compte de ces problèmes est une condition nécessaire à l'aménagement du cours d'eau en aval des barrages afin de localiser correctement les zones sensibles et de pouvoir, en priorité, les protéger. De nombreux logiciels de transport de sédiments ont été créés dans le but de répondre à cette question, en tentant d'évaluer le plus correctement possible la charge de fond en transport qui demeure, à l'heure actuelle, le facteur le plus difficile à quantifier.

L'étude du transport sédimentaire reste un domaine complexe mais quelques ouvrages permettent de rendre compte des connaissances sur le sujet. Yang (1996) dresse un état général de la question concernant le transport sédimentaire en comparant la théorie et les équations. L'approche de Julien (1995), différente de celle de Yang, présente un panorama des équations fondamentales et de leurs applications. Chang (1988) traite du transport sédimentaire en insistant, quant à lui, sur l'aspect quantitatif des processus fluviaux et sur la morphologie des chenaux alluviaux. Simons et Senturk (1994) ainsi que Vanoni (1975) offrent, pour leur part, une vision globale sur les approches des ingénieurs dans le thème de la sédimentation.

Tableau 2.2. Ouvrages traitant la thématique du transport sédimentaire

Auteurs Organismes	Titre	Année	Éditeur
Yang, C. T.	Sediment Transport: Theory and Practice	1996	McGraw-Hill
Simons, D. B., and Senturk, F.	Sediment Transport Technology	1992	Water Resources Publications
Julien, P. Y.	Erosion and Sedimentation	1995	Cambridge University Press
Kadlec, R. H., and Knight, R. L.	Treatment Wetlands	1995	Lewis Publishers
Chang, H. H.	Fluvial Processes in River Engineering	1988	John Wiley and Sons
Vanoni, V. A.	Sedimentation Engineering	1975	ASCE
Graf, W. H.	Hydraulics of Sediment Transport	1971	McGraw-Hill

Les modèles se sont alors affinés et rendent désormais compte plus fidèlement du volume sédimentaire retenu dans les réservoirs de barrages. Tous les résultats issus de ces recherches permettent une meilleure compréhension du phénomène et donnent des réponses réellement plus efficaces dans la prévention d'un dépôt trop rapide de sédiments dans les réservoirs. Ces derniers offrent des chiffres plus cohérents permettant aux exploitants d'adopter la stratégie la plus adéquate à l'évacuation de ces sédiments. La conservation de la capacité de stockage demeure pour l'instant la grande priorité des gestionnaires de ces ouvrages.

Les barrages, en piégeant des quantités importantes de sédiments vont provoquer un déficit des apports solides qui ne compenseront pas les pertes dues à l'érosion, entraînant une modification des chenaux en aval des ouvrages et une régression des zones deltaïques à l'embouchure. Les barrages construits ces cinquante dernières années ont fortement réduit la quantité de sédiments atteignant les littoraux de $1,4 \times 10^9$ t/an ($\pm 0,3 \times 10^9$) [39]. Cette baisse est d'autant plus préoccupante que la quantité de sédiments charriés par les cours d'eau a globalement augmenté de $2,3 \times 10^9$ t/an ($\pm 0,6 \times 10^9$) en raison de l'érosion accrue des sols liée aux activités humaines.

Les figures ci-dessous résument parfaitement les impacts que peuvent produire l'installation des barrages sur le milieu, à la fois en amont et en aval de ces ouvrages. Ces perturbations sont des éléments importants dont il faut tenir compte lors des études d'impacts environnementaux préalables à la construction des barrages sous risque de se retrouver confronté à de graves problèmes de gestion [40].

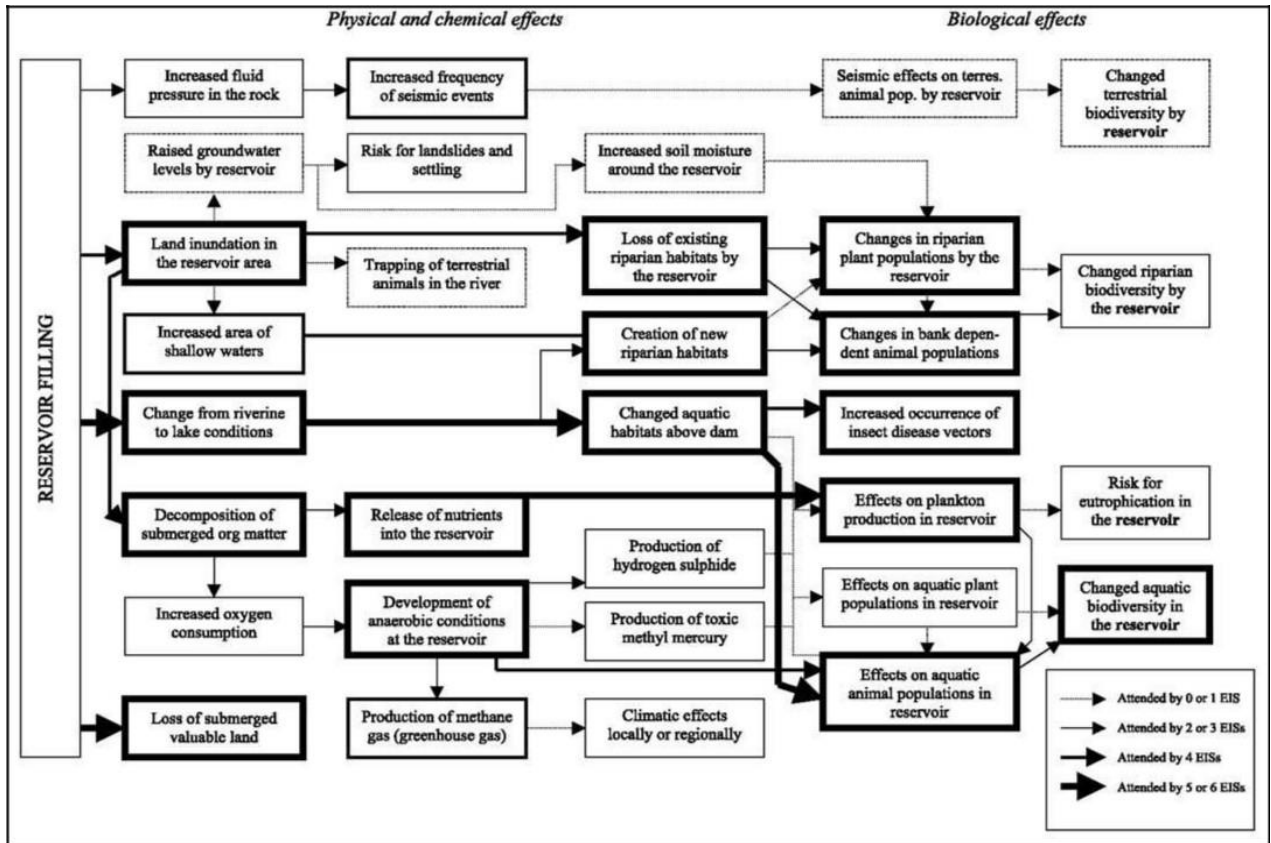


Figure 2.5. Effets en amont des réservoirs dans la zone ennoyée [41].

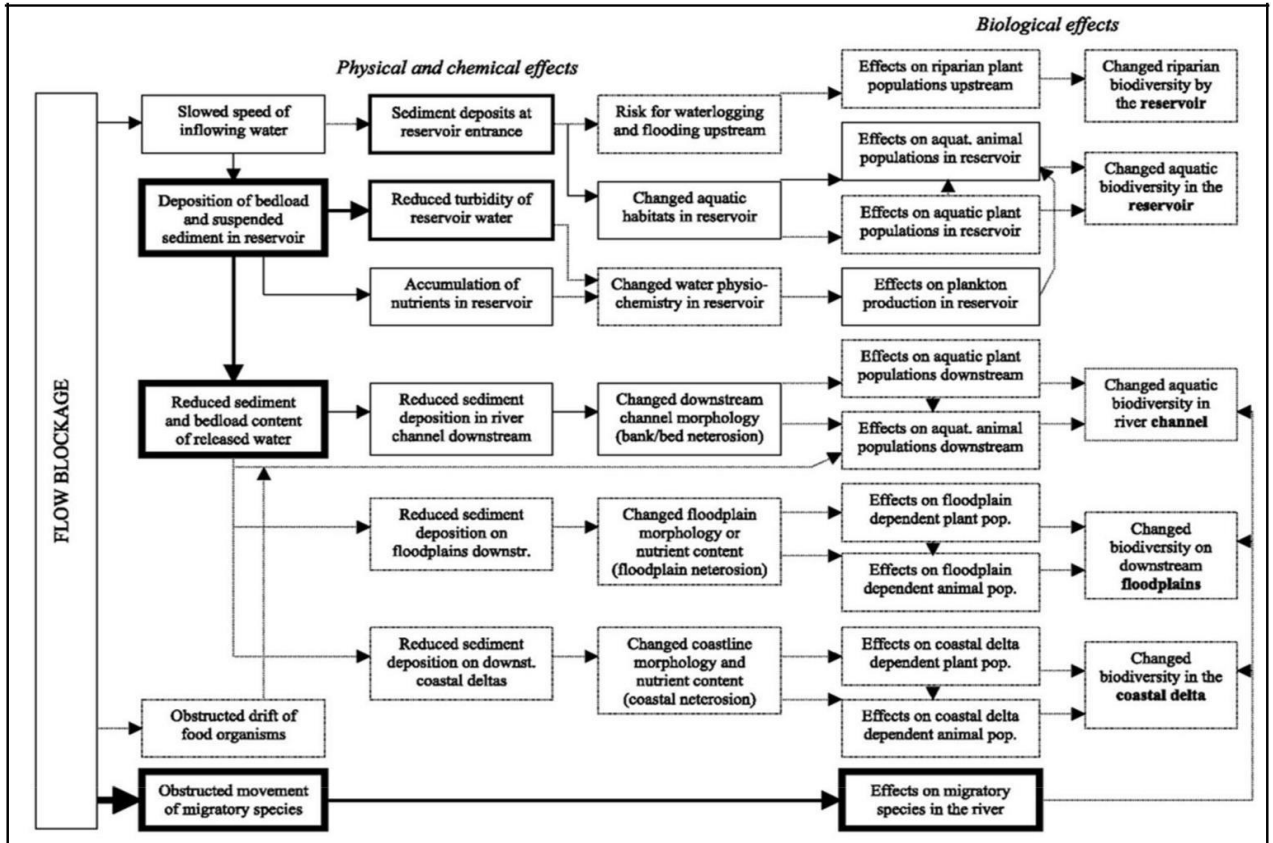


Figure 2.6. Effets en aval des réservoirs [41].

La sédimentation est l'étape finale de l'alluvionnement des retenues. A l'état naturel les cours d'eau transportent progressivement des quantités importantes de sédiments. Les eaux chargées de matériaux fins forment un courant de densité qui s'écoule dans la retenue accélérant le phénomène d'envasement. Le processus sédimentaire comme spécifié ci-haut consiste dans une altération superficielle et de désagrégation ou destruction mécanique de roches, un transport et un dépôt de matières solides. Celles-ci se déposent, des plus grandes particules aux plus petites, de l'amont vers l'aval de la retenue (Figure 2.7). Les différents mécanismes de l'envasement dépendent du type de retenues (morphologie) et des conditions de sédimentation existant à l'amont de la retenue (érosion et transport solide).

L'étude des transferts sédimentaires se situe à l'interface de plusieurs thématiques de recherche impliquant la prise en compte de plusieurs processus qui vont se relayer à différentes échelles de temps et sur un territoire plus ou moins vaste. Ainsi, certaines de ces recherches portent plus particulièrement leur attention sur l'origine des sédiments qui se déposent dans les lacs de barrages. Ces études s'articulent alors autour des trois thèmes suivants : la libération de matériel dans les secteurs amont à travers les processus d'érosion (érosion des sols), le transport des flux solides dans les cours d'eau et la quantification des sédiments déposés dans les réservoirs. Ces études présentent aussi le très grand intérêt d'être à même de pouvoir évaluer la quantité de matériel en jeu. La communauté scientifique a ainsi apporté des éléments de compréhension importants à travers leurs travaux autour de ces trois thèmes.

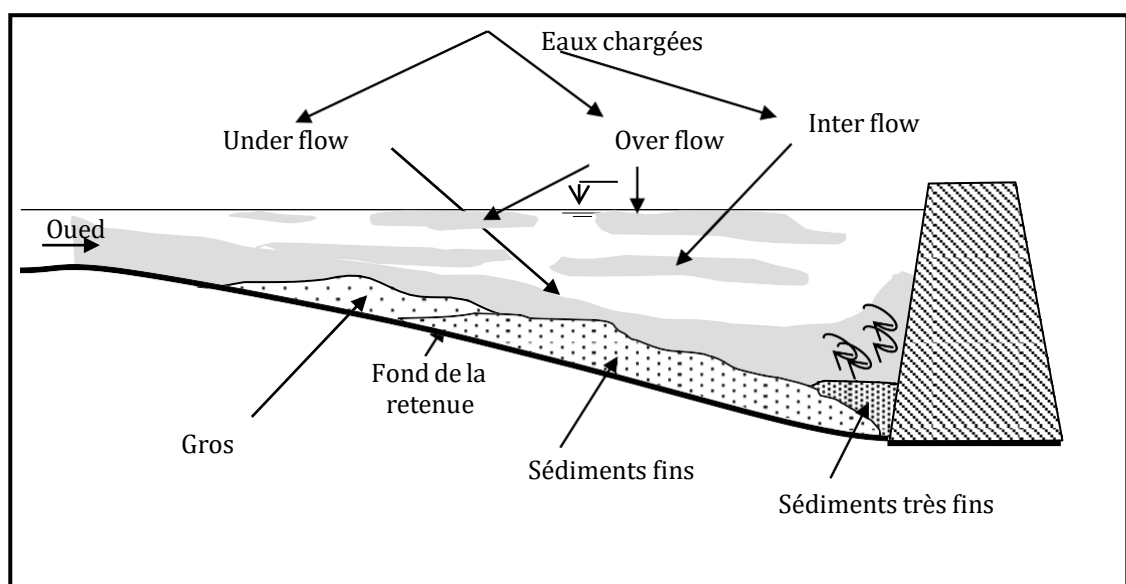


Figure 2.7. Mécanismes de sédimentation des barrages

Parfois l'envasement des barrages est lié à des erreurs commises par les organismes responsables de l'étude du projet et/ou de sa réalisation et/ou enfin de la gestion de l'ouvrage pendant l'exploitation. Ces erreurs dites techniques peuvent être énumérées comme suit :

a) Mauvaise évaluation du problème de l'envasement avant la construction du barrage, pouvant être le résultat de plusieurs facteurs, tels que :

- L'utilisation de modèles empiriques statiques ou établis dans des conditions différentes de celles du site étudié.
- Le manque d'élaboration de modèles de prévision : ces modèles exigent de longues séries de données (météorologiques, hydrométriques.), alors que la qualité des prévisions qu'on en tire est très fortement influencée par la réponse systématique historique.
- Exploitation de fausses données, résultats des fausses mesures : durant les périodes des crues les prélèvements des échantillons pour déterminer la concentration se font dans des endroits non représentatifs de la section d'écoulement.

b)- Mauvaise exploitation et implantation des ouvrages annexes à cause de l'ignorance du mécanisme des courants de densité, ainsi :

- La direction des courants de densité varie avec la morphologie de la retenue et leur évacuation se fait à partir des ouvrages de soutirage ; si ces derniers sont mal positionnés la vase sera emmagasinée en amont du barrage ;
- Le mode d'écoulement de cette vase dépend de sa rigidité qui varie avec la nature des sédiments et leur temps de séjour dans la retenue, et dont la connaissance permet d'optimiser les manœuvres des ouvrages de soutirage.

A la lumière des conditions multiformes des processus complexes : érosion – transport solide – dépôt des sédiments, il convient de souligner l'importance de la quantification de l'envasement des retenues de barrage, des études de modélisation de l'envasement tenant compte des mécanismes et du mode de dépôt-accumulation des vases dans la retenue. Cette approche présente un intérêt économique important permettant de prévoir les mesures nécessaires au cours de l'exploitation, dans le but d'augmenter la durée de vie des ouvrages hydrauliques concernés.

2.6. L'alluvionnement dans les réservoirs et les moyens de lutte contre ce phénomène :

2.6.1. Les facteurs conditionnels de l'engravement des réservoirs :

Un réservoir s'enserasera d'autant plus rapidement que sa capacité V faible vis à vis du débit solide Q_s , véhiculé par le cours d'eau qui alimente le réservoir, étant dans une région

déterminée approximativement proportionnel au débit liquide Q_e lui-même est relié à la superficie S du bassin versant par une loi linéaire.

Il est nécessaire de caractériser un réservoir par sa capacité (spécifique) en m^3/km^2 du bassin versant.

Les apports solides venant de l'amont sont fonction essentiellement :

- De la surface de la topographique et de la nature géologique du bassin versant
- Du régime des pluies et de la température
- De la résistance à l'érosion du sol, liée à sa teneur en eau et à son couvert végétal (forêt, pâturages, culture).

Une partie du débit solide Q_s du cours d'eau est évacuée à l'aval du barrage, soit du fait de l'exploitation normale soit par manœuvres de chasse.

Le réservoir se dévaseront d'autant plus rapidement qu'ils comporteront de plus grandes vannes au niveau du fond du lit naturel.

Une retenue de faible longueur et de forte pente, engravée de matériaux peu cohérents et de granulométrie moyenne, sera évidemment plus facilement débarrassée de ses dépôts qu'une cuvette plate encombrée de vase consolidés sous de grandes hauteurs d'eau.

2.6.2. Mécanisme de formation des dépôts dans le réservoir :

Au Risque de nous répéter, les éléments en transport dans les cours d'eau, en fonction des obstacles rencontrés (naturels ou anthropiques) sont amenés à soit se déposer temporairement – avant une remobilisation ultérieure –, soit définitivement lors d'une phase d'accumulation – ce qui est généralement le cas dans les réservoirs.

a. Les dépôts temporaires.

Tout au long du cours d'eau, il est possible d'y identifier des secteurs propices aux dépôts de matériaux. Dans le cas des cours d'eau qui présente un profil méandreux, l'accumulation sur les rives concaves a pour effet de stocker une partie des matériaux issus de l'amont. Ce schéma peut être perturbé lors des périodes de crues où les matériaux déposés seront remobilisés et continueront vers l'aval. Des obstacles naturels tels que les embâcles peuvent aussi contribuer à un dépôt de matériaux avant d'être remis en transport lors de la rupture de ce dernier. Selon le profil du cours d'eau les zones de sédimentation sont donc plus ou moins nombreuses et influencent alors le temps de réponse entre la dégradation des sols sur les versants en amont et la sédimentation dans les réservoirs en aval.

b. Les dépôts définitifs

Le dépôt définitif de matériaux a lieu essentiellement dans des dépressions topographiques où l'on retrouve généralement une accumulation d'eau (lacs), ou bien en amont d'ouvrages barrant transversalement le cours d'eau. Les barrages influencent ainsi fortement le bilan sédimentaire qui devient dès lors déficitaire, pouvant affecter le style fluvial du cours d'eau ainsi que les deltas qui alors, moins alimentés, régressent. Le rôle des grands barrages dans le piégeage des sédiments en transit représente un outil de premier choix pour apprécier de manière quantitative les processus érosifs qui interviennent en amont de ces ouvrages [35].

2.6.3. Taux et rythmes de sédimentation à l'échelle mondiale

La figure 2.8 présente la variabilité de la sédimentation dans les réservoirs de barrages à l'échelle mondiale (**ICOLD**).

La grande majorité des études sur les réservoirs de différents pays donnent des résultats qui permettent de rendre compte des disparités régionales dans la vitesse de sédimentation. Les pays du Maghreb représentent 29% des données du fait de la vulnérabilité des sols, de la variation des températures et des agressions climatiques associées aux inondations récurrentes. A cet égard, le Maghreb dont l'Algérie fait partie connaît des taux de sédimentation très élevés.

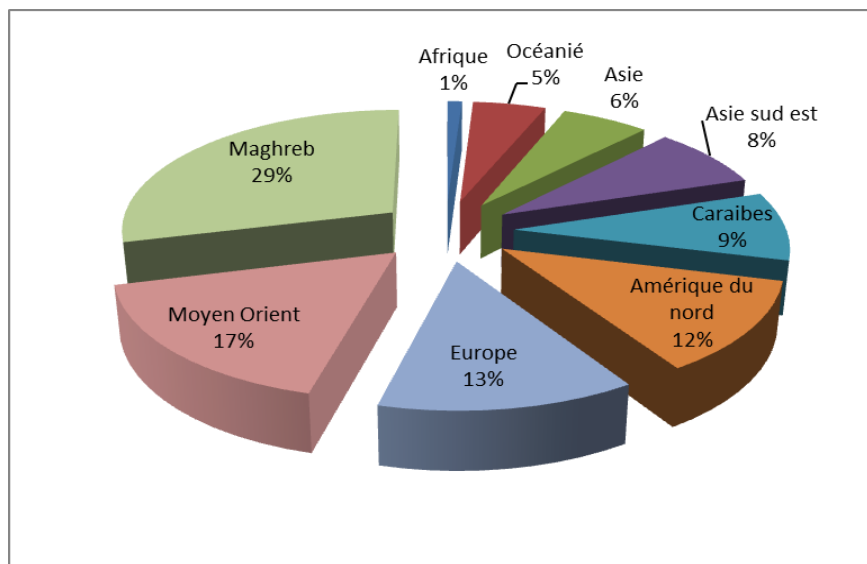


Figure 2.8. Répartition régionale des différents barrages selon la commission internationale des grands barrages (ICOLD)

2.6.4 Analyse des données de sédimentation pour les barrages affectés.

Le tableau 2-3 présenté, nous renseigne assez pertinemment sur les volumes (en m³/km²/an) de sédiments déposés dans les barrages en tenant compte de la taille du bassin versant.

Les chiffres présentés ci-après portent également sur les pays ou la vitesse de sédimentation est élevée ainsi que le nombre de barrages concernés.

Tableau 2.3. Répartition des barrages étudiés par taux de sédimentation [35].

	> à 10 000 m ³ /km ² /an	9001-10 000 m ³ /km ² /an	8001/9000 m ³ /km ² /an	7001-8000 m ³ /km ² /an	6001-7000 m ³ /km ² /an	5001/6000 m ³ /km ² /an	4001-5000 m ³ /km ² /an	3001/4000 m ³ /km ² /an	2001-3000 m ³ /km ² /an	1000 -2000 m ³ /km ² /an	> à 1000 m ³ /km ² /an	total
ALGERIE				1		2		1		3	17	24
AUSTRALIE										2	6	8
AUTRICHE					1					2		3
CHINE											2	2
EGYPTE											1	1
ETATS UNIS	1										16	17
ETHIOPIE									1			1
FRANCE										1		1
GRANDE BRETAGNE											1	1
INDE										1		1
INDONESIE					1		3	2	2	1	3	12
IRAN										2	1	3
ITALIE								1		1	5	7
MAROC											4	4
POLOGNE											2	2
PORTO RICO								1	2	4	7	14
ROUMANIE										2	4	6
TAIWAN	1	1	1	1		1						5
TUNISE							2	3	2	4	3	14
TOTAL	2	1	1	2	2	3	5	8	7	23	72	126

2.6.5. Étude des taux de sédimentation

Le tableau ci-dessus montre les réservoirs qui connaissent des taux de sédimentation supérieur à 2000 m³/km²/an dont l'Algérie. Ces résultats montrent combien la sédimentation est particulièrement active dans le Maghreb.

a) Rapport taille du bassin versant / vitesse de sédimentation

En fonction de la taille du bassin nous pouvons suivre les vitesses de sédimentation pour les différents barrages analysés. On retrouve un taux de sédimentation élevé dans les bassins de petite taille notamment de l'Algérie alors que lorsque la taille du bassin augmente les taux diminuent. En classant les barrages en fonction de la superficie de leur bassin-versant respectif il est possible de distinguer les pays présentant les vitesses de sédimentation les plus élevées dont l'Algérie en particulier, avec 8 barrages sur 28.

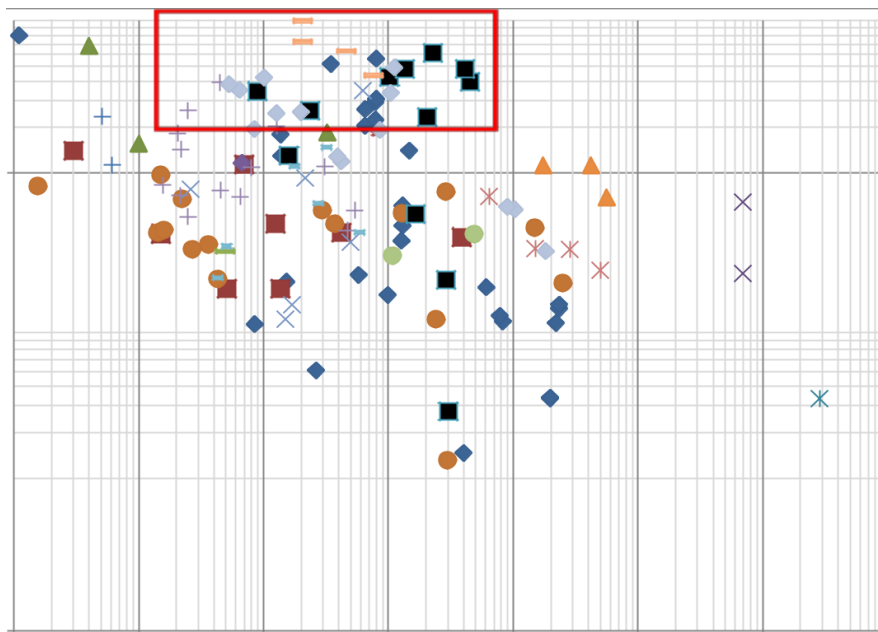


Figure 2.9. Vitesse de sédimentation et surface du bassin-versant
(Dans le rectangle rouge taux $>$ à $2000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$)

La grande majorité des réservoirs est suivie sur une période comprise entre 10 et 30 ans, période assez longue pour être considérée comme représentative. L'objectif étant ici de souligner que les barrages qui présentent ci-dessus des vitesses de sédimentation élevées sont associés à des périodes d'étude assez longues [35].

La sédimentation des réservoirs de barrage réduit progressivement leur capacité utile et affaiblit au long terme leur fonction régulatrice à des degrés variés dans le monde. Dans les pays les plus touchés par ce phénomène, 10 à 20 % de la capacité initiale des réservoirs aménagés est ainsi déjà perdue.

La perte moyenne annuelle actuelle de capacité serait de l'ordre de 1 % à l'échelle mondiale (ICOLD). Malgré le caractère inéluctable de la perte de stockage dans le temps, il est cependant primordial de comprendre quels sont les facteurs qui y

contribuent et de pouvoir les quantifier le plus précisément possible afin d'adapter les stratégies de gestion adéquates.

a) Facteurs de la sédimentation dans les réservoirs de barrage

Les facteurs propices à une importante production sédimentaire, à l'origine du remplissage rapide des réservoirs sont :

- 1- Les facteurs physiques (les climats aux précipitations fortes, les sols meubles facilement mobilisables, la topographie marquée accélérant le déplacement des matériaux mobilisés) ;
- 2- Les facteurs anthropiques (forte pression démographique, défrichement massif des surfaces boisées, politiques agricoles accentuant les taux d'érosion, etc.).

2.6.6. Dépôts formés par les matériaux charriés :

L'évolution du delta à l'amont peut être schématisé ainsi : lors des crues le front du plateau avance vers le barrage ; sa pente diminue, son extrémité aval forme un talus d'éboulement lorsque le débit conserve sa valeur moyenne on observe un alluvionnement régressif; la pente du plateau augmente après un certain temps mais assez lentement. L'abaissement du plan d'eau entraîne l'avancée du plateau vers le barrage tandis que son élévation augmente l'alluvionnement vers l'amont. Le remblaiement acquiert son intensité maximum dans les zones à fortes vitesses mais celles-ci se déplacent du fait de ce remblaiement lui-même, ce qui tend à égaliser les dépôts.

La divagation des courants limite l'efficacité des chasses dans les retenues de grande largeur car le débit au lieu de se répartir également sur toute celle-ci (la largeur) se concentre en quelques bras à fort débit par mètre qui creusent dans les dépôts de véritables canyons dont les berges s'éboulent plus ou moins il faut rattacher à ce phénomène, la formation d'îles que l'on n'observe parfois vers la limite du remous des barrages spécialement dans les parties en courbe du cours d'eau.

2.6.7. Dépôts formés par les matériaux transportés en suspension :

Les matériaux fins en suspension dans l'eau se déposent suivant leur grosseur dans la région de la retenue ou la vitesse et la turbulence sont suffisamment amorties. Dans la zone du plateau sous lacustre ou ne rencontre jamais de vases et de limons que sur la berge à faible pente, le plus souvent elles se rassemblent au fond de la cuvette à l'aval du front des matériaux charriés et tendent à se concentrer au pied du barrage.

Dans les retenues de faibles importances par rapport au débit d'alimentation surtout si elles sont étroites et de faible longueur les matières en suspension dans l'eau n'ont pas le temps de se déposer complètement et sont partiellement transportées à l'aval à travers les ouvrages de prise et d'évacuation des crues.

Il arrive parfois que les matières en suspension, au lieu de se déposer plus ou moins complètement dans toute la masse du réservoir, se concentrent en un courant de densité ou (under flow) qui peut couler soit superficiellement, soit entre deux eaux suivant sa densité par rapport à l'eau qui l'entoure.

L'intérêt pratique de l'étude systématique des courants de densité réside dans la possibilité de les utiliser pour évacuer à l'aval du barrage les matières en suspension qu'ils transitent sans dépôts à travers la retenue.

A cet effet, il conviendrait de prévoir plusieurs vannes (reparties sur toute la largeur de la partie inférieure du barrage) de hauteur relativement faible vis à vis de l'épaisseur du courant de densité ; celles-ci seraient ouvertes particulièrement pendant et après les crues pour soutirer les eaux à fortes concentrations apportées par l'under flow à la rigueur dans les barrages existants on pourrait utiliser dans ce but les vannes de vidange bien que leurs nombres, leurs dimensions et leurs emplacements soient rarement adaptés à ce rôle.

2.7. Méthodes de calcul :

La sédimentation est due au débit solide des cours d'eau amont, qui résulte lui-même de l'érosion générale du sol et de l'agression des berges et du lit des cours d'eau. Bien qu'il existe différentes méthodes pour réduire la production de sédiments dans le bassin versant et le cours d'eau, l'apport de matières solides par les affluents ne peut être influencé de manière significative sur le long terme.

Il est difficile de fixer l'intensité de la pluie susceptible de provoquer l'entraînement des particules solides, car la résistance du sol est changeante dans l'espace et dans le temps.

Thévenin (1960) [54], donne comme seuil critique d'intensité de pluie i sur 60 minutes en Algérie $i_{60\text{min}} \geq 15$ mm/h, avec des pointes d'intensité sur une minute dépassant $i_{1\text{min}} \geq 60$ mm/h. Selon Thévenin, ces valeurs peuvent être adoptées comme premier critère d'érosion, bien qu'il soit très difficile d'établir une corrélation générale entre la pluviométrie et l'érosion.

Sinniger et al 1994 [55] proposent une intensité sur 15 minutes de $i_{15\text{min}} \geq 40$ mm/h, soit un volume de précipitation V_p d'une seule averse de $V_p \geq 95$ mm.

L'importance et la nature du débit solide sont liées d'une part à l'intensité de l'érosion hydrique et d'autre part à la capacité de transport de l'écoulement. Le transport solide peut se

présenter essentiellement sous deux formes différentes, la suspension, le charriage. Dans des conditions bien déterminées, le débit solide peut être évalué par l'application de formules d'origine expérimentale dont le domaine de validité est souvent très étroit et qui ne tiennent que rarement compte de l'histoire et de la disponibilité des matériaux à transporter.

2.8. Opérations de dragage

2.8.1 Typologie des opérations de dévasement

On appelle dragage l'opération qui consiste à extraire les matériaux situés sur le fond d'un plan d'eau. L'objectif d'entretenir les cuvettes des retenues de barrage, afin de gagner un volume de stockage ou d'extraire des granulats pour répondre aux besoins du secteur de la construction.



Figure 2.10 : Opération de dragage du barrage de Foum el Gherza (Source ANBT)

Les dragages concernent en premier lieu les retenues de barrage qu'ils sont soumis à des apports sédimentaires provenant du bassin versant, pour lesquels ces opérations constituent une nécessité pour récupérer un volume de stockage. Ils sont justifiés par l'accumulation des sédiments dans les cuvettes de barrage. D'autres causes justifient moins fréquemment le recours à des dragages : la lutte contre les inondations, protection de l'environnement, etc.....

Les méthodes de dragage devant être mises en œuvre pour réaliser des dragages d'entretien dépendent généralement de la configuration géomorphologique de la zone d'intervention, et des distinctions importantes peuvent être faites entre :

1. Les retenues de barrages où la sédimentation est très souvent constituée de particules fines ou de mélange de sable et de vase.

2. Les chenaux d'accès à la retenue du barrage où la sédimentation est, la plupart du temps, à dominante des particules grossières et sableuse,
3. et les bassins où la sédimentation est liée à la décantation des matières en suspension chargées en particules fines.

2.8.2. Particularités des dragages de travaux neufs

Dans le cas de la construction d'aménagements nouveaux, les matériaux déplacés sont de Nature diverse (roche, sable, terre, argile, graviers ou vase). Une partie des terrassements peut se faire par voie terrestre et ne nécessite donc pas l'intervention d'une drague.

La sensibilité des milieux doit être considérée en fonction des espaces aménagés. Les travaux peuvent engendrer des perturbations des caractéristiques physiques (hydrodynamisme, sédimentologie) et biologiques (destruction d'espèces) des sites. Sauf les sédiments de surface, l'essentiel des matériaux extraits concerne des strates peu sensibles aux altérations de surface. Ces matériaux profonds présentent généralement moins de problématiques de contamination, hormis si les strates inférieures de sédiments sont porteuses d'une contamination historique.

2.8.3 Techniques de dragage des sédiments

Les techniques de dragage et les moyens existants sont nombreux et déterminent la façon dont les fonds seront remaniés pour une opération donnée. Afin de définir les conséquences et buts probablement associés aux prélèvements ou plus largement à la remobilisation des sédiments, il est nécessaire d'appréhender les processus mécaniques en jeu.

Les opérations de dragage multiples à savoir :

- ✓ dragages mécaniques,
- ✓ dragages hydrauliques,
- ✓ Les dragages hydrodynamiques par injection d'eau, rotodévasage à l'américaine,
- ✓ Biodragage ou biorémédiation in situ.
- ✓ Dragage par fluidification des vases.

Le dragage hydraulique constitue la technique majoritaire tant dans les grands plans d'eau. Le dragage mécanique arrive en deuxième position.

a) Dragage hydraulique

Les dragues hydrauliques aspirent les sédiments au moyen d'une pompe centrifuge, à travers une conduite de refoulement. La profondeur de dragage tourne généralement autour de 30 m, et peut aller jusqu'à 60 m pour une drague autoporteuse. Les sédiments, aspirés sous forme de boue liquide, sont ensuite rejetés, selon les dragues, dans un puits, un chaland ou

une zone de dépôt via des conduites. Les dragues hydrauliques les plus simples, dites « stationnaires », sont les dragues suceuses. Leur ancrage par un système de câbles autour de deux pieux assure leur stabilité.

En cours de dragage, elles utilisent successivement les pieux bâbord et tribord comme pivot, décrivant un arc de cercle. Leur déplacement se fait par un remorqueur, ou grâce aux pieux afin de déplacer la barge sur laquelle elles sont installées. Généralement, le produit du dragage est ensuite refoulé vers un chaland ou dans des conduites allant vers une zone de dépôt sur les berges.



Figure 2.11. Photo d'une drague aspiratrice en fonction

Pour les dragues hydrauliques les plus couramment utilisées sur des opérations d'entretien générant des volumes importants, le volume du puits est généralement compris entre quelques centaines et quelques milliers de mètres cubes. La profondeur de dragage est inférieure ou égale à une trentaine de mètres. A noter que pour des opérations de travaux neufs nécessitant le dragage de volumes exceptionnels (plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions de mètres cubes), des dragues de très forte capacité peuvent être amenées à intervenir.



Figure 2.12. Refoulement de matériaux dragués dans le puits d'une drague

L'efficacité peut être augmentée par l'adjonction d'un désagrégateur (sorte de fraise en acier à lames ou à griffes) au niveau du bec d'élinde qui agit par fragmentation du substrat. L'ajout de dispositifs rotatifs réduit en outre les phénomènes de remise en suspension au niveau de la tête d'élinde. Enfin, des grilles de maille variable peuvent également être placées en tête d'élinde afin de sélectionner les tailles maximales de matériaux à prélever.



Figure 2.13 : Drague hydraulique à tête désagrégatrice

Les dragues aspiratrices peuvent être exploitées selon deux modes : en marche et de manière stationnaire.

-La drague aspiratrice en marche : Le dragage se fait en marche à vitesse réduite. L'eau aspirée par l'élinde provoque un affouillement intense des fonds sous le bec qui laisse après son passage, un sillon d'une profondeur de 0,20 m à 0,50 m en général, jusqu'à 1 m, suivant les conditions de dragage et le type de bec. La mixture est ensuite refoulée dans les puits à

déblais de l'engin où elle décante jusqu'à un remplissage convenable. Il est possible alors de densifier la mixture présente dans le puits en continuant à draguer. Ce procédé est appelé surverse de densification. Ces surverses ne sont néanmoins quasiment jamais mises en pratiques dans le cadre de dragages du fait de l'accroissement de la turbidité des eaux qu'elles provoquent.

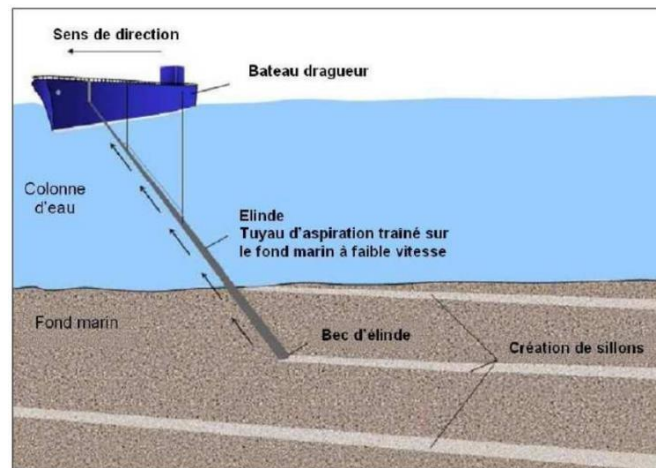


Figure 2.14. Fonctionnement d'une drague aspiratrice en marche sur les fonds

-La drague aspiratrice stationnaire : Ces dragues travaillent de façon stationnaire, sur pieux ou sur ancrés. Elles sont généralement utilisées pour l'excavation des matériaux non cohésifs et des sables peu compacts, dans des zones trop étroites pour permettre les évolutions d'une drague aspiratrice en marche. Son principal avantage est un rendement supérieur à toute drague de puissance comparable (jusqu'à 7000 m³/h). Appliquée ponctuellement, elle forme des dépressions circulaires dont la profondeur et le diamètre peuvent atteindre plusieurs mètres, ajustées en fonction des objectifs de dragage.

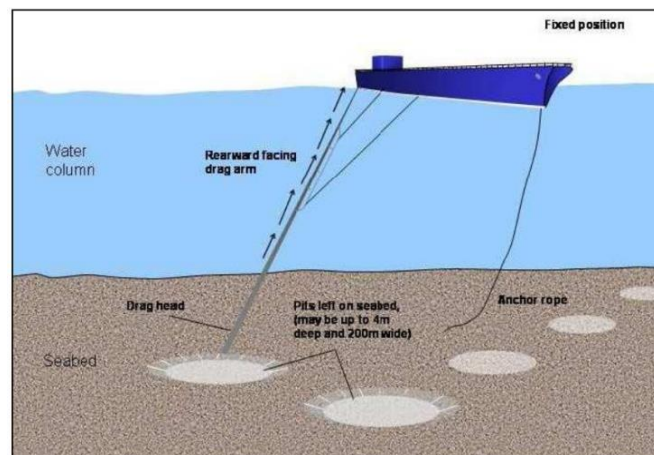


Figure 2.15. Fonctionnement d'une drague aspiratrice stationnaire

b) Dragage mécanique

Les modèles de dragues mécaniques les plus représentées sont les dragues à benne preneuse, les dragues à pelle et les dragues à godets. La benne preneuse, la plus utilisée, est déposée sur le fond en position ouverte et pénètre dans le matériau à draguer sous l'effet de son poids et de l'action du mécanisme de fermeture. Le relâchement du filin fermant la benne permet de verser le contenu de celle-ci dans le puits à déblais de la drague, dans un chaland ou à terre (berge).

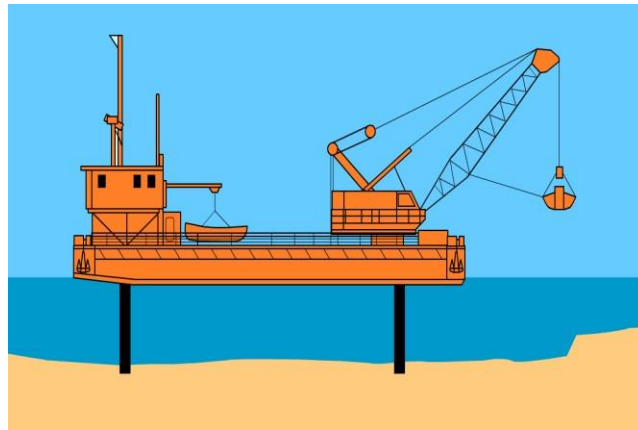


Figure 2.16. Fonctionnement d'une drague a godet montés en chaîne

La drague à pelle fonctionne quant à elle selon le même principe que les engins de chantier à pelle terrestre, sur la base d'un godet articulé fixé à l'extrémité d'un bras orientable.

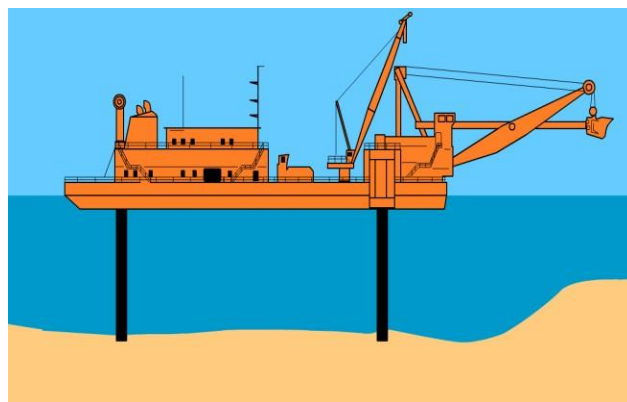


Figure 2.17. Fonctionnement d'une drague a godet
Articulé fixé à l'extrémité d'un bras orientable

Ces deux types de dragues créent des dépressions ponctuelles et localisées dans le substrat. La drague dite à godets fonctionne quant à elle, selon un système de godets montés en chaîne qui prélèvent progressivement le substrat par déplacement lent du navire. Ces dragues sont utilisées dans des zones difficiles d'accès (bordures de quais, bassins étroits) et peuvent travailler jusqu'à des profondeurs de 25 m (dragues à godets) à 30 m (dragues à benne).

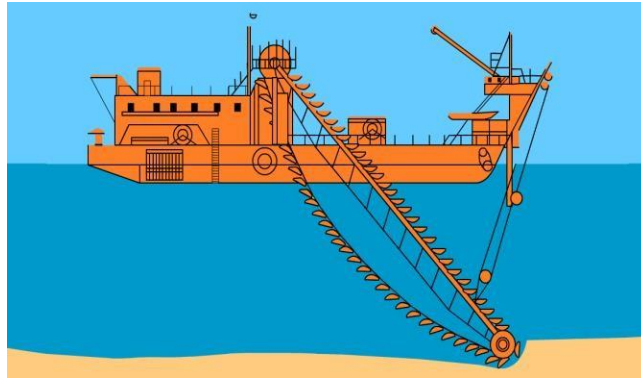


Figure 2.18. Fonctionnement d'une drague niveleuse

Les dragues niveleuses peuvent enfin être rattachées à cette catégorie de dragues mécaniques. Utilisées de manière plus anecdotique, elles modifient la structure du fond par tractage d'équipements permettant d'homogénéiser sa surface. Dans ce cas particulier, il n'y a pas d'extraction à proprement parler mais une homogénéisation du fond par déplacement de sédiments. Elles peuvent être utilisées pour déplacer des matériaux difficilement accessibles par certains types de drague, vers des zones où ils pourront être prélevés plus aisément.

c) Dragage hydrodynamique

Le dragage hydrodynamique consiste à mettre les sédiments en suspension dans la colonne d'eau afin qu'ils se déplacent sous l'effet des courants, des forces gravitationnelles ou encore sous l'action mécanique de l'outil. Il n'y a pas pour cette technique de prélèvements à proprement parler des matériaux. Le dragage et l'immersion sont en quelque sorte simultanée.

Cette technique nécessite la présence de forts courants et ne peut être appliquée que dans des zones peu vulnérables à la turbidité du fait de la remise en suspension de matière qu'elle provoque. Elle est ainsi essentiellement mise en œuvre en milieu estuarien. On distingue trois techniques principales de dragage hydrodynamique : le dragage par injection d'eau, le dragage à l'américaine, et le rotodévasage.

➤ **Dragage par injection d'eau**

Le dragage par injection d'eau repose sur le principe des courants de densité. Une importante quantité d'eau est injectée dans les sédiments par l'intermédiaire de buses orientées perpendiculairement au mouvement de la drague. Les sédiments se fluidifient et se désolidarisent et un fluide de densité supérieure à l'eau est ainsi créé.

Cette mixture se déplace alors sur le fond sous l'effet des courants et des forces de gravité.



Figure 2.19 dragage par injection d'eau

➤ **Dragage à l'américaine**

La technique de dragage à l'américaine repose sur un dragage hydraulique par drague aspiratrice durant lequel le sédiment pompé est rejeté en continu dans la colonne d'eau, soit au bordé, soit par clapets ouverts. Cette technique est d'autant plus efficace qu'elle est pratiquée dans des zones à forts courants susceptibles d'évacuer vers les zones souhaitées, la mixture issue de la surverse.

Le dragage à l'américaine est utilisé occasionnellement dans certains estuaires où cette pratique persiste ponctuellement pour répondre à la nécessité d'évacuer rapidement des matériaux encombrant le chenal en liaison avec l'arrivée d'un navire de fort tirant d'eau et qui ne peuvent être transportés et immergés sur le site de dépôt faute de temps. Le recours à ce type de dragage se justifie par des raisons uniquement économiques et non environnementales.

➤ **Le rotodévasage**

Le rotodévasage consiste à remettre les sédiments en suspension par le biais d'une embarcation munie d'une fraise horizontale de plusieurs mètres de large. L'action de la fraise sur la surface des fonds désolidarise le matériau qui est alors remis en suspension et transporté

par les courants de fond. Le format compact des outils d'intervention permet une utilisation dans les chenaux peu profonds.



Figure 2.20. Dragage par rotodévasage

Les facteurs qui poussent à envisager le curage d'un cours d'eau sont liés à des considérations hydrauliques, à l'entretien et à la restauration du milieu .

Les principaux signes de dysfonctionnement sont :

- Des inondations dues à l'envasement et à l'encombrement du lit.
- L'envahissement du lit d'un cours d'eau par la végétation des berges.
- L'augmentation d'algues et de plantes aquatiques.
- L'encombrement du lit par des dépôts divers (flottants, encombrants, vase affleurante...).
- La divagation du cours d'eau.
- L'effondrement des berges Dubois. V, 2006 [69].

2.9 Conclusion

Le dragage des barrages devient une nécessité régulière pour maintenir la capacité des barrages algériens d'un côté et la protection de l'environnement d'un autre coté par la réutilisation des sédiments dragués comme matériaux de construction ou ajouts dans les matrices cimentaires. Le stockage de ces sédiments est une opération couteuse qui exige des grands espaces et une surveillance a long terme et la mise en décharge n'est plus acceptée par l'opinion publique. Cependant les chercheurs ont commencé à étudier plusieurs alternatives pour incorporer des grandes quantités de sédiments dans les matériaux de construction où les sédiments bruts peuvent être valorisés [70].

La complexité du matériau nécessite une caractérisation systématique des sédiments

Chapitre II : Problématiques de l'envasement et dragage des barrages

pour mieux appréhender leurs comportements physico-chimique, environnemental et mécanique, pour trouver et obtenir une valorisation à moindre coût et avec des performances adéquates [71].

Chapitre III :
Caractéristiques et
traitement des sédiments
de dragage

CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUES ET TRAITEMENT DES SEDIMENTS DE DRAGAGE

3.1. Introduction

Ce chapitre présente une étude sommaire sur les caractéristiques et traitement des sédiments de dragages, les analyses physiques (masse volumique, Teneurs en eau, analyse granulométrique, limite d'Atterberg, Valeur au bleu de méthylène), analyses chimique (pH, Analyse minéralogique par fluorescence des rayons X (SiO₂, CaO, Mg O, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₄, Na₂O, SO₃, K₂O, CaCO₃, H₂O), teneurs en matières organiques. Les matériels et méthodes de recherche de ces caractéristiques sont décrits. La maîtrise des sédiments de dragage des barrages dans leur globalité nécessite de connaître leur fiche descriptive avant de les valoriser. Cette planche d'identité permettra de connaître les caractéristiques et l'impact de ces sédiments sur l'environnement et la programmation de stratégies de valorisations spécifiques.

3.2. Caractéristiques physiques

3.2.1 Eléments constitutifs d'un sol

Les caractéristiques physiques permettent de connaître le comportement et la classification des matériaux dans le but d'étudier ses propriétés mécaniques. Les principaux paramètres qui caractérisent les matériaux dragués, le volume des trois phases (l'air, l'eau et les particules solides) et le poids [71].

Si on extrait d'un terrain quelconque un échantillon de sol, une inspection visuelle révélerait que le sol est constitué de :

- a) Pores ou vides remplis d'air (A) (interstices) : qui sont les espaces libres entre les grains de différentes dimensions.
- b) Grains solides (s) : qui peuvent être macroscopique ou microscopiques ne peuvent être observé à l'œil nu.
- c) Eau (W) : faisant apparaître le sol humide. L'eau dans les pores (eau interstitielle) peut être en grande quantité et de ce fait remplit complètement les vides : dans ce cas le sol est dit (saturé).

Les pores qui ne contiennent pas d'eau sont pleins d'air et/ou vapeur d'eau. Par conséquent dans le cas le plus général le sol est constitué par un mélange d'éléments solide, d'air et d'eau.

La consistance dans le sol de ces trois phases présentant de grandes différences dans leurs propriétés physiques et mécaniques explique la complexité du comportement mécanique des sols, c'est-à-dire le comportement non linéaire et anisotrope.

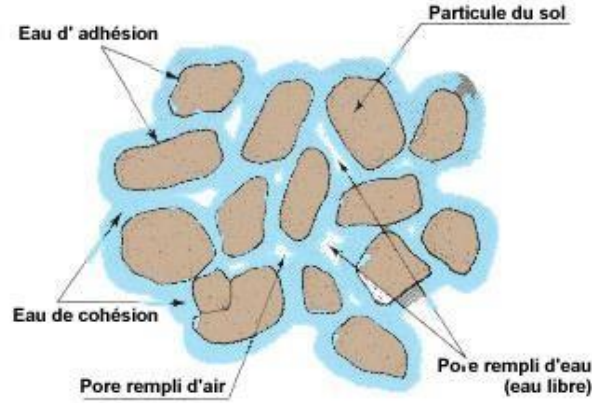


Figure 3.1. Portion de sol constitué de grains solides (s) entourés de vides remplis d'air (A) et d'eau (W).

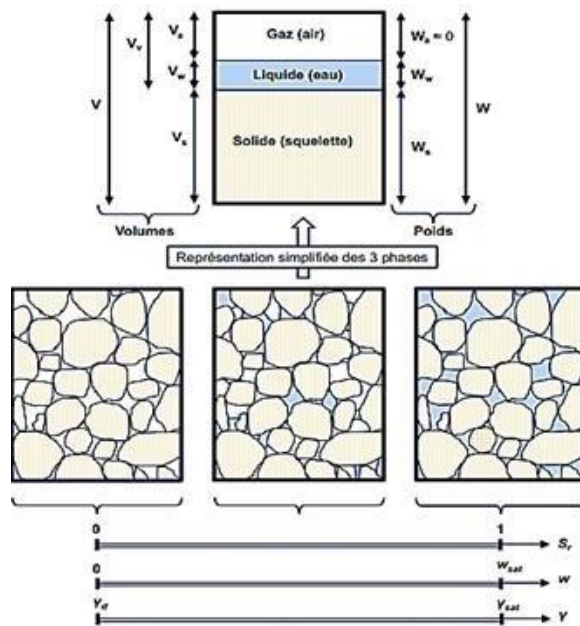


Figure 3.2. Description d'un sol ; états de saturation

Le volume des vides est lui-même constitué du volume d'eau V_w et du volume d'air V_a . On peut représenter schématiquement ces trois phases par un diagramme de phases (figure 3.3). A droite, on indique habituellement les volumes occupés par chacune des phases et à gauche, les poids correspondants. Même si l'on ne représente que deux dimensions sur ce diagramme, les volumes y sont exprimés en mètre cube (m^3).

On peut mesurer les quantités suivantes : le volume total V , le poids d'eau W_w , et le poids des grains solides W_s . On peut ensuite calculer les autres paramètres de même que les relations poids-volume définies ci-dessous. La plupart de ces relations sont indépendantes de la taille de l'échantillon et souvent exprimées sans unités. Elles sont relativement simples et faciles à mémoriser, en particulier si l'on trace le diagramme de phases.

Il y a trois rapports de volumes très utiles, que l'on peut déduire directement du diagramme de phases de la figure II.3 ; (L'indice des vides e , la porosité n et le degré de saturation S_r).

Les notations suivantes sont utilisées :

V_a : volume de l'air.

V_w : volume de l'eau.

V_s : volume des grains solides.

V_v : volume des vides.

W_w : poids de l'eau.

W_s : poids des grains solides.

Le poids total du sol : $W = W_t = W_w + W_s$.

$W_a = 0$, on considère que le poids de l'air est nul.

Le volume total du sol $V = V_t = V_v + V_s = (V_a + V_w) + V_s$.

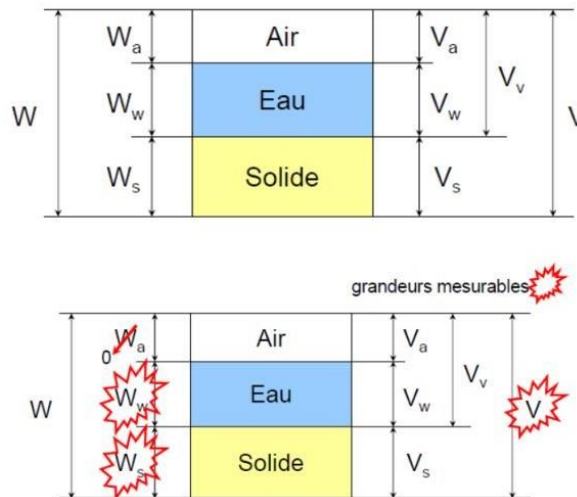


Figure 3.3. Diagramme des phases

a) Les paramètres dimensionnels

o Poids volumique humide (spécifique ou total)

Distinguons d'abord les termes masse volumique et poids volumique. La masse volumique représente le rapport entre la masse et un certain volume de sol, tandis que le poids volumique est une force unitaire exprimée par le rapport entre le poids et ce même volume de sol. Rappelons que la masse d'un corps est une constante, alors que son poids varie proportionnellement à la valeur de l'attraction gravitationnelle. Cette relation se traduit par l'équation suivante :

$$W = M \times g \quad \text{ou} \quad W = \text{poids (N)}$$

$$M = \text{masse (kg)}$$

$$g = \text{accélération gravitationnelle} = 9.81 \text{ m/s}^2$$

En termes de poids et de masse volumiques, l'équation devient :

$$\gamma = \rho \times g \quad \text{Ou} \quad \gamma = \text{poids volumique}$$

$$\rho = \text{masse volumique.}$$

Dans le système international d'unité (SI), la masse volumique s'exprime en (g/cm^3) ou en (kg/m^3), et le poids volumique en (kN/m^3). En mécanique des sols, la mesure de la masse volumique est indispensable au contrôle et à l'acceptation des travaux de compactage.

D'autre part, on a besoin du poids volumique pour calculer les contraintes dans le sol, ce calcul étant l'une des étapes menant à l'évaluation des tassements des dépôts de sol. Ces applications nous amènent à définir plusieurs types de masses et de poids volumique : la masse volumique totale et le poids volumique total, les masses et poids volumiques du sol sec et des particules solides, de même que la masse et le poids volumiques déjaugés.

On appelle poids volumique humide d'un sol le poids par unité de volume du sol considéré, c'est-à-dire la somme des poids des grains et de l'eau que contient ce volume. On le représente par le symbole : γ_h

$$\gamma_h = \frac{W_t}{V_t} \tag{3.1}$$

W_t et V_t ont été défini précédemment.

○ *Poids volumique sec*

Le poids volumique du sol sec est le poids de la matière sèche contenue dans l'unité de volume. On le représente par le symbole γ_d venant du mot anglais 'dry' (sec).

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} \quad (3.2)$$

○ *Poids volumique des particules solides (ou poids spécifique)*

C'est celui du matériau constituant le squelette solide du sol. On le représente par le symbole γ_s , qui est défini par :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (3.3)$$

A noter :

Au laboratoire et par convention, W_s sera le poids du sol après un séjour de 24h dans une étuve à 105°.

Notons aussi que γ_s varie entre 25 et 27 KN/m³ et qu'il est couramment pris égale à 26.5 KN/m³ pour tous les sols, à l'exception des tourbes et des sols organiques.

○ *Poids volumique de l'eau*

Noté γ_w

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} = 9,81 \text{ kN/m}^3 \quad (3.4)$$

On prend souvent $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3 = 1 \text{ t/m}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$.

○ *Poids volumique déjaugé*

Lorsque le sol est saturé, les grains du sol, baignant dans la nappe phréatique, sont soumis à la poussée d'Archimède et ont donc un poids déjaugé. On définit alors le poids volumique déjaugé par :

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (3.5)$$

Sachant que: γ_{sat} correspond au poids volumique du sol saturé.

$$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V_t} \quad (3.6)$$

On a également la relation :

$$\gamma' = \gamma_d \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right) \quad (3.7)$$

A noter : On ne parlera de poids volumique déjaugé que dans un milieu saturé.

- *Quelques ordres de grandeurs pour masses volumiques de certains sols*

Tableau 3.1 Valeurs types pour certains sols connus d'après Hansbo (1975) [72]

Types de sol	Masses volumiques (Mg/m ³)		
	ρ_{sat}	ρ_d	ρ'
Sables et graviers	1.9-2.4	1.5-2.3	0.9-1.4
limon et argiles	1.4-2.1	0.6-1.8	0.4-1.1
Argiles glaciales (tills)	2.1-2.4	1.7-2.3	1.1-1.4
Pierres concassées (roches broyées)	1.9-2.2	1.5-2.0	0.9-1.2
Tourbes (boue)	1.0-1.1	0.1-0.3	0.0-0.1
Argiles et boue organique	1.3-1.8	0.5-1.5	0.3-0.8

b) Paramètres adimensionnels

Les paramètres adimensionnels (dits d'état) indiquent dans quelles proportions existent les différentes phases d'un sol. On peut définir :

- *Teneur en eau (w)*

La teneur en eau est supposée être la quantité d'eau dans les espaces entre les particules solides, qui peut être éliminée par passage du sol dans une étuve à une température de 105°-110° c. Elle est exprimée en pourcentage (%) de la masse spécifique du sol.

$$w(\%) = \frac{w_w}{w_s} \times 100 \quad (3.11)$$

NB : $w \in [0 ; w_{sat.}]$

Avec :

M_w : Masse d'eau.

M_s : Masse des particules solides.

○ **Indice des vides (e)**

L'indice des vides est égal au volume total des vides divisé par le volume total des particules solides dans le sol. Cet indice représente le volume des vides lorsque le volume des solides est supposé égal à 1.

$$e (\%) = \frac{V_v}{V_s} \cdot 100 \quad (3.12)$$

NB : $e \in [0,10 ; 5.]$

Cette caractéristique permet d'évaluer la compacité du sol comme il est indiqué ci-dessous sur des indications sur la consolidation. L'indice des vides peut être supérieur à 1 et même atteindre la valeur 13 (cas extrême des argiles de Mexico) [73].

Tableau 3.2 Valeurs d'indice des vides pour les différents types de sol

Type de sol	L'indice des vides
pour le sable	$e = 0.4 - 1$
pour l'argile	$e = 0.4 - 1.5$
<u>pour le sol organique</u>	$e \geq 1.5$

c) **Dénomination des sols**

Les principaux termes utilisés par les ingénieurs en génie civil pour décrire les sols sont : gravier, sable, limon et argile. La plupart des sols existant dans la nature sont constitués d'un mélange de deux ou plusieurs de ces constituants. On donne au mélange le nom du constituant qui semble avoir le plus d'influence sur son comportement et les autres constituants sont indiqués par des adjectifs. Ainsi ; une argile limoneuse, par exemple essentiellement les propriétés d'une argile mais contient aussi une certaine quantité de limon. Les sables et les graviers sont appelés sols grenus alors que les argiles et les limons ont reçu la dénomination de sols fins.

Plusieurs classifications sont utilisées pour caractériser les particules selon leurs grosseurs. Elle ne diffèrent entre elle que par des détails très secondaires. Parmi les classifications les plus utilisés on peut citer celles d'Atterberg et du MIT (massachusetts Institute of Technology) qui sont représentées ci-dessous.

Tableau 3.3 Classification d'Atterberg [74]

Dénomination	Dimensions des particules (mm)
Enrochement	> 200
Cailloux	200-20
Gravier	20-2
Sable gros	2-0.2
Sable fin	0.2-0.02
Limon	0.02-0.002
Argile	0.002-0.0002
ultraargile	< 0.0002

Tableau 3.4 Classification du MIT

Dénomination	Dimensions des particules (mm)
Pierres	> 63
Gravier gros	63 - 20
Gravier moyen	20 - 6
Gravier fin	6 - 2
Sable gros	2 - 0.2
Sable moyen	0.6 - 0.2
Sable fin	0.2 - 0.06
Limon grossier	0.06 - 0.02
Limon moyen	0.02 - 0.006
Limon fin	0.006 - 0.002
Argile	0.002 - 0.0006

d) Identification des sols au laboratoire

d.1 Analyse granulométrique d'un sol

La distribution des grains de différentes dimensions dans un sol est un facteur important qui conditionne les caractéristiques mécaniques du milieu. En effet, un matériau qui possède un pourcentage élevé d'éléments fins réagit autrement qu'un sol constitué d'éléments grossiers, en particulier en présence d'eaux.

Le but de l'analyse granulométrique est d'étudier la répartition des grains constituent le sol selon leurs diamètres et de mesurer l'importance relative de chacune des fractions de sols définis précédemment : (gravier, sable, limon et argile). Elle présente à cet effet de l'intérêt du point de vue de l'identification, de la dénomination des sols et de l'appréciation qualitative de leurs propriétés mécaniques.

Deux méthodes sont utilisées pour déterminer la répartition en poids des grains :

- **L'analyse granulométrique par tamisage** ; pour les particules dont le diamètre moyen est supérieur à 80μ ; Figure 3.4
- **L'analyse granulométrique par sédimentation**. Pour les particules dont le diamètre moyen est inférieur à 80μ . (Figure 3.5).

- **Analyse granulométrique par tamisage (NF P94-056) [75]**

L'essai consiste à faire passer un échantillon représentatif de sol à travers des tamis superposés dont les ouvertures vont en décroissant du haut vers le bas. Les particules les plus grosses restent donc emprisonnées sur les tamis les plus hauts (refus ou retenu), tandis que les particules plus fines se dirigent vers les tamis inférieurs (tamisât ou passant).

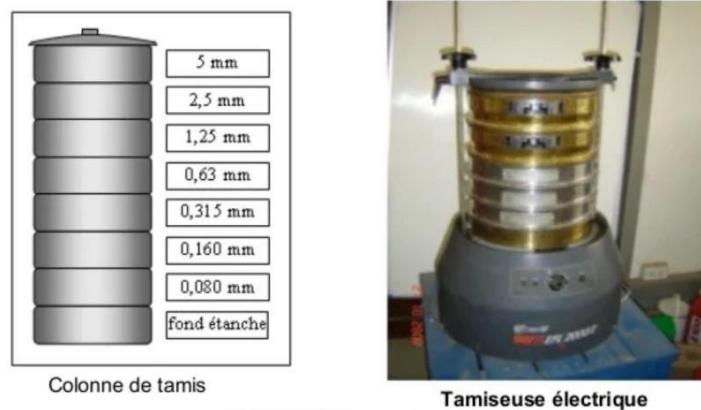


Figure 3.4. Distributions granulométrique

Lorsque les masses retenues sur chaque tamis deviennent constantes, le tamisage est terminé et tous les refus sont pesés. La masse de chaque refus est ensuite comparée à la masse totale de l'échantillon, ce qui permet de calculer les pourcentages de refus cumulé et de passant. Les résultats sont portés sur un graphique semi-logarithmique ou ils construisent une courbe granulométrique.

- **L'analyse granulométrique par sédimentation (NF P94-057) [76].**

Afin d'estimer la distribution granulométrique des particules de silt et d'argile, ainsi que lorsque la dimension des particules est inférieure à $80\mu\text{m}$ le tamisage n'est plus possible, et les forces inter particulaire (force de cohésion) sont trop importantes, et les grains tendent à s'agglomérer. On a alors recours à une analyse granulométrique par sédimentation.

L'essai consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente conformément à la loi de *Navier Stokes* sur la vitesse de chute de billes sphériques dans l'eau.

La mesure de la densité de suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion des grains de chaque diamètre. Un mode de représentation commode des résultats de l'analyse granulométrique est la Courbe Granulométrique. Elle représente pour chaque dimension « d_y » de particule, le poids (ou masse) « y » des particules de cette taille ou de tailles inférieures. Ce poids est exprimé en pourcentage par rapport au poids total de la matière sèche de l'échantillon étudié. Cette courbe est tracée en coordonnées semi-logarithmique.

$$V = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} D^2 \quad (3.13)$$

$$V = \frac{9.8.D^2 (D_{rs} - D_{rl})}{3.\mu} \rightarrow D = \sqrt{\frac{3.V.\mu}{9.8.(D_{rs} - D_{rl})}} \quad (3.14)$$

Où :

D= diamètre de la sphère (mm).

v = vitesse de chute de la sphère (cm/min).

D_{rs} = densité relative de la sphère.

D_{rl} = densité relative du liquide.

η = viscosité dynamique du liquide.



Figure 3.5. Analyse granulométrique par sédimentologie



Figure 3.6. Composants d'un sol

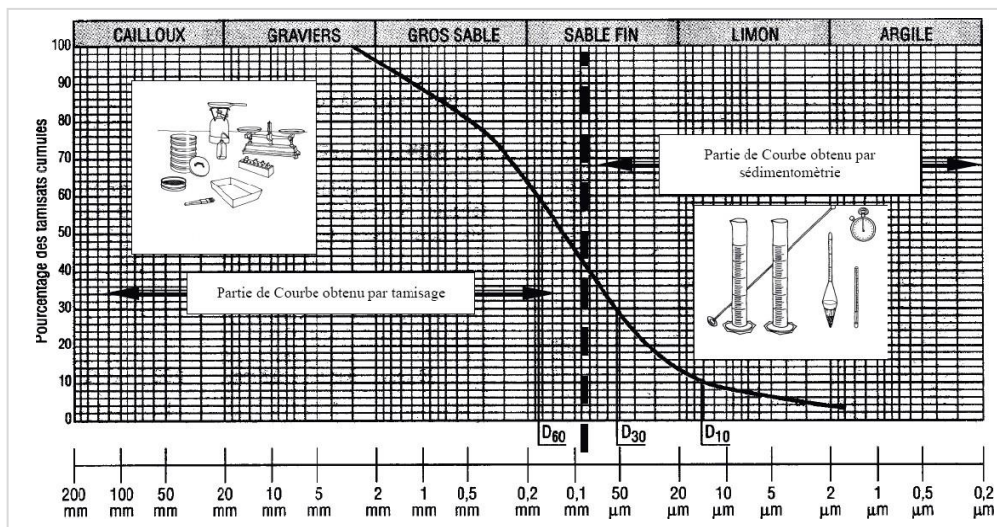


Figure 3.7 Courbe granulométrique.

- *L'interprétation des courbes granulométriques*

A première vue, une courbe granulométrique permet d'identifier les types de sols qui composent l'échantillon analysé. Si en examinant une courbe granulométrique, d'un échantillon constitué de gravier, de sable, de silt et d'argile, on trouve les proportions respectives de chaque type de sol exprimées en pourcentages. Quand on connaît ces proportions, il devient possible d'attribuer au sol une appellation de la manière indiquée au tableau II.6. Ainsi, si le sol est composé de 27% de gravier, à 38% de sable, à 29% de silt et à 6% d'argile par exemple, il porte le nom de sable silteux graveleux avec traces d'argile.

Tableau 3.5 Appellation des sols selon leurs proportions.

Proportion des types de sols	Terminologie	Exemples
> 35%	Nom	Gravier, sable, silt, etc.
20% à 35%	Adjectif	Graveleux, sableux, etc.
10% à 20%	Un peu	Un peu de silt, de sable, etc.
< 10%	Des traces	Avec des traces d'argiles, de silt, etc.

○ *Coefficient d'uniformité et coefficient de courbure d'une courbe granulométrique*

La forme de la courbe granulométrique permet de préciser le degré d'étalement de la granulométrie où encore son uniformité ; Cette uniformité est exprimée par le *Coefficient d'uniformité* ou *coefficient de Hazen* défini par le rapport :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.15)$$

Avec :

D_y : dimension du tamis correspondant à (Y%) de passants. Ce coefficient est donc immédiatement calculé à partir de la courbe granulométrique. C'est-à-dire :

D_{60} : diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant.

D_{10} : diamètre effectif (*ou diamètre efficace*) des particules qui correspond à 10% du passant.

Si $C_u > 2$, la granulométrie est dite étalée (développée ou variée),

Si $C_u < 2$ la granulométrie est dite uniforme (ou serrée).

Plus la granulométrie est serrée plus la pente de la partie médiane de la courbe est prononcée.

Selon la valeur du coefficient d'uniformité, on reconnaît cinq classes de granulométrie tableau 3.6.

Tableau 3.6. Classes de granulométrie de sols.

Coefficient d'uniformité	Classes de granulométrie
$C_u \leq 2$	Granulométrie très serrée.
$2 < C_u \leq 5$	Granulométrie serrée.
$5 < C_u \leq 20$	Granulométrie semi-étalée.
$20 < C_u \leq 200$	Granulométrie étalée.
$200 < C_u$	Granulométrie très étalée.

On définit également le **coefficient de courbure** qui permet de décrire la forme de la courbe granulométrique :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (3.16)$$

Où D_{30} : diamètre effectif des particules qui correspond à 30% du passant.

Lorsque certaines conditions sur C_u et C_c sont satisfaites ($1 \leq C_c \leq 3$), le sol est dit **bien gradué** c'est à dire que sa granulométrie est bien étalée, sans prédominance d'une fraction particulière.

Quand sa granulométrie est discontinue ($1 > C_c > 3$), avec prédominance d'une fraction particulière, il est **dit mal gradué**.

Les sols bien gradués constituent des dépôts naturellement denses avec une capacité portante élevée. Ils peuvent être aisément compactés en remblais et forment des pentes stables.

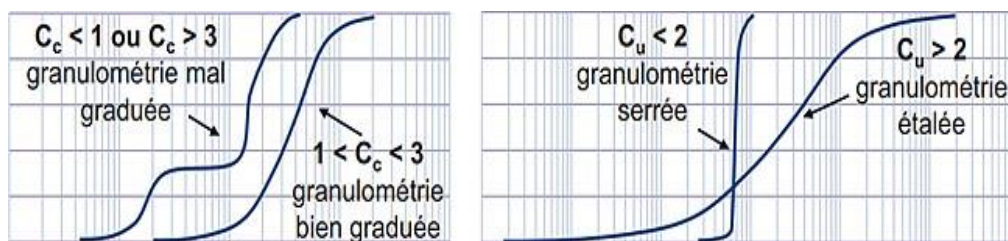


Figure 3.8. Interprétation des courbes selon les coefficients C_u et C_c

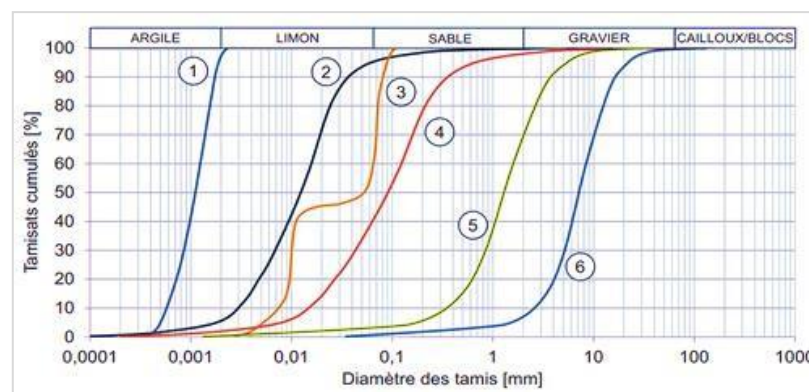


Figure 3.9 Exemples de quelques courbes granulométriques.

d.2. Identifications propres aux sols fins

- Consistance des sols fins (Limites d'Atterberg) (NF P 94-051) [77]

La consistance, que l'on peut définir comme un état de fermeté, est liée aux forces de cohésion entre les particules et ne concerne donc que les sols cohérents. Elle a une grande influence sur la résistance aux déformations. La consistance dépend principalement de la distance qui sépare les particules d'un sol. Cette distance se mesure habituellement de façon indirecte, à l'aide de l'indice des vides (plus l'indice est élevé, plus la distance est grande).

Cependant, comme les sols à grains fins sont la plupart du temps saturés, il est beaucoup plus simple d'en déterminer la teneur en eau. En effet, les vides entre les particules étant remplis d'eau, la mesure de la teneur en eau permet d'évaluer l'indice des vides et, par conséquent, la distance entre les particules.

Ainsi, plus la teneur en eau est grande, plus l'indice des vides est élevé et plus les particules de sol sont éloignées les unes des autres. La cohésion entre les particules diminue d'autant, et la consistance devient molle. On a alors affaire à un sol qui se déformera facilement sous l'effet d'une charge et qui pourrait, à la limite se liquéfier.

Par contre, une diminution de la teneur en eau rapprochera les particules et augmentera les forces de cohésion entre elles. Le sol aura alors une consistance dure et, par conséquent, une résistance élevée aux déformations.

On distingue quatre états de consistances :

- **L'état solide** : comme on peut le voir à la figure II.10, lorsque le sol est à l'état solide, ses particules sont en contact les unes avec les autres, et les films d'eau adsorbée sont très minces et se touchent : il n'y a pas d'eau libre entre les particules. L'assèchement du sol ne produit aucun retrait. Le sol manifeste une très grande résistance au cisaillement et, sous l'effet d'une charge, les déformations sont faibles avant qu'il y ait rupture. En génie civil, on parle de sol ayant un comportement fragile, similaire à celui de la brique.
- **L'état semi-solide** : un sol à l'état semi-solide à une faible teneur en eau, et les liens de cohésion entre ses particules sont très forts. Les films d'eau adsorbée, quoiqu'encore minces, séparent légèrement les particules, de telle sorte qu'un assèchement du sol causerait un retrait. Il s'ensuit que les déformations du sol provoquées par des charges sont toujours accompagnées de fissures.
- **L'état plastique** : lorsque le sol est à l'état plastique, sa teneur en eau est plus grande et ses particules sont plus éloignées les unes des autres. Les films d'eau adsorbée sont beaucoup plus épais, mais ils se touchent encore ; la cohésion du sol est plus faible qu'à l'état semi-solide sous de petites charges, le sol se déforme sans fissures. Sa consistance varie de celle du beurre mou à celle du mastic ferme : c'est un sol qu'on peut façonner à la main.
- **L'état liquide** : lorsque le sol est à l'état liquide, sa teneur en eau est si élevée qu'il n'existe pratiquement plus aucune cohésion entre les particules, qui sont entourées de leur film d'eau adsorbée et isolées les unes des autres par l'eau libre. Le sol peut alors se comporter

comme un liquide visqueux d'une consistance variant de celle de la soupe aux pois à celle du beurre mou.

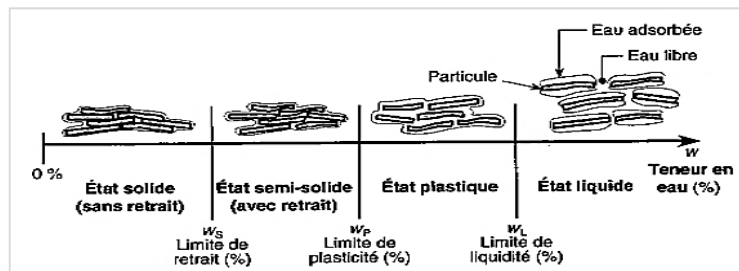


Figure 3.10. Etats de consistance.

○ **Les limites d'Atterberg**

Les teneurs en eau qui délimitent les quatre états de consistance sont appelées **limites de consistance** ou **limites d'Atterberg**. Ces limites, qui s'expriment en pourcentages, sont les suivantes :

- La limite de retrait W_r ;
- La limite de plasticité W_p ;
- La limite de liquidité W_L .

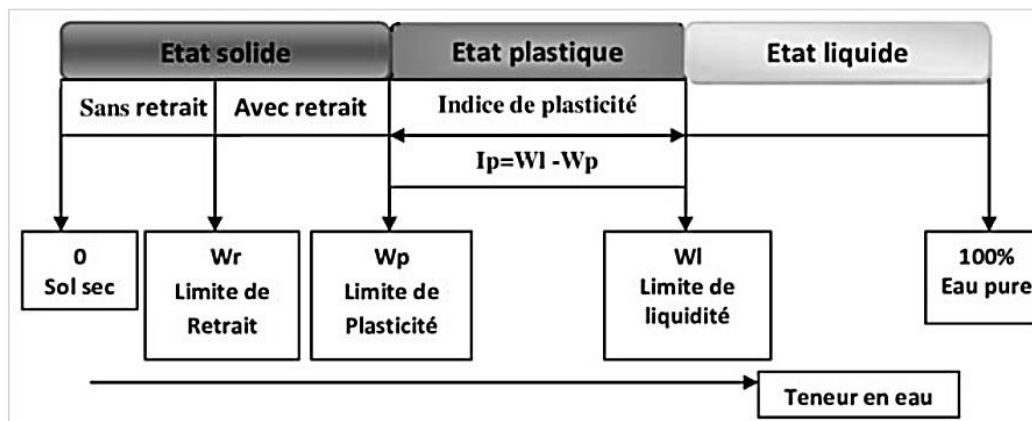


Figure 3.11. Etats de consistance des sols fins.

- **La limite de retrait (W_r) (NF P94-051) [77]** : est la teneur en eau maximale que le sol peut avoir sans changer de volume. Cette limite sépare l'état solide de l'état semi-solide.

Le sol est progressivement desséché dans un cylindre métallique jusqu'à atteindre le retrait volumique. La mesure des différents volumes permet de retrouver la teneur en eau correspondant à la limite de retrait.

- **La limite de plasticité (W_p) (NF P94-051) [77]** : est définie comme la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges. Cette limite sépare l'état plastique de l'état semi-solide. Elle varie de 0% à 100 %, mais elle demeure généralement inférieure à 40%.

Pour déterminer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de cylindre qu'on amincit progressivement. La limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise en petits tronçons de 10 à 20mm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm. Il faut donc réaliser des rouleaux de 3 mm de diamètre sans pouvoir faire de rouleaux plus fins. On exécute en général deux essais pour déterminer cette limite.



Figure 3.12 Détermination de la limite de plasticité.

- **La limite de liquidité (w_L) (NF P 94-051) [77]**: est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique. Elle peut atteindre 1000 % dans le cas de certaines argiles, mais dans la plupart des cas elle ne dépasse pas 100%.

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche du matériau dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de (V). On imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte. Par définition, (W_L) est la teneur en eau (%) qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1cm, en 25 chocs.

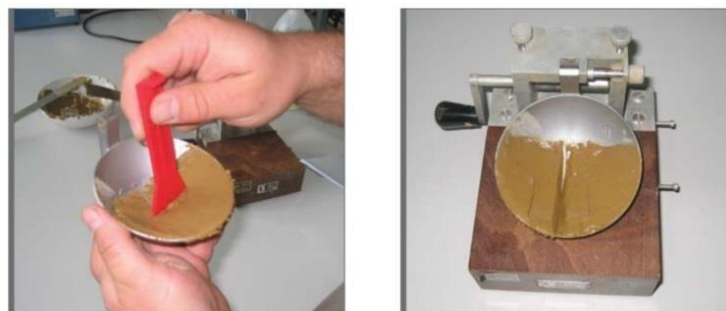


Figure 3.13. Coupelle de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité W_L .

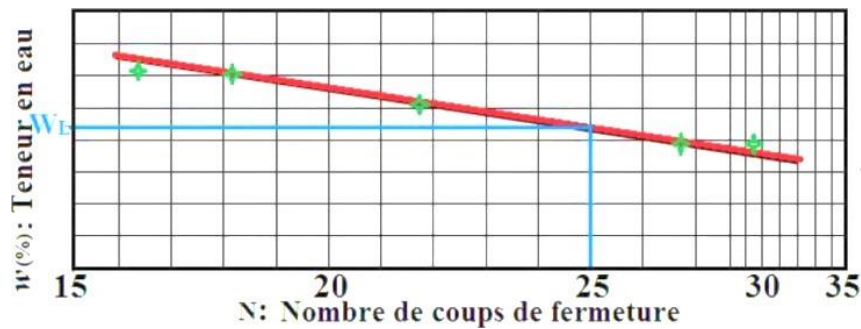


Figure 3.14 Courbe représentative de relation entre la teneur en eau et le nombre de coups.

La relation entre le nombre de chocs N et la teneur en eau w (%), est une droite en coordonnées semi-logarithmiques. Après cinq essais qui doivent s'échelonner régulièrement entre 15 et 35, la droite la plus représentative est ensuite tracée à partir des points expérimentaux. La limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture en 25 chocs.

Comme il est difficile d'obtenir la fermeture à 25 coups, il existe une relation permettant de trouver W_L à partir d'un seul essai pourvu que le nombre de coups de fermeture soit compris entre 15 et 35. Cette relation s'écrit :

$$W_L = w \cdot \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad (3.17)$$

Où W_L : est la limite de liquidité,

W : La teneur en eau du mortier au moment de l'essai,

N : le nombre de coups correspondant à la fermeture du mortier sur 1cm dans la coupelle.

○ **Méthode du cône de pénétration** (NF P 94-052-1) [78]

Méthode du cône de pénétration détermine expérimentalement la relation entre la teneur en eau du sol remanié et la pénétration d'un cône normalisé (angle au sommet de 30° , masse de 80g), tombé en chute libre sous son propre poids, pendant 5 secondes. Pour déterminer la limite de liquidité on porte en ordonnée les teneurs en eau (en %) et en abscisse les pénétrations correspondantes du cône (en mm), les deux échelles étant linéaires. La droite la plus représentative est tracée à partir des points expérimentaux. Par définition la limite de liquidité est la teneur en eau du sol qui correspond à une profondeur de pénétration du cône de 17 mm.



Figures 3.15 Cône de pénétration pour la détermination de WL.

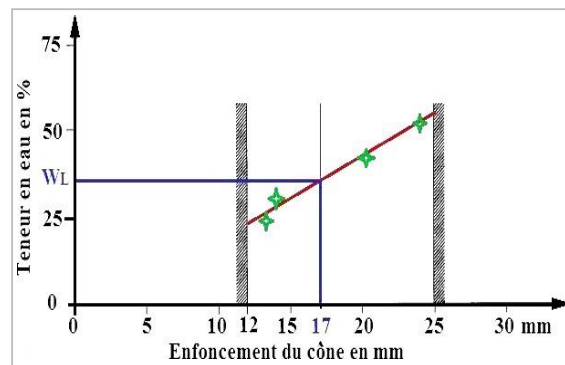


Figure 3.16 Relation entre la teneur en eau et l'enfoncement du cône

Les limites de plasticité et de liquidité servent surtout à identifier et à classer les sols à grains fins. Dans l'étude de ces sols dont les particules sont invisibles à l'œil nu, elles fournissent des informations plus utiles et plus intéressantes que celles obtenues lors d'analyses granulométriques par sédimentation. Quant à la limite de retrait, elle sert surtout à l'étude de certains sols dont le volume varie fortement à cause des changements de la teneur en eau. C'est surtout dans les régions arides, où se trouvent des dépôts contenant de la montmorillonite et où la teneur en eau du sol subit d'énormes changements, que l'on observe ces variations de volume, aussi appelées retraites ou gonflements.

Sur la base de ces limites, on définit les indices suivants :

○ **Indice de plasticité I_P** (NF P94-051) [77]

L'indice de plasticité I_P est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols. Il permet de mesurer l'étendue du domaine de plasticité du sol (où on peut travailler le sol). Il s'exprime par la relation suivante :

$$I_P = W_L - W_P. (\%) \quad (3.18)$$

Aussi :

$$I_p = 0,73 (W_L - 20). (\%) \quad (3.19)$$

Tableau 3.7. Classification de l'argilite suivant l'indice de plasticité.

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

La plasticité d'un sol (c.-à-d. sa capacité de devenir très déformable en absorbant de l'eau) est appréciée par le couple (W_L , I_p) qui dépendent de la nature et de la quantité des minéraux argileux contenus dans le sol. C'est ainsi que Casagrande a défini un diagramme dit "Abaque de plasticité de Casagrande" qui permet de classer les sols fins.

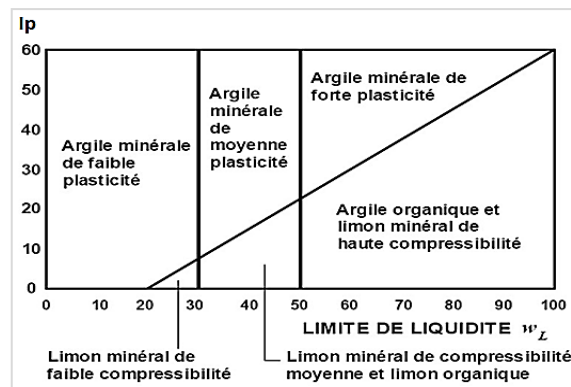


Figure 3.17 Abaque de plasticité de Casagrande

Deux autres indices caractérisent la structure d'une argile. Ils sont l'indice de consistance et l'indice de liquidité.

Tableau 3.8. Ordres de grandeur

Nature	WL (%)	Wp (%)	Ip (%)
Limon	24	17	7
Argile limoneuse peu plastique	40	24	16
Argile plastique	114	29	85
Bentonite	710	54	656

○ *Indice de consistance I_c*

La comparaison de la teneur en eau naturelle w d'un sol et des limites d'Atterberg permet de se faire une idée de l'état d'une argile qu'on peut caractériser par son indice de consistance :

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p} \quad (3.20)$$

Tableau 3.9. Etat du sol selon I_c .

Indice de consistance I_c	Etat du sol
$I_c > 1$	Solide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c < 0$	Liquide

○ *Indice de liquidité I_L*

Permet de savoir rapidement si un sol est à l'état liquide, plastique, semi-solide ou solide. Pour établir cet indice, on compare la teneur en eau naturelle (in situ) (w) d'un sol à ses limites de plasticité et de liquidité :

Il est défini par :

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p} = 1 - I_c \quad (3.21)$$

d-3 Classification des sols

Pour comparer les différents types de sol, il est nécessaire de les classer en familles ; cependant à cause de la grande variété des sols existants dans la nature il n'a pas été possible de créer un système universel de classification des sols permettant de diviser les sols en différents groupes et sous-groupes sur la base de leurs propriétés physiques.

Plusieurs classifications existent dans le monde. En général, des simples identifications visuelles permettent de donner un nom au matériau : marne bleue, argile jaune, sable fin, ...

• *Identification visuelle d'un sol*

Les sables : ce sont des particules visibles à l'œil nu.

Les limons : s'effritent une fois qu'ils sont secs ;

Les argiles sont collantes et se présentent en mottes quand ils sont humides. Ils deviennent très durs une fois sèches. Les argiles peuvent être découpées en morceaux ou effritées à la main. Il faut toutefois compléter cette indication par : (une analyse granulométrique ; détermination des limites d'Atterberg ; teneur en eau, masse volumique ; indice de densité pour les sols pulvérulents ; résistance à la compression simple pour les sols cohérents).

Les renseignements permettent d'identifier les sols et par conséquent de se faire une idée sur leurs comportements.

Il existe plusieurs systèmes de classification des sols dont on peut citer :

- ✓ Classification **USCS** (Unified Soil Classification System) établie par Casagrande ;
- ✓ Classification **LPC** (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) identique à USCS.
- ✓ Classification **AASHO** (American Association State Highways Officials);
- ✓ Classification **GTR** (Guide des terrassements routier).

La classification la plus utilisée dans les pays d'Afrique francophone c'est la classification LPC. Elle a été mise au point en France en 1965 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Cette classification est une adaptation de la classification U.S.C.S (The Unified Soil Classification System).

- **Classification LPC modifiée**

Cette classification adoptée par les laboratoires des Ponts et Chaussées a été adaptée à partir de la classification américaine U.S.C.S. (Unified Soil Classification System). Les modifications initiales tiennent aux valeurs légèrement différentes d'ouverture de tamis, donc de classes granulométriques.

Elle est tout d'abord basée sur 2 critères : la granulométrie (passant à 80 μm) et la présence visible de matières organiques. Trois grandes familles de sols sont mises en évidence (Figure 3.18).

- Les sols organiques
- Les sols fins
- Les sols grossiers (grenus).

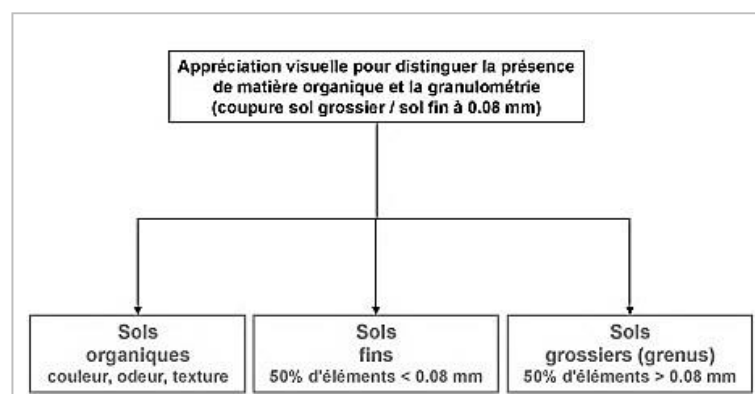


Figure 3.18 Les grandes familles de la classification LCPC modifiée

A partir de ce premier tri, on va progresser pour chaque famille en prenant en compte les critères spécifiques.

Pour les sols fins (Figure 3.19), la classification prend en compte les valeurs des limites d'Atterberg en positionnant le point dans le diagramme de plasticité de Casagrande (W_L , I_p) (Figure 3.19) avec 2 critères :

- ✓ La coupure à $W_L = 50$
- ✓ La position par rapport à la ligne A du diagramme dont l'équation est : $I_p = 0,73(W_L - 20)$.

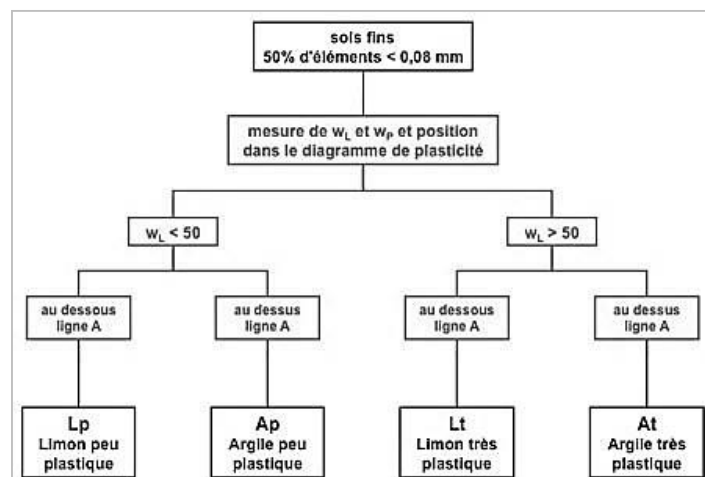


Figure 3.19. Diagramme de classification de Casagrande

Pour les sols grossiers figure 3.20, la classification fait intervenir tout d'abord la quantité q_1 d'éléments supérieurs à $80 \mu\text{m}$ et supérieurs à 2 mm , ce qui différencie les sables et les graviers.

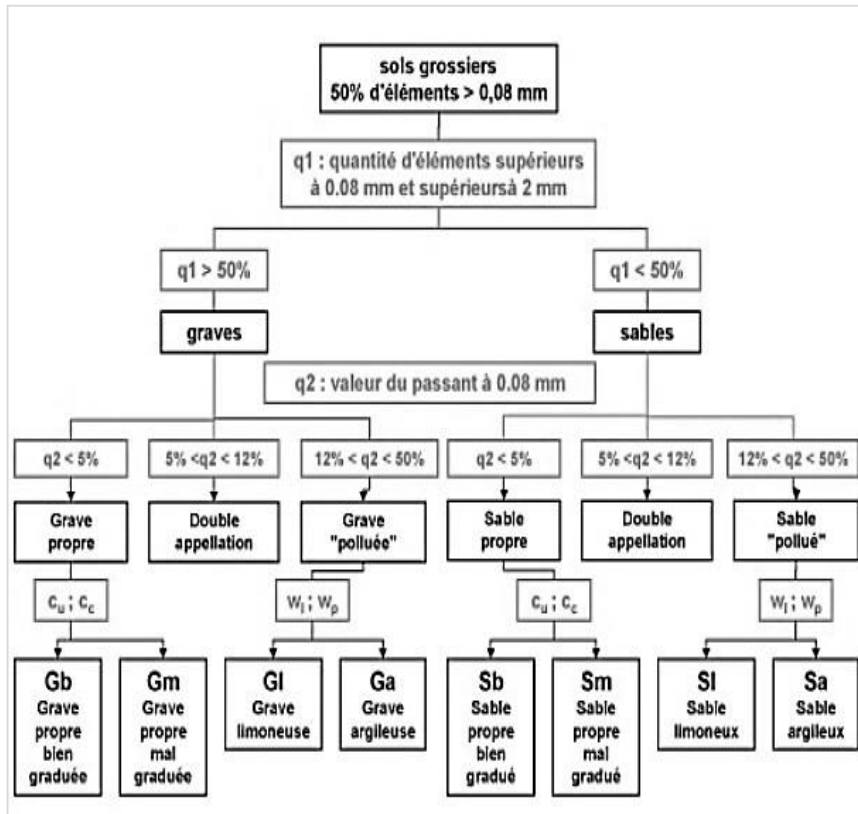


Figure 3.20 Diagramme de plasticité des sols fins

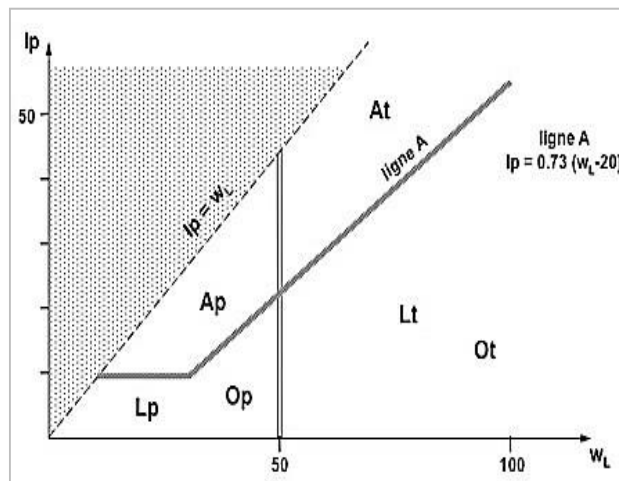


Figure 3.21 Classification des sols grossiers

On fait ensuite de nouveau intervenir le passant à 80 μm en appelant q_2 , la quantité d'éléments inférieurs à 80 μm avec 3 coupures :

- $q_2 < 5\%$: sols propres ;
- $5\% < q_2 < 12\%$: double appellation ;
- $12\% < q_2 < 50\%$: sols limoneux ou argileux.

Si $q_2 < 5 \%$, on regarde la valeur des coefficients C_u et C_c ; si $q_2 > 12 \%$, on regarde la position dans le diagramme de plasticité de Casagrande figure 3.19, ce qui permet d'associer un adjectif.

Ceci définit 8 classes principales :

- **Gb** : grave propre bien graduée ;
- **Gm** : grave propre mal graduée ;
- **Gl** : grave limoneuse ;
- **Ga** : grave argileuse ;
- **Sb** : sable propre bien gradué ;
- **Sm** : sable propre mal gradué ;
- **Sl** : sable limoneux ;
- **Sa** : sable argileux.

Ces classes sont complétées par des sols en double appellation pour q_2 compris entre 5 et 12 %.

Pour les sols organiques, on détermine la teneur en matières organiques C_{MO} qui détermine 3 classes :

- $3 \% < C_{MO} < 10 \%$: sols faiblement organiques (**fo**) ;
- $10 < C_{MO} < 30 \%$: sols moyennement organique (**mo**) ;
- $C_{MO} < 30 \%$: sols très organique (**to**).

Pour les sols **fo**, on complète le nom par le nom du sol fin correspondant vu plus haut.

Pour les sols **mo** ou **to**, on effectue le test de **Von Post**.

- **Classification des sols pour les terrassements routiers (GTR) (NF P 11-300) [79].**

Une classification de matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières et donne par le GTR (Setra LCPC ; 1992) [80]. La classification GTR permet de classer les sols, en fonction d'un certain nombre de paramètres (Passant à 80 μm , passant à 2 mm, l'indice de plasticité I_p et la valeur au bleu VBS), en :

- Classe A : sols fins.
- Classe B : sols sableux et graveleux avec fines.

- ✓ Classe C : sols comportant des fines et de gros éléments.
- ✓ Classe D : sols insensibles à l'eau.

Les principes généraux de cette classification sont présentés sur la Figure 3.22. La classification détaillée est décrite dans un guide technique du LCPC et du SETRA et dans la norme.

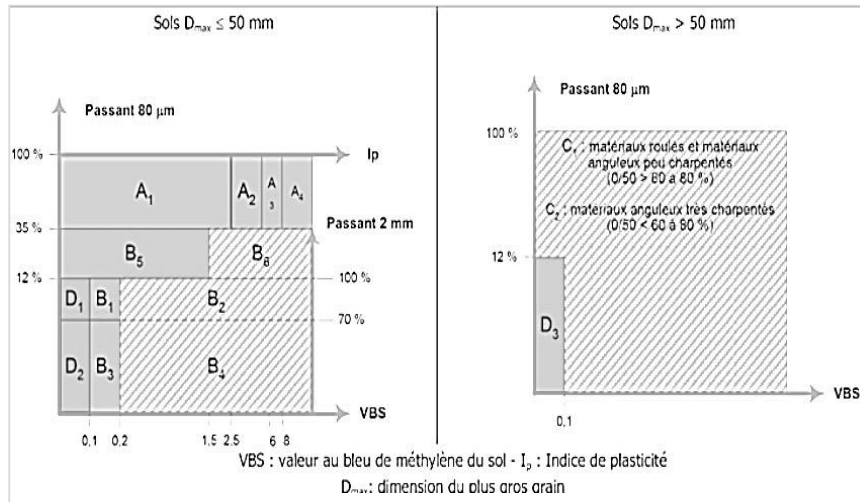


Figure 3.22. Structure générale de la classification GTR pour les terrassements routiers [79]

- **Classification triangulaire**

Les systèmes de classification triangulaire prennent la forme de triangles dont les côtés portent des échelles représentant les proportions de sable, de silt et d'argile mesurées sur un échantillon de sol.

Ces triangles sont divisés en zones portant une appellation conventionnelle selon les proportions relatives des types de sols. Seules les échelles des proportions d'argile, de sable et de silts (limon) figurent sur le triangle.

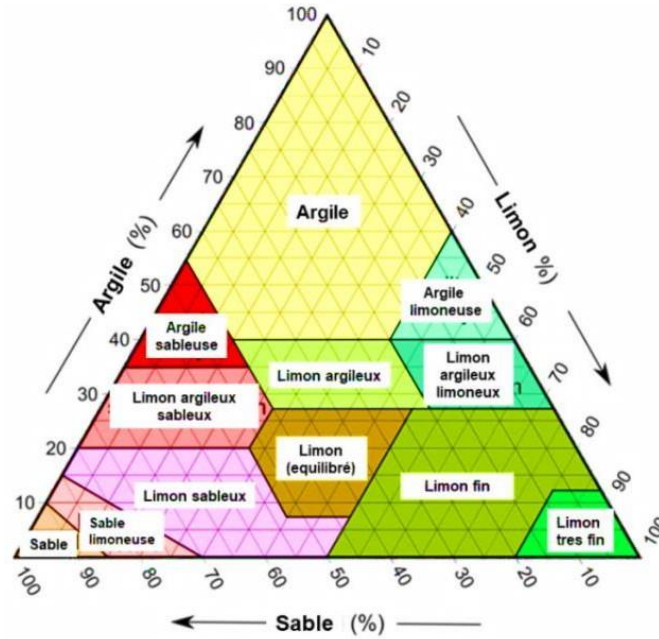


Figure 3.23. Diagramme triangulaire de classification

e) Les argiles

e.1. L'activité des argiles

En 1953, Skempton [81] proposait une équation mathématique permettant de quantifier l'activité électrochimique des argiles. Selon cette équation, l'activité d'une argile (A) est égale au rapport entre son indice de plasticité et la fraction d'argile présente dans un soi donné :

$$A = \frac{I_p}{T_{arg} \text{ <fraction d'argile>}} \tag{3.22}$$

Avec : $T_{arg} = \frac{\text{poids } <2\mu\text{m}}{\text{poids totale sec } <0.4\text{mm}}$ (3.23)

La fraction d'argile correspond au pourcentage que représente dans le sol le poids des particules dont le diamètre équivalent est inférieur à 0.002 mm. (Certains organismes comme l'ASTM tient compte des particules dont le diamètre équivalent est inférieur à 0,005 mm pour établir la fraction d'argile). Rappelons que l'activité électrochimiques des argiles est proportionnelle au nombre de charges électriques situées à la surface des particules. Or, les particules d'argile ayant une structure cristalline et une très grande surface spécifique, la quantité de charges électriques y est très élevée et les molécules d'eau sont fortement attirées. L'augmentation de la fraction d'argile dans un sol entraîne donc un accroissement des charges électriques : plus la fraction est grande, plus le sol attire et maintient les molécules d'eau dans

ses interstices. Le sol devenant plus plastique, l'indice de plasticité augmente, ce que traduit l'équation de Skempton.

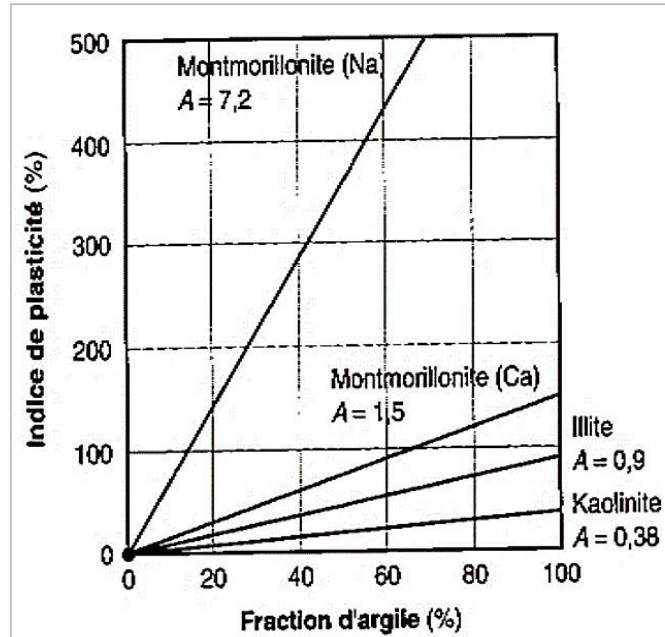


Figure 3.24. Activité de certains minéraux argileux mélangés à du sable de quartz (D'après Skempton, 1953) [82] .

L'échelle d'activité généralement utilisée est la suivante :

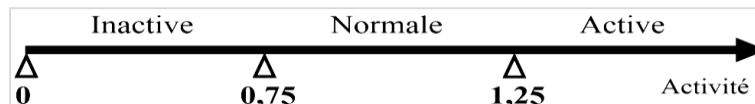


Figure 3.25. Echelle d'activité des minéraux argileux

Tableau 3.10 Activité des minéraux argileux

Nature	Activité
Kaolinite	0.38 (inactive)
Illite	0.9 (normale)
Montmorillonite	7.2 (active)

e.2. Structure des argiles

Les particules d'argile (granulométrie inférieure à $2\mu\text{m}$) correspondent à des phyllosilicates d'aluminium hydratés. Leur structure cristalline est constituée de couches

d'octaèdres $Al(OH)_6$ et de couches de tétraèdres SiO_4 reliées par les atomes O et OH mis en commun (Figure 3.20).

L'enchainement des couches octaédriques et tétraédriques peut différer selon le type d'argile :

- Tétraédrique/Octaédrique (noté 1/1),
- Tétraédrique/Octaédrique/Tétraédrique (noté 2/1).

Un enchainement de couches constitue un feuillet. L'espace entre les feuillets est appelé espace interfoliaire. L'ensemble « feuillet + espace interfoliaire » est une unité structurale. Ces unités s'agencent entre elles pour former les particules argileuses. Les charges des feuillets diffèrent selon le type d'argile. Pour équilibrer ces charges, des cations s'insèrent dans l'espace interfoliaire. Selon le type d'argile cette capacité d'insertion des cations est plus ou moins importante.

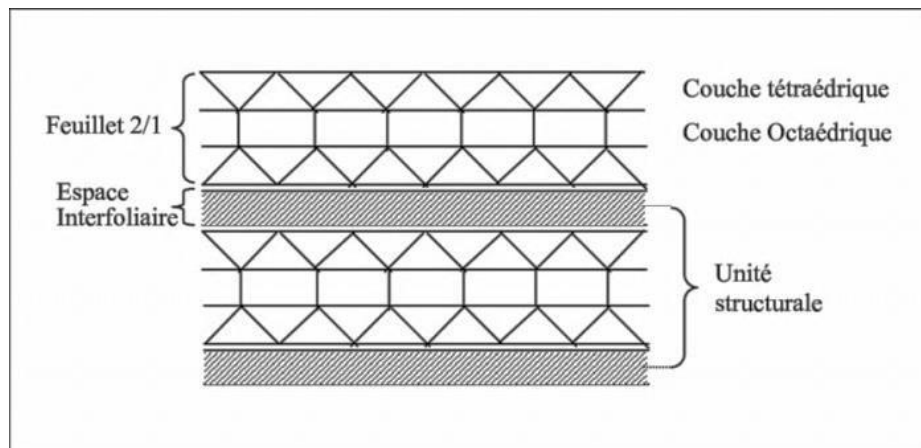


Figure 3.26. Schéma de la structure générale d'une argile [83]

e. 3. Trois principaux types d'argile sont distingués :

- La kaolinite de formule $Al_2O_3, 2SiO_2, 2H_2O$. Elle est composée d'une couche de silice et d'une couche d'alumine. Le feuillet est neutre.
- La bentonite aussi appelée smectite ou montmorillonite de formule $2Al_2O_3, 8SiO_2, 2H_2O, nH_2O$. Elle est composée de deux couches de silice et d'une couche d'alumine. Il existe plusieurs types de bentonite dite calcique ou sodique pour lesquels la charge du feuillet est différente (calcium ou sodium).
- L'illite de formule $K Al_2(OH)_2, (AlSi_3(O,OH)_{10})$. Elle est composée par deux couches de silice et d'une couche d'alumine. Les atomes de potassium s'insèrent dans l'espace interfoliaire.

e.4. Activité des argiles

Dans certains cas l'argile est dite active contrairement à un sable qui est neutre. Cette activité correspond à une capacité de gonflement de l'argile au contact de l'eau due à l'insertion des molécules d'eau et de cations dans les espaces interfoliaires. Plus la capacité de gonflement de l'argile est importante plus celle-ci est dite active. La capacité de gonflement est liée à la charge des feuillets. Elle est caractérisée par un paramètre noté λ et appelé « épaisseur de la double couche ». Il correspond à l'épaisseur de la couche d'anion qui entoure les feuillets. Selon la valeur de λ , deux situations se présentent :

- Lorsque λ est important les particules exercent une force répulsive entre elles ce qui permet aux molécules d'eau et des cations de s'insérer entre les particules conférant ainsi à l'argile un pouvoir de gonflement.
- Lorsque λ est moindre, les particules exercent une force attractive entre elles. Les particules se chevauchent limitant ainsi l'insertion des molécules d'eau. λ est fonction de la concentration des charges de cation et de leur valence. La relation n'est pas linéaire. Lorsque la valence est deux fois plus importante, λ est divisé par 4. Selon le type de cations dans l'espace interfoliaire des feuillets, on distingue deux types de bentonite :
 - La bentonite calcique : Elle se caractérise par la présence de cation Ca^{2+} entre les feuillets et qui est celle que l'on trouve le plus souvent à l'état naturel.
 - La bentonite sodique : Elle se caractérise par la présence de cation Na^{+} entre les feuillets et qu'on trouve très rarement à l'état naturel. Celle qui est vendue par les fournisseurs correspond souvent à une bentonite qui était initialement calcique et qui a subi ce qu'on appelle la sodification. Le fait de remplacer des ions Ca^{2+} par des ions Na^{+} diminue la valence et donc augmente la valeur de λ conférant ainsi à la bentonite sodique une capacité de gonflement plus importante que la bentonite calcique.

A noter que dans le cas des sédiments marins, l'eau de mer contient des cations Na^{+} en quantité importante ce qui pourrait changer la bentonite calcique en une bentonite sodique qui a une capacité de gonflement importante.

f. Les Minéraux :

Les minéraux de ce groupe sont caractérisés par une structure comprenant une couche tétraédrique et une couche octaédrique.

Famille de la kaolinite (Figure 3.20)

Formule générale de la demi-maille: $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$ Il s'agit d'un minéral phylliteux de couleur blanche, blanche-grise ou légèrement jaunâtre. Il se présente sous forme de masse onctueuse au toucher, parfois compacte. Sa densité varie de 2,4 à 2,64.

Ces minéraux sont peu attaquables par les acides, excepté l'acide fluorhydrique. A l'analyse thermique différentielle, les minéraux de ce groupe sont caractérisés par:

- Un phénomène endothermique assez accentué qui commence à se manifester vers 500 °C et dont le maximum de développement a lieu entre 530 °C et 560 °C.
- Un phénomène exothermique qui se traduit par un crochet aigu, parfois très développé prenant naissance vers 950 °C avec un maximum vers 980 °C. L'importance de ce phénomène varie avec le minéral étudié, mais ces variations ne peuvent pas être utilisées comme critère.

En effet, la présence d'oxyde de fer, même en faible quantité, abaisse la température d'apparition de cet accident et le transforme en une faible bosse. Toutefois les caractères essentiels sont suffisamment stables pour permettre, en général, une identification de l'espèce

Famille de l'halloysite :

Formule générale de la demi-maille: $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_{4n}\text{H}_2\text{O}$

n: généralement voisin de 2. Elle se limite à un seul minéral. L'halloysite est constituée de feuillets identiques à ceux de la kaolinite, mais séparés par une couche de molécules d'eau, si bien que l'équidistance 001 est de 10,1 Å.

Par déshydratation vers 75 ou 80 °C, parfois même par un long séjour au laboratoire, le minéral perd une partie de son eau et se transforme en métahalloysite. Toutefois, la transformation n'est totale que vers 400 °C. Ce minéral se trouve le plus souvent en masses terreuses sous une grande variété de couleur blanche, grisâtre, jaunâtre, verdâtre ou rougeâtre. Sa densité varie entre 2 et 2,20.

A l'analyse thermique différentielle le départ de l'eau située entre les feuillets se confond avec celui de l'eau hygroscopique et se manifeste par un fort accident endothermique. Sur le diagramme des rayons X, les feuillets sont identiques à ceux de la kaolinite mais avec l'intercalation d'une couche d'eau qui porte l'équidistance 001 à 10,1 Å, d'où une confusion possible avec l'illite [84].

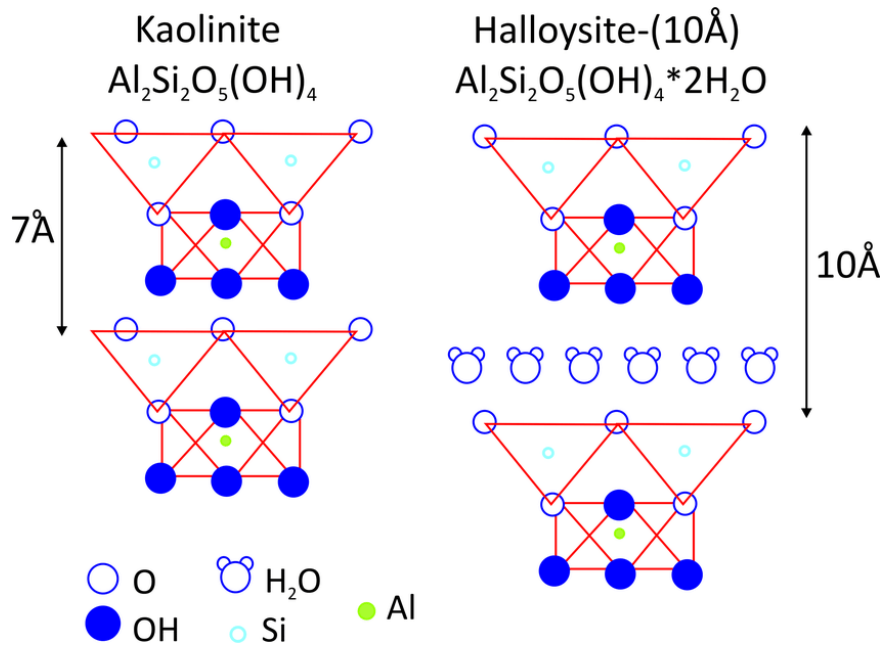


Figure 3.27. Structure de la kaolinite et l'halloysite.

Famille l'antigorite :

Formule générale de la demi-maille: $Si_2O_5(M^{2+}_3)(OH)_4$

M^{2+} représente un cation divalent qui, dans le type original, est le magnésium. Le minéral se présente à l'état naturel sous différentes couleurs blanche, verte, jaune de miel. Sa densité varie entre 2,40 et 2,65. A l'analyse thermique, on observe:

- ✓ Un petit phénomène endothermique vers 100 °C;
- ✓ Un accident extrêmement marqué dont l'origine se situe entre 600 °C et 660 °C et dont le maximum d'amplitude est de 700-750 °C.

Les diagrammes de rayons X présentent de nombreuses singularités dues, en particulier, aux distorsions du feuillet.

Famille de la berthierine :

Formule générale de la demi-maille: $(Si_{(2-x)}M_x^{3+})O_5(M_x^{3+}R^{2+}_{(3-x)})(OH)_4$

M^{3+} peut être Al^{3+} ou Fe^{3+}

R^{2+} peut être Mg^{2+} ou Fe^{2+}

La coloration est blanche ou verte plus ou moins foncée. Sa densité varie de 3 à 3,4. La courbe d'analyse thermique montre:

- ✓ Une légère inflexion vers 100°C;
- ✓ Un phénomène endothermique important vers 400°C, se dédoublant vers 500°C et se terminant vers 670°C par un phénomène exothermique très aigu.

G. Essai Proctor.

Le principe de l'essai consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale, cette courbe appelée courbe Proctor présente une valeur maximale de la masse volumique sèche, elle est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces 2 valeurs qui sont appelées caractéristiques de compactage Proctor Normal ou Proctor Modifié suivant l'essai réalisé.

- **Matériel Nécessaire.**

Matériel spécifique Proctor Moule Proctor avec embase et hausse Ou moule CBR avec embase et hausse Dame Proctor normal Ou dame Proctor modifié Règle à araser Balance de portée supérieure à 6 kg.



Figure 3.28. Essai Proctor.

3.3 Caractéristiques chimiques

La caractérisation chimique des sédiments dragués des barrages est nécessaire avant de procéder à leur valorisation. Cette propriété est indispensables pour préparer leur planche d'identité, afin de dévoiler leur composition chimique, notamment avoir une lecture sur la présence de contamination. Cet examen est indispensable pour connaître si les sédiments dragués des barrages sont contaminé. Il s'agit essentiellement des paramètres chimiques tels que (Analyse chimique par fluorescence des rayons X, pH, teneurs en matières organiques [85]).

3.3.1 Analyse chimique par fluorescence des rayons X

La fluorescence X (FRX) est une technique d'analyse qui peut être utilisée pour déterminer la composition chimique d'une grande variété de types d'échantillons, y compris les solides, les liquides, les boues et les poudres libres. La fluorescence X est également utilisée pour déterminer l'épaisseur et la composition des couches et des revêtements. Elle

peut analyser des éléments allant du béryllium (Be) à l'uranium (U) dans des gammes de concentrations allant de 100 wt% à des niveaux inférieurs au ppm.

les avantages de l'analyse par spectrométrie de fluorescence X, est robuste, combinant haute précision et exactitude avec une préparation d'échantillons simple et rapide. Elle peut être facilement automatisée pour une utilisation dans des environnements industriels à rendement élevé. En outre, la fluorescence X fournit des informations qualitatives et quantitatives sur un échantillon. Une combinaison simple d'informations sur la nature du contenu et les quantités permet également une analyse rapide (semi-quantitative). Avec une méthode d'émission atomique, similaire à la spectroscopie d'émission optique (OES), à la spectrométrie d'émission plasma (ICP) et à l'analyse par activation neutronique (spectroscopie gamma). Ces méthodes mesurent la longueur d'onde et l'intensité de la « lumière » (les rayons X dans ce cas) émise par les atomes énergisés de l'échantillon. En fluorescence X, l'irradiation par un faisceau de rayons X primaire depuis un tube à rayons X provoque l'émission de rayons X fluorescents dotés d'énergies discrètes caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon.

A partir de cette analyse on peut avoir les pourcentages en oxydes suivants (SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O et K_2O). (Malvern Panalytical) [86].

3.3.2. Valeurs au bleu de méthylène (VBS) (Norme NF P94-068) [87].

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol. Son application est récente. Ce paramètre, noté VBS (valeur de bleu du sol), représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses contenues dans la fraction du sol considéré ; c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol. L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation. On prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique. Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée on peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole. La VBS traduit globalement la quantité et la qualité (activité) de la fraction argileuse du sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de sol

$$\text{VBS} = 10 \cdot \frac{V_1}{M_1} \quad (3.24)$$

Où : M_1 : est la masse de l'échantillon, en grammes.

V_1 : est le volume total de solution de colorant injectée, en millilitres.

Tableau 3.11. Classification des sols

Valeur de bleu de méthylène (Vbs)	Catégorie de sol
$Vbs < 0.2$	sol insensible à l'eau ou peu sensible à l'eau.
$0.2 < Vbs < 1.5$	sol sablo limoneux, apparition de la sensibilité à l'eau.
$1.5 < Vbs < 2.5$	sols sablo limoneux des sols sablo argileux, peu plastiques.
$2.5 < Vbs < 6$	sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne
$6 < Vbs < 8$	sols limoneux des sols argileux.
$Vbs > 8$	sols argileux des sols très argileux

3.3.3 Les métaux lourds :

Les Sources naturelles de contamination En dehors de toute intervention de l'homme, les sols ont une concentration naturelle en métaux provenant de l'altération de la roche-mère. L'effritement de celle-ci, et l'érosion conduisent à la formation des sols. Ces processus géochimiques associés à d'autres phénomènes, en particulier biologiques, sont désignés sous le terme de différenciation des sols. Elle s'effectue sur une échelle de temps de l'ordre de plusieurs milliers d'années et est la source principale de contamination naturelle du sol en métaux. Ainsi, une roche-mère riche en arsenic, par exemple, donnera un sol riche en arsenic, bien que cette corrélation soit plus marquée pour certains métaux (Cr, V, Zn) que pour d'autres (Co, Mo, Pb, Se) dont l'abondance dans le sol peut être plus fortement liée au cycle bio-géochimique [88]. Dans certains cas les sols ainsi formés peuvent donc être fortement concentrés en métaux, au point que cette contamination naturelle soit problématique sur le plan écologique.

Tableau 3.12. Utilisation actuelle courante des métaux dans l'industrie (abondance moyenne de chaque élément dans la croûte terrestre)

Métal	Utilisation	Métal	Utilisation
Al (8.1 %)	transport 25 % bâtiment 20 % emballage 20 % construction électrique 10 % autres 25 %	Ni (75 ppm)	acier inoxydable 65 % alliages de nickel 15 % aciers et fontes alliées 7.5 % revêtements de surface 7.5 % autres 5 %
Cd (0.1 ppm)	piles 70 % pigments 13 % autres usages industriels 17 %	Hg (20 ppb)	cellules d'électrolyse 50 % construction électrique 25 % autres 25 %
Cr (100 ppm)	aciers inoxydables 65 % chimie et réfractaires 20 % utilisations métallurgiques diverses 15 %	Pb (10 ppm)	batteries 70 % laminés et munitions 10 % chimie 10 % autres 10 %
Co (25 ppm)	superalliages 72.6 % aimants 9 % carbures cimentés 3.4 % céramiques 9.6 % chimie (pigments, catalyseurs, agents siccatifs...) 5.4 %	Zn (80 ppm)	galvanisation 50 % pièces moulées 15 % laiton et autres métaux d'alliages 20 % demi-produits 5 % chimie et autres 10 %
Cu (50 ppm)	construction électrique 55 % bâtiment 20 % équipement industriel 10 % transport 5 % autres 10 %	Sn (2 ppm)	fer blanc 30 % soudure 30 % chimie 15 % étain ouvré et divers 25 %
Fe (5.0 %)	sidérurgie 99 % autres 1 %	Mo (1.5 ppm)	ferro-molybdène et alliages 70 % chimie (catalyseurs) 30 %

- Impact des métaux lourds sur l'environnement et sur la santé

Quand ils ne contaminent pas les eaux souterraines par lessivage, les éléments traces métalliques, non dégradables dans le sol, s'y accumulent puis pénètrent dans les plantes que les animaux consomment ensuite, l'homme y compris. On estime ainsi que les végétaux récoltés stockent environ 1 % des métaux présents dans l'horizon de surface [69]. Pour l'homme, l'inhalation de poussières et d'aérosols reste la principale source d'intoxication, mais les risques liés à l'absorption de métaux lourds par ingestion d'eau ou de nourriture ne sont toutefois pas négligeables.

3.3.4 Potentiel hydrogène (pH)

pH est un sigle signifiant potentiel hydrogène et qui représente la mesure de l'alcalinité en chimie. Le pH mesure la concentration d'une solution aqueuse en ions oxonium H₃O⁺ et le degré d'acidité ou de basicité d'une solution, le pH se calcule selon la formule : $pH = -\log[H_3O^+]$ où [H₃O⁺] est la concentration molaire en ions oxonium H₃O⁺ exprimée en moles par litre.

En solution aqueuse à température de 25°C et à pression standard, un pH de 7 indique la neutralité. Un pH moins élevé (par exemple pH 3) indique une augmentation de l'acidité, et un pH plus élevé (par exemple pH 11) indique une augmentation de l'alcalinité, c'est-à-dire de la basicité. Dans le cas de l'eau le pH varie de 1 à 14 mais pour d'autres solutions le pH n'est pas limité à cette échelle. Par exemple, le pH de neutralité de l'acétonitrile est de 27. Lorsque le pH d'une solution est peu sensible aux acides et aux bases, on dit qu'il s'agit d'une solution tampon ; c'est le cas du sang, du lait ou de l'eau de mer, qui renferment des couples acido-basiques susceptibles d'amortir les fluctuations du pH jusqu'à un certain point. Le pH d'une solution dite physiologique est de 7,4.

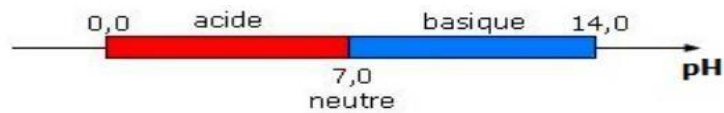


Figure 3.29. Échelle pH

a. Mesure du pH

a.1. Indicateur coloré

Un indicateur coloré est une espèce chimique qui change de couleur en fonction de la valeur du pH. Par exemple, un indicateur coloré qui est bleu en milieu basique, vert en milieu neutre, et jaune en milieu acide.

a.2. Mesure au papier pH

Le papier pH est une bande de papier imbibée d'un indicateur universel. L'indicateur universel est constitué d'un mélange d'indicateurs colorés dont les teintes varient graduellement en fonction du pH. Le papier pH a donc une teinte qui varie en fonction de la valeur du pH.

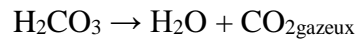
a.3. Mesure au pH-mètre

On peut mesurer la valeur du pH avec un pH-mètre. Le pH-mètre est un appareil de mesure constitué d'une électrode double reliée à un boîtier électronique indiquant la valeur du pH.

3.3.5 Détermination du taux de carbonates de calcium [90].

Méthode de détermination de la teneur en carbonate dans des échantillons de sols (y compris les sédiments), de matières utilisées sur ou dans les sols et de déchets. Cette détermination est systématique sur les matières amendâtes mais pas sur les sols.

a. Principe : L'acide chlorhydrique est ajouté à un échantillon pour décomposer tous les carbonates présents : $\text{MeCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Me}^{2+} + \text{H}_2\text{CO}_3$



Le volume de gaz carbonique dégagé est mesuré à l'aide d'un appareil et comparé au volume de gaz carbonique produit par du carbonate de calcium pur. Afin de ne pas tenir compte de correction, tous les tests sont réalisés dans les mêmes conditions.

b. Préparation de l'échantillon : les échantillons sont séchés à l'air ou dans une étuve ventilée à une température inférieure à 40 °C. Ils sont alors émottés et tamisés au travers d'un tamis de 2 mm d'ouverture de mailles, si la prise d'essai est inférieure à 2 g, une partie de l'échantillon peut être broyé, sans refus, pour passer au travers d'un tamis à 250 µm d'ouverture de mailles. Une partie de l'échantillon à 2 mm servira à la mesure de l'humidité résiduelle.

c. Analyse préliminaires : Faire un essai préliminaire en ajoutant un peu d'acide chlorhydrique sur une fraction de l'échantillon déposé sur un verre de montre. L'intensité et le temps de l'effervescence donneront une estimation de la teneur en carbonate.

Le tableau donne une idée de la quantité d'échantillon nécessaire :

Tableau 3.13 – quantité d'échantillon nécessaire

Intensité de l'effervescence	Teneur en Carbonate (g/kg)	Masse de la prise d'essai (g)
Aucune ou limitée	<20	10
Faible, de courte durée	20 à 80	5
Forte, de longue durée	80 à 160	2.5
Très forte, de longue durée	>160	≤1

Si la masse d'échantillon est inférieure à 2 g, il convient de prélever une portion représentative de l'échantillon et de le broyer, sans refus, pour obtenir des particules < 250 μm ,

d. Le Calcul de la teneur en carbonate de l'échantillon

$$W(\text{CaCO}_3) = 1000 \times \left[\frac{m_2}{m_1} \frac{V_1 - V_3}{V_2 - V_3} \right] \times \frac{100 + W_{\text{H}_2\text{O}}}{100} \quad (3.25)$$

où : **W(CaCO₃)** est la teneur en carbonate, en g par kg, d'échantillon séché en étuve

m₁ : est la masse de la prise d'essai (g) ; **m₂** est la masse moyenne des étalons de carbonate de calcium (g) ; **V₁** est le volume moyen du gaz carbonique produit par la réaction de la prise d'essai (ml) ; **V₂** est le volume moyen du gaz carbonique produit par la réaction de carbonate de calcium (ml) ; **V₃** est la variation en volume des déterminations à blanc (ml), cette valeur peut être négative ; **W(H₂O)** est la teneur en eau, exprimée sous forme de pourcentage en masse, sur la base d'une masse séchée, mesurée .

3.3.6 Caractéristiques microscopiques

Les caractéristiques microscopiques en utilisant le microscope électronique nous permettent de connaître la microstructure des sédiments dragués. La microscopie électronique à balayage nous donne des images claires. Cette méthode nous donne une vision qui nous permet de différencier les matières minérales des matières organiques par la représentation des images de l'élément analysé.

Le microscope électronique à balayage (MEB) est un appareil d'imagerie à haute résolution. Le faisceau d'électrons est focalisé par un jeu de lentilles sur les surfaces de l'échantillon analysé en un spot très fin. Un jeu de bobines permet de déplacer le faisceau de façon à balayer toute la surface de l'échantillon. Pour faire de l'imagerie électronique, l'échantillon est balayé ligne par ligne selon une matrice rectangulaire. L'interaction entre le faisceau d'électrons et la surface de l'échantillon produit trois types de signaux secondaires :

Des électrons secondaires, des électrons rétrodiffusés et des rayons X. La détection des deux types d'électrons permet de reconstituer simultanément des images électroniques différentes. La détection des électrons secondaires permettra d'obtenir des informations sur relief de l'échantillon.

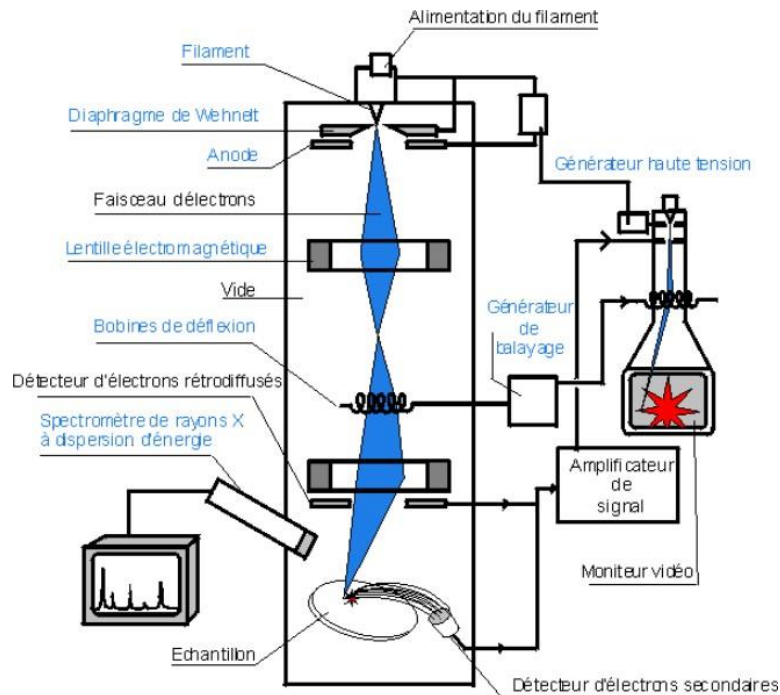


Figure 3.30. Fonctionnement du MEB

3.3.7. Caractéristiques rhéologiques

L'étude rhéologique des sédiments fins permet de déterminer des paramètres importants pour préciser le comportement de ces mixtures de vases ou de boues et définir, par des valeurs numériques, les caractéristiques physiques d'un dépôt en cours de consolidation sous l'eau ou hors d'eau. Il sera possible ensuite de rattacher les conditions de transport de mixtures d'éléments fins, sous l'action des courants ou de la houle ainsi que les écoulements gravitaires et les pentes d'équilibre des dépôts, aux valeurs rhéologiques mesurées en laboratoire ou sur le terrain à l'aide d'appareils relativement simples. Ces mesures rhéologiques portent principalement sur la définition de la viscosité et de la rigidité initiale (yield value) ainsi que sur la thixotropie ou dilatance du milieu que l'on peut mettre en évidence par l'étude de la variation des valeurs du cisaillement des dépôts en fonction de la vitesse d'un rotor immergé dans la suspension [91].

3.4. Conclusion

Les analyses et essais présentés dans ce chapitre visent les définitions des propriétés physiques, chimiques, minéralogiques, microscopiques et rhéologiques des sédiments de

dragages. Les caractéristiques physiques qui nous permettent de connaître la classification des matériaux dragués afin d'étudier ses propriétés mécaniques. Aussi la caractéristique chimique est essentielle afin de dresser la planche d'identité du matériau pour permettre de dévoiler sa composition chimique. La minéralogie est nécessaire pour compléter à l'analyse chimique. Elle nous permet de reconnaître les minéraux primaires présents dans un échantillon. Donc la connaissance de la composition minéralogique des matériaux est nécessaire dans le domaine de valorisation des sédiments. La microscopie électronique MEB permet de connaître la microstructure des sédiments dragués. La microscopie électronique à balayage nous donne des images claires du relief de la structure du matériau. La rhéologie permet d'expliquer le comportement rhéologique des vases à partir de leur structure et donner l'équation rhéologique d'un fluide par la mesure des paramètres rhéologiques.

Chapitre IV :
Procédures
expérimentale et
interprétations des
résultats

CHAPITRE 4. PROCEDURES EXPERIMENTALES ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

4.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons présenté la zone d'étude ou des prélèvements de la vase du barrage effectué, ainsi que la méthodologie de travail durant cette expérimentation.

Une première partie, pour les matériaux sélectionnés et le matériels utilisés pour cette étude, donc il s'agit de l'argile extraite du barrage Koudiet Medaouar pour son utilisation dans la fabrication des briques de terre compressé (BTC) avec ou sans ajout, les caractérisations géotechnique, chimique et minéralogique l'argile utilisées dont des combinaisons et des mélanges ont été choisi avec des liants hydraulique (ciment et chaux hydraulique), fibre de verre et poudre de verre, afin de classer les plus efficaces en fonction des objectifs que nous visions (résistance à la compression et à la flexion). Enfin, les compositions des différents mélanges confectionnés seront précisées à la fin de cette première partie sous forme de tableau avec codification.

La deuxième consacré aux démarches et protocoles de confection des spécimens avec ou sans renforcement, dont les résultats seront présentés dans le chapitre 5 (comportement mécanique).

4.2. Présentation de la zone d'étude

Le barrage de Koudiat Medouar est situé sur l'oued Reboua à 35 kilomètres du chef-lieu de Batna Est de l'Algérie il est destiné pour l'alimentation en eau potable de la wilayat de Batna et Khenchela (voir figure 4.1).

Le cours d'eau principal prend naissance sa source a une altitude de 2007 m d'altitude pour traverser 56 km jusqu'à l'exutoire 958 m d'altitude, l'oued drainé une superficie de 578,6 km² et un périmètre de 141,2 km avec une pente moyenne de 18,75 m/km , le réseau drainant d'une allure dense a l'amant pour se relâcher a l'entrée de la cuvette qui totalise une longueur de 3896 km , l'apport solide il a été estimé à 370 000 t/an , soit 240 000 m³/an (ANBT).

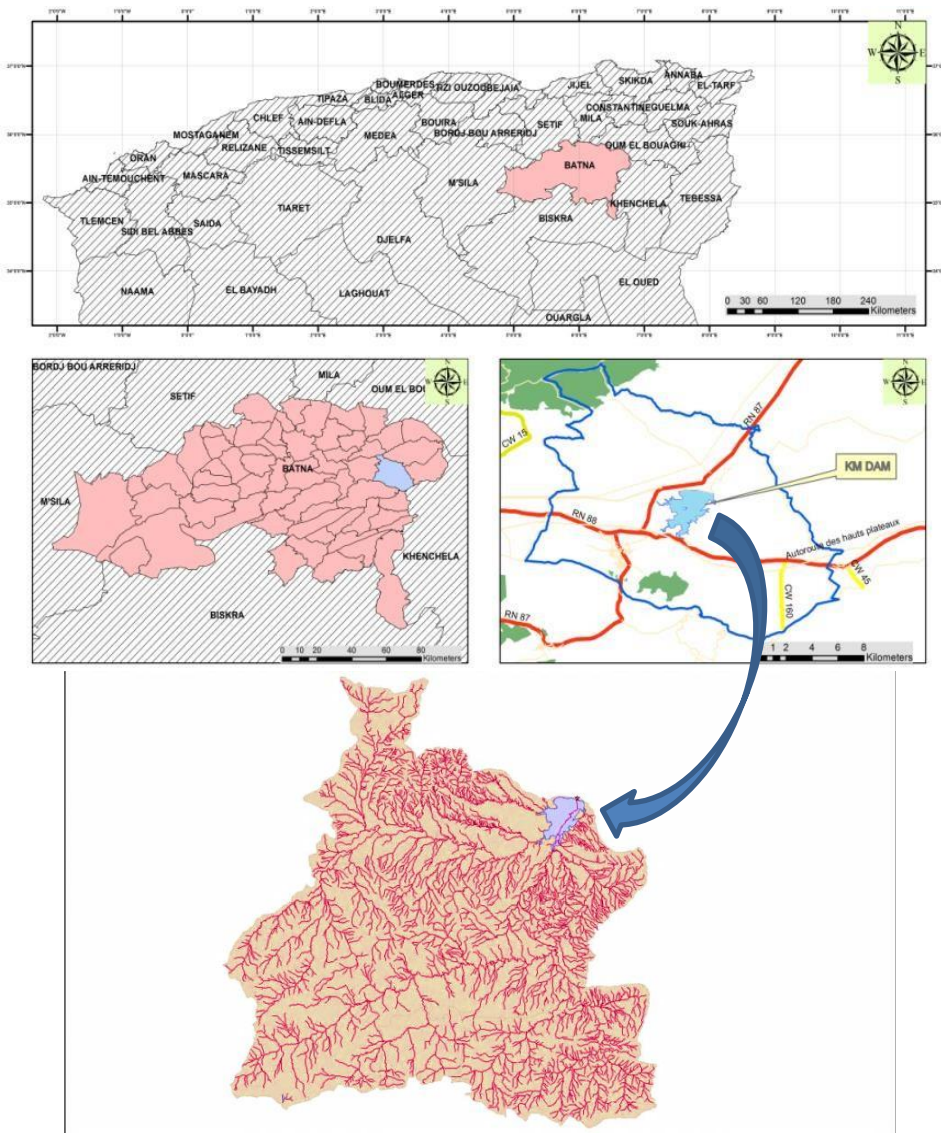


Figure 4.1 plan de situation du barrage et réseau hydrographique

Le barrage de Koudiat-Medaouar est composé par deux digues :

Une digue de 47 m de hauteur constituée par un noyau massif d'étanchéité et par des recharges en graviers et en enrochements.

- Une cuvette avec un volume brut de correspondant au plan d'eau d'exploitation normale- 992,50 m
- Une conduite munie d'une prise d'eau pour l'irrigation et une pour l'AEP ;
- Une vidange de fond située à la base de la rive droite, d'une longueur totale 324,50 m
- évacuateur de crue avec déversoir frontal, situé en rive droite

Les caractéristiques principales du barrage KOUDIAT-MEDAOUR sont les suivants :

- cote en crête est de 997,00m
- longueur de la crête 2465 m
- hauteur maximale 48m
- pentes des talus : aval : 1/3,5 ; amont: 1/3
- profondeur maximale du voile: 45 m
- cote de retenue nominale : 992,50 m
- superficie de la retenue (à 992,5): 6,7 km²

4.3. Méthodologie

Un organigramme de la méthodologie de recherche et de caractérisation est présenté dans la (figure 4.2)

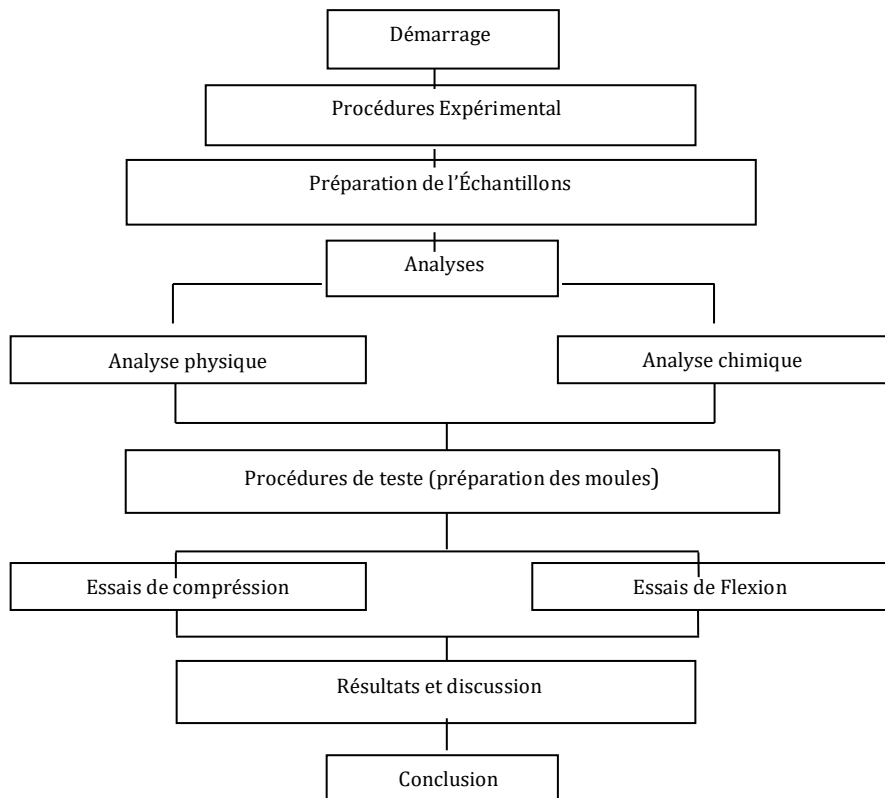


Figure 4.2 Organigramme de la méthodologie de travail.

4.4. Matériels et matériaux

4.4.1 Opérations d'échantillonnage des sédiments

a- Conditions d'échantillonnage

Pour les cours d'eau, la période et le site d'échantillonnage des sédiments dépendent de l'hydrologie.

L'échantillonnage annuel doit être réalisé en fin d'été à la fin de l'été (août septembre) pour les cours d'eau à régime pluvial ou à la fin de l'hiver (février-mars) pour les cours d'eau à régime nival. Cela permet de maximiser les chances d'obtenir des sédiments fins. A cette effet Il est recommandé de :

❖ **s'assurer qu'il y ait bien un écoulement normal :**

- 1- sur certains cours d'eau, en cas de fort étiage, il peut ne persister que quelques flaques sans réel écoulement. Il sera alors demandé de remplir la fiche terrain échantillonnage de sédiment avec la mention « pas d'eau » ou « cours d'eau complètement à sec » ;
- 2- - en cas de rivière en forte crue, si le cours d'eau sort de son lit, il sera demandé de ne pas procéder à l'échantillonnage, et de remplir la fiche terrain échantillonnage de

sédiment avec la mention « Crue débordante » ou « débordement du lit mineur ». Ne jamais prélever après une augmentation du débit, à partir de vitesses de l'ordre de 50 cm/s ;

❖ Pour des raisons de sécurité :

- 1 - les opérateurs doivent être équipés d'équipement de protection individuelle (EPI) comme des gants « nitrile ». Les risques de contamination des échantillons par le préleveur. Et du préleveur par le milieu sont ainsi réduits ;
- 2 - chaque opération de terrain doit être assurée, entre le lever et le coucher du soleil. Cette disposition permet également d'assurer une bonne qualité des opérations et d'optimiser la répartition des tâches.

b- Mesures de paramètres environnementaux

Il est demandé de réaliser la caractérisation du lieu d'échantillonnage pour chaque point d'échantillonnage (conditions météorologiques, présence d'un seuil, type de prélèvement, situation hydrologique apparente, odeur, aspect des abords, irisation sur l'eau, présence de boues organiques flottantes, présence de produits ligneux ou herbacés frais, présence de tout corps ou produit ne faisant pas l'objet d'une observation spécifique, etc.).

De plus, il est demandé à l'opérateur d'échantillonnage de donner une indication du débit. Cette information est importante afin de déterminer si les conditions d'échantillonnage sont acceptables (période d'étiage) et figurera dans la fiche terrain. Le débit peut être évalué :

- ❖ en consultant des hydrogrammes des stations hydrométriques. Lorsqu'aucune station hydrométrique n'est disponible, les données d'une station hydrométrique proche sur un bassin-versant plus important pourront être utilisées avec prudence. Dans ce dernier cas, il est plutôt conseillé de s'appuyer sur le point suivant ;
- ❖ en consultant les stations pluviométriques. Cette méthode ne donne pas directement le débit mais permet d'estimer les perturbations de celui-ci en fonction des pluies.

c- Épaisseur prélevée

Dans le cas d'un échantillonnage annuel, il est défini que l'épaisseur prélevée doit être :

- Les 2 à 3 premiers cm pour les cours d'eau ;
- Les 2 à 3 premiers cm pour les plans d'eau.

Cependant, cette épaisseur dépend du taux de sédimentation dans le cours d'eau ou le plan d'eau considéré [92].

d- Outil opérateur d'échantillonnage

Le choix de l'outil de prélèvement dépend de plusieurs paramètres tels que le type de sédiment ou la profondeur au point d'échantillonnage. L'outil doit préserver l'intégrité de la surface du sédiment et permettre de sous-échantillonner une épaisseur choisie. Pour les faibles profondeurs : drague manuelle type Cemagref ou écope. Il faut être vigilant à ne pas mélanger les différentes strates (épaisseurs) du sédiment lors du raclage (figure 4.3) ;

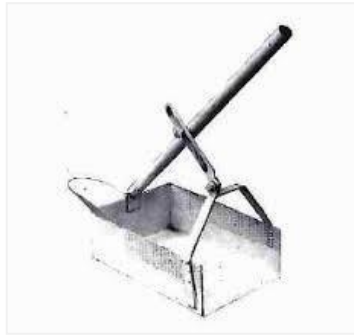


Figure 4.3 Drague manuelle (type Cemagref)

Alors dans le cas ou des moyennes et grandes profondeurs : des bennes de type Eckman et Van Veen font l'objet d'échantillonnage (figure 4.4).



Figure 4.4 Bennes de type Eckman (à gauche) et Van Veen (à droite)

e- Protocole d'échantillonnage sur site

Dans tous les cas les outils sont déployés sur site en prenant les précautions suivantes :

- remonter l'outil lentement afin de minimiser au maximum le lessivage du sédiment ;
- dans le cas d'échantillonnage par benne ou carottier, il est nécessaire de procéder à un sous échantillonnage afin de ne pas échantillonner le sédiment en contact de l'outil opérateur

d'échantillonnage (risques de contamination et phénomène de friction qui perturbe la stratification).

Quel que soit le type d'outil de prélèvement sélectionné, il est nécessaire de suivre les recommandations suivantes :

- Afin d'obtenir un échantillon représentatif de la station de mesure, on prélèvera plusieurs échantillons. Le Guides techniques pour l'échantillonnage en milieu continental AQUAREF recommande un minimum de 3 points, et plus si cela est nécessaire afin d'obtenir un volume de sédiment suffisant pour l'analyse, ceci en particulier dans le cas de la présence d'une très faible couche de sédiment fin sur la station de mesure. En cours d'eau, les points d'échantillonnage devront se situer sur un emplacement non perturbé par la présence de l'opérateur (en amont de celui-ci, et en un endroit non exploité par un échantillonnage précédent). Il est recommandé d'échantillonner si possible au moins un point rive gauche, un point au centre du chenal et un point rive droite et de s'assurer d'échantillonner des sédiments qui ont toujours été immergés (éviter les berges). Afin de recueillir le maximum de particules fines, choisir les points qui privilégient :

- les zones de dépôt visibles (sédiments fins, vaso-organiques de couleur sombre, éviter les échantillons sableux) ;
- les zones concaves ;
- les zones de végétation aquatique ;

En plan d'eau, les points d'échantillonnage doivent être réalisés au point de plus grande profondeur (afin de prélever à l'endroit le plus représentatif de la station de mesure là où les sédiments sont les moins perturbés). Une bathymétrie doit donc être réalisée au préalable. Il est recommandé d'échantillonner au moins 3 points différents, espacés d'un mètre ou deux environ, pour un même échantillon.

f- Conditionnement des échantillons

Le conditionnement des échantillons doit être réalisé loin de toute source de contamination (gaz échappement, cigarette, réseau routier, échappement d'un groupe électrogène, ou autre source de contamination potentielle...). Le Guides techniques pour l'échantillonnage en milieu continental AQUAREF recommande le port de gants « nitriles » à usage unique pour les opérations de constitution des échantillons.

g- Constitution de l'échantillon composite

Les points échantillonnés (qui constituent in fine l'échantillon composite) doivent présenter si possible des sédiments de même nature et en quantités équivalentes selon les méthodes d'échantillonnage présentées ci-dessus. Les prises d'essais destinées à l'analyse étant souvent faibles (de l'ordre du gramme, voire moins dans le cas des métaux), il est essentiel que le sédiment soumis à l'analyse soit suffisamment homogène afin d'obtenir un résultat représentatif de l'échantillon prélevé. Cette étape d'homogénéisation des prélèvements individuels, si elle est réalisée sur le terrain, doit être effectuée à l'abri des sources de contamination (fumée des moteurs, cigarette,...). Dans la suite, le suivi des substances organiques ou inorganiques sera défini comme le suivi de deux familles de composés.

Dans le cas où une seule famille de substances est suivie (un seul flacon à remplir), les échantillons prélevés aux différents points sont versés directement dans le flacon au fur et à mesure, à l'aide d'une spatule de composition inerte vis-à-vis des polluants recherchés. Si le flacon est de taille suffisante pour contenir un échantillon considéré homogène, il n'y a pas d'homogénéisation à effectuer sur le terrain. En revanche, si le flacon fourni par le laboratoire est jugé trop petit pour contenir un échantillon considéré homogène, le sédiment doit être prélevé en quantité suffisante, versé dans un contenant intermédiaire non contaminant vis à vis des polluants à rechercher et mélangé à l'aide d'une spatule de composition inerte également. Une fraction de ce sédiment mélangé est ensuite versée dans le flacon. Dans le cas où les deux familles de substances sont suivies (plusieurs flacons de matériaux différents à remplir), il faut alors mélanger le sédiment prélevé en différents points dans un contenant intermédiaire non contaminant vis à vis des polluants à rechercher. Les flacons remplis doivent être, en verre teinté pour recueillir le sédiment destiné à l'analyse des composés organiques traces, ou en polyéthylène ou polypropylène pour les métaux. Il faut veiller à ce que l'homogénéisation soit effectuée dans deux contenants différents à l'aide de deux spatules différentes, chacun dans un matériau non contaminant vis-à-vis du sédiment prélevé.

Après homogénéisation, le sédiment est transvasé, avec une spatule ou une cuillère de composition inerte, dans le flacon de destination. Les organismes vivants et les végétaux seront éliminés au maximum. Lorsque l'analyse de composés volatils ou de l'eau interstitielle est demandée, le préleveur doit s'assurer que les flacons soient bien remplis à ras-bord, afin de limiter l'oxydation du sédiment.

h- Conservation et transport de l'échantillon

Les responsabilités concernant la conservation et le transport des échantillons entre la station de mesure et le laboratoire d'analyses doivent être clairement établies avant le début de la campagne. Dans tous les cas, une concertation étroite entre les différents intervenants doit être menée. Les consignes liées au flaconnage (nature, volume, remplissage, maniement), à l'étiquetage, au conditionnement (consignes particulières de rinçage des flacons, ...), aux conditions de transport sont de la responsabilité du laboratoire en charge des analyses et doivent être fournies aux préleveurs avant le début de la campagne d'échantillonnage.

i- Traçabilité documentaire des opérations d'échantillonnage

L'ensemble des opérations de terrain doit être consigné sur la fiche terrain échantillonnage sédiment. D'autres informations demandées dans le cadre de ce guide doivent être intégrées à la fiche terrain (conditions météorologiques, présence d'un seuil, type de prélèvement, situation hydrologique apparente, odeur, aspect des abords, irisation sur l'eau, présence de boues organiques flottantes, présence de produits ligneux ou herbacés frais, présence de tout corps ou produit ne faisant pas l'objet d'une observation spécifique etc.).

Les éléments suivants doivent au minimum être rapportés sur la fiche terrain :

- Nom et code national identifiant de la station ;
- Coordonnées géographiques ;
- Code de l'échantillonnage (si disponible) ;
- Nom de l'opérateur ;
- Date et heure de début et de fin de l'échantillonnage ;
- Support ;
- Matériel d'échantillonnage ;
- Protocole d'échantillonnage ;
- Paramètres environnementaux (conditions météorologiques, état des berges, etc) ;
- Résultats des mesures de paramètres physico-chimiques spécifiques (si réalisé) ;
- Toute observation et commentaire utile pour interpréter les futurs résultats d'analyse (source de contamination observée lors de l'échantillonnage, les raisons de changement de lieu, absence de sédiment fin, hétérogénéité des échantillons individuels,...).

Afin de garantir la pérennité du lieu d'échantillonnage et d'assurer la représentativité des résultats, l'opérateur doit également réaliser des photos du point d'échantillonnage dans son environnement ainsi que du lieu exact d'échantillonnage du sédiment, dans le cas où celles-ci

seraient absentes des fiches fournies, ou encore seraient différentes de celles existantes. Les fiches de terrain relatives aux opérations d'échantillonnage doivent être déposées dans une pochette plastique étanche afin d'éviter la détérioration de celles-ci par l'humidité, ou saisies sous forme électronique et transférées au laboratoire d'analyses.

4.4.2 Matériaux

4.4.2.1 les sédiments de dragage

Les échantillons de sédiments de dragage ont été prélevés en 04 points (P1, P2, P3 et P4). Extraits de la cuvette du barrage et à la sortie de la vidange du fond en juin 2020 (figure 4.5) au moyen d'un préleveur conçu par nous-même et confectionné au niveau du laboratoire de mécanique université de Batna 2. Et une barque de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) (figure 4.6).



Figure 4.5. Points de prélèvements



Figure 4.6 Instrument de prélèvement

Les échantillons ont été homogénéisés après avoir été stockés dans l'ombre. Ces sédiments sont vaseux et caractérisés par une granulométrie fine, avec 99,95 % de passage à 80 μm dont 74 % de limon. La valeur du bleu de méthylène atteint 4,75 g pour 100 g. La teneur initiale en matière organique, non modifiée au cours de l'étude est de 0,072 % et la teneur en eau du sédiment à l'extraction est de 85 % à l'extraction.



Figure 4.7 Opérations de séchage et broyage des sédiments

a- Analyses physiques

a.1 Analyse granulométrique.

Les caractéristiques physiques permettent de connaître le comportement et la classification du matériau dans le but d'étudier ses propriétés mécaniques. Les principaux paramètres physiques analysés des sédiments présentés dans le tableau 4.1, aussi l'analyse granulométrique effectuée par sédimentométrie, dont les résultats granulométrique sont illustrés dans la figure 4.8.

Tableau 4.1 Diamètre des particules par l'analyse sédimentométrie

Analyse sédimentométrique		
Tamis (%)	D equivalent μm	Tamisat (%)
99,95	69,90	98,85
	48,70	98,85
	34,50	98,95
	22,00	95,67
	15,70	92,49
	11,30	86,13
	8,10	79,78
	5,80	73,42
	3,40	67,06
	1,50	53,24

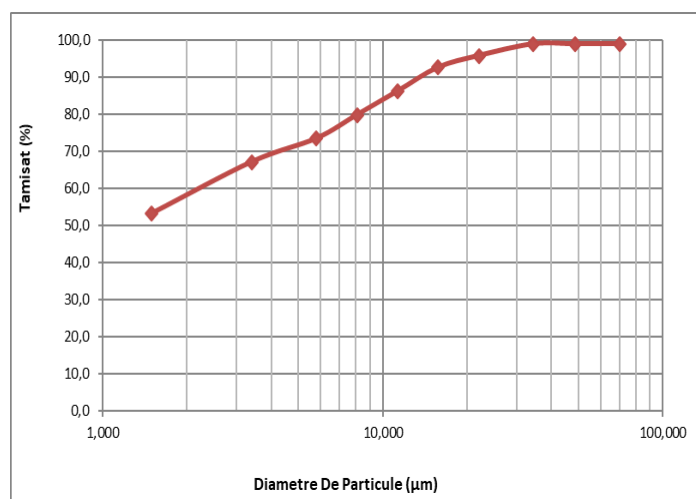


Figure 4.8 Courbe granulométrique des sédiments



Figure 4.9 Courbe granulométrique des sédiments

a.2 Les limites d'Atterberg

Les teneurs en eau qui délimitent les quatre états de consistance sont appelées *limites de consistance* ou *limites d'Atterberg*. Ces limites, qui s'expriment en pourcentages, sont les suivantes :

- La limite de retrait W_r ;
- La limite de plasticité W_p ;
- La limite de liquidité W_L .

Dont les résultats présentés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Propriétés physique de la vase.

Settings	W (%)	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)	γ_s (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	Vb	MO (%)
/	85	64,38	36,37	28,01	26,5	1,59	4,75	0,072

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche du matériau dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de (V). On imprime à la coupelle des coups semblables en comptant le nombre de coups nécessaires pour fermer la rainure sur 1cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte. Par définition, (W_L) est la teneur en eau (%) qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1cm, en 25 chocs.

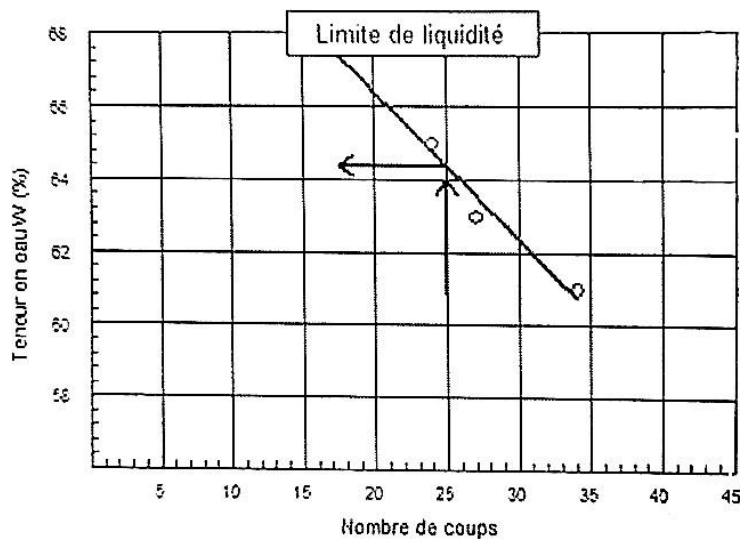


Figure 4.10 limite de liquidité (WL)

Pour déterminer La limite de retrait (W_r), la teneur en eau maximale que le sol peut avoir sans changer de volume. Cette limite sépare l'état solide de l'état semi-solide. Le sol est

progressivement desséché dans un cylindre métallique jusqu'à atteindre le retrait volumique. La mesure des différents volumes permet de retrouver la teneur en eau correspondant à la limite de retrait.

Pour déterminer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de cylindre qu'on amincit progressivement. La limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise en petits tronçons de 10 à 20mm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm. Il faut donc réaliser des rouleaux de 3 mm de diamètre sans pouvoir faire de rouleaux plus fins.

Le diagramme présenté sur la figure 4.10 dit "Abaque de plasticité de Casagrande", permet de classer les sols fins

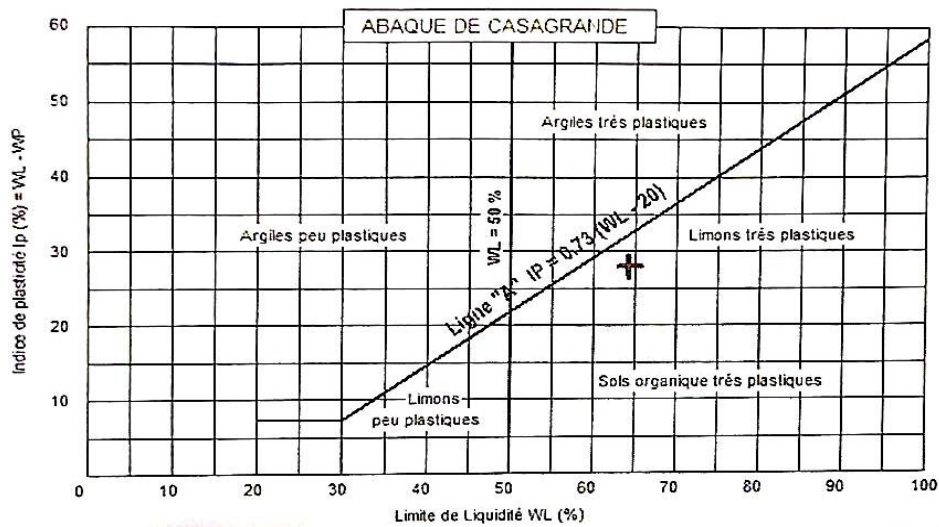


Figure 4.11 abaque de Casagrande

a.3 Essai Proctor.

Les essais de compactage (Proctor Normal) ont été effectués au niveau du laboratoire national de l'habitat et de la construction (LNHC BATNA) dont les valeurs :

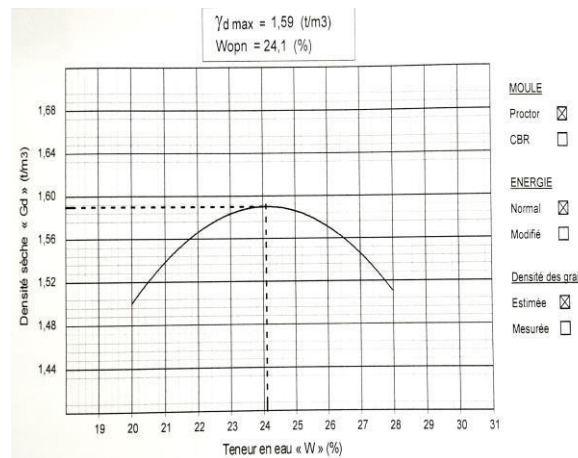


Figure 4.12 courbe de Proctor

b. Analyses chimiques

b.1 La spectrométrie de fluorescence X (FRX)

La spectrométrie de fluorescence X (FRX) permet d'identifier l'analyse chimique de la vase de dragage du barrage de Koudiet Medaouar, les principaux minéraux qui composent cette vase sont présentés dans le Tableau 4.2.

b.2 Préparation de l'échantillon : La vase extraite du barrage, l'échantillon analysé a été prélevé au niveau du barrage de Koudiet Medaouar afin de reconnaître les principaux minéraux.

- L'échantillon mise dans un étuve pendant 24 h ($T = 105^{\circ}\text{C}$) pour séchage.

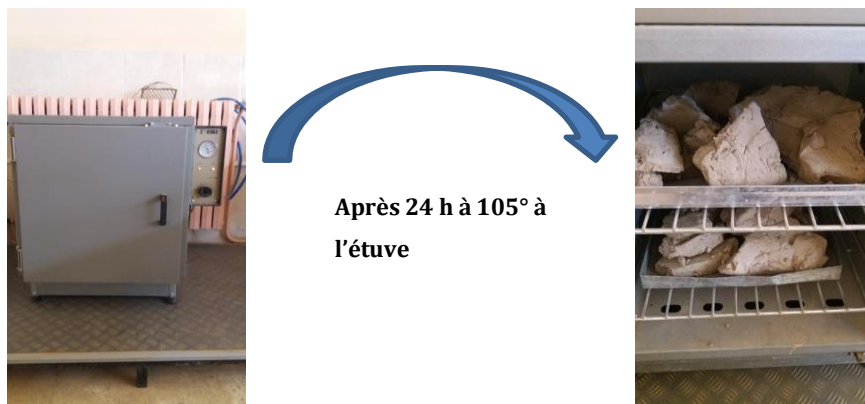


Figure 4.13 séchage de la vase au four

- Broyage des morceaux de l'échantillon de la vase séchée dans un broyeur afin d'obtenir une poudre.

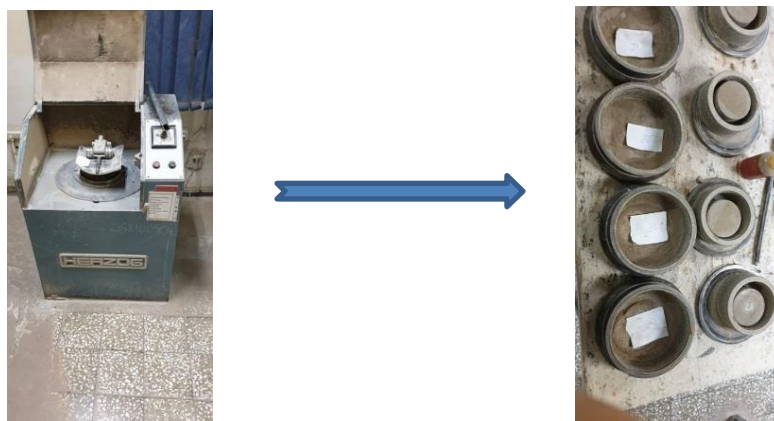


Figure 4.14 broyage de l'échantillon

-Élimination de la matière organique en faisant calciner notre spécimen dans un four.

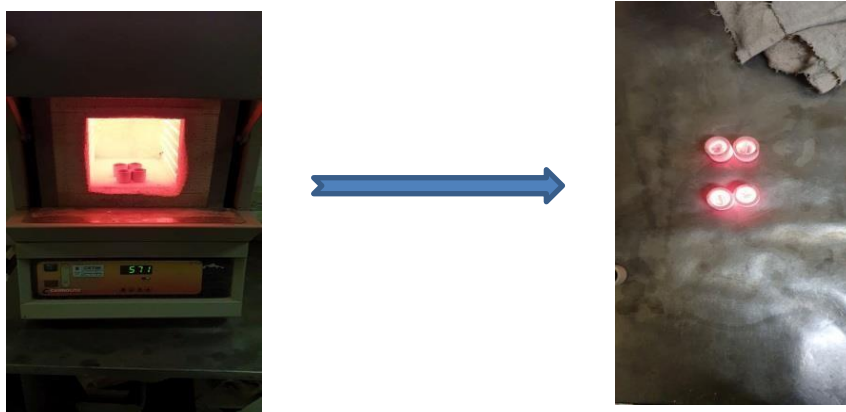


Figure 4.15 élimination de la matière organique

- Préparation des pastis pour la mise en place des échantillons a la machine FRX



Figure 4.16 image de préparation de l'essai FRX

-Lecture des résultats par la machine Zetium.

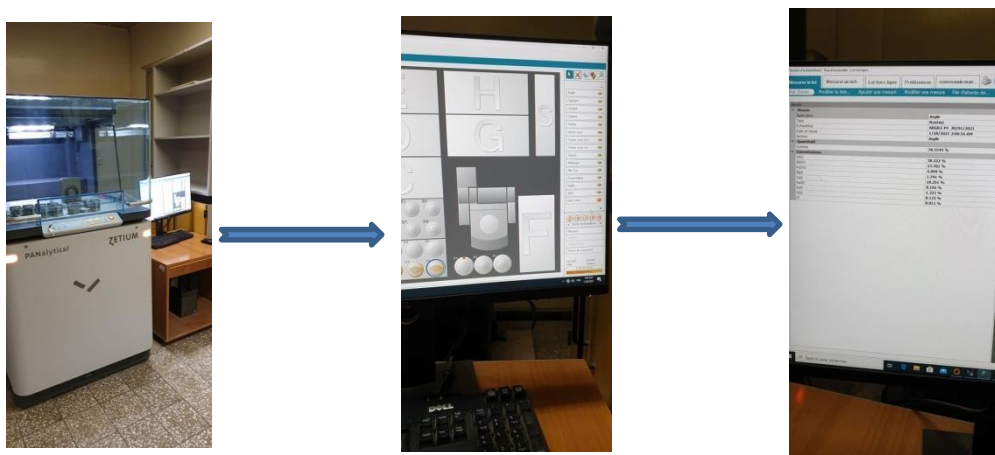


Figure 4.17 Image des résultats FRX

Donc les résultats des analyses de spectrométrie de fluorescence FRX sont présentés dans le tableau 4.3.

Table 4.3 Résultats de spectrométrie de fluorescence X (FRX)

Elements	SiO ₂	CaO	Mg O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₄	CL	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	P.F ₂	CaCO ₃	H ₂ O
Vase du barrage	38,13	18,32	1,74	13,79	4,92	0,82	0,13	0,18	0,12	1,32	17,43	43	37,20

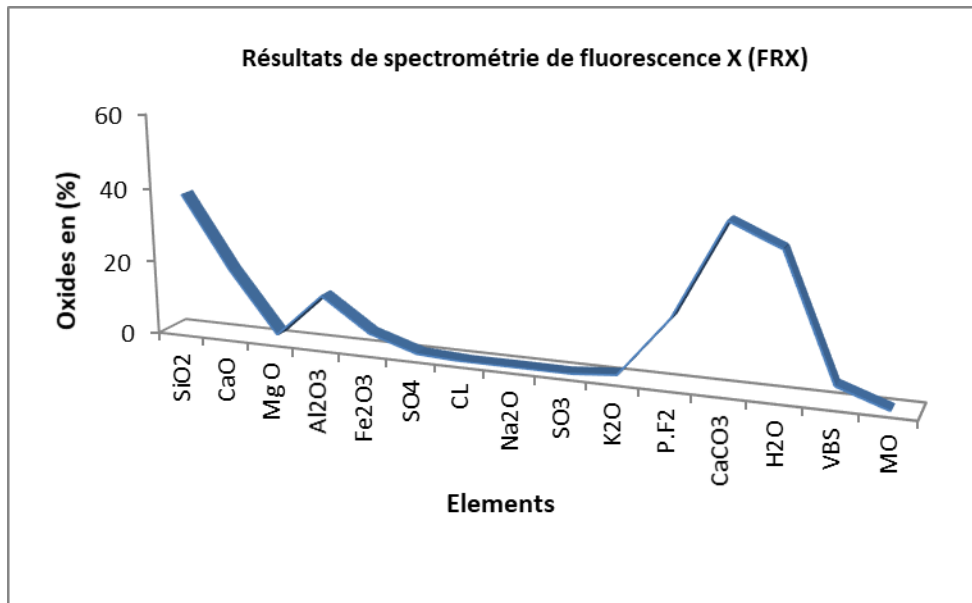


Figure 4.18 représentation graphiques des concentrations des minéraux

Les analyses par spectrométrie de fluorescence X (XRF) effectuées sur les échantillons de la boue du barrage de Koudiet Medaouar illustrent les principaux minéraux cristallins avec des lignes caractérisant le quartz (SiO₂), et les carbonates (CaCO₃) la calcite ainsi qu'une quantité d'alumine (Al₂O₃) sous forme de Kaolinite (Al₂O₃ 2SiO₂ 2H₂O).

4.3.2.2 Le Ciment

Le ciment est un matériau chimique composé au départ de calcaire (environ 75-80%) et d'argile (20-25%) broyée et éventuellement additionnées de produits secondaires ou de matériau apportant la silice, l'alumine et le fer. Ce mélange est ensuite chauffé dans un four à 1450 C°. Le Ciment Portland Artificiel (CPA) résulte du broyage du clinker avec environ 5% de gypse pour réguler la prise.

Les clinkers peuvent être très différents les uns des autres du fait de la composition du cru du mode de cuisson et du refroidissement. C'est-à-dire qu'en les broyant à des finesses

variées avec des teneurs en gypse plus ou moins importantes, on obtiendra des ciments Portland artificiels n'ayant pas les mêmes caractéristiques.

La fabrication du ciment est encore plus variée grâce à l'ajout de constituants secondaires tels que les Laitiers de Haut Fourneau (LHF), les Cendres Volantes (CV), les pouzzolanes (Z), et la Fumée de Silice (SF). [93]

Les principaux composants minéralogiques du clinker sont :

- ✓ Les silicates tricalciques (alite) : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C3S]
- ✓ Les silicates bicalciques (belite) : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C2S]
- ✓ Les aluminates tricalciques : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ [C3A]
- ✓ Les aluminoferrites tétracalciques : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ [C4AF]

Les silicates de calcium (C3S) et (C2S) représentent environ 75% de la masse du ciment. Les caractéristiques granulaires du ciment sont exprimées par sa granulométrie et sa finesse de mouture. Cette finesse de mouture appelée aussi surface spécifique de Blaine peut atteindre $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge.

Le ciment utilisé dans cette formulation est du type Portland ordinaire CEM I 42.4N (PC) conforme à la norme SCIMAT NA 442 édition 2013 dont la composition chimique est présenté dans le tableau 4.4.

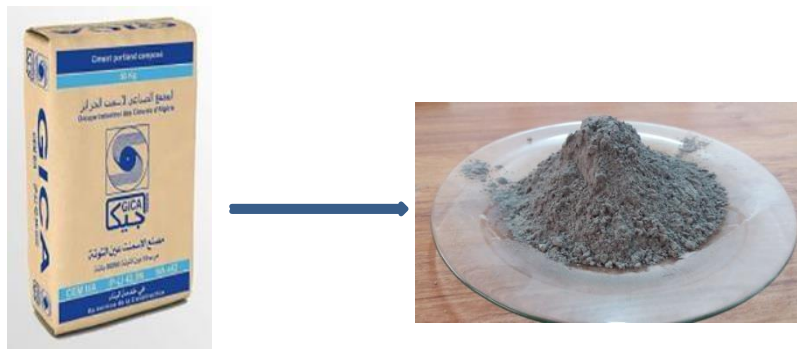


Figure 4.19 image du ciment utilisé CEM I 42.4N

Le ciment utilisé dans cette formulation est du type Portland ordinaire CEM I 42.4N (PC) conforme à la norme SCIMAT NA 442 édition 2013.

Le tableau 4.4 présente la composition chimique du ciment.

Elements	SiO ₂	CaO	Mg O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₄	CL	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	P.F ₂	CaCO ₃	H ₂ O
Vase du barrage	21,45	61,43	1,24	4,31	4,56	2,28	0,018	0,39	2,28	0,61	2,19	-	25,82

4.3.2.3 La chaux

La chaux hydraulique constituée principalement de silicates de calcium, d'aluminates de calcium et d'hydroxyde de calcium produite par la calcination, l'extinction et le broyage de calcaires argileux et/ou par le mélange avec de l'hydroxyde de calcium de matériaux appropriés.

Au contact de l'eau, elles ont la propriété de faire prise et de durcir. Le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue également au processus de durcissement. Elles contiennent au moins 12 % en masse de chaux libre non liée (norme NF EN 459-2).

Les chaux obtenues par la calcination de calcaire plus ou moins argileux ou siliceux, avec réduction en poudre par extinction, avec ou sans broyage, sont appelées «chaux hydrauliques naturelles» (NHL). Les chaux hydrauliques naturelles, auxquelles on additionne de façon appropriée des matériaux pouzzolaniques ou hydrauliques jusqu'à 20 %, sont désignées par NHL-Z.



Figure 4.20 image de la chaux utilisée

Le tableau 4.5 présente la composition chimique d'une chaux hydraulique (L) fabriquée par l'unité de Lafarge Holcim Algérie classée selon la norme NF EN 998-1. Dont elle a été choisie comme ajout aux argiles extraites du barrage.

Tableau 4.5 composition chimique de la chaux

Elements	SiO ₂	Ca O	Mg O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₄	CL	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	P.F ₂	CaCO ₃	H ₂ O
Vase du barrage	0,16	97,9 2	0,20	0,06	0,03	-	-	-	-	-	-	18,47	-

**Tableau 4.6 Résistance à la compression des chaux hydrauliques et naturelles d'après
(NF P 15-311 Janvier 1996) [94].**

Type de chaux	Résistance à la compression N/mm ²	
	7 jours	28 jours
HL 2 ; NHL 3,5	-	2 à 5
HL 3,5 ; NHL 3,5	≥ 1,5	3,5 à 10
HL 5.NHL 5	≥ 2	5 à 151)
1) Si HL 5 (ou NHL 5) a une masse volumique apparente inférieure à 0,90 kg/dm ³ , il est permis d'avoir une résistance jusqu'à 20 N/mm ²		

4.3.2.4 La poudre de verre :

Les poudres de verre sont des déchets de plusieurs procédés industriels à travers le monde, et la nécessité de les traiter sans les envoyer à la décharge est une priorité.

Une étude montre qu'avec l'ajout d'une petite quantité de ciment Portland, avec de la poussière de calcaire et du verre en poudre peut produire un nouveau type de brique. La nouvelle brique est manufacturable sans avoir besoin de tirer dans un four, et affiche des propriétés similaires aux briques de béton contemporaines.

Il est à noter que la poudre de verre améliore les résistances mécaniques telle que la résistance à la compression et celle à la flexion aussi les résistances la résistance à l'abrasion et la conductivité thermique de la brique - tout en maintenant la compétitivité économique [95] . Dans la fabrication traditionnelle de briques de type argile, l'ajout de 2,5 à 10 par masse 20 micron verre moulu a été montré pour diminuer les pertes de fabrication et d'augmenter la force de 20 MPa à 29 MPa - en raison du verre moulu remplissant les pores internes de l'argile [96].

Le remplissage des pores, la non-absorption de l'eau et la solidité des déchets de bouteilles en verre transparent. Leur transformation en poudre présente des caractéristiques bénéfiques et écologiques. C'est pourquoi nous avons choisi une poudre de verre (GP).

Les bouteilles en verre de soda collectées pour ce projet sont concassées par un marteau, puis le verre brisé est broyé par une machine pour obtenir de la poudre de verre (voir figure 4.19). La poudre de verre de couleur blanche et ont une taille maximale de 3,5 mm.

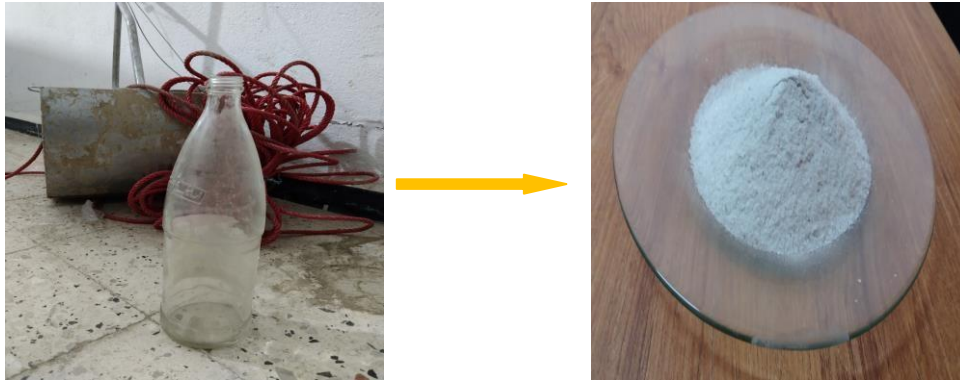


Figure 4.21 image des bouteilles avant et après broyage

4.3.2.5 Les fibres de verre :

Les Caractéristiques et propriétés des fibres dans la brique en terre compressée, sont des armatures réparties dans le corps de la brique, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement homogène. Donc ces fibres présentent selon leur nature des caractéristiques spécifiques, (géométriques que mécaniques).

La capacité de renforcement d'une fibre dépend en particulier de son ancrage, de sa résistance a la traction et de son module d'Young.

Les fibres ont pour rôle principal de s'opposer à la propagation des microfissures. Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, leurs rôles se traduisent aussi par des améliorations relatives à savoir :

- La cohésion du béton frais ;
- La facilité de moulage ou de mise en place dans le coffrage ;
- La déformabilité avant rupture ;
- La résistance à la traction par flexion ;
- La ductilité et la résistance post-fissuration ;
- La limitation de la fissuration due au retrait ;
- La répartition homogène de la fissuration ;
- La résistance aux chocs ;
- La résistance à la fatigue ;
- La résistance à l'usure ;
- La résistance à l'abrasion ;
- La tenue au feu ;
- La capacité à absorber de l'énergie.

Chacune de ces propriétés ont une influence particulière sur les lois de comportement, ce qui se traduit par des applications et spécifiques adaptées.

Le choix du type de fibres est donc fonction du domaine d'application et des performances souhaitées. Les fibres ne sont utiles que si les blocs en terre compressée sont soumis à des tractions supérieures à sa propre résistance.

Si des fissures apparaissent dans la brique (BTC), elles permettent de transmettre les efforts à travers les fissures.



Figure 4.22 image de la fibre de verre utilisé

La fibre de verre utilisé dans notre expérimentation (GF) est un tissu de type T-23 sous forme de textile d'une épaisseur de 0,01 mm. Cette fibre est coupée en longueurs de 25 mm, facile à mettre en œuvre (voir figure 4.20), l'anti-fissuration, la résistance à la traction et aux alcalis nous ont conduits à utiliser cet ajout.

4.3.2.6 L'eau:

L'eau potable est nécessaire à l'hydratation du mélange de notre brique en terre comprimée. L'eau doit être exempte d'acides, d'huiles, d'alcalis, de matières végétales ou d'autres impuretés organiques. L'eau douce produit également des briques plus fragiles.

Dans ce projet, nous avons utilisé de l'eau potable normale. Elle a été recueillie dans la municipalité de Batna. Et elle a un pH de 6,9.

Afin d'améliorer les caractéristiques de notre échantillon, de créer un matériau pour la fabrication des briques de terre compressée fiables. L'ajout de ciment et de chaux a fait l'objet de notre étude.

Le ciment utilisé dans cette formulation est du type Portland ordinaire CEM I 42.4N. De même que la chaux est une chaux hydraulique (L) de Lafarge Holcim Algérie.

Le remplissage des pores, la non-absorption de l'eau et la solidité des déchets de bouteilles en verre transparent. Leur transformation en poudre présente des caractéristiques bénéfiques et écologiques. C'est pourquoi nous avons choisi une poudre de verre (GP).

Fibre de verre (GF) Un tissu T-23 sous forme de renfort textile d'une épaisseur de 0,01 mm coupé en longueurs de 25 mm, facile à mettre en œuvre, l'anti-fissuration, la résistance à la traction et aux alcalis du ciment nous ont conduits à utiliser cet ajout.

4.4. Procédures De L'expérimentation

Vingt-huit mélanges différents ont été préparés dont des blocs de (100 × 200 × 60) mm. Ont été réalisés et conditionnés dans une température ambiante de 20°C ±. Pour assurer une bonne conservation et séchage des briques en (BTC), il est nécessaire de garder les spécimens à l'ombre afin d'éviter les fissures de retrait plastique formées par l'évaporation de l'eau à la surface de la brique.

Une série de tests a été menée après 28 jours afin de déterminer la résistance à la compression et à la flexion des différents mélanges de briques (BTC). Le tableau 4.7 présente les combinaisons et les pourcentages des différents mélanges.

4.4.1 Préparation des briques en terre compressée

Dans le cadre de notre étude nous confectionnons des éprouvettes 100x200x60 mm³ en un premier temps afin d'étudier les comportements de notre matériau des briques avec ou sans traitement.

Les briques sont réalisées en maintenant l'enchaînement des opérations (malaxage, compactage et démoulage).

Tout d'abord, le sol sec est concassé et broyé grossièrement pour obtenir des particules fines. Ensuite la préparation des mélanges s'effectue en ajoutant des liants (ciment, chaux) des fibres de verre, poudre de verre, un malaxage à sec dans un seau (figure 5.1) pendant 3 minutes. Par la suite des quantités d'eau sont ajoutées progressivement jusqu'à l'atteinte d'une maniabilité souhaitée.



Figure 4.23 Opération du malaxage

Le mélange est placé dans des moules en interface de bois de forme prismatiques avec des dimensions $(100 \times 200 \times 60) \text{ mm}^3$, chaque moule comporte quatre casier voir (figure 4.24). Ces moules sont fixé sur les quatre coté par des serre joint métallique afin de maintenir la forme et d'éviter les déformations des parois latérales.

Les faces et le fond du moule sont huilés correctement pour éviter le collage du matériau au coffrage.



Figure 4.24. Moule utilisé $100 \times 200 \times 60 \text{ mm}^3$

Afin d'attendre une bonne compacité une dame en acier conçu par nous-même dont les dimensions sont similaire à celle de la brique réalisée, a fait l'objet de cette opération. (Figure 4.25).

Le compactage a été garanti par la chute libre de la platine perforée au centre surmontant un axe gradué pour assurer une même hauteur de chute, ainsi que le même poids appliqué pour tous les échantillons.



Figure 4.25. Dame adapté au moule pour compactage

4.4.2 Optimisation de la teneur en eau

La quantité d'eau utilisée à notre mélange est la même recommandée par l'essai Proctor. Pour atteindre notre densité sèche maximale trouvée précédemment des essais de répétabilité de compactage effectués en variant le nombre de coups et la hauteur de chute, afin d'arriver à une énergie de compactage adéquate.

4.4.3 Codage des mélanges

Les mélanges utilisés lors de cette étude sont codifiés afin de faciliter la lecture du mélange. Un système de code retenu est composé de lettres majuscules qui désignent chaque constituant du mélange, et des chiffres qui représentent le pourcentage de chaque constituant d'un mélange. A titre d'exemple C+2%CP+6%L désigne une brique en terre compressée (C) renforcée par 2 % de ciment portland (CP) et de 6% de chaux (L) La codification de l'ensemble des mélanges étudiés est présentée sur le tableau 4.7.

Le tableau 4.7. Formulation des mélanges testés

Specimen	Formulation du mélange	L'argile %	Ciment Portland %	Glass powder %	Glass Fiber %	Lime %
S00	Untreated clay	100	-	-	-	-
S01	C+2%L	98	-	-	-	2
S02	C+4%L	96	-	-	-	4
S03	C+6%L	94	-	-	-	6
S04	C+2%PC	98	2	-	-	-
S05	C+4%PC	96	4	-	-	-
S06	C+6%PC	94	6	-	-	-
S07	C+1.5%GP	98.50	-	1.5	-	-
S08	C+3%GP	97	-	3	-	-
S09	C+4.5%GP	95.50	-	4.5	-	-
S10	C+0.15%GF	99.85	-	-	0.15	-
S11	C+0.25%GF	99.75	-	-	0.25	-
S12	C+0.35%GF	99.65	-	-	0.35	-
S13	C+2%CP+6%L	92	2	-	-	6
S14	C+4%CP+4%L	92	4	-	-	4
S15	C+6%CP+2%L	92	6	-	-	2
S16	C+2%CP+4.5%GP	93.50	2	4.5	-	-
S17	C+4%CP+3%GP	93	4	3	-	-
S18	C+6%CP+1.5%GP	92.50	6	1.5	-	-
S19	C+2%CP+0.35%GF	97.65	2	-	0.35	-
S20	C+4%CP+0.25%GF	95.75	4	-	0.25	-
S21	C+6%CP+0.15%GF	93.85	6	-	0.15	-
S22	C +2%L+0.35%GF	97.65	-	-	0.35	2
S23	C +4%L+0.25%GF	95.75	-	-	0.25	4
S24	C +6%L+0.15%GF	93.85	-	-	0.15	6
S26	C +2%L+4.5%GP	93.50	-	4.5	-	2
S27	C +4%L+3%GP	93	-	3	-	4
S28	C +6%L+1.5%GP	92.50	-	1.5	-	6

4.4.4 Cure des briques en terre compressée

Après démoulage, les briques (BTC) sont prises manuellement avec précaution, en évitant de toucher les coins à cause de sa fragilité. Il est ensuite conservé dans un endroit à l'abri dans une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50\% \pm 5\%$ afin d'éviter un dessèchement rapide.

Comme pour les bétons, la résistance d'un sol-liant croît avec l'âge. Tous les sols n'ont pas un comportement identique, mais une période minimum de cure de 7 jours est indispensable. Afin d'étudier le comportement mécanique des briques (BTC),

Afin de favoriser le maximum l'hydratation pour atteindre une résistance finale des spécimens conservés pendant 28 jours avant d'être subi a des tests.

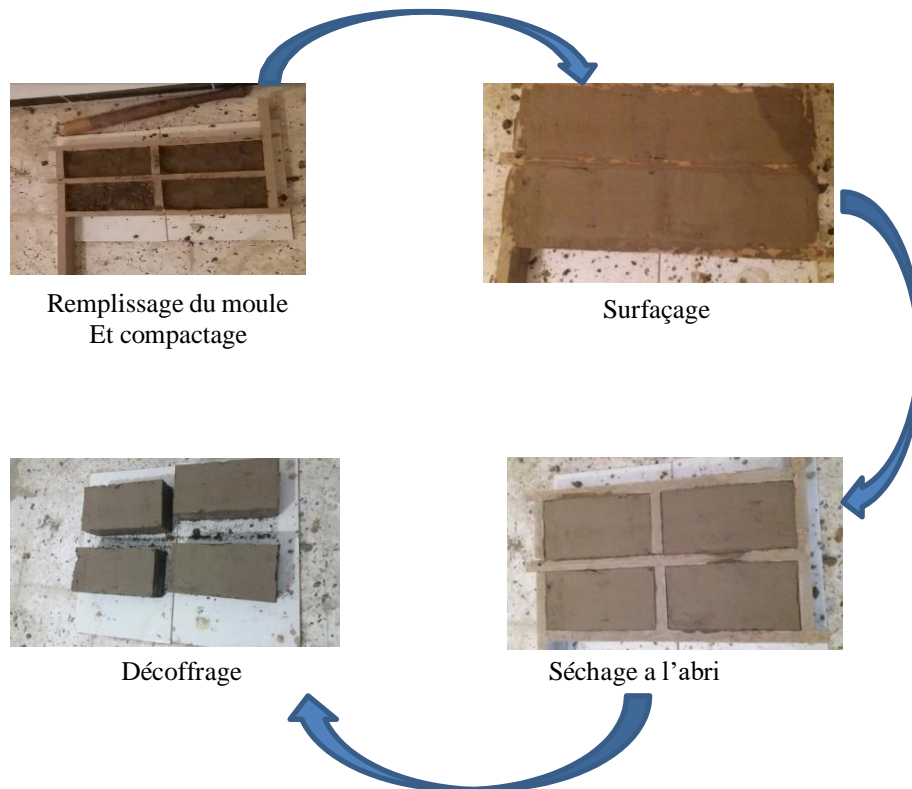


Figure 4.26. Procédure de moulage et coffrage de BTC

4.5. Résistance à la compression

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme prismatique, placée entre les plateaux d'une presse, à une force axiale.

Si le matériau étudié est ductile, la rupture ne peut être atteinte avec ce test. L'essai de compression est surtout utilisé pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (comme la brique) qui sont difficiles à usiner pour un essai de traction.

La résistance à la compression est donnée par la formule

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (4.1)$$

R_c : Résistance à la compression des blocs en (MPa).

F : Force maximale en (N).

S : Section comprimée en mm^2

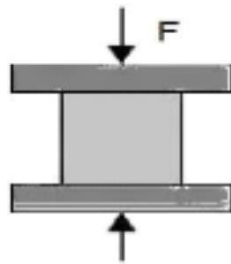


Figure 4.27 Schéma du principe de l'essai de compression

4.6. Résistance à la flexion

L'essai de flexion 3 points permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une éprouvette prismatique du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de l'éprouvette une force croissante jusqu'à rupture. Comme l'essai de compression, l'essai de flexion ne permet généralement pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles. L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple (peu ou pas d'usinage). Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.

Donc la charge F est appliquée au centre de l'échantillon, symétriquement par rapport aux appuis (Figure 4.28). Les composites de section $b \times h$ étant supposés homogènes, la contrainte normale de traction σ appliquée sur la section de la poutre prismatique est déterminée par l'équation :

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (4.2)$$

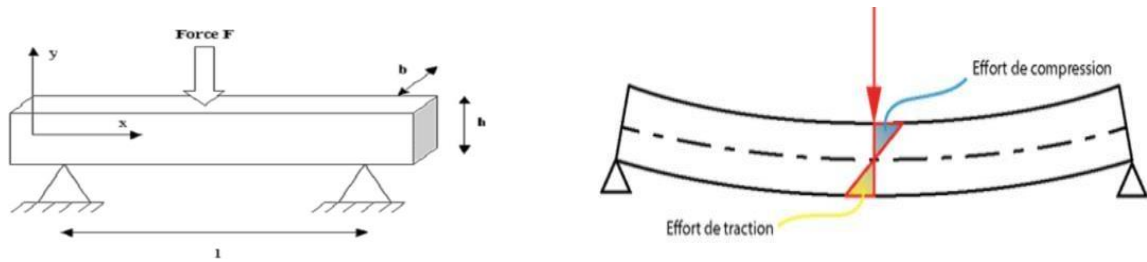


Figure 4.28. Schéma du montage de flexion 3 points

4.7. Résultats et discussion

Vingt-huit échantillons a été préparés avec des composants d'addition de différentes proportions, y compris un échantillon non traité (référence), afin d'estimer leurs résistances à la flexion et à la compression, respectivement.

4.7.1. Effet de la résistance à la compression avec différents mélanges

La résistance à la compression de l'éprouvette a été déterminée à l'aide d'une machine d'essai universelle (CM0157) d'une capacité maximale de 250 kN. La procédure de test a été guidée par la norme (ASTM C109). Les demi-échantillons récupérés des expériences de flexion ont été testés en compression avec un incrément de charge qui a été appliqué jusqu'à la rupture de l'échantillon (figure 4.29), dont les valeurs de contrainte-déformation obtenues de la machine d'essai ont également été enregistrées.



Figure 4.29. Image de l'écrasement de la brique en BTC (compression)

Cet essai permet de déterminer la résistance nominale en compression simple des blocs de terre compressée BTC. Il s'agit de soumettre une éprouvette de forme prismatique de dimensions $100 \times 100 \times 60 \text{ mm}^3$ à une compression simple jusqu'à la rupture. Afin de favoriser les déplacements transversaux libres de l'échantillon (Figure 4.29).

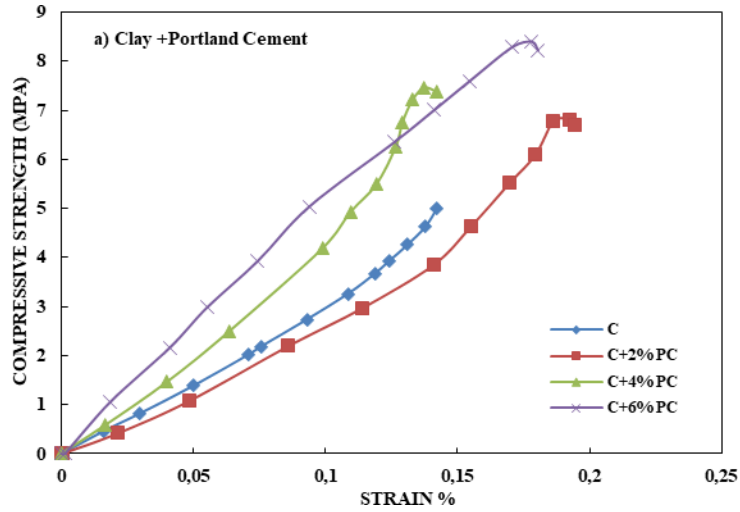


Figure 4.30. Résultats de compression argile/ciment portland

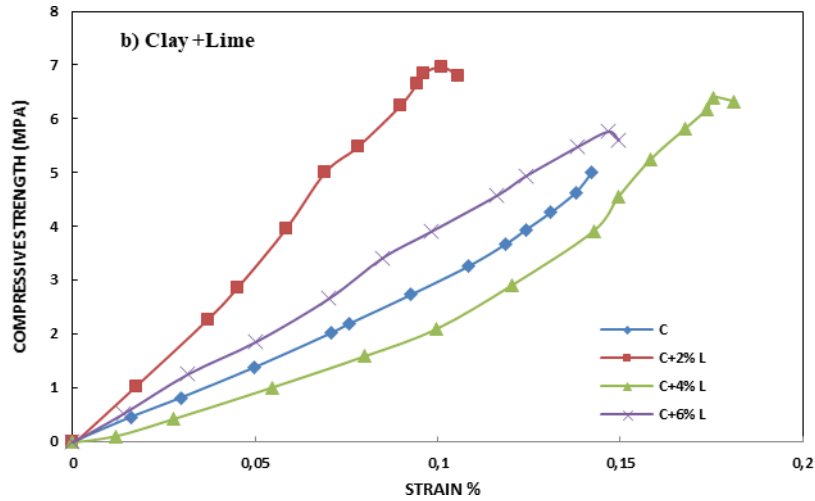


Figure 4.31. Résultats de compression argile/chaux

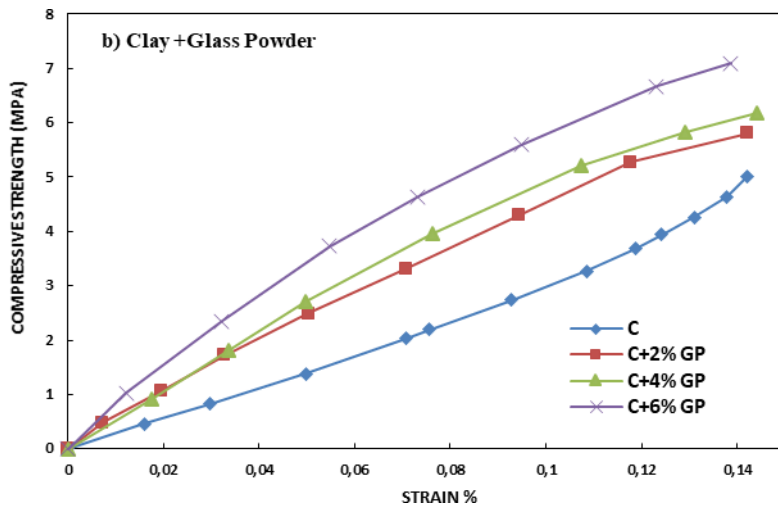


Figure 4.32. Résultats de compression argile/poudre de verre

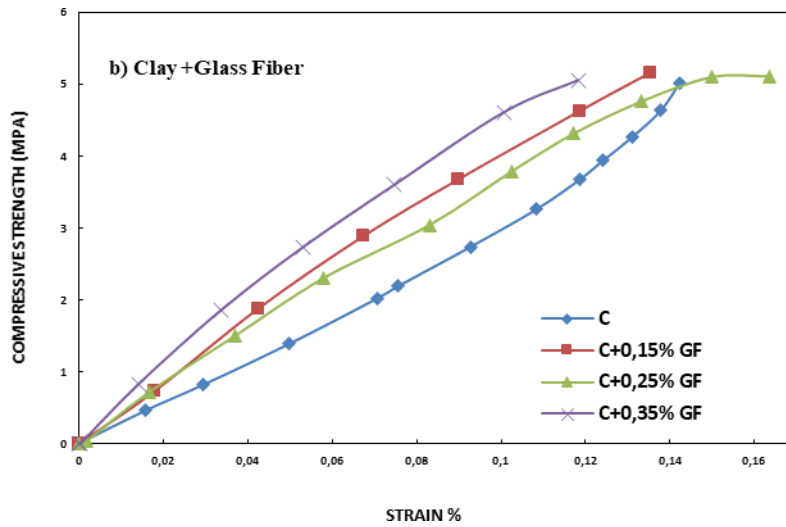


Figure 4.33. Résultats de compression argile/fibre de verre

Les figures 4.30, 4.31, 4.32 et 4.33 montre que tous les mélanges présentent une augmentation considérable de la résistance à la compression par rapport à l'argile non traitée (contrôle).

La figure (4.30) montre que la résistance à la compression du mélange (argile-ciment) présente une augmentation considérable, avec des valeurs proportionnelles de 6,80, 7,46 et 8,39 MPa observées par l'ajout de 2,4 et 6% de ciment.

L'addition de 2% de chaux montre une augmentation significative de 6.96 Mpa dans la résistance à la compression.

Donc l'addition de 4 et 6% donne des valeurs de 6.40 et 5.76 MPa qui montre une diminution de la résistance. (Figure 4.34)

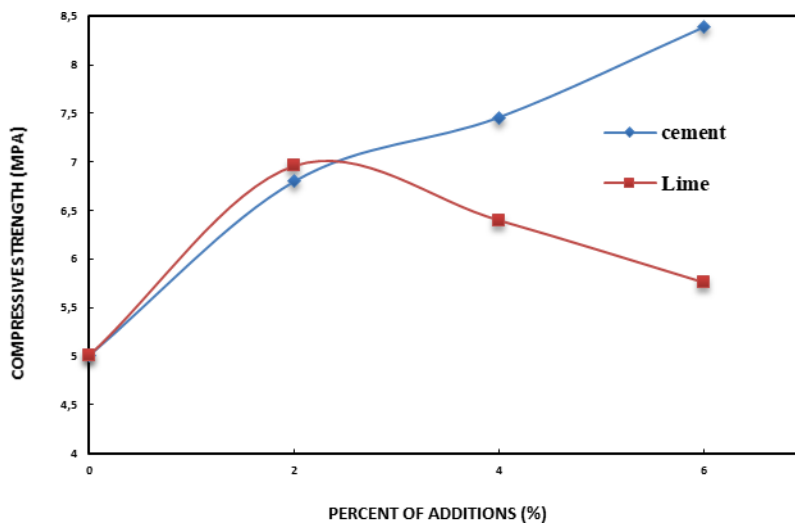


Figure 4.34 déferéce de résultats de compression argile/ ciment et argile/chaux

Les résultats expérimentaux révèlent que le mélange (argile - poudre de verre) donne une résistance à la compression plus élevée que l'argile non traitée avec des valeurs de 5,80, 6,18 et 7,09 MPa pour des ajouts de 1,5, 3 et 4,5 %.

Une tendance similaire est observée pour le mélange argile-fibres de verre, où les résultats sont presque identiques à ceux de l'argile non traité.

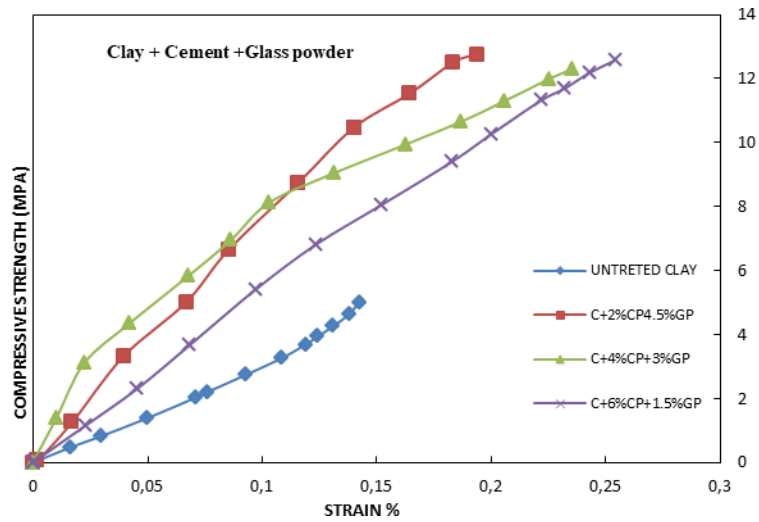


Figure 4.35. Résultats de compression argile/ciment/ poudre de verre

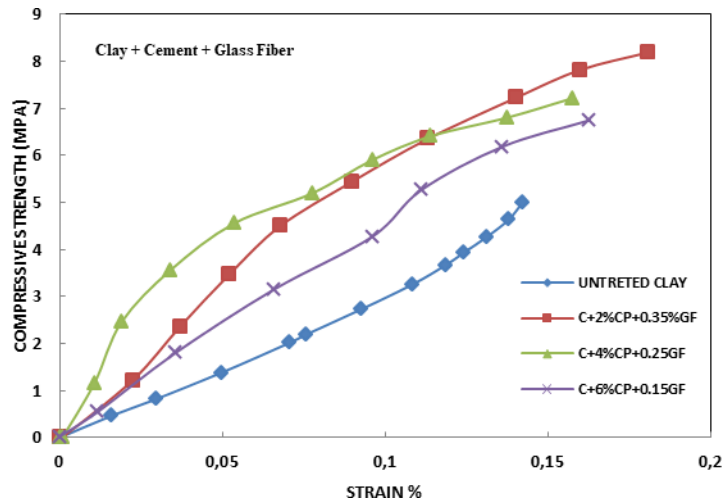


Figure 4.36. Résultats de compression argile/ciment/ fibre de verre

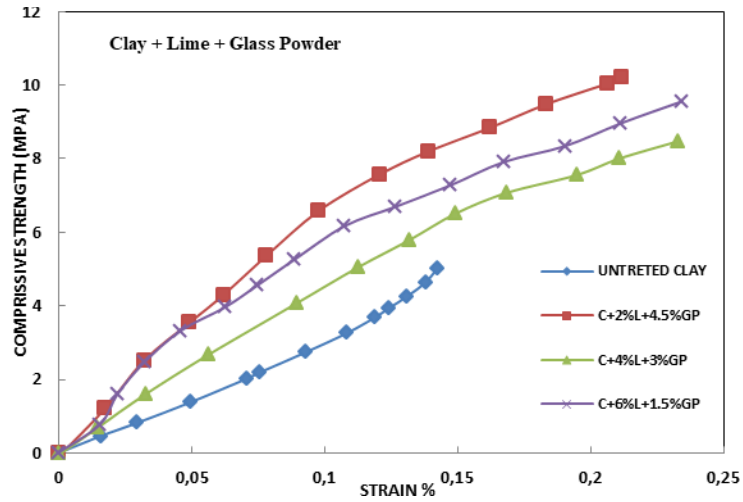


Figure 4.37. Résultats de compression argile/chaux/ poudre de verre

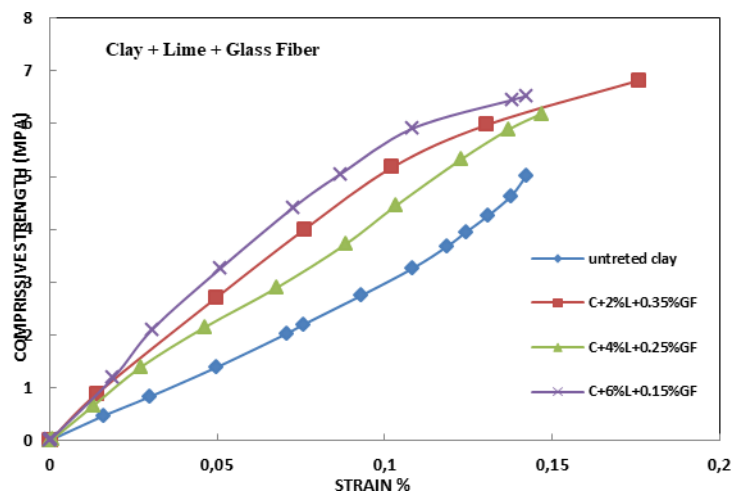


Figure 4.38. Résultats de compression argile/chaux/ fibre de verre

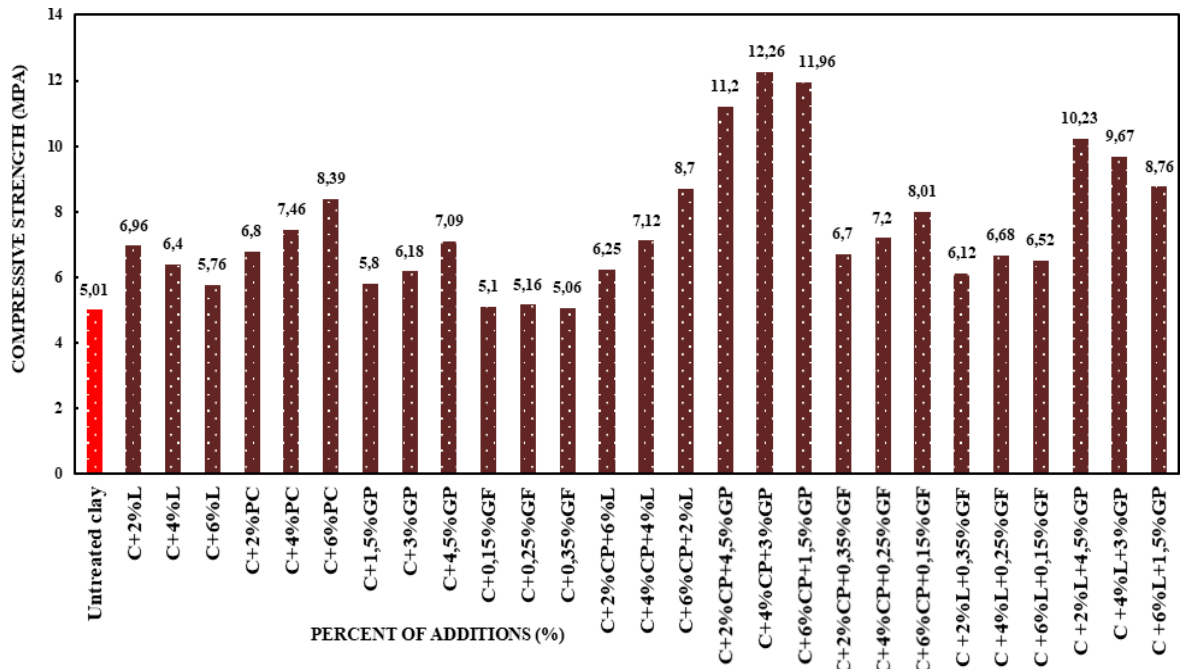


Figure 4.39. Résultats de compression de différents mélanges

La figure (4.39) montre que l'ajout des différentes additions dans notre échantillon de référence (argile de barrage) augmente la résistance à la compression avec des valeurs irrégulières.

L'ajout de ciment fournit une résistance à la compression optimale avec des taux compris entre 35% (S04) et 150% (S17) par rapport à l'échantillon de référence, Ceci est dû à l'augmentation de la liaison inter-granulaire. Cependant, l'ajout de chaux augmente également la résistance à la compression de 15% (S03) à 105% (S26) à l'exception d'une diminution surprenante au-delà de 4% qui a été observée, Ceci est dû au fait que les grains de chaux ont besoin de plus d'eau pour l'hydratation que ceux du ciment.

Une augmentation significative de la résistance à la compression a été observée avec l'ajout de poudre de verre par rapport à l'échantillon de référence (S00) dans la gamme de 16% (S07) à 145% (S17), en raison des caractéristiques pouzzolaniques de ce matériau, un matériau siliceux qui réagit dans l'eau et l'hydroxyde de calcium, qui offre des avantages tels que l'augmentation de la durabilité et la résistance mécanique, ainsi qu'une réduction de la quantité de ciment nécessaire, dont la production crée un fardeau environnemental.

Une très légère augmentation de la résistance à la compression a été observée avec l'ajout de fibres de verre dans tous les mélanges, dont les résultats sont restés pratiquement inchangés. Cela est dû au chevauchement des fibres de verre, qui entraîne une mauvaise cohésion.

4.7.2. Effet de la résistance à la flexion avec différents mélanges

Les essais de flexion à trois points ont été guidés sur la base de la norme ASTM C78 afin d'obtenir une rupture par flexion de notre brique d'essai. La brique a été placée sur deux supports et une force perpendiculaire a été appliquée sans excentricité du spécimen en appliquant une charge incrémentale jusqu'à la rupture. Les résultats de contrainte/déformation ont été acquis et enregistrés par la machine.

Cet essai permet de déterminer la résistance à la rupture d'un matériau. Il s'agit de soumettre une éprouvette de forme prismatique de dimensions $(100 \times 200 \times 60)$ mm³ à une force perpendiculaire croissante a été appliquée sans excentricité jusqu'à la rupture (Figure 4.40)



Figure 4.40. Image de l'écrasement de la brique en BTC (Flexion)

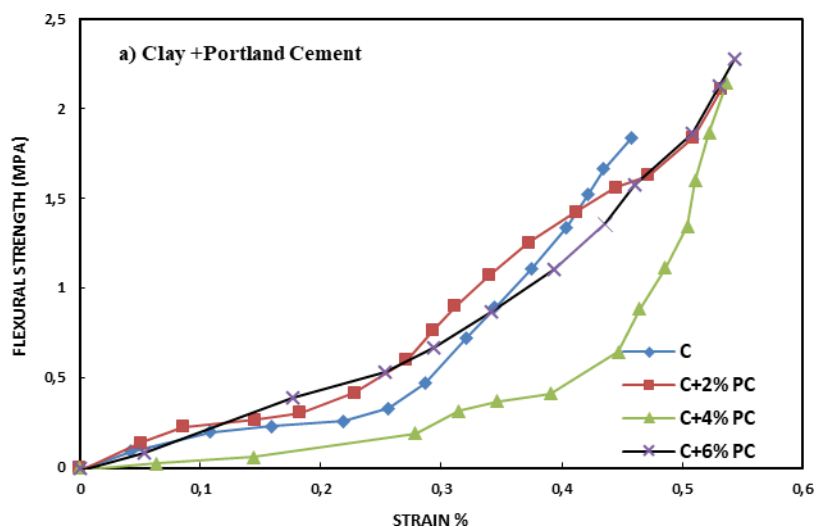


Figure 4.41 résultats de Flexion argile/ciment

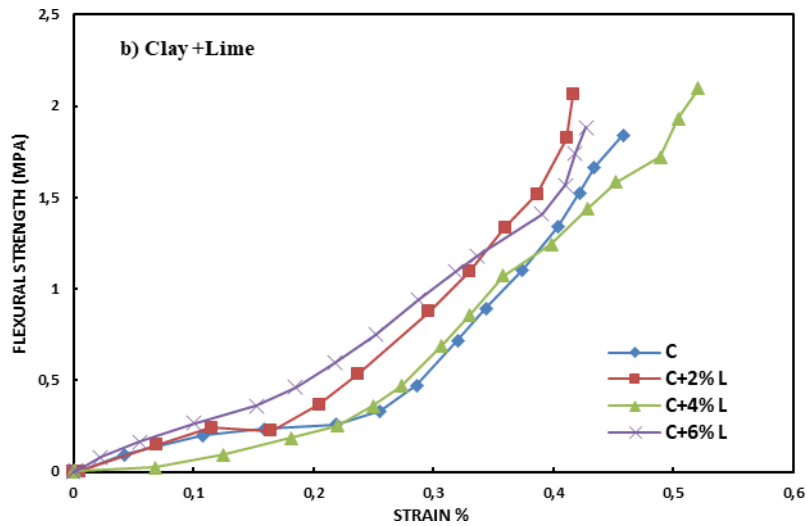


Figure 4.42 résultats de Flexion argile/chaux

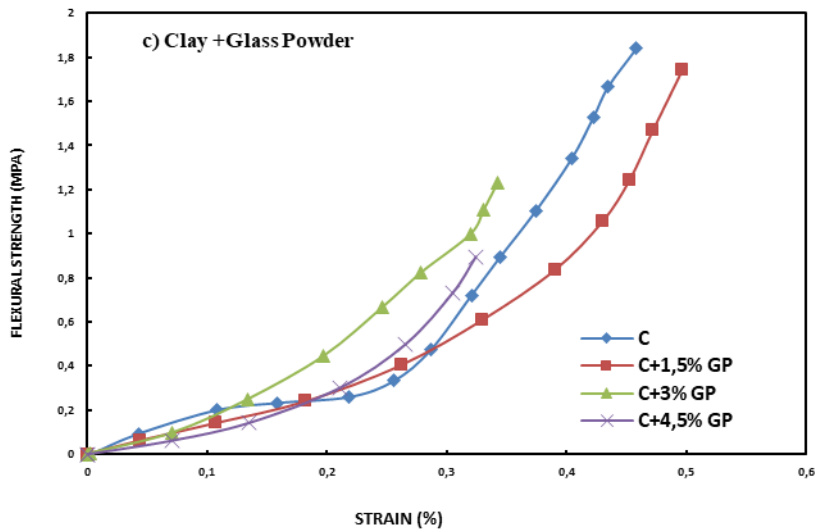


Figure 4.43 résultats de Flexion argile/poudre de verre

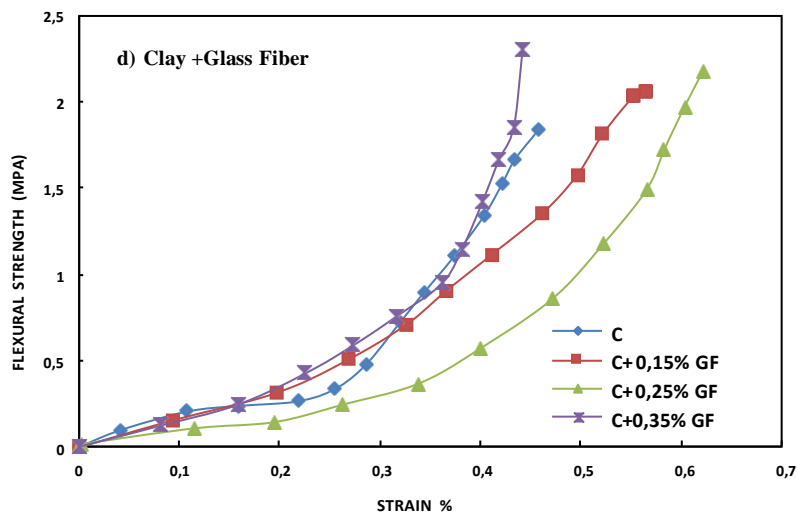


Figure 4.44. Résultats de Flexion argile/ciment

En examinant les graphiques 4.41, 4.42, 4.43 et 4.44 les spécimens contenant la poudre de verre montrent des résultats de résistance à la flexion plus faibles que l'argile non traitée (contrôle).

Une augmentation significative de la résistance à la flexion du mélange (argile-ciment) a été observée. Ainsi, une variation progressive de 2,11, 2,14 et 2,27 MPa a été marquée en faisant varier l'ajout de 2,4 et 6% de ciment.

L'ajout de 2 et 4% de chaux montre une augmentation significative de 2,06 et 2,09 MPa de la résistance à la flexion, en outre l'ajout de 6% de chaux diminue la valeur de la résistance à la flexion à 1,88 MPa (Figure 4.45).

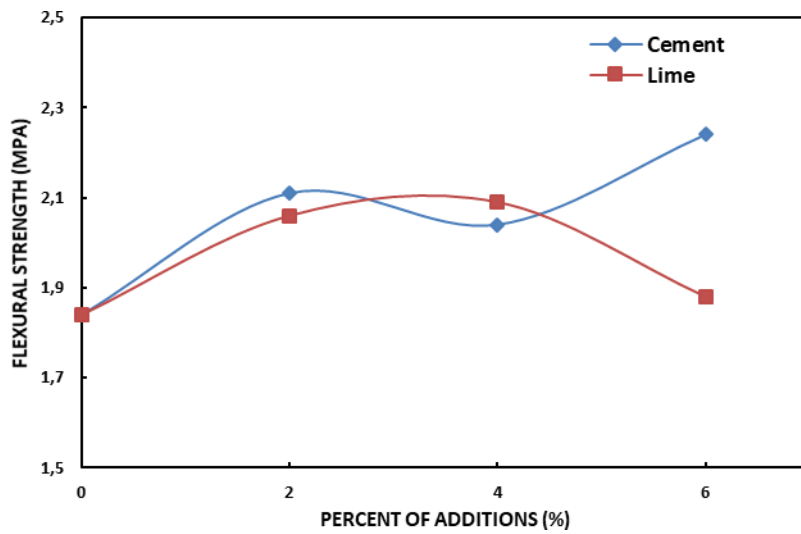


Figure 4.45. Différence de résultats de flexion argile/ ciment et argile/chaux

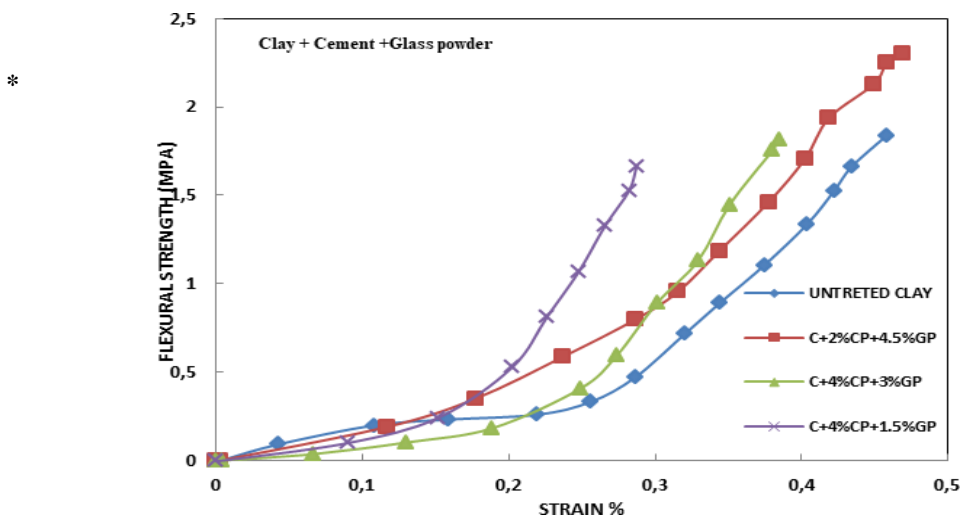


Figure 4.46. Résultats de Flexion argile/ciment/poudre de verre

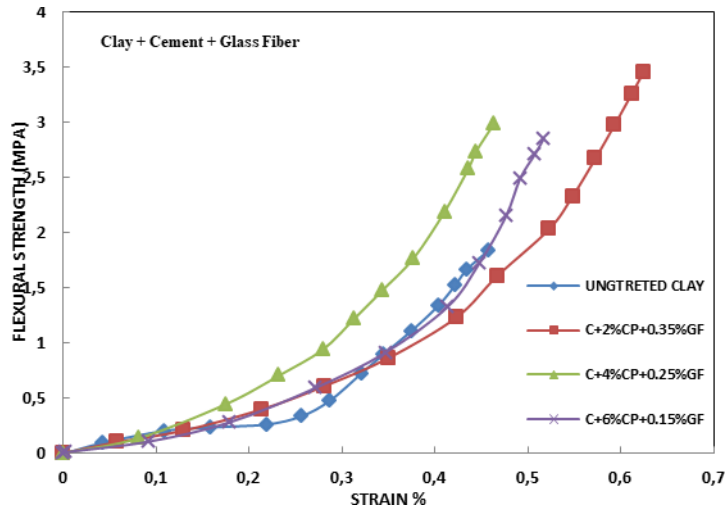


Figure 4.47. Résultats de Flexion argile/ciment/fibre de verre

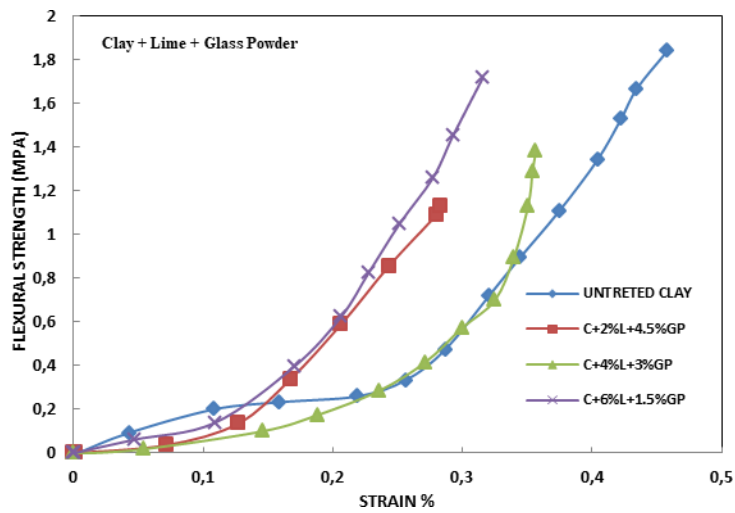


Figure 4.48. Résultats de Flexion argile/chaux/poudre de verre

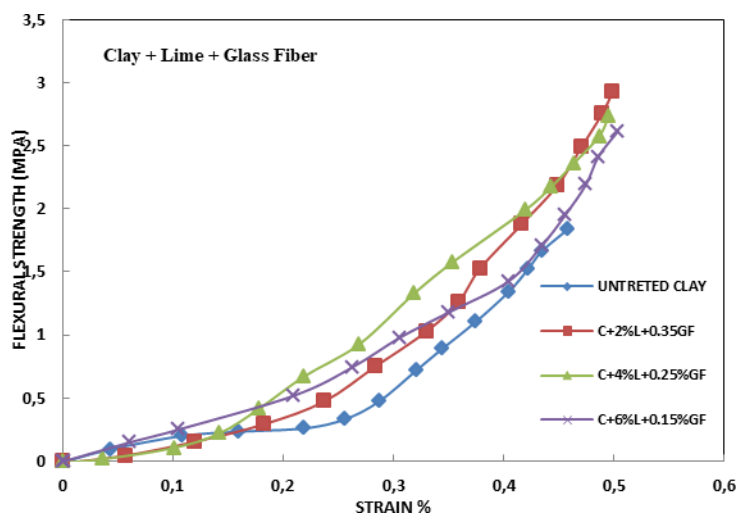


Figure 4.49. Résultats de Flexion argile/chaux/fibre de verre

L'expérimentation montre dans les (Figures 4.46 et 4.48) que l'ajout de poudre de verre diminue la résistance à la flexion par rapport aux mélanges (argile-ciment) et (argile-chaux).

L'influence de l'ajout de fibres de verre sur la résistance à la flexion a un effet bénéfique sur le mélange, comme on peut le voir sur les (Figures 4.47 et 4.49) qui résulte en une augmentation de 2.06, 2.18 et 2.31 MPa avec les pourcentages de 0.15, 0.25 et 0.35 % respectivement.

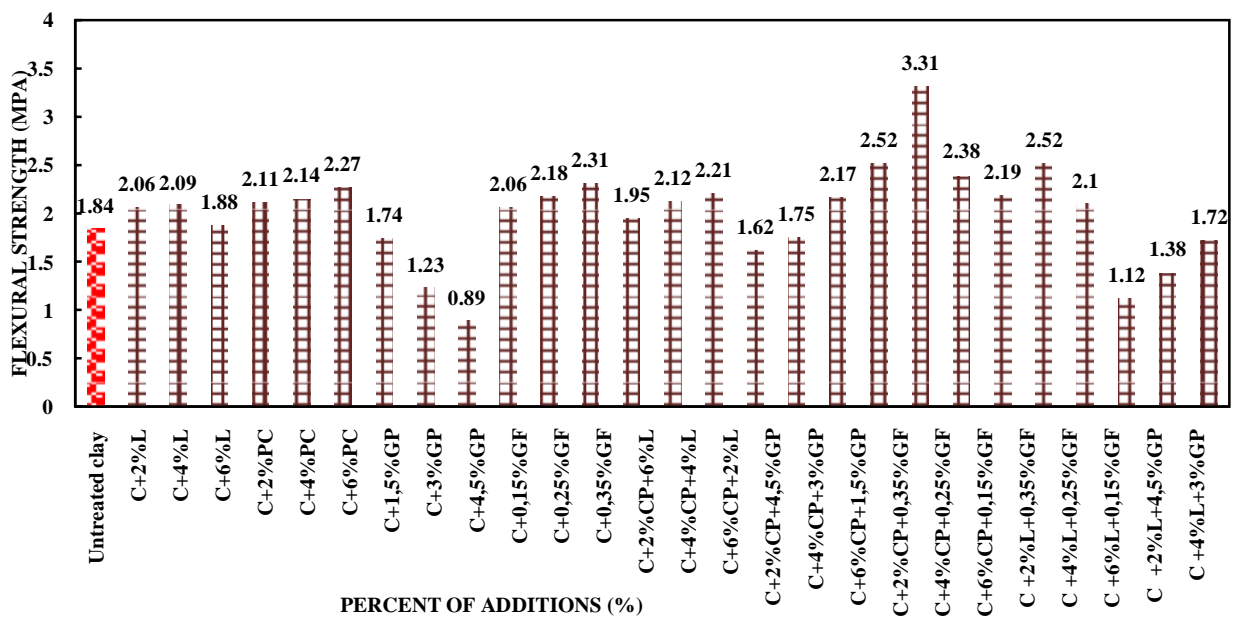


Figure 4.50. Résultats de flexion de différents mélanges

Le schéma révèle que l'ajout des différents ajouts dans notre échantillon de référence (argile de barrage) a amélioré la résistance à la flexion, à l'exception de l'ajout de poudre de verre dont les valeurs sont irrégulières.

Au cours des essais, tous les blocs non renforcés ont cédé soudainement, alors qu'aucun des blocs renforcés par des fibres ne l'a fait ; ceci est dû au comportement des fibres qui sont connues pour s'opposer et empêcher la formation de microfissures qui ont tendance à se propager.

En conséquence, les blocs renforcés de fibres de verre ont donné une meilleure résistance à la flexion que tous les autres mélanges, car les fibres commencent à prendre le dessus et la charge recommence à augmenter.

Afin d'obtenir une résistance significative de l'ordre de 112% (S10) à 180% (S20) par rapport au contrôle. Des tendances similaires de la résistance à la compression sont observées pour les mélanges traités avec 2, 4 et 6% de ciment et soumis à des essais de flexion.

Ces essais donnent des valeurs allant de 115% (S04) à 169% (S20).

La figure 4.50 révèle une augmentation progressive de la résistance à la flexion due à l'ajout de chaux avec des taux allant de 112% (S01) à 114% (S02) et de 119% (S22) à 137% (S23) à l'exception d'une étonnante diminution de l'ordre de 2% (S03) et de 14% (S24) par l'ajout de 6% de chaux.

5.8. Conclusion

La bonne préparation confection de la brique en terre compressée BTC permet d'avoir des briques parfaitement calibrées, de qualité relativement identique. Car les propriétés des sédiments dragués tel que la qualité et le taux d'humidité de l'argile, aussi leurs criblage, le malaxage (avec ou sans ajouts), le remplissage des moules, et son énergie de compactage ont un effet important sur le comportement mécanique.

Dans cette étude, différents essais en laboratoire ont été réalisés afin de déterminer le comportement mécanique des briques de terre comprimée (BTC) pour une éventuelle utilisation dans le domaine industriel.

A partir des résultats obtenus, les constatations et conclusions suivantes ont été faites :

Des tendances croissantes et similaires ont été trouvées dans les résistances à la compression et à la flexion de l'ordre de 35-150% et 112 - 180% respectivement en raison de l'ajout de 2, 4 et 6% de ciment.

L'ajout de chaux augmente la résistance à la compression de 15 à 105 %. A l'exception de la chaux à 6%, une diminution surprenante a été observée. D'autre part, une augmentation progressive de la résistance à la flexion de l'ordre de 112-137% par rapport au contrôle a été observée, à l'exception d'une diminution de l'ordre de 2-14% par l'ajout de 6% de chaux, un fait qui peut être éclairci par l'hydratation insuffisante des grains de poudre de chaux.

Un effet bénéfique de la poudre de verre est qu'elle augmente la résistance à la compression de 16-145% en raison des caractéristiques pouzzolaniques de cet ajout. Par conséquent, l'ajout de poudre de verre a un effet négatif sur la résistance à la flexion.

Le chevauchement des fibres de verre entraîne une mauvaise cohésion des grains, ce qui se traduit par des résistances à la compression similaires à celles du témoin. D'autre part, une résistance à la flexion considérable de 112-180% a été observée par rapport à tous les mélanges, en raison des caractéristiques de résistance à la traction de ce matériau.

**Conclusion générale
Et
Perspectives**

Conclusion générale

La sédimentation des réservoirs est devenue un enjeu majeur dans les réservoirs d'eau des barrages. L'accumulation importante des sédiments dans les barrages qui constitue un problème économique et environnemental risque d'impacter remarquablement leur capacité de stockage. Le dévasement par dragage qui s'impose comme une solution adéquate pour prolonger leur durée de vie des retenues de barrage doit s'inscrire dans le cadre d'une activité impérative d'entretien/maintenance pour une gestion durable de ces ouvrages.

Les objectifs de cette étude sont d'abord de caractériser sur les plans, physique, mécanique et environnementale les sédiments du barrage de Koudiat Medouar, d'utiliser ces sédiments pour la fabrication et la mise au point de produits de construction (briques), et de proposer une nouvelle alternative à la fois écologique et économique pour la gestion des sédiments de dragage du barrage Koudiat Medouar (Timgad, Algérie). Un état des connaissances sur le problème de dragage des sédiments, de leur réutilisation en tant que matériaux de construction est présenté. Le problème résulte de l'obligation de draguer de grands volumes de sédiments déposés dans les barrages. Cette étude devrait permettre d'évaluer la faisabilité de la valorisation des sédiments dragués et de dégager des voies de valorisation de ces **sédiments** comme **matériaux** de construction, notamment dans la fabrication des briques en terre compressée BTC.

La caractérisation physique montre que les sédiments dragués du barrage de Koudiet Medaouar sont majoritairement constitués de limon. Ces sédiments ont des caractéristiques presque confondues avec les caractéristiques de la Kaolinite. On note aussi que la présence de la matière organique dans ces sédiments est faible. Ainsi, les sédiments de dragage du barrage peuvent être incorporés dans la formulation d'un nouveau matériau avec ou sans traitement.

La caractérisation minéralogique a montré par spectrométrie de fluorescence X (XRF) effectuées sur les échantillons des sédiments du barrage de Koudiet Medaouar illustrent les principaux minéraux cristallins avec des lignes caractérisant le quartz (SiO_2), et les carbonates (CaCO_3) la calcite ainsi qu'une quantité d'alumine (Al_2O_3) sous forme de Kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Cinquante-six échantillons a été préparés avec des composants d'addition (ciment/chaux/fibre de verre/ poudre de verre) de différentes proportions, y compris un échantillon non traité (référence), afin d'estimer leurs résistances à la flexion et à la compression

Les mélanges présentent une augmentation considérable de la résistance à la compression par rapport à l'argile non traitée (référence), dont la résistance à la compression

Conclusion générale et perspectives

du mélange (argile-ciment) présente une augmentation considérable, avec des valeurs proportionnelles de 6,80, 7,46 et 8,39 MPa observées par l'ajout de 2,4 et 6% de ciment. Aussi l'addition de 2% de chaux montre une augmentation significative de 6.96 Mpa dans la résistance à la compression.

Donc l'addition de 4 et 6% donne des valeurs de 6.40 et 5.76 MPa qui montre une diminution de la résistance.

Les résultats expérimentaux révèlent que le mélange (argile - poudre de verre) donne une résistance à la compression plus élevée que l'argile non traitée avec des valeurs de 5,80, 6,18 et 7,09 MPa pour des ajouts de 1,5, 3 et 4,5 %.

Une tendance similaire est observée pour le mélange argile-fibres de verre, où les résultats sont presque identiques à ceux de l'argile non traité, dont les spécimens contenant la poudre de verre montrent que les résultats de la résistance à la flexion sont plus faibles que l'argile non traitée (référence).

Une augmentation significative de la résistance à la flexion du mélange (argile-ciment) a été observée. Ainsi, une variation progressive de 2,11, 2,14 et 2,27 MPa a été remarquée en faisant varier l'ajout de 2,4 et 6% de ciment. Aussi avec l'ajout de 2 et 4% de chaux on observe une augmentation significative de 2,06 et 2,09 MPa de la résistance à la flexion, en outre l'ajout de 6% de chaux diminue la valeur de la résistance à la flexion à 1,88 MPa .

L'expérimentation montre que l'ajout de poudre de verre diminue la résistance à la flexion par rapport aux mélanges (argile-ciment) et (argile-chaux).

L'influence de l'ajout de fibres de verre sur la résistance à la flexion a un effet bénéfique sur le mélange, assurant une augmentation de 2.06, 2.18 et 2.31 MPa, avec les pourcentages de 0.15, 0.25 et 0.35 % respectivement.

Donc La bonne préparation et la confection d'une brique en terre compressée BTC permet d'avoir des briques parfaitement calibrées, de qualité relativement identique. Car les propriétés des sédiments dragués tel que la qualité et le taux d'humidité de l'argile, aussi leurs criblage, le malaxage (avec ou sans ajouts), le remplissage des moules, et son énergie de compactage ont un effet important sur le comportement mécanique de notre brique .

Perspectives

Ce travail de recherche propose d'autres perspectives d'investigations pour mieux comprendre le comportement des sédiments par des essais expérimentaux au laboratoire. À cet effet, et pour poursuivre de futures recherches, nous recommandons les points suivants :

- Il serait pertinent de mener des essais complémentaires de durabilité des BTC à base de sédiments de dragage tels que la résistance aux cycles gel/dégel afin d'avoir une idée sur le comportement de ce matériau ;
- Il serait intéressant d'entreprendre une étude technico-économique ainsi qu'une analyse de cycle de vie des sédiments recyclés comme ajout dans les matrices cimentaire afin d'avoir un concept claire sur la contribution économique et environnemental de ce matériau ;
- L'étude de la modélisation thermodynamique des différents mélanges ciment-sédiments, chaux-sédiment, poudre de verre-sédiments pour une caractérisation profonde de ce matériau ;
- L'étude de l'influence de la finesse des sédiments sur la microstructure de la matrice ainsi que sur les indicateurs de durabilité est souhaitable ;
- Une étude de valorisation des sédiments de dragage comme ajout dans la fabrication des bétons autoplaçants
- Une étude d'un élément structural armé en comprenant les sédiments afin de quantifier leur comportement mécanique.
- Une étude de valorisation des sédiments de dragage dans la fabrication des céramiques et terre cuite.

Références bibliographiques

- [1] Remini, Boualem, Bensafia, D., et Mekhatri, A. (2018). Sidi M'hamed Ben Aouda's Dam (Algeria): Acceleration to the Silting!. *LARHYSS Journal* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (33), 221-252.
- [2] Remini, Boualem, Christian Leduc, and Wassila Hallouche. "Évolution Des Grands Barrages En Régions Arides : Quelques Exemples Algériens." *Sécheresse* 20, no. 1 (January 2009): 096–103. doi:10.1684/sec.2009.0172.
- [3] Remini, B. (2019). Algeria: The Mud at the Bottom of the Dams, What To Do? *LARHYSS Journal* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (40), 213-247.
- [4] Rakshith, Shetty, and D. N. Singh. "Utilization of Dredged Sediments: Contemporary Issues." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 143, no. 3 (May 2017): 04016025. doi:10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000376.
- [5] Loudini, Ahmed, Mounsi Ibnoussina, Omar Witam, Ali Limam, and Oksana Turchanina. "Valorisation of Dredged Marine Sediments for Use as Road Material." *Case Studies in Construction Materials* 13 (December 2020): e00455. doi:10.1016/j.cscm.2020.e00455.
- [6] Wang, Dong Xing, NorEdineAbriak, Rachid Zentar, and WeiYaXu. "Solidification/stabilization of Dredged Marine Sediments for Road Construction." *Environmental Technology* 33, no. 1 (January 2012): 95–101. doi:10.1080/09593330.2011.551840.
- [7] ANGER, Baptiste, Isabelle MOULIN, Emmanuel PERIN, François THERY, and Daniel LEVACHER. "Utilisation de Sédiments Fins de Barrage Dans La Fabrication de Mortiers." *XIIIèmes JNGCGC, Dunkerque* (2014). doi:10.5150/jngcgc.2014.105.
- [8] Federico, Antonio, Claudia Vitone, and AgneseMurianni. "On the Mechanical Behaviour of Dredged Submarine Clayey Sediments Stabilized with Lime or Cement." *Canadian Geotechnical Journal* 52, no. 12 (December 2015): 2030–2040. doi:10.1139/cgj-2015-0086.
- [9] Piattoni, Quintilio, Enrico Quagliarini, and Stefano Lenci. "Experimental Analysis and Modelling of the Mechanical Behaviour of Earthen Bricks." *Construction and Building Materials* 25, no. 4 (April 2011): 2067–2075. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.039.
- [10] Park, Jaesung, Younghwan Son, Sookack Noh, and Taeho Bong. "The Suitability Evaluation of Dredged Soil from Reservoirs as Embankment Material." *Journal of*

Références bibliographiques

Environmental Management 183 (December 2016): 443–452.
doi:10.1016/j.jenvman.2016.08.063.

[11] Wu, Y. K., Y. B. Li, and B. Niu. “Investigation of Mechanical Properties of Randomly Distributed Sisal Fibre Reinforced Soil.” *Materials Research Innovations* 18, no. sup2 (May 2014): S2–953–S2–959. doi:10.1179/1432891714z.000000000511.

[12] Quagliarini, Enrico, and Stefano Lenci. “The Influence of Natural Stabilizers and Natural Fibres on the Mechanical Properties of Ancient Roman Adobe Bricks.” *Journal of Cultural Heritage* 11, no. 3 (July 2010): 309–314. doi:10.1016/j.culher.2009.11.012.

[13] Maherzi, Walid, Mahfoud Benzerzour, Yannick Mamindy-Pajany, Eleanor van Veen, Mohamed Boutouil, and Nor Edine Abriak. “Beneficial Reuse of Brest-Harbor (France)-Dredged Sediment as Alternative Material in Road Building: Laboratory Investigations.” *Environmental Technology* 39, no. 5 (April 9, 2017): 566–580. doi:10.1080/09593330.2017.1308440.

[14] BOUTOUIL, Mohamed, and Lucile SAUSSAYE. “Influence de L’ajout D’un Correcteur Granulométrique Sur Les Propriétés Des Sédiments Traités Aux Liants Hydrauliques.” *Revue Paralia* 4 (2011): 8.1–8.11. doi:10.5150/revue-paralia.2011.008.

[15] Amar, M., Benzerzour, M., Abriak, N. E., et Maherzi, W. (2016). Étude de valorisation des sédiments de dragage. *Academic Journal of Civil Engineering*, 34(1), 882-889.

[16] Bouhamou, N., N. Belas, H. Mesbah, A. Mebrouki, and Y. Ammar. “Étude Du Comportement à L’état Frais Des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux.” *Canadian Journal of Civil Engineering* 35, no. 7 (July 2008): 653–662. doi:10.1139/107-134.

[17] SERBAH, B., Bourabah, M. A., Bouchemella, S., Abou-Bekr, N., & Taibi, S. (2017). Etude du comportement mécanique d'un sédiment de barrage en technique routière. *Academic Journal of Civil Engineering*, 35(1), 291-294.

[18] HAMOUCHE, F., et ZENTAR, R. (2017). Caractérisation des Matières Organiques dans les sédiments de dragage par méthodes thermiques et chimiques en vue d’une valorisation dans le domaine des travaux routiers. *Academic Journal of Civil Engineering*, 35 (1), 218-221.

[19] Couvidat, Julien, Mostafa Benzaazoua, Vincent Chatain, and Hassan Bouzahzah. “Environmental Evaluation of Dredged Sediment Submitted to a Solidification Stabilization

Références bibliographiques

Process Using Hydraulic Binders.” *Environmental Science and Pollution Research* 23, no. 17 (May 24, 2016): 17142–17157. doi:10.1007/s11356-016-6869-9.

[20] Loudini, Ahmed, Mounsif Ibnoussina, Omar Witam, Ali Limam, and Oksana Turchanina. “Valorisation of Dredged Marine Sediments for Use as Road Material.” *Case Studies in Construction Materials* 13 (December 2020): e00455. doi:10.1016/j.cscm.2020.e00455.

[21] Rekik, Boubaker, and Mohamed Boutouil. “Etude de La Compressibilité et de La Microstructure D’un Sédiment de Dragage Traité Au Liant Hydraulique.” IXèmes Journées, Brest (2006). doi:10.5150/jngcgc.2006.061-r.

[22] MAAROUF, H., Semcha, A., Mahmoudi, N., Bouhamou, N., Benzerzour, M., et Maherzi, W. (2018). Experimental study on the reuse of a dredging sludge from west of Algeria in brick fabrication. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 5(2), 163-172.

[23] Larouci, A., Y. Senhadji, L. Laoufi, and A. Benazzouk. “Valorisation of Natural Waste: Dam Sludge for Road Construction.” *Nature Environment and Pollution Technology* 19, no. 3 (September 1, 2020): 1075–1083. doi:10.46488/nept.2020.v19i03.018.

[24] El-Attar, Mohamed M., Dina M. Sadek, and Amir M. Salah. “Recycling of High Volumes of Cement Kiln Dust in Bricks Industry.” *Journal of Cleaner Production* 143 (February 2017): 506–515. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.082.

[25] Zhou, Chaoqun. “Production of Eco-Friendly Permeable Brick from Debris.” *Construction and Building Materials* 188 (November 2018): 850–859. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.049.

[26] Bernardi, D., J.T. DeJong, B.M. Montoya, and B.C. Martinez. “Bio-Bricks: Biologically Cemented Sandstone Bricks.” *Construction and Building Materials* 55 (March 2014): 462–469. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.019.

[27] Messina, F., C. Ferone, A. Molino, G. Roviello, F. Colangelo, B. Molino, and R. Cioffi. “Synergistic Recycling of Calcined Clayey Sediments and Water Potabilization Sludge as Geopolymer Precursors: Upscaling from Binders to Precast Paving Cement-Free Bricks.” *Construction and Building Materials* 133 (February 2017): 14–26. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.039.

Références bibliographiques

- [28] Tang, Chao-Wei. "Properties of Fired Bricks Incorporating TFT-LCD Waste Glass Powder with Reservoir Sediments." *Sustainability* 10, no. 7 (July 17, 2018): 2503. doi:10.3390/su10072503.
- [29] Safhi, Amine el Mahdi, Patrice Rivard, AmmarYahia, Mahfoud Benzerzour, and Kamal Henri Khayat. "Valorization of Dredged Sediments in Self-Consolidating Concrete: Fresh, Hardened, and Microstructural Properties." *Journal of Cleaner Production* 263 (August 2020): 121472. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121472.
- [30] Bounouara, Zohra, Souad Malab, BelkacemMekerta, AbdelatifBenaissa, and SouadAmalBourokba. "Treatment of Dredged Sediments of Bouhanifia Dam for Their Valorization in Passive Barrier of Landfill." *Geotechnical and Geological Engineering* 38, no. 4 (March 18, 2020): 3997–4011. doi:10.1007/s10706-020-01273-x.
- [31] HadjSadok, Rachid, Nadia Belas, MahfoudTahlaiti, and RidhaMazouzi. "Reusing Calcined Sediments from Chorfa II Dam as Partial Replacement of Cement for Sustainable Mortar Production." *Journal of Building Engineering* 40 (August 2021): 102273. doi:10.1016/j.job.2021.102273.
- [32] Slama, Abdelwaheb Ben, Nesma Feki, Daniel Levacher, and Moncef Zairi. "Valorization of Harbor Dredged Sediment Activated with Blast Furnace Slag in Road Layers." *International Journal of Sediment Research* 36, no. 1 (February 2021): 127–135. doi:10.1016/j.ijsrc.2020.08.001.
- [33] Morgan, R. P. C. & Ligdi, E. E., (1995). Contour grass strips: a laboratory simulation of their role in soil erosion control. *Soil Technology*, 8(2), 109-117.
- [34] Sundborg, A. (1983). Sedimentation problems in river basins. *Nature and Resources*.
- [35] Tejwani, K. G. (1984). Reservoir sedimentation in India—its causes, control, and future course of action. *Water International*, 9(4), 150-154.
- [36] Larson, C. L., & Albertin, W. (1984). Controlling erosion and sedimentation in the Panama Canal watershed. *Water international*, 9(4), 161-164.
- [37] Mathias BOUN HENG. La sédimentation dans les lacs de barrage à java, Indonésie processus, rythmes et impacts. Thèse, 22 mars 2013. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. Pp 301).

Références bibliographiques

- [38] Haan, C. T., Barfield, B. J., & Hayes, J. C. (1994). Design hydrology and sedimentology for small catchments. Elsevier.
- [39] Renard, K. G. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Government Printing.
- [40] Pacaud, J. M., & Le Renard, J. (1995). Révision des mollusques Paléogènes du Bassin de Paris. IV-Liste systématique actualisée. *Cossmanniana*, 3(4), 151-187.
- [41] Bruijnzeel, L. A., & Van Eijk, B. (1998). process modelling. In *Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes: Proceedings of an International Symposium Held at Vienna from 13 to 17 July 1998...* Organized by the International Commission on Continental Erosion of the International Association of Hydrological Sciences... (No. 249, p. 211). IAHS Press.
- [42] Young, R. A. (1987). AGNPS, Agricultural Non-Point-Source Pollution Model: a watershed analysis tool. Conservation research report (USA). no. 35.
- [43] (Beasley, D. B., & Huggins, L. F. (1981). ANSWERS, areal nonpoint source watershed environment response simulation: user's manual.
- [44] Brazier, R. E., Beven, K. J., Freer, J., & Rowan, J. S. (2000). Equifinality and uncertainty in physically based soil erosion models: application of the GLUE methodology to WEPP—the Water Erosion Prediction Project—for sites in the UK and USA. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 25(8), 825-845.
- [45] Bruijnzeel, L. A. (1983). Evaluation of runoff sources in a forested basin in a wet monsoonal environment: a combined hydrological and hydrochemical approach. *Hydrology of Humid Tropical Regions IAHS Publication*, (140).
- [46] Bons, C. A. (1990). Accelerated erosion due to clearcutting of plantation forest and subsequent Taungya cultivation in upland West Java, Indonesia. *Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ*, 192, 279-288.
- [47] van Noordwijk, M., Murdiyarso, D., Hairiah, K., Wasrin, U. R., Rachman, A., & Tomich, T. P. (1998). Forest soils under alternatives to slash-and-burn agriculture in Sumatra, Indonesia. In *Soils of tropical forest ecosystems* (pp. 175-185). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [48] Bruijnzeel, L. A., & Bremmer, C. N. (1989). Highland-lowland interactions in the Ganges Brahmaputra river basin: a review of published literature.

Références bibliographiques

- [49] Purwanto, E., & Donker, N. H. W. (1991). Semi-distributed hydrologic modelling of the humid tropical upper Cimabdiri catchment (west java) using HEC-1 model. *ITC journal*, (4), 241-253.
- [50] Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- [51] El-Swaify, S. A., Dangler, E. W., & Armstrong, C. L. (1982). Soil erosion by water in the tropics.
- [52] Harper, K. T., & Marble, J. R. (1988). A role for nonvascular plants in management of arid and semiarid rangelands. In *Vegetation science applications for rangeland analysis and management* (pp. 135-169). Springer, Dordrecht.
- [53] Murdiyarso, D. (2005). Water resource management policy responses to land cover change in South East Asia river basins. *Forest-Water-People in the Humid Tropics: An emerging view*. Cambridge University Press, Cambridge. pp, 121-133.
- [54] Beyer Portner, N. (1998). Erosion des bassins versants alpins suisses par ruissellement de surface (No. THESIS). EPFL.
- [55] BOUCHELKIA, H., BELARBI, F., & REMINI, B. (2011). QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION PAR ANALYSE STATISTIQUE: CAS DU BASSIN VERSANT DE MOUILLAH QUANTIFICATION OF SUSPENDED SEDIMENT YIELD BY STATISTICAL ANALYSIS: THE CASE OF MOUILLAH WATERSHED. *Le Journal de l'Eau et de l'Environnement*, 10(19), 29-41.
- [56] Mazumdar, S. K., Sinniger, R., & Essyad, K. (1994). Control of shock waves in supercritical expansion. *Irrigation and Power*, 51(4), 7-16.
- [57] Burr-Reynaud, F., d'Herbecourt, E., Lane, P., & Thompson, J. California Gold Mine.
- [58] UN, E. D. T. S. D. (2009). REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique Université ABOU BEKR BELKAID.
- [59] Bian, C., Jiang, W., & Song, D. (2010). Terrigenous transportation to the Okinawa Trough and the influence of typhoons on suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 30(10-11), 1189-1199.

Références bibliographiques

- [60] De Cesare, G. (1998). Alluvionnement des retenues par courants de turbidité. Lausanne EPFL. doi 10.5075/epfl-thesis-1820.
- [61] Tombrello, T. A., Jones, C. M., Phillips, G. C., & Weil, J. L. (1962). The scattering of protons from He3. *Nuclear Physics*, 39, 541-550.
- [62] Lier, R. V. (1941). Cultuur en strijd in Engeland in de negentiende eeuw. *Mens en Maatschappij*, 17(1), 24-55
- [63] COVER ON VERTICAL TRANSFER IN STREAM CHANNELS 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 14(6), 1429-1439
- [64] Celik, I., & Rodi, W. (1988). Modeling suspended sediment transport in nonequilibrium situations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1157-1191.
- [65] Van Rijn, L. C., & Nienhuis, L. E. A. (1985). In-situ determination of all velocity of suspended sediment. In *NATL. CONF. PUBL. INST. ENG. AUST.* 1985..
- [66] Sergent, P., & Zhang, B. (2002). Evolution du dépôt de clapage du Kannick. VII ièmes journées nationales Génie Civil Génie Côtier, Anglet, 195-204.
- [67] Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of hydraulic engineering*, 110(12), 1733-1754.
- [68] César, J., Bouyer, J., Granjon, L., & Akoudjin, M. (2009). Les dégradations autour de Bobo-Dioulasso et sur la falaise de Banfora.
- [69] Samara, M. (2007). Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille).
- [70] BEN CHAA, S. E., & MEBSOUT, L. (2017). Effet de l'ajout d'un correcteur granulométrique sur les Propriétés géotechniques de la vase du barrage de Charef à base de chaux (Doctoral dissertation).
- [71] Albatal, A., Wadman, H., Stark, N., Bilici, C., & McNinch, J. (2019). Investigation of spatial and short-term temporal nearshore sandy sediment strength using a portable free fall penetrometer. *Coastal Engineering*, 143, 21-37.
- [72] Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991). *Introduction à la géotechnique*. Presses inter Polytechnique.

Références bibliographiques

- [73] Daneels, A., & Guerrero, L. F. (2012). La construction en terre crue dans les tropiques humides: un cas archéologique exceptionnel au Vêracruz, Mexique.
- [74] McBride, R. A. (2002). 2.9 Atterberg Limits. *Methods of Soil Analysis: Part, 4*, 389-398.
- [75] AFNOR, NF P 94-056, "Soils: recognition and testing. Particle size analysis. Method by dry sieving after washing", Paris, France, 1996.
- [76] Norme Française NF P 94-057, Sols: Reconnaissance et Essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation. Homologuée mai 1992. Bull, liaison Labo. P. et Ch., 190, (1994).
- [77] Norme Française NF P 94-051, Sols: Reconnaissance et Essais - Détermination des limites d'Atterberg: limite de liquidité à la coupelle - limite de plasticité au rouleau. Homologuée février 1993. Edition Association Française de Normalisation (AFNOR). Tour Europe 92049, Paris La Défense Cedex7, (1993)
- [78] Norme Française NF P 94-052-1, Sols: Reconnaissance et Essais - Détermination des limites d'Atterberg : limite de liquidité – Méthode au cône de pénétration. Homologuée novembre 1995. Edition Association Française de Normalisation (AFNOR). Tour Europe 92049, Paris La Défense Cedex7, (1995).
- [79] AFNOR (1992). NF P 11-300, Exécution des terrassements — Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières
- [80] The standards as GTR guide (LCPC-SETRA 1992)
- [81] Boussaid, W., Baouahhab, K., & MEKERTA, B. (2015). Caractérisation physico-chimique des gisements des argiles à la région d'Adrar (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draïa-Adrar).
- [82] Lamara, M., Gueddouda, M. K., & Benabed, B. (2006). Stabilisation physico-chimique des sols gonflants (sable de dune+ sel). *Revue française de géotechnique*, (115), 25-35.
- [83] Khemakhem, S. (2005). Elaboration de membranes de microfiltration et d'ultrafiltration en céramique à base d'argile tunisienne (Doctoral dissertation, PhD thesis, Université de Sfax, Tunisia).
- [84] Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Righi, D., & Delvaux, B. (2005). Halloysite clay minerals—a review. *Clay minerals*, 40(4), 383-426.

Références bibliographiques

- [85] Costa, A. T., Nalini, H. A., de Lena, J. C., Friese, K., & Mages, M. (2003). Surface water quality and sediment geochemistry in the Gualaxo do Norte basin, eastern Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Environmental geology*, 45(2), 226-235.
- [86] Boutenel, F. (2020). Comportement d'une matrice alumine-silice au cours de l'élaboration de composites à matrice céramique oxyde/oxyde (Doctoral dissertation, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux).
- [87] NF P94-068, Sols : reconnaissance et essais – Mesure de la capacité d'adsorption au bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux – Détermination de la valeur au bleu d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache, Norme Française, AFNOR, 1998
- [88] Vadillo, J. M., & Laserna, J. J. (2004). Laser-induced plasma spectrometry: truly a surface analytical tool. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 59(2), 147-161.
- [89] Cremers, D. A., & Radziemski, L. J. (1983). Detection of chlorine and fluorine in air by laser-induced breakdown spectrometry. *Analytical Chemistry*, 55(8), 1252–1256. doi:10.1021/ac00259a017
- [90] NF ISO 10693. Détermination de la teneur en carbonates. Méthode volumétrique (Indice de classement : X31-105) (1995).
- [91] Migniot, C. (1989). Tassement et rhéologie des vases. Première partie. La houille blanche, (1), 11-29.
- [92] Lionard, E., Dabrin, A., Coquery, M., Ghestem, J. P., Botta, F., Larrose, A., & Masson, M. (2015). Essai collaboratif sur l'échantillonnage des sédiments de rivière: résultats et recommandations (Doctoral dissertation, irstea).
- [93] Abd Elouahab, D. D. B. (2013). Etude De Comportement Physique Et Mecanique Du Mortier Et Beton A Base Des Ciments Ternaires (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et Technologies).
- [94] Domede, N. (2006). Méthode de requalification des ponts en maçonnerie (Doctoral dissertation, INSA de Toulouse).
- [95] Taha, Y. (2017). Valorisation des rejets miniers dans la fabrication de briques cuites: Évaluations technique et environnementale (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).
- [96] Demir, I. (2009). Reuse of waste glass in building brick production. *Waste management & research*, 27(6), 572-577.