

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
والبحث العلمي وزارة التعليم العالي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MUSTAPHA Stambouli
Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي
معسكر

Faculté des sciences et technologies
Département de génie civil
Laboratoire des sciences et techniques de l'eau

THESE de DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil
Option : Matériaux et Durabilité

Contribution à la valorisation des sédiments de dragage- faisabilité et caractérisation des composites élaborés

Présentée par : M^r LAROUCI Abdelkader

Soutenu Le 04/11/2025 à 10h00

Devant le jury :

Président	RAHAL Nacer	Prof.	Université de Mascara
Examineur	LASLEDJ Abdelmadjid	Prof.	Ecole Nationale Polytechnique d'Oran
Examineur	SELLAF Hamid	Prof.	Université de Saida
Examineur	GAIDI Laouni	Prof.	Université de Mascara
Encadreur	SENHADJI Yassine	Prof.	Université de Mascara

Année Universitaire : 2024 -2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Entreprendre ce doctorat a été une expérience qui a véritablement changé ma vie et je n'aurais pas pu le faire sans le soutien et les conseils que j'ai reçus de nombreuses personnes.

Tout d'abord, je suis extrêmement reconnaissant à mon superviseur, le Prof. SENHADJI Yassine, pour ses précieux conseils, son soutien continu et sa patience durant mon étude de doctorat. Ses immenses connaissances et son abondante expérience m'ont encouragé à chaque instant de ma recherche universitaire et de ma vie quotidienne.

Je tenais à exprimer ma profonde gratitude à Laoufi Laid, avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler. Je le remercie pour les conseils scientifiques et techniques qu'il m'a apportés pour mener à bien ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à messieurs : Professeur. SENHADJI Yassine de et LASLEDJ Abdelmadjid de Ecole Nationale Polytechnique d'Oran et SELLAH Hamid de l'Université de Saida et Mr GAIDI Laouni de l'Université Mustapha Stambouli De Mascara d'avoir accepté de juger mon travail. Je tiens à exprimer avec fierté ma gratitude à Monsieur Rahal Nacer de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

J'aimerais exprimer ma sincère gratitude et de tout cœur à mon cher père et à ma chère défunte mère « رحمه الله عليها », pour m'avoir toujours encouragé à suivre mes rêves, pour leurs grand rôle dans ma vie et leurs nombreux sacrifices pour moi et pour mes frères. Je voudrais remercier vivement mon cher frère Mohammed qui m'a apporté un soutien moral pour la thèse.

Un grand merci à ma chère épouse et à mes enfants. Je n'oublie pas non plus ma sœur, Somaya pour avoir été de vraie sœur en cas de besoin.

Merci



Dédicace

الى من قال فيهما الله سبحانه و تعالى :

«وَاخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا»

[سورة الإسراء: 24]

الى والدي الكريم حفظه الله تعالى

الى والدتي رحمها الله تعالى رحمة الابرار واسكنها فسيح جنانه

الى زوجتي واولادي حفظهم الله

ملخص

تسلط هذه الدراسة الضوء على فوائد استخدام المواد الصديقة للبيئة الناتجة عن عملية التعرية الرملية. توفر هذه الموارد حماية معينة للسدود الجرائرية، التي تتأثر بشكل متكرر بالجفاف المتكرر وتقلبات الأمطار المرتبطة بالاحتباس الحراري، خلال جزء كبير من السنة. تشكل هذه التهديدات البيئية تأثيرات على جدوى وأداء السدود، مما يجعل التجريف ضروريًا على الرغم من الاستخراج الضخم للرواسب الذي قد يغير الخريطة البيئية. يقدم البحث المقترح حلاً جذاباً: إعادة استخدام الرواسب (الطمي) الناتجة عن التجريف من خلال دمجها في مواد الطرق.

تمت دراسة الطمي الناتج عن السدود في ولاية معسكر من عدة جوانب: كيميائية، فيزيائية ومعدنية. لأسباب تقنية، تم اختيار الطين من سد فرقوق كبديل للمادة المستخدمة تقليدياً في بناء الطرق في هذه المنطقة. هذا المادة، التي تُعرف باسم التوف لبناء الطرق، تم دمجها مع الطمي بنسب تتراوح بين 5% و 25%، مع زيادات تدريجية بنسبة 5%. أظهرت الاختبارات أن الخليط يتمتع بقدرة تحمل أقل من تلك الخاصة بالخليط العادي، على الرغم من كثافته العالية. بعد معالجة الجير، تم إعادة تقييم الخليط، مما أظهر تحسناً ملحوظاً في التحمل على الرغم من انخفاض الكثافة. تقدم هذه التقنية المتقدمة للمنتج النهائي مزايا رئيسية متعددة، بما في ذلك مقاومة أفضل وفائدة بيئية إيجابية. النتائج المعروضة مشجعة وتشير إلى استخدام فعال للأوعية المستمدة من مناطق السدود المماثلة، مما يوفر فوائد على الصعيدين الميكانيكي والاقتصادي.

الكلمات المفتاحية: الترسيب؛ الرواسب المجروفة؛ التثمين؛ الخصائص الفيزيائية والميكانيكية؛ التوف؛ المعالجة؛ إنشاء الطرق.

Résumé

Cette étude souligne les bénéfices de l'emploi de matériaux écoresponsables issus du processus d'ensablement. Ces ressources offrent une certaine protection aux barrages algériens, fréquemment affectés par des sécheresses répétées et des fluctuations de précipitations liées au réchauffement climatique, pendant une bonne partie de l'année. Cette menace écologique a des répercussions sur la viabilité et les performances des barrages, rendant indispensable le dragage malgré l'extraction massive de sédiments qui pourrait altérer la carte environnementale. La recherche proposée présente une solution attrayante : réutiliser les sédiments de dragage (vase) en les intégrant dans les matériaux routiers.

L'étude de la vase issue des barrages de la wilaya de Mascara a été menée selon plusieurs perspectives : chimique, physique et minéralogique. Pour des motifs techniques, la vase du barrage de Fergoug a été sélectionnée comme alternative au matériau traditionnellement employé pour l'édification des routes dans cette zone. Ce matériau, désigné comme tuf pour l'édification de routes, a été combiné avec la vase dans des proportions allant de 5 % à 25 %, avec des élévations par étapes de 5 %. Les essais ont démontré que le mélange présente une portance inférieure à celle d'un mélange standard, malgré sa densité élevée. Suite à un traitement à la chaux, le mélange a été réévalué, démontrant une amélioration notable de la portance malgré une faible densité. Cette avancée technologique offre un produit final divers atouts majeurs, dont une meilleure résistance et un bénéfice environnemental positif. Les résultats affichés sont encourageants et indiquent une utilisation efficace des vases issus de zones de barrages comparables, apportant des avantages sur les plans mécaniques et économiques.

Mots – Clés : *Envasement ; Sédiments de dragage ; Valorisation ; propriétés Physico-mécaniques ; Tuf ; Traitement ; Construction routière.*

Abstract

This study highlights the benefits of using eco-friendly materials derived from the sandblasting process. These resources offer some protection to Algerian dams, frequently affected by repeated droughts and fluctuations in precipitation linked to global warming, for a good part of the year. This ecological threat has repercussions on the viability and performance of the dams, making dredging indispensable despite the massive extraction of sediments that could alter the environmental map. The proposed research presents an attractive solution: reusing dredged sediments (vase) by integrating them into road materials.

The study of the vase from the dams in the Mascara province was conducted from several perspectives: chemical, physical, and mineralogical. For technical reasons, the sediment from the Fergoug dam was selected as an alternative to the material traditionally used for road construction in this area. This material, referred to as tuff for road construction, was combined with mud in proportions ranging from 5% to 25%, with stepwise increments of 5%. The tests demonstrated that the mixture exhibits lower load-bearing capacity than a standard mixture, despite its high density. Following a lime treatment, the mixture was re-evaluated, demonstrating a notable improvement in load-bearing capacity despite a low density. This technological advancement offers the final product several major advantages, including better resistance and a positive environmental benefit. The displayed results are encouraging and indicate an efficient use of sediments from comparable dam areas, providing mechanical and economic benefits.

Keywords: *Siltation; Dredged sediments; Valorisation; Physico-mechanical properties; Tuff; Treatment; Road construction.*

Table des Matières

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
ملخص.....	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
Table des matières.....	VI
Liste des Figures	XII
Liste des Tableaux	XVII
Introduction générale	1
Chapitre I : L'envasement des barrages	
1.1 Introduction	5
1-2 L'érosion sur les bassins versants	6
1-3 L'envasement.....	7
1-3.1 Le processus d'envasement.....	7
1-3-2 L'effet de l'envasement sur les projets de barrage.....	8
I-3-3 Origines et raisons d'envasement	10
1-3-4 La résolution du problème de l'envasement des barrages.....	10
1-3-4-1 Les différentes solutions de remédiation et de prévention	11
1-3-4-2 Solutions thérapeutiques et aides de désenvasement.....	12
1-4 Le dragage	13
1.4-1 Techniques de dragage (le curage)	14
1.4-2 Transport des sédiments de dragage.....	18
1-4-3 Dépôt et entreposage des sédiments dragués.....	19
1-5 Conclusion	19
Chapitre II : L'état des barrages en Algérie	
II-1 Introduction	21

II-2- L'évolution du nombre des barrages à l'échelle mondiale	21
II-3- L'envasement dans les barrages du monde.....	22
II-4- L'envasement des barrages au nord de l'Afrique	25
II-5- Situation des barrages en Algérie	26
II-5-1- Régions Ouest.....	27
II-5-2- Région Centre	29
II-5-3- Région Est.....	32
II-6- Progression temporelle des dépôts de vases dans les barrages en Algérie	34
II-7- Taux de comblement ou bien sédimentation d'un barrage	36
II-8- Critères de classement des barrages en fonction de leur envasement	38
II-8-1- Classement des barrages en fonction de leur niveau d'envasement	39
II-8-1-1- Barrages faiblement envasés	39
II-8-1-2- Barrages à envasement moyen	41
II-8-1-3- Barrages fortement envasés	43
II-8-1-4- Nouveaux barrages mis en exploitation.....	44
II-9- L'envasement des barrages de wilaya de Mascara	46
II-9-1- Etat des barrages à travers la Wilaya de Mascara (2022)	47
II-10- Conclusion	48

Chapitre III : Partie expérimental

III-1 Introduction.....	49
III-2 Préparation de l'échantillon	49
III-2-1 Zone d'échantillonnage.....	49
III-2-2 Observation :	50
III-3 Détermination les essais chimiques sur les vases	51
III-3-1 pH (Potentiel Hydrogène)	51
III-3-2 L'analyse chimique par spectrométrie à la fluorescence X « XRF »	52
III-3-2-1 Introduction.....	52
III-3-2-2 Principe	53
III-3-2-3 Rayons X et fluorescence	53
III-3-3 La composition minéralogique avec la diffraction aux rayons X « XRD »	54
III-3-3-1 Introduction.....	54
III-3-3-2 Principe	54
III-3-4 Teneur en eau (Test d'humidité)	55

III-3-4-1 Mode d'opérateur	55
III-3-4-2 Expression des résultats obtenus	55
III-3-5 La teneur en matière organique, M.O	57
III-3-6 La valeur au bleu de méthylène VBS	58
III-3-6-1 Principe de l'essai	58
III-3-6-2 Les étapes de déroulement d'essai	59
III-3-6-3 Exploitation des résultats	60
III-3-7 Essai de teneur en CaCO_3 , Calcimètre	61
III-3-7-1 But d'essai	61
III-3-7-2 Principe de l'essai	62
III-3-7-3 Appareillage	62
III-4 Les essais physiques sur les vases	62
III-4-1 Les courbes granulométriques des différents types de vases	62
III-4-1-1 Analyse granulométrique avec le tamisage	63
III-4-1-1-2 Définition de but d'essai	63
III-4-1-1-3 Principe	63
III-4-1-1-4 Caractéristiques de la courbe granulométrique	64
III-4-1-2 Analyse granulométrique avec la sédimentation	65
III-4-1-2-1 Définition de but de l'essai	65
III-4-1-2-2 Principe d'essai	65
III-4-1-2-3 Mode opératoire	65
III-4-1-2-4 Préparation du mélange eau distillée et défoulant	66
III-4-1-2-5 Préparation de prise d'essai	66
III-4-1-2-6 Imbibition de la prise d'essai	66
III-4-1-2-7 Exécution d'essai	67
III-4-2 Les limites d'Atterberg	67
III-4-2-1 Détermination la limite de plasticité	68
III-4-2-2 Détermination la limite de liquidité	69
III-4-2-3 Indice de plasticité	72
III-5 Les essais mécaniques	72
III-5-1 Essai Proctor normal et modifié	72
III-5-1-1 Domaine de l'application	72
III-5-1-2 Préparer les échantillons	73
III-5-1-3 Mode opératoire	73

III-5-1-3-1 La sélection du type de moule	73
III-5-1-3-2 Exécution d'essai	74
III-5-1-3-3 Expression des résultats	77
III-5-2 Indice CBR après immersion -Indice Portant Immédiat	77
III-5-2-1 Domaine d'application	77
III-5-2-2 Définitions	78
III-5-2-3 Principe de l'essai	78
III-5-2-4 Appareillage	79
III-5-2-4-1 Matériel d'exécution des éprouvettes	79
III-5-2-4-2 Matériel pour poinçonnement	79
III-5-2-4-3 Matériel pour l'immersion et la mesure du gonflement	80
III-5-2-5 Exécution d'essai	81
III-5-2-5-1 Confection des éprouvettes	81
III-5-2-5-2 Exécution du poinçonnement	81
III-5-2-6 Calcul des résultats	82
III-6 Conclusion	82

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV- Introduction.....	83
Phase I : Identification des vases de barrage de la Wilaya de Mascara.....	84
IV-1-2 Résultats des essais chimiques sur les quatre vases.....	84
IV-1-2-1 P ^H (Potentiel hydrogène)	84
IV-1-2-2 La composition chimique par « XRF »	85
IV-1-2-3 La composition minéralogique par (DRX)	87
IV-1-3 Résultats des essais physiques sur les quatre vases.....	89
IV-1-3-1 Teneur en eau (Test d'humidité)	89
IV-1-3-2 La teneur en matière organique (M.O.)	90
IV-1-3-3 Les courbes granulométriques des différents types de vases.....	92
IV-1-3-3-1 Classifications élémentaires.....	96
IV-1-3-3-2 Classification des vases selon l'abaque triangulaire de Taylor.....	97
IV-1-4 Résultats des essais géotechniques sur les quatre vases.....	99
IV-1-4-1 Limites d'Atterberg.....	99
IV-1-4-2 La valeur au bleu de méthylène (VBS)	100
IV-1-5 Classification des différents vases.....	102

IV-1-5-1 Classification LPC modifiée.....	102
IV-1-5-2 Classification GTR des sols destinés pour les routes (NF P 11-300, 1992)	103
IV-1-5-3 Classification selon la teneur en CaCO_3 par Calcimètre.....	105
IV-1-6 Récapitulation des résultats de la première phase	108
IV-1-7 Conclusion de la partie première.....	111
Phase II : Valorisation de la vase de Fergoug dans le domaine routier.....	112
IV-2-1 Introduction.....	112
IV-2-2 Résultats des essais chimiques.....	113
IV-2-2-1 valeur au bleu méthylène (VBS)	113
IV-2-3 Résultats des essais physiques.....	115
IV-2-3-1 Limites d'Atterberg	115
IV-2-4 Résultats des essais mécaniques.....	117
IV-2-4-1 Les essais de compactage (Proctor normal et Proctor modifié)	117
IV-2-4-1-1 Proctor Normal.....	118
IV-2-4-1-2 Proctor modifié.....	120
IV-2-4-2 Indice CBR après Immersion	123
IV-2-4-3 L'indice portant immédiat (IPI)	126
IV-2-5 Classification GTR des formulations.....	128
IV-2-6 Conclusion	131
Phase III : La stabilité par le traitement des sols.....	132
IV-3-1 Introduction de la partie du traitement.....	132
IV-3-2 Caractéristiques physiques des mélanges traitées.....	133
IV-3-2-1 Les résultats de l'essai de limite d'Atterberg	133
IV-3-2-1-1 Variation de la limite de liquidité.....	134
IV-3-2-1-2 Variation de la limite de plasticité.....	135
IV-3-2-1-3 Variation de l'indice de plasticité.....	136
IV-3-3 Caractéristiques Mécaniques des mélanges traitées.....	138
IV-3-3-1 Caractéristiques de compactage (Proctor modifié)	138
IV-3-3-2 Les essais de portance (CBR après immersion, IPI)	141
IV-3-3-2-1 CBR après immersion.....	141
IV-3-3-2-2 Indice Portant Immédiat IPI.....	142
IV-3-3-3 Résistance à la compression.....	143
IV-3-3-3 Résistance au cisaillement.....	144
IV-3-4 Analyse de la microstructure de la vase traitée.....	145

IV-3-5 Conclusion de la partie du traitement	147
IV- Conclusion	147
Conclusion générale et perspectives.....	149
Références Bibliographiques	152
Les Normes.....	159

Liste des Figures

Figure I.1 : Progression du delta d'éléments grossiers (Keller et Bouchard, 1986)	6
Figure I.2 : Le comportement des sédiments fins (Keller et Bouchard, 1986)	7
Figure I.3 : La formation des sédiments dans le barrage réservoir (Remini, 1990)	8
Figure I.4 : Dragues mécaniques (Geode, 2012a)	14
Figure I.5 : Dragues hydrauliques aspiratrices (Geode, 2012a)	15
Figure I.6 : La drague à agitation (Geode, 2012b)	16
Figure I.7 : Dragage par injection d'eau (Geode, 2012b)	16
Figure I.8 : Dragage par rotodévaseur (Geode, 2012b)	17
Figure I.9 : La drague à injection d'air (Geode, 2012b)	17
Figure I.10 : La drague à charrue Alligator et description d'une niveleuse (Geode, 2012b) ..	18
Figure II.1 : l'évolution du nombre de barrage dans le monde (<i>Anton J.Schleiss et Henri pougatsch, 2011</i>)	22
Figure II.2 : Une compilation des taux annuels de perte de stockage documentée pour les grands barrages dans différents pays, basée sur Basson (2008).	23
Figure II.3 : Estimations du volume total de sédiments séquestrés dans les grands réservoirs mondiaux durant la période qui s'étend de 1940 à 2050, d'après Basson (2008)	24
Figure II.4 : Nombre de barrages en Afrique du nord.....	25
Figure II.5 : Capacité de stockage des barrages au nord de l'Afrique.	25
Figure II.6 : Envasement en Afrique du nord.....	26
Figure II.7 : Situation actuel des barrages par région (ANBT, 2022)	27
Figure II. 8 : capacité initial (hm ³) les barrages dans la région Ouest (ANBT,2022)	28
Figure II-9 : capacité dernier levé (hm ³) des barrages dans la région Ouest (ANBT, 2022)...28	
Figure II.10 : la perte de capacité Million m ³ des barrages dans la région Ouest (ANBT, 2022).....	28
Figure II.11 : taux d'envasement (%) des barrages dans la région Ouest (ANBT, 2022).....	29
Figure II.12 : capacité initial (hm ³) les barrages dans la région Centre (ANBT, 2022).....	30
Figure II.13 : capacité dernier levé (hm ³) des barrages dans la région Centre (ANBT, 2022)...30	
Figure II.14 : la perte de capacité Million m ³ des barrages dans la région Centre (ANBT, 2022).....	31
Figure II.15 : taux d'envasement (%) des barrages dans la région Centre (ANBT, 2022)	31

Figure II.16 : capacité initial (hm^3) les barrages dans la région Est (ANBT, 2022)	32
Figure II.17 : capacité dernier levé (hm^3) des barrages dans la région Est (ANBT, 2022) ...	33
Figure II.18 : la perte de capacité En (Hm^3) des barrages dans la région Est (ANBT, 2022) ..	33
Figure II.19 : taux d'envasement (%) des barrages dans la région Est (ANBT, 2022)	34
Figure II.20 : Historique de volume d'eau conservée dans les barrages. (Remini, 2017)	35
Figure II.21 : Evolution de l'envasement des barrages en Algérie (Remini 2017)	35
Figure II.22 : Evolution dans le temps du taux d'envasement des barrages.....	36
Figure II.23 : Progression temporelle du taux de remplissage des barrages.....	37
Figure II.24 : Diminution progressive de la capacité des barrages au fil du temps.	37
Figure II.25 : Positionnement des barrages à faible envasement.....	40
Figure II.26 : Localisation des barrages Moyennement envasés.....	42
Figure II.27 : Localisation des barrages Fortement envasés.....	43
Figure II.28 : Localisation des nouveaux barrages	45
Figure II.29 : Position des barrages de la Wilaya du Mascara.....	46
Figure III.1 : Prélèvement des sédiments dans la retenue barrage de Fergoug(Mars, 2017)	49
Figure III.2 : Les sédiments prélevés dans la retenue barrage de Bouhanifia (Mars, 2017)	50
Figure III.3 : Photographie des sédiments et Tuf (TSC)	51
Figure III.4 : Mesure de pH- mètre des vases selon la norme ISO 10390.	52
Figure III.5 : Appareil XRF (BRUKER) au niveau de Lafarge-Holcim unité Oggaz Mascara.....	53
Figure III.6 : Appareil DRX (BRUKER) au niveau de Lafarge-Holcim unité Oggaz Mascara.....	55
Figure III.7 : Pesée des échantillons après étuvage.....	56
Figure III.8 : Le four nécessaire pour la détermination de la matière organique.....	57
Figure III.9 : L'échantillon dans le four et d'un dessiccateur.....	57
Figure III.10 : L'essai de VBS.....	59
Figure III.11 : Vérifications effectuées lors de l'essai de tache.....	61
Figure III.12 : Calcimètre.....	62
Figure III.13 : Tamisage de la vase.....	64
Figure III.14 : L'analyse granulométrique par sédimentométrie	66
Figure III.15 : Agitateur mécanique.	67
Figure III.16 : L'état du sol en fonction de la quantité d'eau.	68
Figure III.17 : Procédure d'exécution de la limite de plasticité (W_P)	69
Figure III.18 : Des photos de préparation de la pâte	70

Figure III.19 : Limite de liquidité selon le nombre de coups effectués.	72
Figure III.20 : Les conditions pour le choix de type de moule.....	73
Figure III.21 : Modalités de réalisation des essais Proctor normal et modifié.....	74
Figure III.22 : Exécution de l'essai Portor	74
Figure III.23 : Illustration de la distribution des coups de dame sur une couche.	75
Figure III.24 : Le remplissage des échantillons représentatifs afin de déterminer de la teneur en eau.....	76
Figure III.25 : l'exécution de l'essai indice CBR après immersion (l'immersion)	80
Figure III.26 : Matériel d'essai du CBR	82
Figure IV.1 : Potentiel hydrogène des solutions de vases de barrages.....	85
Figure IV.2 : Composition chimique de la vase de Bouhanifia.....	86
Figure IV.3 : Composition chimique de la vase de Chorfa.....	86
Figure IV.4 : Composition chimique de la vase de Fergoug.....	86
Figure IV.5 : Composition chimique de la vase d'Ouizert.....	86
Figure IV.6 : Spectres DRX des quatre vases des barrages étudiées.....	88
Figure IV.7 : Spectre DRX du Tuf de Sidi Ali Cherif.	88
Figure IV.8 : Teneur en eau contenue dans les matériaux étudiés.....	89
Figure IV.9 : Teneur en matière organique présente dans les vases des barrages.	91
Figure IV.10 : Courbe granulométrique de la vase de Bouhanifia.....	93
Figure IV.11 : Courbe granulométrique de la vase de Chorfa.....	94
Figure IV.12 : Courbe granulométrique de la vase de Fergoug.....	94
Figure IV.13 : Courbe granulométrique de la vase d'Ouizert.....	95
Figure IV.14 (a) : Courbe granulométrique de la vase de TSC.....	95
Figure IV-14 (b) : Courbe granulométrique des vases étudié et TSC.....	96
Figure IV.15 : Classement trigonal des sols fins (avec moins de 30% d'éléments de plus de 2 mm de diamètre).	98
Figure IV.16 : Indice de plasticité "IP" des vases de barrages.....	100
Figure IV.17 : Valeurs de bleu de méthylène "VBS" des vases de barrages étudiés.....	101
Figure IV.18 : Classification des vases selon le diagramme de Casagrande.....	102
Figure IV.19 : Classification des sols ayant un Dmax inférieur à 50 mm en fonction du GTR (SETRA-LCPC, 1992).	104
Figure IV.20 : Le taux du carbonate de calcium des vases de barrages.....	106
Figure IV.21 : Organigramme des travaux de la première partie.	108
Figure IV.22 : localisation des quatre barrages (Chorfa, Ouizert, Bouhanifia et Fergoug)...	110

Figure IV.23 : L'organigramme des travaux réalisés dans la deuxième partie.....	113
Figure IV.24 : Valeur au bleu de méthylène des mélanges TSC-Vase.....	114
Figure IV.25 : Limites Atterberg des mélanges TSC-VBF avec 0, 5, 10, 15, 20 et 25% de VBF.	116
Figure IV.26 : L'ensemble des courbes de compactage Proctor normal (OPN)	118
Figure IV.27 : Variation de la teneur en eau de l'optimum en fonction de la teneur en vase (OPN)	119
Figure IV.28 : Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en vase (OPN).....	120
Figure IV.29 : L'ensemble des courbes de compactage Proctor modifié (OPM).....	121
Figure IV.30 : La teneur en eau de l'optimum en fonction de la teneur en vase (OPM).....	121
Figure IV.31 : La densité sèche en fonction de la teneur en vase (OPM)	122
Figure IV.32 (a) : évolution de l'indice CBR après Immersion (OPN) en fonction du % vase.....	123
Figure IV.32 (b) : Effort pénétration CBR après Immersion (OPN).	124
Figure IV.33 (a) : évolution de l'indice CBR après Immersion (OPM) en fonction de la teneur en vase.	125
Figure IV.33(b) : effort pénétration CBR après Immersion (OPM)	125
Figure IV.34 : Les courbes Efforts-Pénétration IPI (OPN).	126
Figure IV.35 : Evolution de l'IPI (OPN) en fonction de la teneur en vase.	126
Figure IV.36 : Les courbes Efforts-Pénétration IPI (OPM).	127
Figure IV.37 : Effort pénétration IPI (OPM).	128
Figure IV.38 : Classification des sols avec un D_{max} inférieur à 50 mm (SETRA-LCPC, 1992).....	129
Figure IV.39 : Organigramme des travaux de la troisième partie.....	133
Figure IV.40 : Valeurs W_L des mélanges TSC+ Vase en fonction de % de la chaux.....	134
Figure IV.41 : Valeurs W_P des mélanges TSC+ Vase en fonction de % de la chaux.....	136
Figure IV.42 : Valeurs I_P des mélanges TSC+ Vase en fonction de % de la chaux.....	137
Figure IV.43 : Evolution de la densité sèche maximale de (Tuf+10% vase) +2, 4, 6 et 8% de la chaux en fonction de la teneur en eaux.	139
Figure IV.44: Evolution de la densité sèche maximale de (Tuf+20% vase) +2, 4, 6 et 8% de la chaux en fonction de la teneur en eaux.	140
Figure IV.45 : Evolution de la densité sèche maximale de (Tuf+10% vase) +2, 4, 6 et 8% de la chaux en fonction de la teneur en eaux.	140

Figure IV.46 : Evolution de l'indice CBR après immersion en fonction de la teneur en vase (avant traitement).	141
Figure IV.47 : Évolution de l'indice portant immédiat en fonction de la teneur en vase (avant traitement).....	142
Figure IV.48 : l'évolution de la résistance à la compression à 28 j des mélanges étudiées.....	143
Figure IV.49 : les paramètres de l'essai de cisaillement à la boîte Casagrande à 28 j des mélanges étudiées avec 2% de chaux.....	145
Figure IV.50 : Observation MEB d'échantillons.....	146

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Les chiffres correspondant au taux de remplissage annuel pour chaque type...	39
Tableau II.2 : La catégorisation d'un barrage en fonction de son envasement.	39
Tableau II.3 : Barrages faiblement envasés.....	40
Tableau II.4 : Barrages moyennement envasés.....	42
Tableau II.5 : Barrages fortement envasés.....	44
Tableau II.6 : les nouveaux barrages	45
Tableau II.7 : Situation des barrages en la Wilaya du Mascara.....	47
Tableau III.1 : Cinématique et commentaires lors d'un essai au bleu de méthylène.....	60
Tableau IV.1 : Les règles d'interprétation du niveau d'acidité-basique des sols (Arfang, 2019).....	84
Tableau IV.2 : Résultats de l'analyse chimique des vases brute étudiées (les oxydes sont exprimés en pourcentage de leur masse)	87
Tableau IV.3 : Diffraction des rayons X, Analyse DRX.....	89
Tableau IV.4 : Classification géotechnique des vases brutes selon M.O.	90
Tableau IV.5 : Teneur en M.O. des vases de dragage de quelques barrages, ports et fleuve.....	91
Tableau IV.6 : Distribution granulométrique des vases brutes.	93
Tableau IV.7 : Classification des vases brutes selon Cc et Cu.	97
Tableau IV.8 : Classification des vases brutes selon l'abaque de Taylor (Owens Et Rutledge, 2005).	98
Tableau IV.9 : données des limites d'Atterberg obtenues pour l'ensemble des vases.	99
Tableau IV.10 : Classification des vases selon le diagramme de Casagrande.....	103
Tableau IV.11 : Classes principales du GTR (1992).....	104
Tableau IV.12 : Classification géotechnique des sols en fonction du taux de CaCO_3	105
Tableau IV.13 : Classification géotechnique des vases en fonction du taux de CaCO_3 (selon Loz et Mathieu, 1990)	107
Tableau IV.14 : Comparaison entre la quantité du CaCO_3 obtenue par le calcimètre et par DRX.....	107
Tableau IV.15 : Récapitulation des résultats de la première partie.....	109
Tableau IV.16 : Valeur de l'essai VBS.....	114
Tableau IV.17 : Classement des mélanges TSC-Vases selon Burmister (1967)	117
Tableau IV.18 : Récapitulatif des essais pour la classification.....	128

Tableau IV.19 : Classes de portance des sols étudiée.	130
Tableau IV.20 : le rapport d'indice CBR Imb sur l'Indice Portant Immédiat (IPI).	130
Tableau IV.21 : Les caractéristiques physico-chimique de la chaux en (%) massique.....	133
Tableau IV.22 : Ensemble des résultats des limites de liquidité de TSC+% VBF avec différents pourcentages de chaux.....	134
Tableau IV.23 : Ensemble des résultats des limites de plasticité de TSC+% VBF avec différents pourcentages de chaux.....	135
Tableau IV.24 : Ensemble des résultats des indices de plasticité de TSC+% VBF avec différents pourcentages de chaux.....	136

Introduction générale

Dans le domaine de la technique routière, afin de créer des routes faibles à moyen trafic, on cherche de plus en plus à utiliser des matériaux locaux (granulats fins, matériaux recyclés, sous-produits industriels, argile ou sable de dragage, etc.) afin de réduire les coûts de transport et de construction et d'économiser les ressources en granulats. Ces matériaux locaux présentent généralement une ou plusieurs propriétés non conformes aux spécifications des matériaux routiers. L'utilisation de ces nouveaux matériaux « hors spécifications » nécessite donc des études en laboratoire et sur site, pour vérifier qu'ils présentent un comportement satisfaisant pour l'application envisagée et qu'ils peuvent être utilisés avec certaines restrictions.

Les volumes des sédiments dragués sont importants chaque année et sont estimés à environ 600 millions de m³ dans le monde (Boutin R, 1999), ce qui pose un problème lié à la gestion de ces sédiments qui sont considérés comme des déchets et peuvent avoir parfois un impact environnemental important. Ces grandes quantités de matériaux peuvent représenter une source de matières premières très intéressante, notamment pour un secteur consommateur de granulats comme le génie civil.

En Algérie, les déchets sont souvent stockés dans des conditions qui ne répondent pas aux normes. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place une gestion écologiquement rationnelle des déchets, notamment la prévention et la réduction de leur production. Les méthodes actuelles de traitement de ces dépôts dragués tendent à ne gérer que le caractère opérationnel des installations sans se soucier du devenir réel de ces limons et vases dragués. A l'heure actuelle, deux solutions sont adoptées : le rejet en mer et l'élimination des déchets à terre. Pendant longtemps, les considérations techniques et économiques ont prévalu dans les prises de décision. Aujourd'hui, on prend d'avantage conscience du contenu humain des substances présentes dans un grand nombre de ces matériaux, et de leurs propriétés.

Dans son évaluation de janvier 2011, l'Agence nationale des barrages et des transferts (ANBT) a exposé l'étendue des dangers prévisibles à très brève échéance si aucune action n'est entreprise. La construction de nouvelles réserves n'est pas l'unique option à considérer, il est également nécessaire de conserver les capacités initiales avec les mêmes ouvrages. De

notre côté, notre attention se porte particulièrement sur la valorisation des vases issus des barrages situés dans la wilaya de Mascara.

De telles quantités de matériaux peuvent donc représenter une source de matières premières intéressante, notamment pour un secteur très consommateur comme le génie civil. Dans les divers domaines du génie civil, le domaine routier se distingue par son besoin accru en matières premières, du fait de sa consommation importante de matériaux aux propriétés mécaniques variées. Par conséquent, l'étude proposée offre une nouvelle source d'approvisionnement en matériaux pour les travaux routiers, en utilisant les sédiments fins provenant du dragage des barrages. Il est donc essentiel d'approfondir la compréhension des dépôts examinés, en tenant compte de leurs caractéristiques intrinsèques et de leur comportement, pour optimiser leur utilisation en tant que matériau de couche dans la construction routière.

La recherche présentée suggère l'utilisation de sédiments (vases) issus du barrage comme matériau dans les domaines routiers. Le matériau évalué provient d'une source fluviale. Il renferme une prédominance de particules fines dont la taille est inférieure à 80 micromètres et présente une faible proportion de matière organique. Cela se manifeste par une résistance mécanique réduite, une forte compressibilité et une grande sensibilité à l'eau. Ces caractéristiques ne sont pas conformes aux exigences mécaniques pour les matériaux de chaussée. Il est donc indispensable d'améliorer ses performances mécaniques. Nous l'avons donc inclus, partiellement, dans le matériau essentiel pour la réalisation des routes dans la wilaya de Mascara (le tuf de la carrière de Sidi Ali Cherif), dans le but de diminuer l'énorme consommation de ce matériau d'une part, et d'exploiter la vase des barrages d'autre part. Cette recherche vise à élaborer une stratégie intégrale pour optimiser la gestion de la vase issue des barrages, ce qui est essentiel pour garantir un bon recouvrement des matériaux concernés dans le domaine routier. Il est dès lors indispensable d'accroître leur longévité et leurs caractéristiques mécaniques. Ce travail a été réalisé aux laboratoires L.N.H.C, unité de Sidi Bel Abbès, L.T.P.O, Oran et Génie-Civil à l'université Mustapha Stambouli de Mascara.

Ce travail est divisé en quatre chapitres :

- Nous avons d'abord commencé par une introduction générale consacrée à la description de la problématique et des objectifs de l'étude.

- Le premier chapitre a été consacré au problème des sédiments dans les barrages, en commençant par ses causes et la source des sédiments, en plus des solutions après la découverte de la sédimentation et d'autres solutions proactives pour empêcher la sédimentation. Nous avons également abordé les types de dragage, qui est considérée comme la solution la plus efficace actuellement après avoir découvert le problème de la vase.
- Le deuxième chapitre a traité de la complexité et du problème de l'accumulation de vase dans les barrages au niveau mondial en général, ainsi qu'en Afrique du Nord et à l'échelle de l'Algérie en particulier, jusqu'à la wilaya de Mascara, qui contient cinq barrages qui souffrent du problème d'envasement, à l'exception du barrage d'Oued El Taht qui est nouvellement réalisé, sur la base d'articles publiés dans la littérature scientifique et technique les agences et organismes agréés.
- Le troisième chapitre consiste à présenter le prélèvement des échantillons dans les barrages, les méthodes de conservation et de préparation pour les tests en utilisant des techniques expérimentales selon les normes en vigueur, où les tests d'induction à effectuer sur les échantillons ont été présentés à travers une étude d'induction géotechnique. Cela fournira des éléments permettant d'identifier ces matériaux et de les classer selon certaines propriétés et propriétés basées sur la documentation technique.
- Dans le quatrième chapitre, consacré aux résultats et discussion des essais expérimentaux, il se compose de trois sections :
 - Premièrement : Les tests d'identification des échantillons comprennent des tests physiques et chimiques et leur classification selon des documents techniques ;
 - Deuxièmement : Détail des traitements proposés pour valoriser ces vases dans les techniques routières, plus précisément dans la couche de fondation selon les recommandations Technique GTR (LCPC-SETRA, 2000). Il existe des formulations pour les mélanges de vase avec matériaux routier. L'objectif est de pouvoir proposer un matériau de transformation économiquement compétitif et facile à mettre en œuvre sur site ;
 - Troisièmement : des traitements proposés avec ajout de matériaux liants tels que la chaux afin d'obtenir un matériau cohésif à grande capacité portante ayant la capacité de résister aux routes à trafic moyen.

Une conclusion générale et perspective résume les résultats majeurs obtenus dans le cadre de cette recherche.

Chapitre I : L'envasement des barrages

I.1 Introduction

Le problème des ouvrages hydrauliques a été aggravé par les teneurs importants de sédimentations dans plusieurs barrages et les inquiétudes concernant leur durabilité à long terme. Il est donc primordial d'évaluer l'effet réel de la sédimentation dans les réservoirs, ainsi que la faisabilité économique des différentes solutions pour réduire ce problème. Parmi les inquiétudes majeures, on trouve une réduction de volume de stockage du réservoir, l'état des turbines endommagées et l'impact considérable sur le lit de la rivière en aval. Quoiqu'il en soit, il y a plusieurs raisons pour lesquelles on accorde de l'importance à la sédimentation :

- Les problèmes peuvent être minimisés en raison des coûts élevés et de l'expérience acquise dans divers États et Pays.
- Dans de nombreuses zones où de futurs barrages seront construits, il y a un risque élevé de sédimentation.
- Au-delà de l'optimisation économique, l'évaluation de l'acceptabilité des futurs projets de barrage dépend fortement de la durabilité à long terme.

Les estimations erronées des dimensions et le volume des sédiments sont responsables de la majeure partie des dégâts ou des pertes de capacité de stockage des anciens réservoirs. Il aurait été envisageable d'éviter cela en développant des projets et des activités adaptés à chaque situation.

Aucune solution standard n'est disponible, et il est nécessaire d'étudier différentes approches, en prenant en considération l'incertitude associée à l'estimation du potentiel de sédimentation. Il est important d'analyser les facteurs techniques, environnementaux et économiques avant de commencer à gérer les sédiments de l'étape initiale d'un projet de dragage jusqu'à la gestion finale. À partir de début du processus de dragage, il est crucial de déterminer la composition physico-chimique des sédiments, en tenant compte selon leur niveau de polluants, de possibilité de choix de la méthode d'extraction et des besoins au cours du traitement ou du prétraitement des sédiments.

La gestion de ces dépôts doit être conforme à l'environnement et à la réglementation en vigueur. La compréhension des effets de l'agglomération de sédiments sur les équipements hydrauliques est essentielle. Par la suite, on trouve des techniques de gestion des sédiments pour évaluer de manière précise les bénéfices et les exigences en matière de restauration des sédiments.

I.2 L'érosion sur les bassins versants

L'érosion des sols est principalement causée par les conditions météorologiques comme le vent, la pluie et le gel, où les eaux de surface transportent les matières solides vers les zones aquatiques. Les retenues du barrage créent un environnement favorable au stockage des matériaux altérés. L'érosion entraîne des phénomènes d'envasement qui altèrent la capacité de stockage des barrages en raison de la sédimentation dans les réservoirs.

Il y a généralement des taux d'érosion importants, et la quantité de sédiments déplacés est énorme et diffère grandement en fonction de la forme du bassin, de l'inclinaison des côtés, de la condition de la végétation, etc. On peut déterminer l'étendue et l'impact de cette tendance en fonction de l'évolution annuelle du taux d'érosion (ex : T/Km²/an). Il est possible que ce paramètre se situe entre quelques dizaines et plusieurs milliers (Berthier et al, 1970).

Habituellement, la taille des matériaux en stockage dans les réservoirs diminue de l'amont vers l'aval (Parzonka, 1984). Dès qu'ils auront atteint la retenue, ces sédiments seront déposés de façon différente (Keller et Bouchard, 1986).

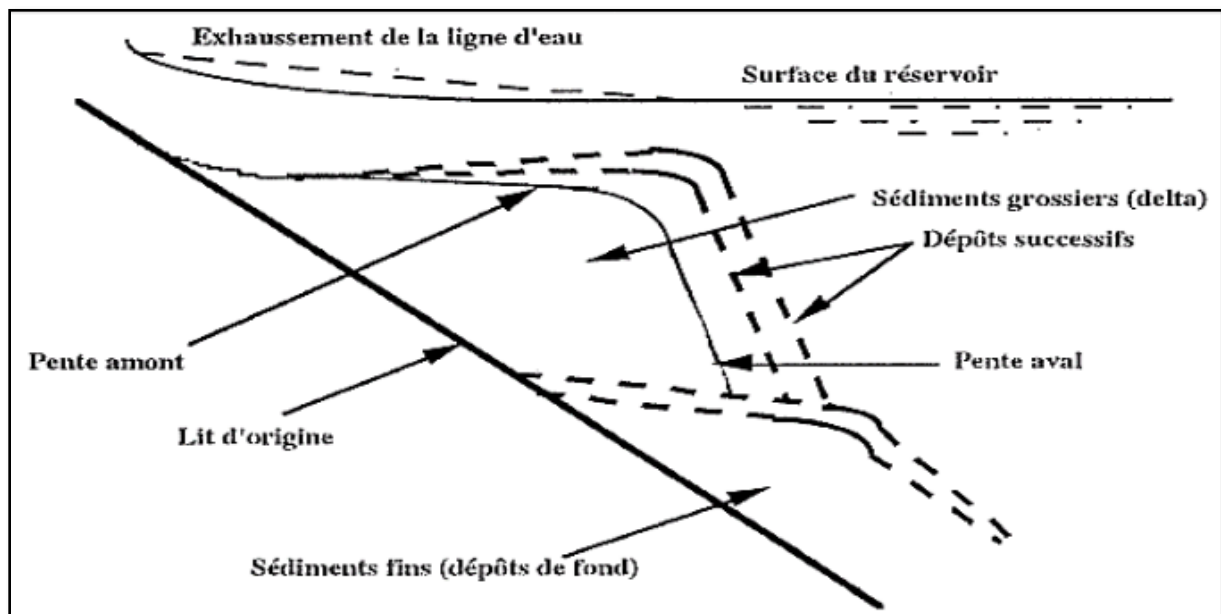


Figure I-1 : Progression du delta d'éléments grossiers (Keller et Bouchard, 1986)

Un delta est formé par les composants massifs transportés par la charge (générée par le vent ou l'eau) qui s'étendent au voisinage de l'entrée de la retenue. Cela correspond aux matériaux les plus grands (Figure I-1). Entre 10 et 40 % de la totalité des sédiments déplacés est représentée par cette quantité de poids du lit transporté (Keller et Bouchard, 1986).

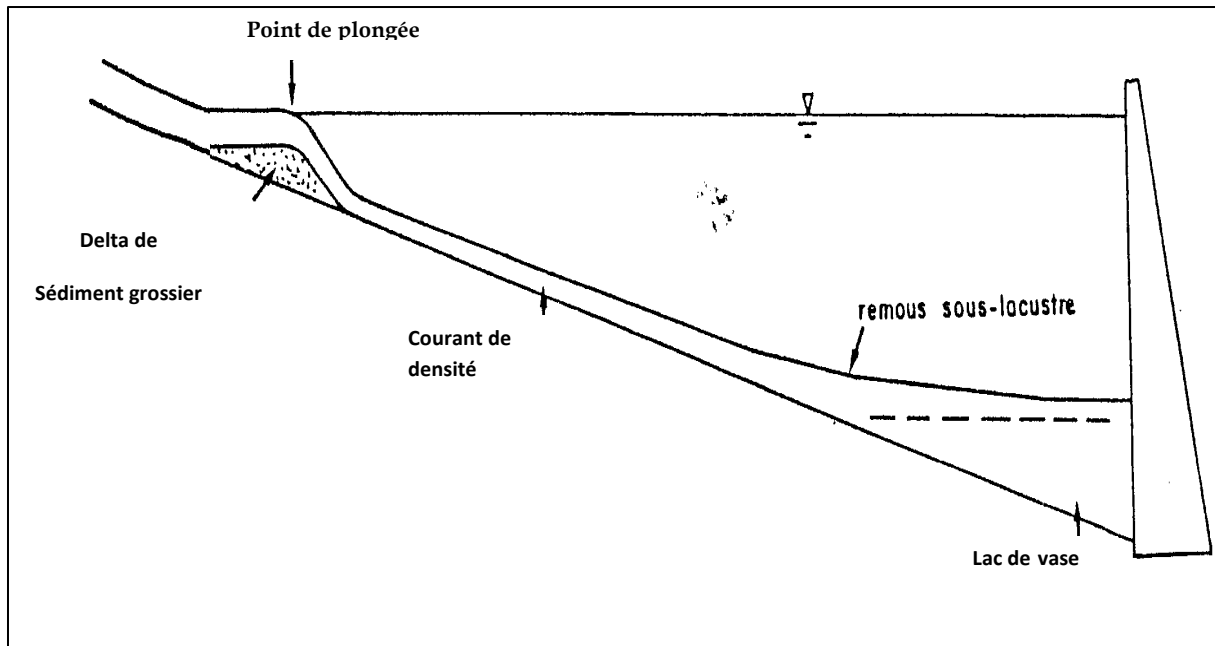


Figure I-2 : Le comportement des sédiments fins (Keller et Bouchard, 1986)

Dans plusieurs zones de la retenue, Les substances transportées en suspension sont déposées de façon pratiquement homogène. De plus, les matériaux les plus fines ont la possibilité de s'approcher du barrage, où ces derniers s'établissent (Figure I-2). En général, les dépôts représentent entre 5 et 10 fois la masse des sédiments en suspension.

Dans la nature, l'érosion hydrique est un phénomène observable qui est régulé en raison de phénomènes physiques naturels comme l'influence de la météo, la pétrologie, la couverture végétale et la topographie. L'action humaine intensifie généralement ce phénomène naturel en déboisant les forêts, en pâturent le bétail et en cultivant sur les pentes abruptes.

À l'heure actuelle, Le phénomène d'érosion des sols continue de croître en raison de l'extension excessive des surfaces imperméables, de l'absence de dispositifs antiérosifs dans la nature du paysage et l'évolution des terres et des méthodes agricoles. La perte de la couche fertile du sol peut être causée par ce phénomène d'érosion, qui est entraînée par la formation de ravins, les inondations et la dégradation de la propriété des eaux.

I.3 L'envasement

I.3.1 Le processus d'envasement

À l'opposé de leur apparence, les rivières transportent progressivement des quantités considérables de sédiments à la mer. Le déversement des eaux pluviales entraîne l'érosion des versants de montagne, libérant ces sédiments.

Cependant, lorsque les cours d'eau sont aménagés avec des barrages, le transit naturel de ces sédiments est modifié. Ils s'accumulent dans les eaux calmes des retenues, comblant graduellement ces dernières au fil du temps. Cette situation pose des problèmes sérieux pour la préservation du potentiel hydraulique, malgré le coût élevé de mobilisation.

La figure I-3, représente le processus d'envasement dans les barrages :

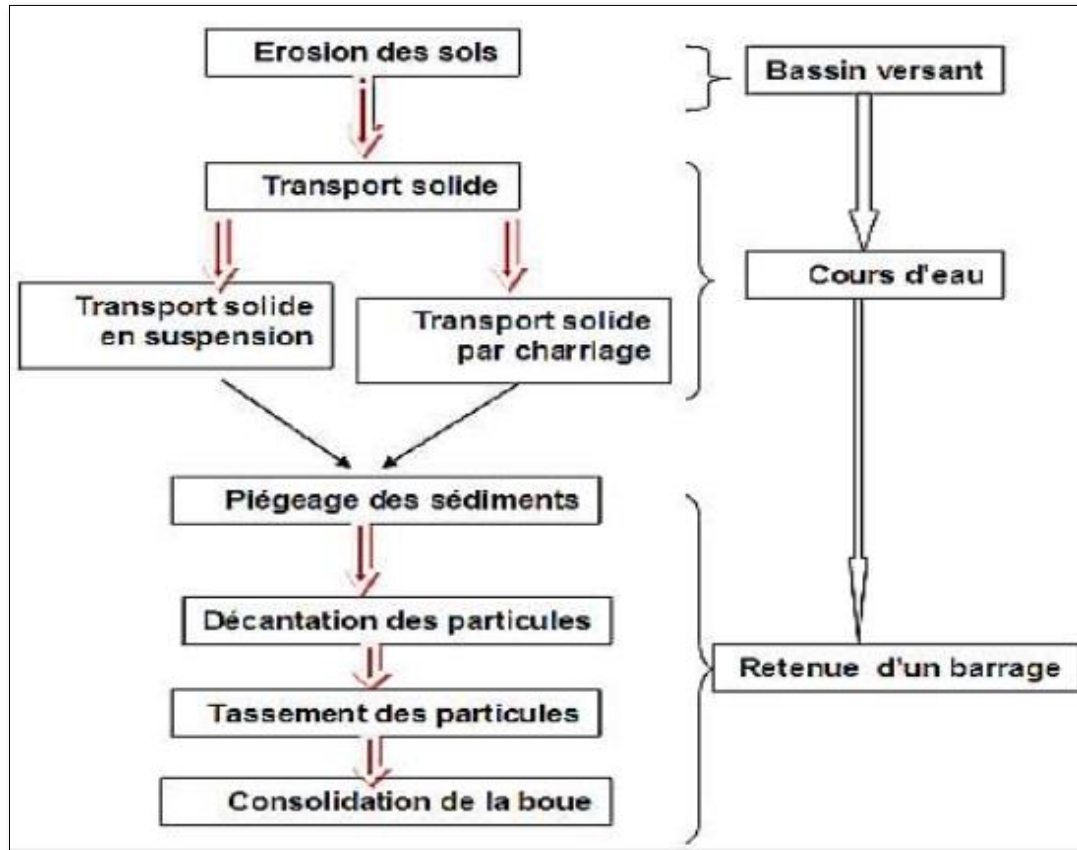


Figure I-3 : La formation des sédiments dans le barrage réservoir (Remini, 1990)

Le phénomène couramment appelé « l'envasement des barrages » est sûrement l'impact le plus préoccupant de l'érosion des bassins versants. Il se manifeste sous la forme d'une sédimentation avec accumulation de vase.

I.3.2 L'effet de l'envasement sur les projets de barrage

L'analyse de l'impact réel du processus d'envasement (sédimentation des retenues) et l'évaluation de la viabilité économique des différentes solutions pour réduire ce problème sont indispensables. Des difficultés importantes se posent pour le barrage, ses dirigeants et l'environnement en raison de l'envasement. Entre les difficultés rencontrées que nous identifions, nous pouvons mentionner notamment :

- ♣ Le volume de stockage du barrage diminue progressivement parce que les sédiments s'accumulent dans la retenue. Cela entraîne une baisse de la qualité du service offert par la retenue. Cette diminution du volume annuel a un impact de plus en plus significatif à mesure que les besoins en eau augmentent et doivent être satisfaits à partir du barrage ;
- ♣ La diminution graduelle du volume allouer des ressources à l'écrêtage des crues augmente le risque de débordement. Ce risque compromet la sécurité de la construction et des zones inondables situées en aval, ce qui entraîne des pertes d'eau pour l'alimentation habitable, l'irrigation ;
- ♣ En cas d'urgence, l'accumulation de sédiments peut entraver l'ouverture des vannes des turbines et des organes de vidange, rendant difficile la réduction du degré d'eau dans la retenue ;
- ♣ La détérioration des parois de l'ouvrage se manifeste par une diminution de leur capacité de résistance, principalement en raison des attaques chimiques causées par les sulfures et les acides proviennent des sédiments et des eaux agressives ;
- ♣ Les sédiments déposés empêchent l'inspection subaquatique et visuelle après vidange, car ils dissimulent le parement amont et empêchent l'accès depuis la cuvette ;
- ♣ L'eutrophisation du lac entraîne la détérioration des eaux dans les réservoirs de barrage. Ce phénomène est associé à une surconsommation de phosphore, d'azote et de manganèse, ce qui fait croître les plantes aquatiques. Cette plante offre une grande quantité de matière organique et encourage la croissance de nombreuses bactéries aérobies, ce qui a un impact sur la qualité de l'eau en changeant sa composition chimique et en provoquant la stratification thermique de la retenue ;
- ♣ La pression hydrostatique augmentée, provoquée par la substitution progressive des volumes par les sédiments et la densité de l'eau due à la suspension, compromettra l'intégrité structurelle du barrage ;
- ♣ Il est souvent coûteux de résoudre de tels problèmes. L'évacuation des sédiments est une tâche difficile et complexe qui demande souvent l'arrêt du barrage, ce qui est presque impossible dans les pays où les conditions climatiques saisonnières sont extrêmes et les précipitations imprévisibles.

Dans quelques installations hydroélectriques, les dépenses associées aux dégâts en aval sont capables d'inclure des déperditions d'énergie, des dépenses d'entretien et d'usure des turbines.

I-3-3 Origines et raisons d'envasement :

Les phénomènes d'érosion sont directement associés à l'envasement des retenues et des barrages. Les définitions des processus d'érosion varient d'un auteur à l'autre. La définition que nous avons choisie comprend l'arrachement (creusement de la superficie du sol, détérioration et altération des roches), le déplacement et le stockage de matériaux.

Les trois processus principaux de l'évolution géodynamique de la croûte terrestre sont l'érosion, le transport de matériaux et la sédimentation, ce qui entraîne l'aplatissement des reliefs montagneux à travers le monde. Pour aborder ces thèmes, il y a plusieurs approches, mais notre objectif est de mettre en évidence les processus et les méthodes de mesure qui pourraient régler les problèmes liés à l'évaluation et à quantification des matières solides qui sont chargées de l'envasement des retenues de barrages.

Selon la trilogie « creusement, mobilité et agglomération des matériaux », la définition de l'érosion nous conduit à élaborer un système fluvial optimal qui comprend trois zones.

- Zone de production (amont) : Cette zone correspond à la région où les matériaux sont produits, généralement en amont du cours d'eau.
- Zone de transfert (fleuve) : Dans cette zone, les matériaux arrachés en amont on les transporte le long du fleuve.
- Zone de dépôt (retenues et estuaires) : C'est là que les matériaux se déposent, formant des accumulations dans les retenues des barrages et les estuaires.

Il convient de noter que la distribution spatiale des processus d'érosion n'est pas nettement délimitée ; Différents phénomènes peuvent avoir lieu en même temps dans une même région du système fluvial. Cependant, Pour faciliter la tâche, nous examinerons le bilan de l'érosion sur les versants, le transport de fond et les matières en suspension.

Lors des phénomènes d'érosion, l'eau est l'agent moteur principal. Elle est à l'origine de l'altération des roches, entraînant la formation de particules et le détachement d'agrégats. L'énergie en mouvement générée Par le ruissellement, cela permet de transporter ces agrégats séparés, de creuser le sol et de déposer ou accumuler progressivement les matériaux, tout en dissipant cette énergie.

I.3.4 La résolution du problème de l'envasement des barrages

Les approches pour résoudre le problème d'envasement des barrages peut être résolu par deux approches : les précautions préventives et les mesures curatives. Les premières visent à prévenir l'accumulation de sédiments, tandis que les secondes impliquent des interventions de désenvasement une fois que l'envasement s'est produit.

I.3.4.1 Les différentes solutions de remédiation et de prévention

Ce regroupement englobe toutes les solutions, à savoir les approches curatives et préventives :

♣ **Le reboisement** : La plantation d'arbres à l'entrée d'une retenue permet de capter et de stocker les sédiments en amont des flux d'eau. Il joue le rôle d'un écran végétal performant, réduisant ainsi la pénétration des matériaux solides dans la retenue, diffusant le flux d'entrée et réduisant sa vitesse. Une plantation abondante provoquera un usage d'eau plus important ;

♣ **La plante à tiges longues plantée le long des oueds** peut servir de piège efficace pour retenir les sédiments ;

Les arbres sont plantés le long des courbes de niveau et les berges sont stabilisées : constituent une approche technique pour prévenir l'érosion. Elle peut être réalisée soit en utilisant des végétaux pour corriger les problèmes d'érosion mineurs, soit en mettant en place des structures végétales qui nécessitent une meilleure compréhension de la structure des sols existants ;

♣ **La restauration des sols** : Cette approche repose sur l'utilisation de processus biologiques pour renforcer la résistance des sols du bassin versant à l'eau ou au vent, en exploitant l'influence des plantes naturelles ou cultivées. Elle implique la plantation d'arbustes soigneusement sélectionnés en fonction de leurs capacités à résister à l'érosion et à améliorer la qualité de la terre. Il convient de sélectionner les espèces minutieuses pour éviter tout effet indésirable. De plus, La méthode du paillage implique de recouvrir le sol avec des matériaux organiques, minéraux ou plastiques, protège et améliore sa structure tout à travers la diminution de l'érosion et l'augmentation de la perméabilité.

♣ **Les banquettes**, qui sont des aménagements mécaniques sur les versants, ont pour objectif de réduire L'érosion du sol hydrique, de retenir Les déversements, de favoriser l'infiltration sur les inclinaisons et de garantir le maintien des sédiments en amont. Ces bancs mécaniques sont constitués de digues de terre érigées perpendiculairement à l'inclinaison du sol et d'un canal qui retient les eaux de crue et les sédiments entre les banquettes. Pour optimiser la pénétration, minimiser l'érosion sur les descentes et éviter le déversement des eaux, il est recommandé de construire ces banquettes sur des pentes inférieures à 25 % ;

♣ **La construction de petits barrages en pierres dans les talwegs permet d'éviter la sédimentation dans les réservoirs** : Cette technique, simple et pratique, consiste à ériger des systèmes de berges artificielles non étanches, appelés « gabions », le long du fleuve principal

qui se jette dans la retenue. Les gabions ont pour rôle de capturer les sédiments fins en amont de la retenue. Pour nettoyer ces dépôts, des outils mécaniques simples peuvent être utilisés ;

♣ **Les plages d'épandage :** Il s'agit d'ouvrages à parement vertical en aval destinés à encourager les dépôts sédimentaires et à garantir la recharge et l'alimentation des barrages lors des crues. Des structures de dérivation classiques sont également présentes, avec souvent un seuil pour fermer le lit du cours d'eau ou une partie de celui-ci, formant un chenal avec la rive de l'oued qui se prolonge jusqu'au barrage. En outre, afin d'éviter que les sédiments ne parviennent au barrage principal, il est possible de construire un ouvrage de transfert ou de rétention et de décantation des apports solides en amont du barrage.

I.3.4.2 Solutions thérapeutiques et aides de désenvasement

Ces solutions visent à prévenir l'érosion et à empêcher l'accumulation de sédiments dans un bassin. Elles incluent l'élimination des matériaux solides et la vidange des fonds.

♣ **La méthode de vidange, également appelée « chasse à l'espagnol »,** Cette opération vise à diminuer le niveau d'eau et à accélérer la vitesse d'écoulement pour évacuer une partie des sédiments stockés par le barrage. L'ouverture des vannes lors de la vidange permet de prévenir l'engorgement du barrage et de réduire les dangers liés aux inondations. Cette technique est recommandée pour les barrages de faible importance, ceux qui sont régulés annuellement et lors des premières inondations. En revanche, Elle ne convient pas aux barrages situés dans des zones arides où l'eau est rare et dans lequel les précipitations sont compensées par l'évaporation des superficies et la transpiration des plantes ;

♣ **Les vidanges de fond à barrage plein, également appelées « chasses de dévasement »,** consistent Il est nécessaire d'équiper un barrage avec un système de vidange au fond (vannes de fond). Ce dispositif assure à la fois la vidange de l'ouvrage et l'évacuation des crues, tout en permettant l'élimination des sédiments accumulés au fond de la retenue. Cela représente un élément absolument indispensable pour tout barrage, et il faut prendre en considération dès la conception, surtout en cas de risque de sédimentation ;

♣ **Le soutirage des courants de densités** Il s'agit d'équiper un barrage d'un mécanisme de vannes spécialement conçu pour évacuer les sédiments. Cette méthode permet d'évacuer et de supprimer une fraction des sédiments à l'avance, qu'ils ne se déposent au fond du barrage, en particulier lorsque le cours d'eau apporte des sédiments à grande vitesse et avec une forte turbulence. La batterie de vannes comprend des pertuis de réduction, des canalisations et des ébauches de dévasement. Pour optimiser ce moyen de soutirage, il est essentiel que La forme

géométrique et l'aspect global de la retenue du barrage permettent un écoulement dense à l'entrée de la retenue, qui pourrait éventuellement se propager jusqu'à la base du barrage ;

♣ **La levée de la digue est une surélévation de la digue :** Il s'agit de faire monter la structure afin d'éviter le débordement de l'eau après le dépôt de sédiments (ce qui est la principale fonction d'une digue de défense). La réalisation de cette opération requiert une analyse des structures du barrage pour identifier le type et les dimensions de la partie à intégrer à la structure existante, tout en préservant sa stabilité. En surélevant la digue, la capacité de la retenue est accrue, ce qui compense le volume diminué en raison de la sédimentation. La section surélevée de l'ouvrage est exposée à une charge hydraulique presque permanente et est perçue comme faisant partie intégrante du barrage selon la réglementation. Il est donc essentiel de respecter les spécifications techniques relatives aux barrages. Chaque solution Afin de surmonter un barrage présente Des points forts et des points faibles.

Globalement, les alternatives légères et économiques permettent une mise en place rapide pour des surélévations de faible hauteur. En revanche, les solutions rigides, bien que plus coûteuses, offrent une meilleure résistance aux pressions hydrostatiques et une durabilité accrue.

En effet, il est également envisageable d'augmenter la hauteur totale du barrage ainsi que celle de ses ouvrages annexes (comme les matériaux de remblai, Les éléments de construction rigides comme les parois en béton et les éléments plus souples tels que les géotextiles.). Cette surélévation peut être réalisée en utilisant des digues amovibles, telles que les batardeaux à planches, inclinés, membranaires ou auto-stables.

♣ **Le dragage de barrages :** Le dragage a pour but de restaurer Les sources d'eau sont à leur plein potentiel une fois que celle-ci a été réduite par la sédimentation due aux précipitations. Ces travaux consistent à extraire les matériaux sédimentaires présents au plus profond de l'eau, notamment La boue, le limon, le sable et le gravier.

I.4 Le dragage

Dans les barrages, le dragage est principalement une opération d'entretien des fonds, où les stocks sont fréquemment composés de particules fines ou d'un mélange de sable et de boue. On envisage l'utilisation du dragage lorsque les solutions mentionnées précédemment sont impossibles à réaliser ou s'avèrent Faillibles sur le plan économique ou technique.

Deux éléments essentiels du dragage sont capables influencer l'environnement : la méthode de dragage utilisée et les propriétés des sédiments. Il est donc crucial de mettre en place une gestion plus intégrée de l'environnement du dragage, surtout dans les pays en voie

de croissance. En général, les travaux de dragage se déroulent en trois étapes : le nettoyage en soi, les travaux de dragage, et le transport et l'élimination des sédiments extraits. (Manap et Voulvoulis, 2015).

I.4.1 Techniques de dragage (le curage)

Le dragage peut prendre différentes formes, notamment mécanique, hydraulique ou hydrodynamique, en fonction de La volume de sédiments à retirer ainsi que le mode de fonctionnement du matériel.

§ **Le dragage mécanique** : est spécialement conçu pour les opérations de précision et les espaces limités. La plupart des modèles sont les dragues à benne preneuse, à pelles et à godets (Figure I-4). Elles sont employées dans des endroits peu accessibles tels que les bords de quai et les bassins étroits et peuvent travailler à des profondeurs de 30 m (pour le dragage à la benne) et de 25 m (pour le dragage au godet). La benne preneuse, souvent utilisée, est placée sur le fond en état ouvert et s'enfonce dans le sédiment à extraire grâce à son poids propre et au processus de fermeture. Le déverrouillage de la ligne du godet autorise le déversement de son contenu dans la cuve de la drague, sur la barge ou sur le sol (Geode, 2012a).

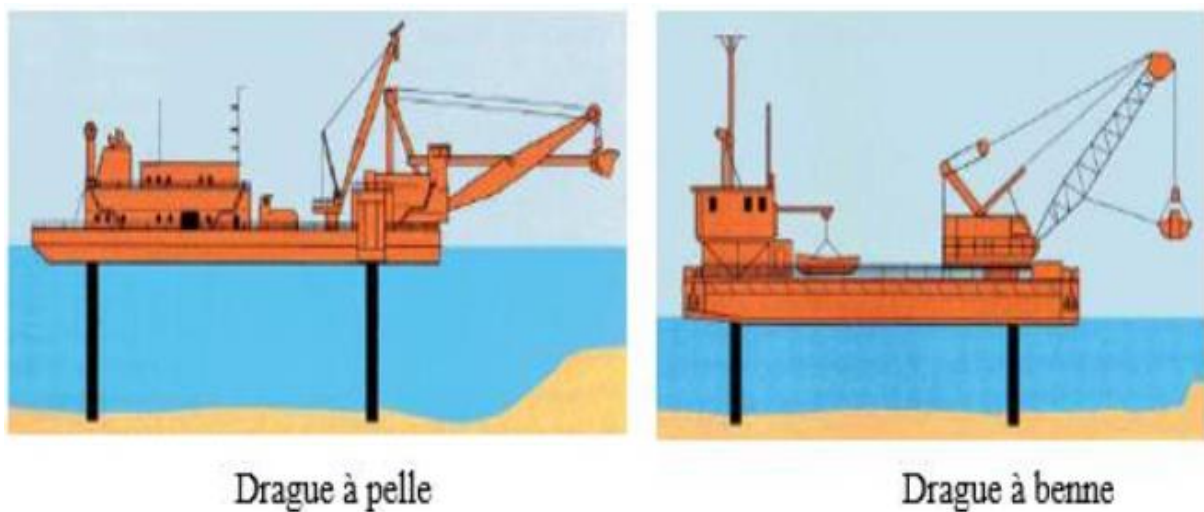


Figure I-4 : Dragues mécaniques (Geode, 2012a)

Dragage hydraulique : La drague aspiratrice fonctionne en aspirant Un mélange d'eau et de sédiments est transféré à travers une conduite (élinde) muni d'un embout (bec d'élinde) grâce à l'utilisation d'une pompe centrifuge. Selon le type de drague, ce mélange est ensuite versé dans des bassins, des canalisations ou des tuyaux qui mènent à la zone d'accumulation. Les dragues aspiratrices peuvent atteindre des profondeurs allant jusqu'à 30 mètres. Pour améliorer l'efficacité de l'opération de dragage, on peut ajouter Une cisaille faite en acier

(comme cutter) munie de lames ou de griffes au niveau du bec d'élinde, notamment pour les sols durs ou compactés. Ce système permet d'augmenter l'action de retour de fond durant les opérations de dragage. On distingue deux catégories de dragues : les dragues aspirantes fixes (DAS) et les dragues aspirantes en mouvement (DAM).

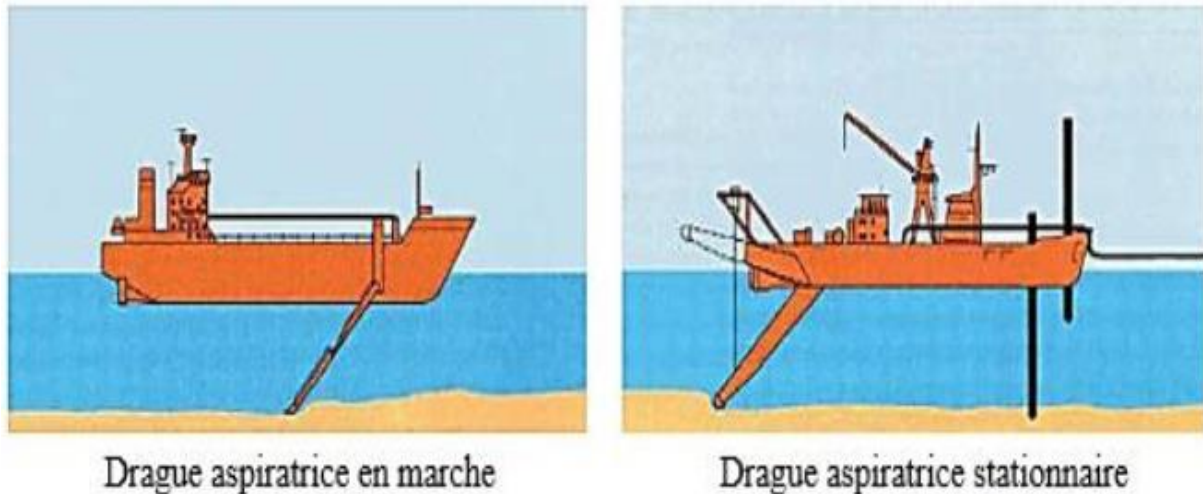


Figure I-5 : Dragues hydrauliques aspiratrices (Geode, 2012a)

♣ **Dragage hydrodynamique :** Grâce à divers instruments, le dragage a pour but de remettre en suspension des matières accumulées dans la colonne d'eau. Derrière l'influence de courants naturels, ces substances sont éparpillées ou déplacées vers une région spécifique (Pardos, 2003).

- Le dragage par agitation, également appelé « à l'américaine », vise à réutiliser des sédiments spécifiques. On peut provoquer l'agitation en remuant les sédiments dans la colonne d'eau grâce à un jet d'eau puissant et/ou en grattant le fond à l'aide d'un outil. A titre exemple, une drague aspiratrice en fonctionnement génère un débordement constant ou écarte les matériaux (voir Figure I-6) (Geode, 2012b).

Le dragage à la manière américaine permet d'évacuer en continu les boues pompées dans l'environnement. Il est particulièrement efficace dans les zones à forts courants, où le mélange peut être drainé par débordement vers les zones souhaitées. Dans certains cas, l'utilisation de ce type de dragage peut être motivée davantage par des considérations économiques que par des préoccupations environnementales (Geode, 2012a).



Figure I-6 : La drague à agitation (Geode, 2012b)

Le dragage par injection d'eau repose sur le concept des flux de densité. Dans ce procédé, Une grande quantité d'eau est injectée dans les sédiments par le biais de buses, perpendiculairement à l'activité de la drague. Les résidus deviennent plus fluides, ils se détachent et constituent un liquide ayant une densité supérieure à celle de l'eau. Par la suite, sous l'effet du courant électrique et de la gravité, ce mélange se déplace vers la surface inférieure. (Voir Figure I-7) (Geode, 2012a, Geode, 2012b).



Navire

Principe à injection d'eau

Figure I-7 : Dragage par injection d'eau (Geode, 2012b)

- Le rotodévasage est une technique qui vise à remettre les sédiments en mouvement grâce à un bateau muni d'une fraise transversale de de nombreux mètres de large. (Voir Figure I-8).



Figure I-8 : Dragage par rotodévaseur (Geode, 2012b)

- L'injection d'air dans le dragage consiste à utiliser un système d'injection d'air à la pression pour pulvériser les sédiments. L'objectif de cette méthode est de les fragmenter en petites particules, d'altérer leur cohésion et de les répartir dans la colonne d'eau. Cependant, du fait de son efficacité inférieure comparée au dragage par injection d'eau, cette méthode est peu rarement utilisée. (Voir Figure I-9) (Geode, 2012b).



Figure I-9 : La drague à injection d'air (Geode, 2012b)

La drague à charrue permet de déplacer un cubage limité de sédiments d'un endroit à un autre en utilisant une charrue ou une niveleuse (voir Figure I-10). Le site choisi pour le dépôt des sédiments peut être choisi pour la préservation (en vue d'une récupération future par des méthodes traditionnelles), soit pour la dissémination (dans le but d'éviter l'érosion et de prévenir la réintégration des matériaux à leur état naturel). Le matériau est collecté par la

charrue lorsqu'elle est traînée sur le sol. Elle permet ensuite l'accumulation des sédiments dans la zone visée, répétant le processus autant de fois que requis.



Figure I-10 : La drague à charrue Alligator et description d'une niveleuse (Geode, 2012b)

Il existe des dragues à charrue de diverses dimensions. La largeur d'une charrue peut varier de 3 à 35 mètres, tandis que sa surface peut osciller entre 1,5 et 50 m² (Geode, 2012b).

I.4.2 Transport des sédiments de dragage

Le choix des divers modes de transport pour les sédiments dragués dépendra du lieu de dépôt. Les sédiments destinés dans les endroits d'immersion peuvent être transportés par voie d'eau à l'aide de bateaux ou par camions vers des dépôts terrestres. Étant donné la grande quantité de sédiments en condition humide, accompagnée de procédés de déshydratation sont nécessaires pour réduire leur teneur en eau et leur volume, répondant ainsi aux enjeux économiques et écologiques liés aux moyens de transport.

Le transport fluvial offre une réduction significative en termes de consommation de carburant, d'émissions de CO₂ et de charges associées, comparés au transport sur route.

Cependant, l'utilisation de ce mode de chargement est actuellement menacée. Sur certaines portions, la circulation est rendue difficile, voire impraticable en raison de l'accumulation de sédiments au fond des voies navigables, ce qui limite la profondeur de l'eau. Afin de maintenir des niveaux d'eau adéquats, les dirigeants effectuent fréquemment à des opérations de dragage afin d'éliminer les sédiments. Une fois déposés à terre, ces sédiments sont considérés comme des déchets.

I.4.3 Dépôt et entreposage des sédiments dragués

Les sédiments sont acheminés à des lieux de passage ou de rassemblement, d'où ils vont être prélevés en vue de leur élimination ou de leur valorisation. Au-delà d'une certaine période d'entreposage, si les sédiments ne sont pas retirés ni exploités, leur rétention est jugée comme étant permanente.

En tenant compte des propriétés des sédiments et de leur risque particulier, le lieu de stockage peut consister en une excavation réalisée dans le sol, sans l'utilisation d'un matériau particulier pour l'étanchéité. Cette cuve doit être située en dehors des zones inondables, facilement accessible et située tout près de la zone purifiée pour simplifier le déplacement des sédiments prélevés. Une fois exploités, les terrains sont obligatoirement réhabilités et font l'objet d'un suivi attentif. (Record, 2017).

La récupération des sédiments englobe le réemploi, le recyclage ou toute autre démarche visant à produire des matériaux ou de l'énergie pouvant être réemployés. On distingue trois secteurs dans la répartition des filières de valorisation. (Zentar, 2009) : L'ingénierie civile et les travaux publics, l'agriculture pour l'amélioration des sols et la réhabilitation des sites naturels. Dans le cas où les sédiments seraient inertes et qu'aucun effet négatif sur la santé ou l'environnement n'aurait été prouvé suite à des études et recherches, ils peuvent être exploités pour l'aménagement d'espaces naturels et de zones de détente.

I.5 Conclusion

L'envasement des barrages, bien que parfois exagéré, constitue néanmoins un problème sérieux pour de nombreux barrages, surtout dans les pays où de nouveaux barrages sont prévus. Pour atténuer ce problème, il est crucial de se concentrer spécifiquement sur la mise en application des mesures et dispositions nécessaires pour assurer la durabilité sur longue durée.

L'accent dans la surveillance du danger d'envasement sera prochainement mis sur le contrôle des flux de surface, perçus comme un facteur de risque prépondérant pour la sûreté et la maintenance des barrages. La gestion peut grandement varier en fonction de la localité du barrage, de sa finalité et de son mode d'opération. Il faut intégrer quelques facteurs dans les études sur les barrages incontournables pour estimer la sédimentation. Cela inclut le choix de l'emplacement pour la construction du barrage, la conception de ses infrastructures et la supervision des débits d'eau évacués. Selon les conditions locales précises du site du barrage, les méthodes de chasse et/ou de dragage ainsi que les galeries de dérivation permanentes

peuvent se révéler efficaces et économiques. L'évaluation des performances effectives des structures en place facilitera la mise en œuvre de l'opération de dessablement des eaux turbinées. La rétention elle-même peut engendrer l'effet escompté de manière plus économique pour le dévasement. En général, des solutions combinées sont recommandées.

L'évaluation d'un faible risque d'envasement n'exclut pas la nécessité d'une étude approfondie de la durabilité sur le long terme. Bien que cette étude puisse initialement entraîner des investissements supplémentaires, ceux-ci seront minimes et sans impact comparé aux futurs investissements nécessaires pour traiter l'envasement réellement mesuré. Cette action anticipative permettra de réduire considérablement les investissements à venir. Des progrès continus dans la réduction de l'envasement doivent être réalisés en s'appuyant sur les informations et les données concernant les dépenses vraies et l'efficacité des différentes solutions appliquées avec succès partout sur la planète. Il est aussi essentiel de tirer des enseignements des défis rencontrés et des modifications apportées aux ouvrages.

Chapitre II : L'état des barrages en Algérie

II-1 Introduction :

Le phénomène de la sédimentation affecte tous les barrages à travers le monde, bien que les vitesses de sédimentation varient d'une région à l'autre. On a beaucoup signalé ce phénomène aux États-Unis, en Russie, à Taïwan, en Inde, en Chine, en Iran, au Soudan et au Maghreb. Dans cette zone, l'infrastructure hydraulique perd chaque année entre 2% et 5% de sa capacité totale (Demmak, 1982). L'obstruction des barrages représente un enjeu crucial dans les nations du Maghreb telles que l'Algérie, le Maroc et la Tunisie. Les 250 barrages situés dans le Maghreb, qui ont une capacité complète de 23 milliards de mètres cubes, reçoivent chaque année environ 130 millions de mètres cubes de sédiments (Remini, 2007). La capacité de stockage de ces infrastructures hydrauliques se dégrade continuellement au fil du temps en raison d'une érosion hydrique significative exacerbée par la rudesse du climat, l'alternance de phases sèches et humides, les précipitations automnales sont puissantes et dévastatrices pour les sols, compte tenu de la vulnérabilité des formations géologiques, du manque de couverture végétale adéquate et de l'influence humaine.

II-2- L'évolution du nombre des barrages à l'échelle mondiale :

Au fil des ans, de nombreux cours d'eau ont été altérés pour répondre au besoin de l'humanité. De nombreux exemples existent de barrages et de digues qui conviennent l'eau de manière provisoire ou permanente. Les premières infrastructures datent de l'Antiquité, comme les barrages de Jawa en Jordanie et de Saad-el Kafara en Égypte, qui ont environ 500 ans. L'accroissement continu du nombre de barrages en activité est clairement illustré par les différentes versions du registre mondial des barrages, géré par la Commission Internationale Des Grands Barrages. Au début du XXe siècle, on comptait 427 barrages majeurs. Ce chiffre a augmenté pour atteindre 5 268 en 1950, puis est monté à 36 235 au moment du recensement de 1992 et a culminé à presque 45 000 au tournant du XXIe siècle. D'après les informations de 1998, plus de 20 000 barrages étaient recensés uniquement en Chine. La figure II-1 montre respectivement l'évolution du nombre de grands barrages dans le monde.

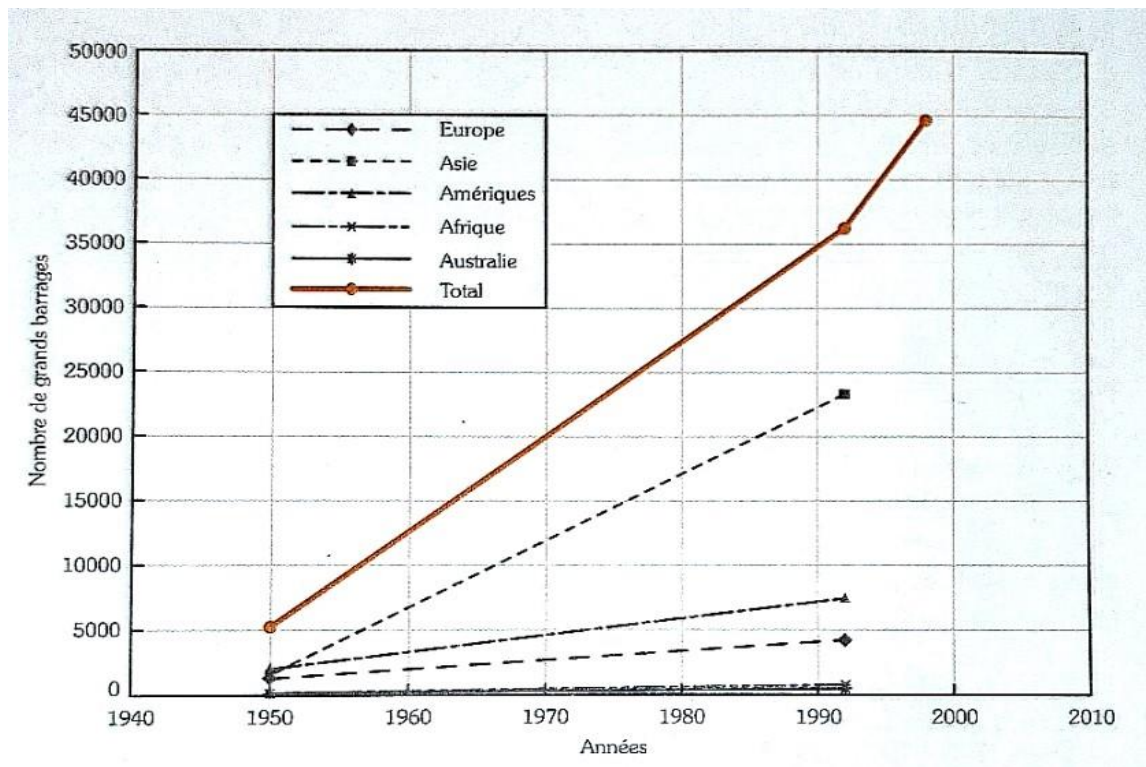


Figure II -1 : l'évolution du nombre de barrage dans le monde (Anton J.Schleiss et Henri pougatsch, 2011)

Selon l'analyse, il existe aujourd'hui 60 000 grands barrages dans le monde, dont plus de 3 700 sont actuellement prévus ou en construction, bien que ce dernier chiffre puisse en fait être bien plus élevé. Le moins de barrages par pays se trouvent sur le continent africain et la densité la plus élevée se trouve en Asie, principalement en Chine et en Inde (respectivement 9 215 et 6 785 grands et moyens barrages) ainsi qu'au Brésil (5 366), aux États-Unis (4 602) et au Sud. -Afrique (1 431).

II -3- L'envasement dans les barrages du monde :

90 % des bassins versants mondiaux génèrent moins de 500 tonnes de sédiments par an et par km², mais 10 % génèrent 5000 tonnes/km² en moyenne et certains fournissent bien plus de 10 000 tonnes. La charge sédimentaire annuelle atteignant de nombreux petits réservoirs est de plusieurs milliers de m³, mais de nombreux grands réservoirs hydroélectriques sont atteints par des millions ou des dizaines de millions de m³/an et la charge de 10 rivières dépasse 150 Hm³/an.

– La concentration varie fortement au cours de l'année ; 50% de la charge annuelle peut être déchargée en quelques jours et 90% en un mois. La plupart de l'envasement peut se produire au début de la saison des crues. La charge annuelle totale peut varier considérablement.

Une évaluation plus récente et plus détaillée de la sédimentation globale des réservoirs entreprise par le Comité de sédimentation des réservoirs de la CIGB et rapportée par Basson (2008) a été utilisée par Walling (2008) pour mettre à jour cette estimation antérieure de 25 Gt/an (Giga tonnes par an). L'enquête rapportée par Basson (2008) était basée sur les quelque 33 000 barrages inclus dans Le Registre International des Barrages de la CIGB et incorporait des informations sur la réduction annuelle du stockage des réservoirs signalés par les différents pays. Ces données, comme le montre la figure II-2, indiquent une perte de stockage moyenne annuelle de 0,96 %, et Basson (2008) a fourni une meilleure estimation de la réduction globale du stockage de 0,8 % par an.

En se basant sur une évaluation de l'aptitude de stockage actuelle des principaux barrages du monde de 6000 milliards de m³, cela équivaut à une perte annuelle de stockage d'environ 48 km³ par an. En supposant une densité apparente sèche pour les sédiments déposés d'environ 1,2 t/m³, cela équivaut à une séquestration annuelle d'environ 60 Gt/an.

Cette valeur est supérieure d'un ordre de grandeur aux estimations de la réduction du flux de sédiments terre-océan due au piégeage des réservoirs rapportées ci-dessus, qui étaient de l'ordre de 4 à 5 Gt/an.

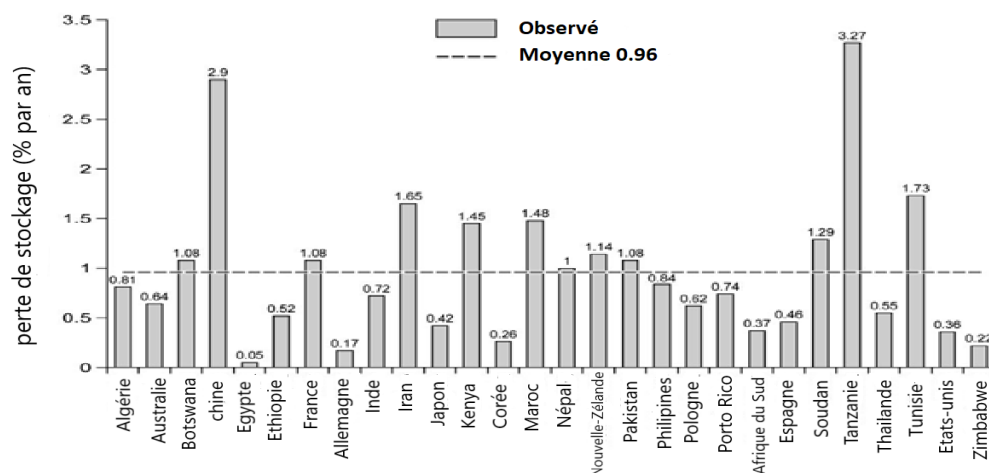


Figure II-2 : Une compilation des taux annuels de perte de stockage documentée pour les grands barrages dans différents pays, basée sur Basson (2008).

Il est également environ quatre fois supérieur au flux annuel probable de sédiments terre-océan, si l'on suppose qu'il est d'environ 15 Gt/an. Étant donné que le registre ICOLD peut ne pas inclure tous les barrages qui devraient être pris en compte et qu'il n'inclut pas la multitude de barrages plus petits qui séquestreront également les sédiments, la valeur d'environ 60 Gt/an pourrait représenter une sous-estimation. Les informations présentées dans la figure II-2 peuvent également être combinées avec l'estimation de la réduction globale annuelle du stockage des réservoirs de 0,8 % par an rapportée ci-dessous pour fournir une estimation du volume total de sédiments séquestrés dans les réservoirs du monde sur la période allant du début du boom de la construction de barrages au milieu du XXe siècle jusqu'en 2050 (voir figure II-3). La figure II-3 indique que ce volume totalise actuellement de sédiments environ $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ et aura augmenté à environ $4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ d'ici 2050. Une grande partie de ce stockage perdu se situe en Asie et en Europe, bien que les barrages d'Amérique du Nord et du Sud soient clairement aussi importants.

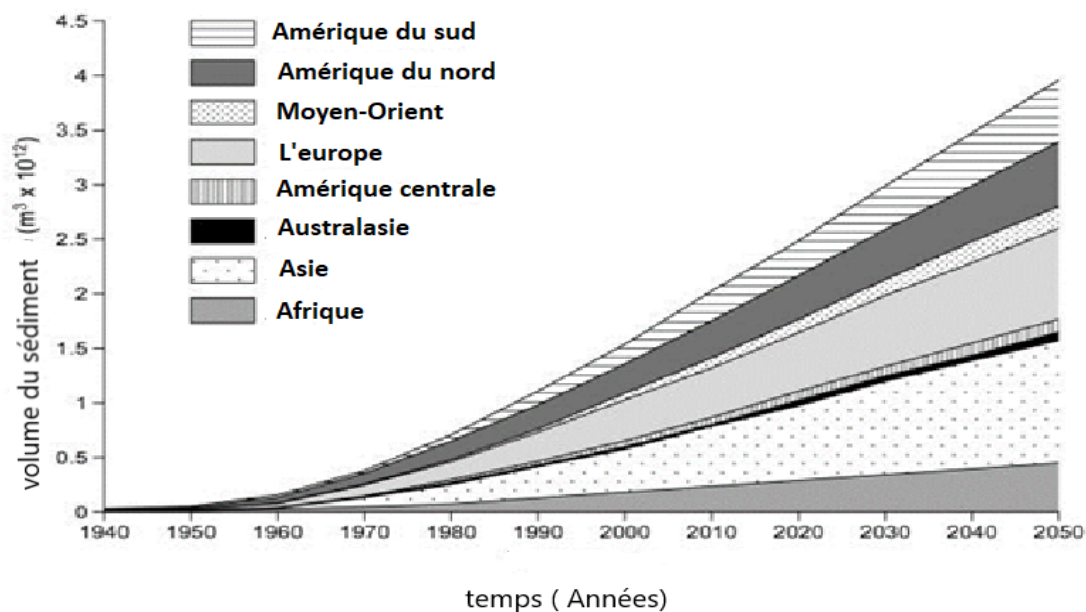


Figure II-3 : Estimations du volume total de sédiments séquestrés dans les grands réservoirs mondiaux durant la période qui s'étend de 1940 à 2050, d'après Basson (2008)

Les sédiments coulent, des prévisions comme celle-ci ont clairement des implications importantes pour la durabilité à plus long terme des grands barrages du monde, car la figure I-3 indique que d'ici 2050, jusqu'à deux tiers de la capacité de stockage initiale des barrages du

monde pourraient avoir été perdus à cause de la sédimentation. Cependant, l'attention se concentre ici sur l'importance du stockage des sédiments pour le bilan sédimentaire mondial.

La conversion des valeurs de volume de sédiments citées ci-dessus en valeurs de masse suggère que d'ici 2050 de l'ordre de 5000 Gt de sédiments auront été séquestrés par les grands réservoirs mondiaux. Cela doit être considéré comme une perturbation majeure du bilan sédimentaire mondial, alors qu'il est reconnu qu'il équivaut à environ 300 à 400 fois le transfert annuel de sédiments terre-océan. Cependant, la signification précise de ces valeurs nécessite une discussion plus approfondie, comme indiqué ci-dessous (Géographie, Collège des sciences de la vie et de l'environnement, Université d'Exeter, 2012).

II-4- L'envasement des barrages au nord de l'Afrique :

Actuellement, l'Afrique du Nord compte plus de 230 barrages ayant une capacité globale de stockage de 23 milliards de m³ (km²), divisée comme suit (figure II-4, et figure II-5). La surveillance de l'accumulation de sédiments dans les retenues a permis d'estimer qu'environ 125 106 000 m³ de capacité est perdu chaque année en raison de l'envasement. Cette capacité est distribuée de la manière suivante (voir la figure II-6) entre les trois pays.

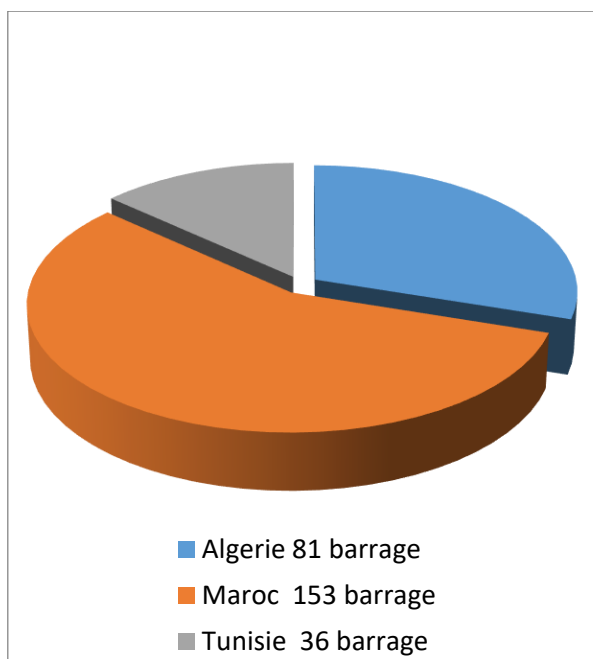


Figure II-4 : Nombre de barrages en Afrique du nord (Bettaher, 2023).

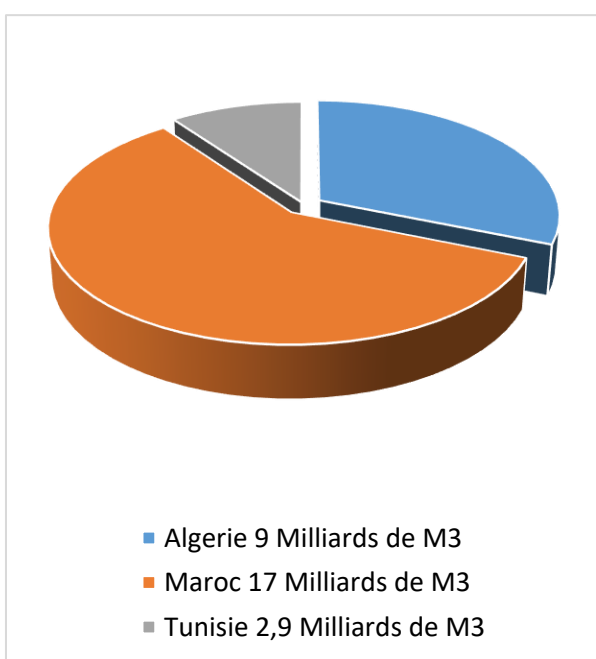


Figure II-5 : Capacité de stockage des barrages au nord de l'Afrique (Bettaher, 2023).

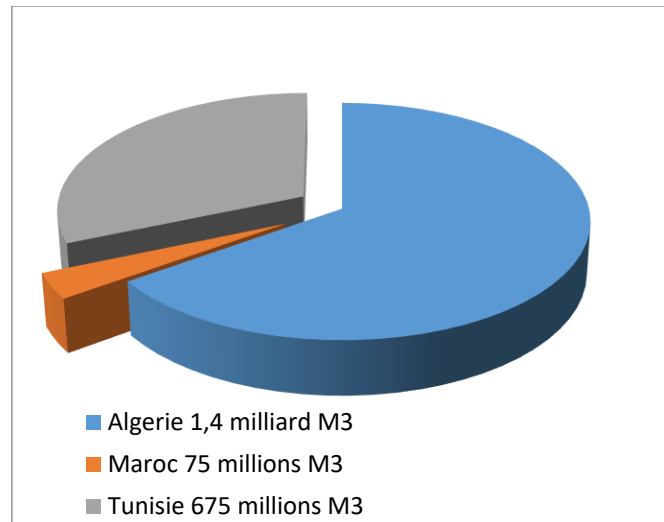


Figure II-6 : Envasement en Afrique du nord (Bettaher, 2023)

Outre la diminution de la capacité, la sédimentation affecte le réservoir lui-même, ainsi que sa partie amont et en aval du barrage. Ces nations (l'Algérie, la Tunisie et le Maroc) se situent dans une région montagneuse où règne un climat sévère marqué par des cycles d'années arides et humides. Les pluies de l'automne, qui sont particulièrement destructrices pour les sols, surviennent à un moment où la végétation est soit réduite, soit absente, tandis que les sols sont desserrés par le labour (Remini, 2003).

II-5-Situation des barrages en Algérie :

Selon l'Agence Nationale des Barrages et Transferts, le niveau national de remplissage des barrages s'établit à 44,52% sur l'échelle nationale. Elle précise que dans les régions occidentales du pays, le taux de remplissage est de 26%, celui du Centre se situe à 24% tandis que dans l'Est, il atteint 61%. Les responsables ont noté que ces pourcentages étaient raisonnablement satisfaisants, en comparaison avec le commencement de l'année 2022.

De nombreux barrages en Algérie présentent un degré « significatif » d'envasement. En effet, « compte tenu de la capacité totale initiale des 81 barrages en place en Algérie, dépassant les 9 milliards de m³ (9 km³), le volume de sédiments est estimé à environ 1,4 milliard de m³, ce qui équivaut à un taux d'envasement de 17,50 % » (ANBT, 2022).

La figure II-7 représente un graphique à barre résumant la situation actuelle des barrages pour chaque région.

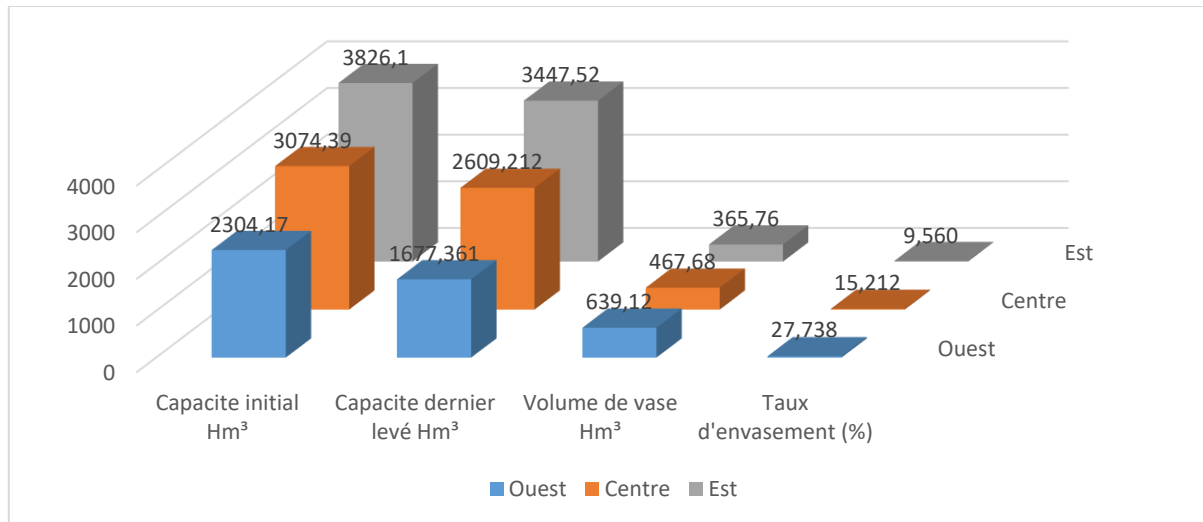


Figure II-7 : Situation actuelle des barrages par région (ANBT, 2022)

Selon les données obtenues de l'ANBT, nous avons fait une étude sur la situation des barrages en Algérie pour les trois régions, la région de Ouest a un volume de vase le plus élevée, la capacité initiale et la capacité du dernier levé sont le plus moins, alors que le taux d'envasement est le plus élevée. Le volume de vase dans l'Est est le plus moins. Malgré la capacité initiale des barrages est le plus important que les autres régions.

II-5-1-Régions Ouest

La région Ouest possède 24 barrages la capacité initiale total 2304,17 Hm^3 , capacité dernier levée 1677,361 Hm^3 , la perte de capacité 639,679 Hm^3 et le taux d'envasement total 27,73 %, les figures (II-8, II-9, II-10 et II-11) représente des données de chaque barrage.

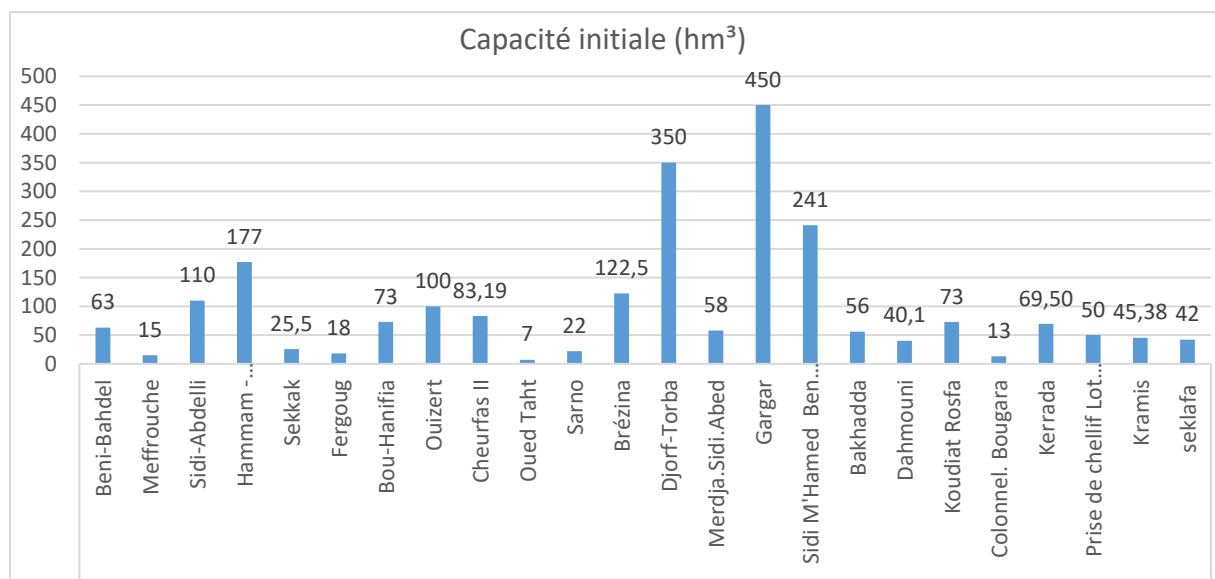


Figure II- 8 : capacité initiale (hm^3) les barrages dans la région Ouest (ANBT, 2022)

Le barrage de Gargar dans la wilaya de Relizane possède la plus grande capacité de stockage dans cette région, estimée à 450 Hm³, suivi par le barrage de Djorf-Torba (Bechar) avec 350 Hm³, puis le barrage de Sidi Mohamed Ben Aouda (Relizane) avec 241 Hm³.

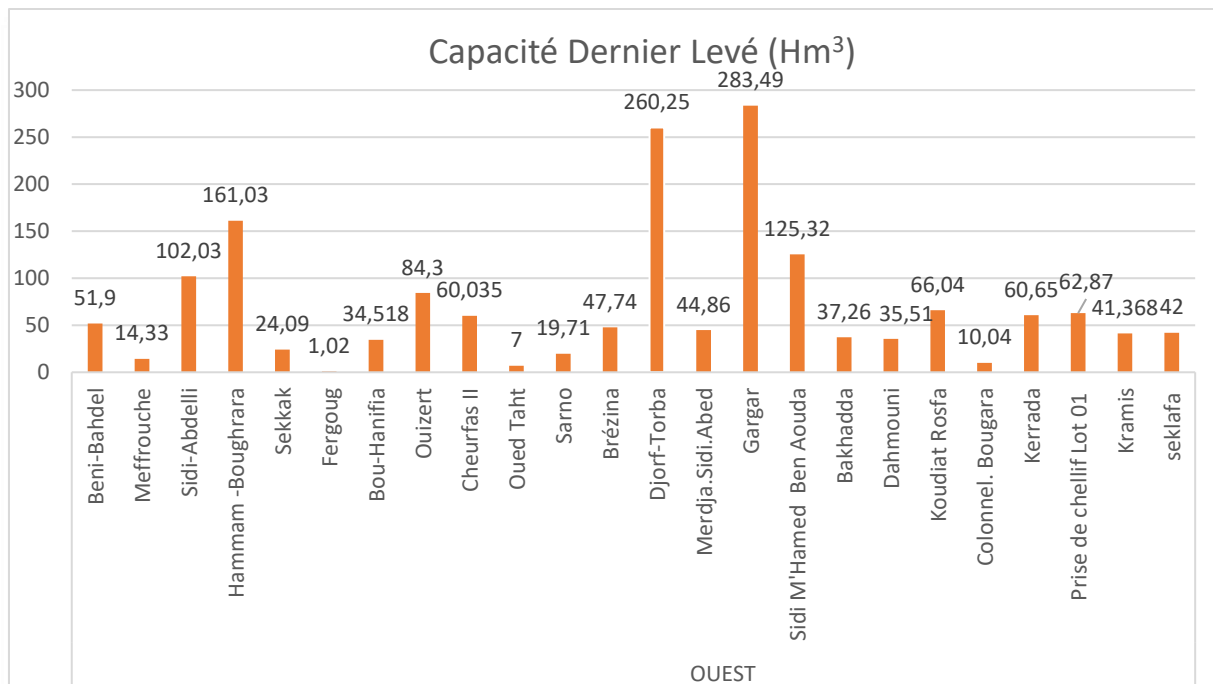


Figure II-9 : capacité dernier levé (hm³) des barrages dans la région Ouest (ANBT, 2022)

Le plus petit volume est représenté par le barrage d'Oued-That « 7 Hm³ » (Mascara), qui se trouve dans la wilaya de Mascara et qui a été mis en service en 2017. La plupart des volumes des barrages dans la région occidentale varient entre 20 et 100 Hm³.

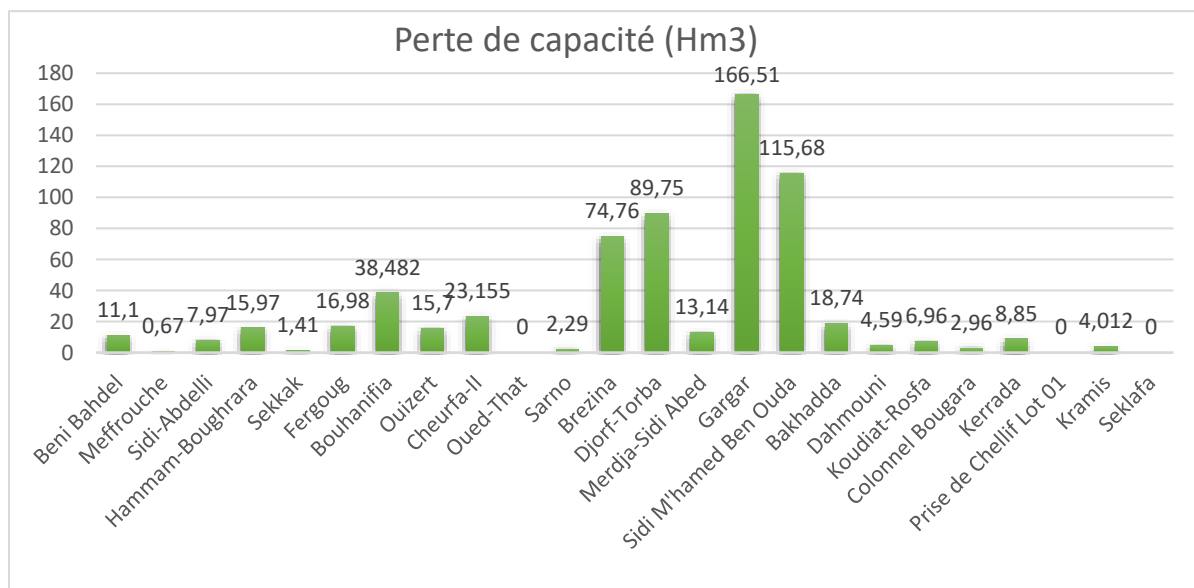


Figure II-10 : la perte de capacité Million m³ des barrages dans la région Ouest (ANBT, 2022)

Le barrage de Gargar dans la wilaya de Relizane représente la plus grande perte de capacité de stockage dans la région ouest de l'Algérie, suivi par le barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda dans la même wilaya, puis Djorf-Torba dans la wilaya de Béchar et le barrage de Brizina dans la wilaya de El Bayadh, respectivement, en raison de leur grande capacité de stockage.

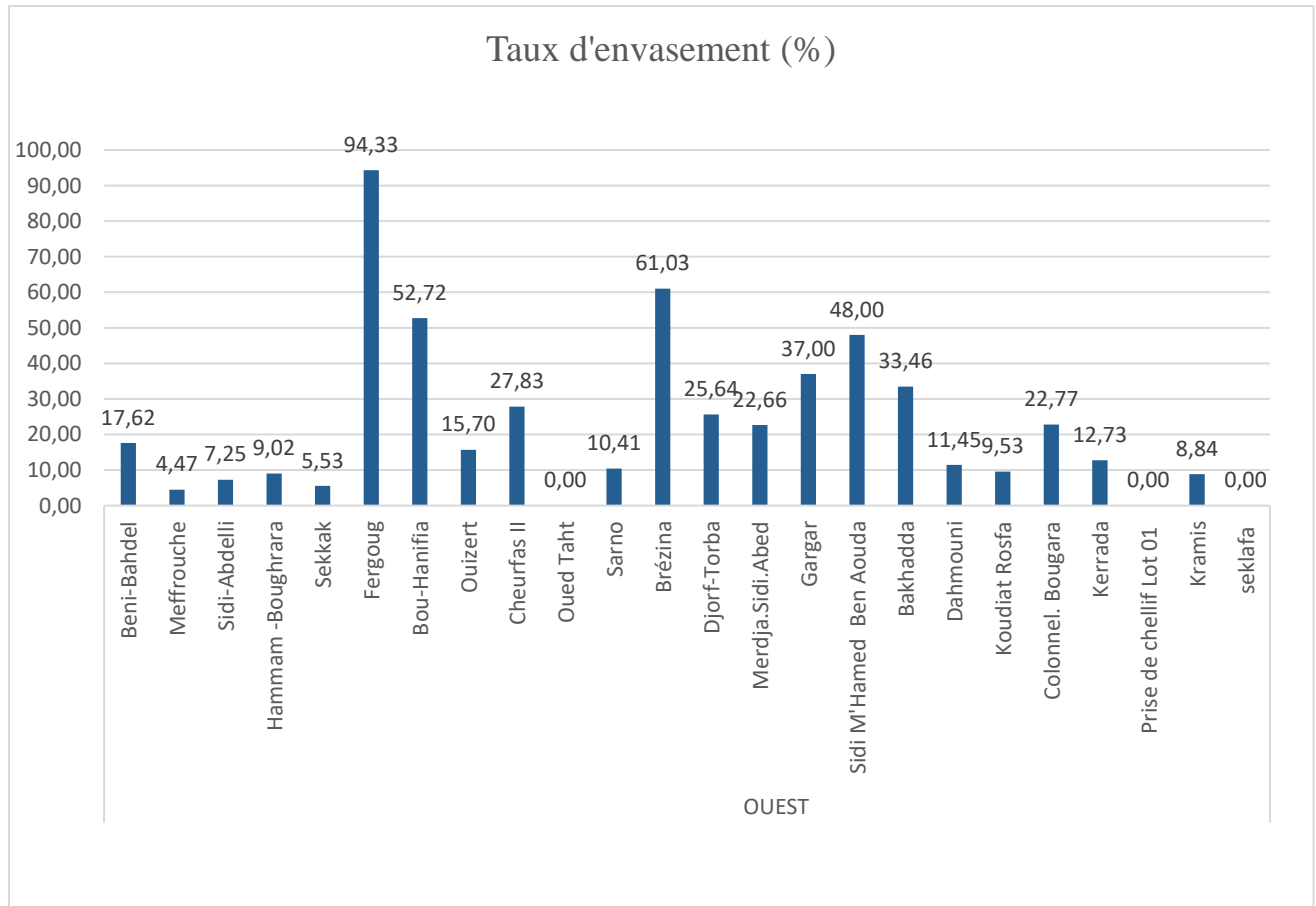


Figure II-11 : taux d'envasement (%) des barrages dans la région Ouest (ANBT, 2022)

Le plus taux d'envasement représenté par le barrage de Fergoug (Mascara), suivi de barrage de Brezina, Bouhanifia et Sidi M'Hamed Ben Aouda qui ont un taux d'envasement de 94,33 %, 61,03 %, 52,72 % et 48,00 % respectivement.

II-5-2-Région Centre

La région Centre possède 23 barrages. La capacité initiale totale est de 3074,39 Hm³, la capacité de la dernière levée est de 2609,212 Hm³, la perte de capacité est de 468,678 Hm³ et le taux d'envasement total est de 15,21 %. Les figures (II-12, II-13, II-14 et II-15) représentent des données de chaque barrage.

Les barrages de la région Centre se distinguent par leur grande capacité, où la moitié de leurs barrages dépassant une capacité de 100 Hm³ représente 84,74 %. De plus, le plus

grand barrage de cette région, le Koudiat-Accerdoune, wilaya de Bouira, représente 20,8 % (640 Hm³).

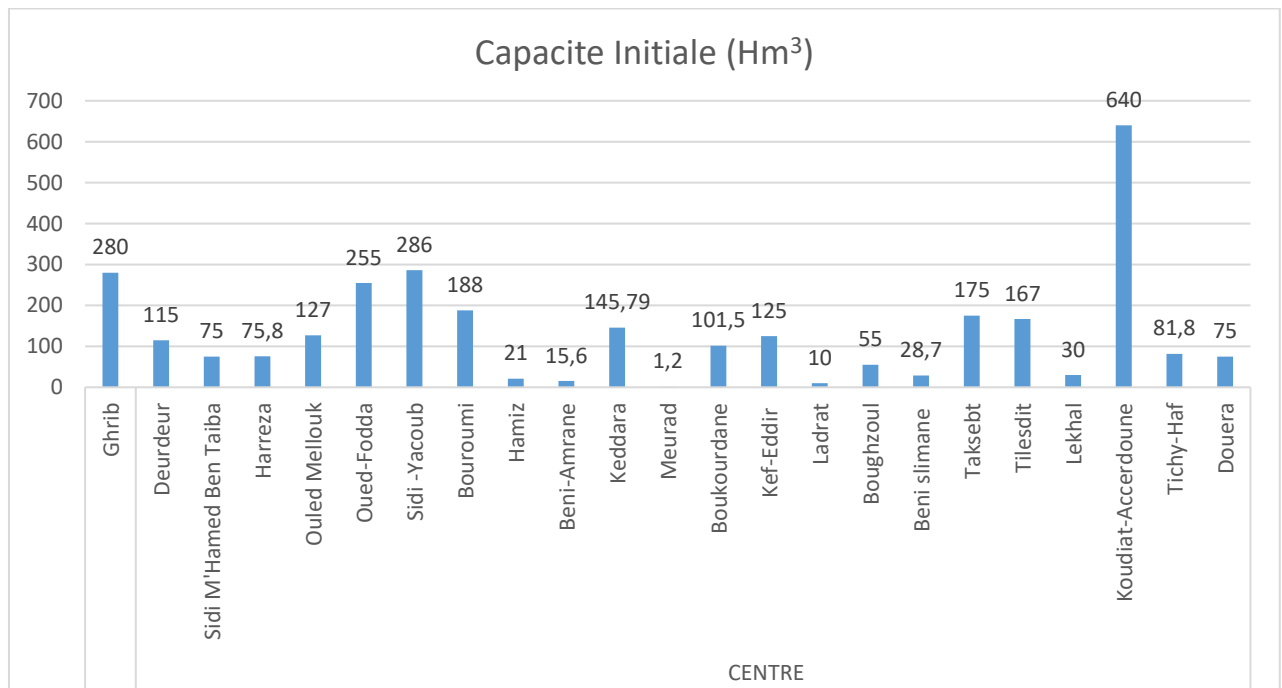


Figure II-12 : capacité initial (hm³) les barrages dans la région Centre (ANBT, 2022)

Le barrage de Koudiat-Accerdoune dans la wilaya de Bouira représente la plus grande capacité de stockage 640 Hm³ dans la région du centre d'Algérie, suivi par le barrage de Sidi Yacoub 286 Hm³ (Chlef), Ghrib (Ain Defla) et Oue-Fodda 255 Hm³ (Chlef) respectivement.

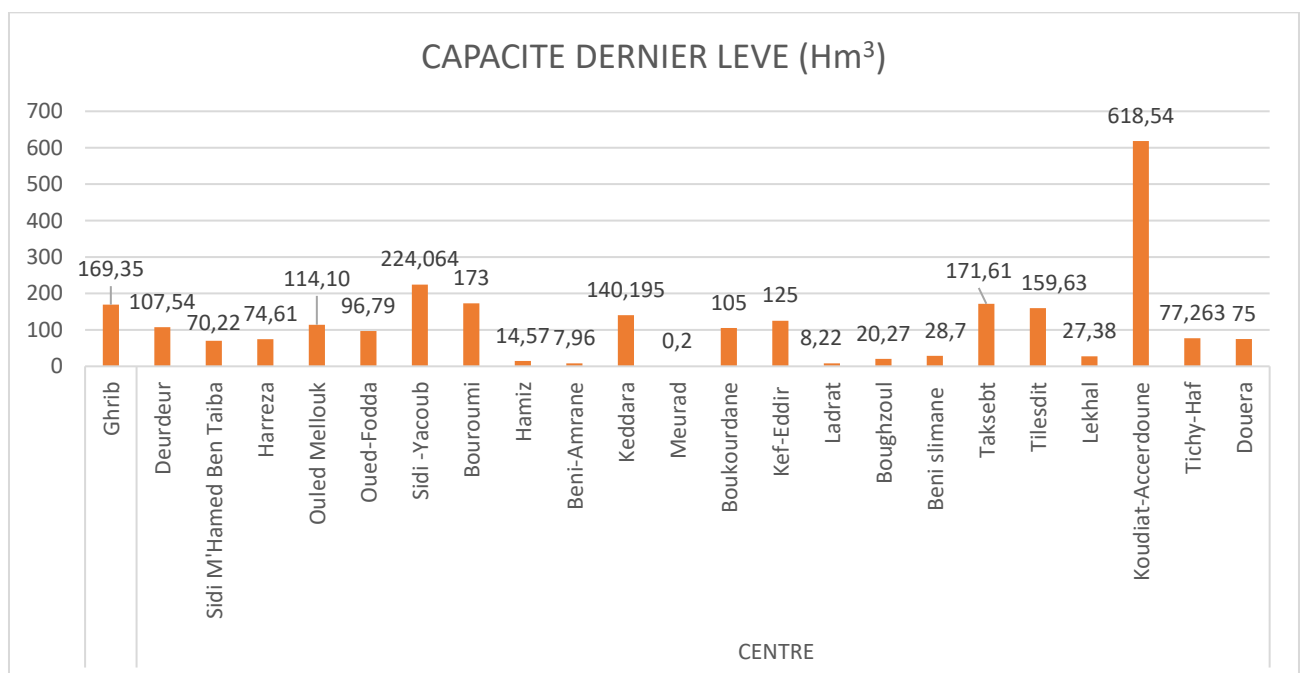


Figure II- 13 : capacité dernier levé (hm³) des barrages dans la région Centre (ANBT, 2022)

Nous constatons que la perte de capacité des barrages de la région du centre est moindre que celle de la région ouest, malgré sa grande capacité par rapport à cette dernière.

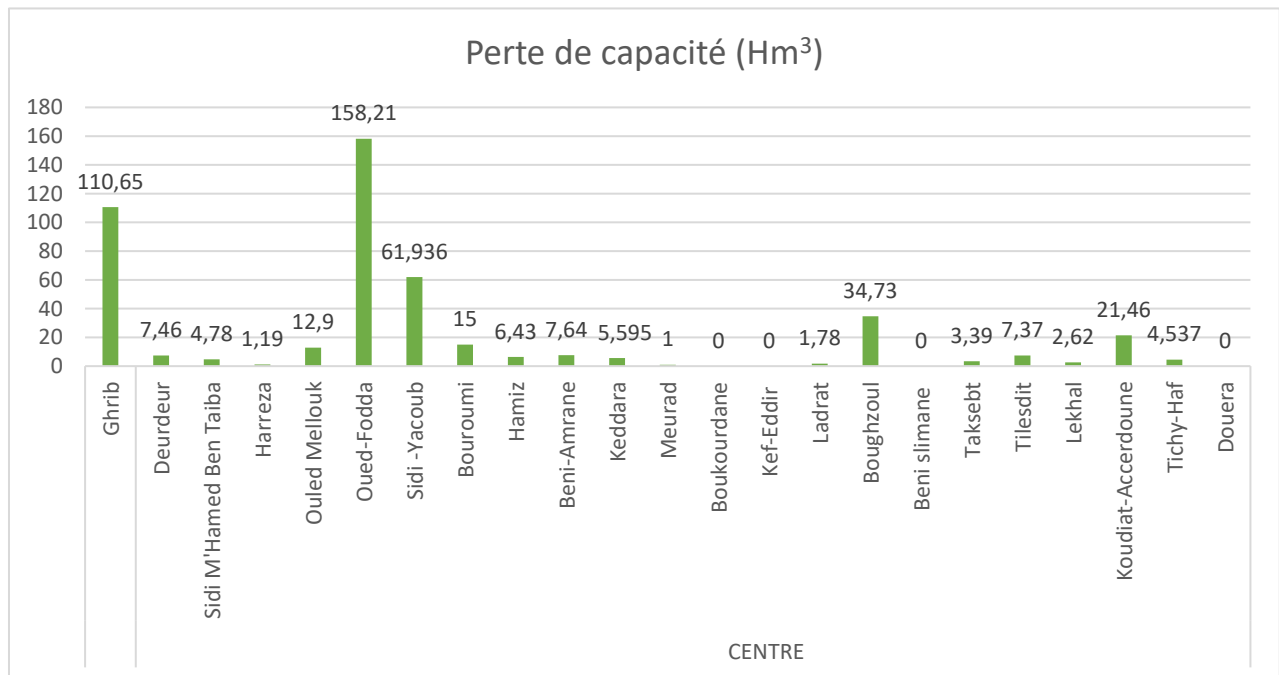


Figure II-14 : la perte de capacité Million m³ des barrages dans la région Centre (ANBT, 2022)

Nous notons également que la plus grande perte de capacité concerne le barrage d'Oued El-Fodda adjacent à la région ouest (Chlef), et c'est ce qui distingue ce dernier, bien qu'il existe des facteurs qui contribuent au phénomène d'envasement dans la région ouest.

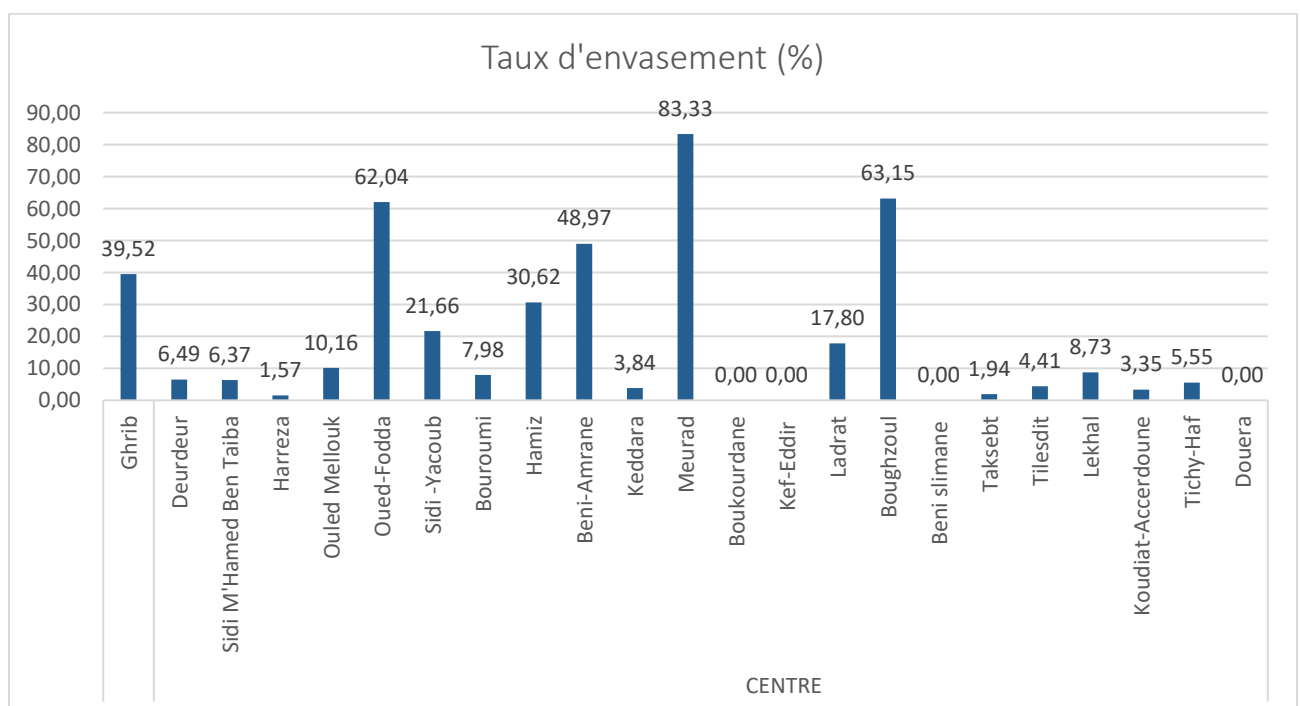


Figure II-15 : taux d'envasement (%) des barrages dans la région Centre (ANBT, 2022)

Le taux de perte de capacité dans la région centre varie entre 0 et 83 %. Sur 23 barrages, 6 barrages présentent un taux de perte supérieur à 30 %. Les autres barrages ont des taux inférieurs à ce taux, qui peuvent se résumer à une moyenne générale d'environ 15 %.

II-5-3-Région Est

La région Est possède 33 barrages, la capacité initiale totale est de 3826,1 Hm³, la capacité de dernière levée est de 3447,52 Hm³, la perte de capacité est de 365,465 Hm³/an et le taux d'envasement total est de 9,56 %. Les figures (II-16, II-17, II-18 et II-19) représentent des données de chaque barrage.

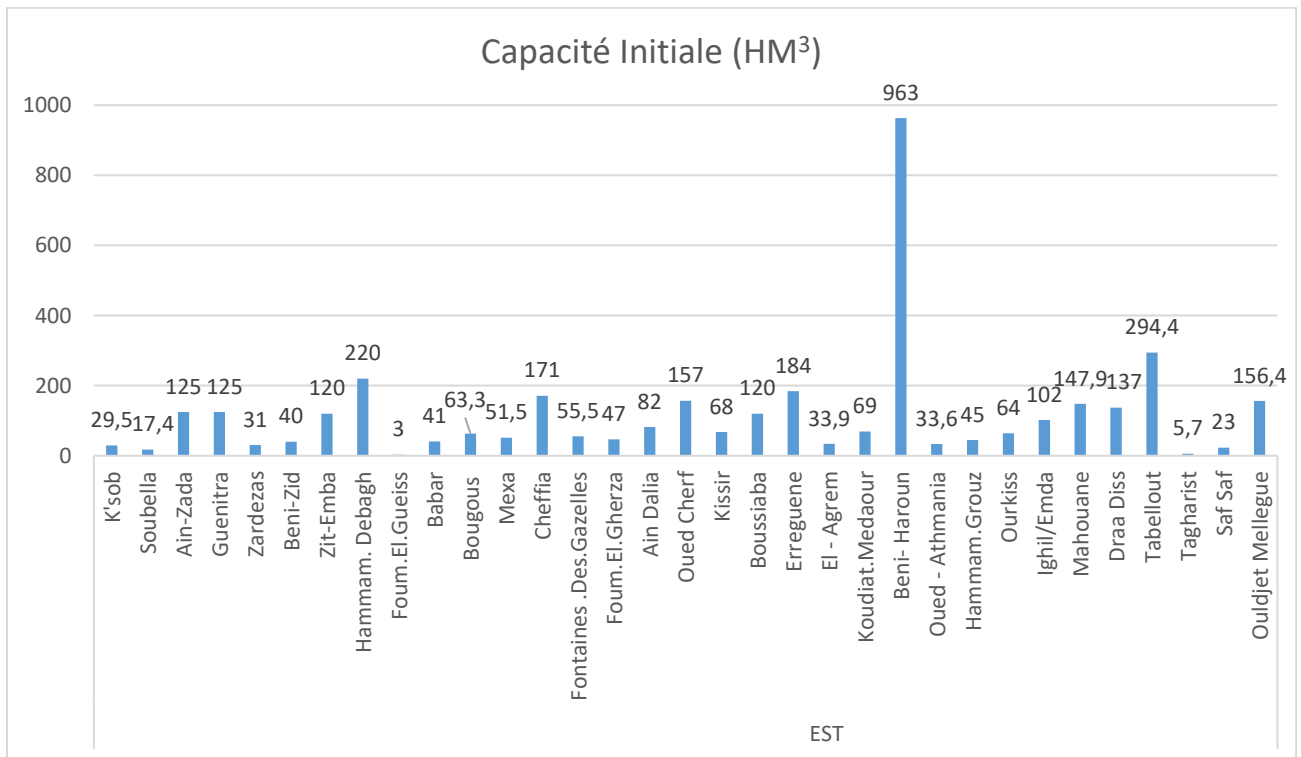


Figure II-16 : capacité initial (hm³) les barrages dans la région Est (ANBT, 2022)

La région de l'Est se caractérise par l'abondance des barrages par rapport aux autres. Ainsi, la capacité des barrages varie de 3 à 82 millions de mètres cubes (Hm³) dans 19 barrages, soit 21 %, tandis que ceux d'une capacité supérieure à 100 millions de mètres cubes (Hm³) sont 14 barrages, soit 79 %, dont le plus grand est le barrage de Bani Haroun (Mila), avec une capacité de 963 millions de mètres cubes (Hm³), soit 25 % à lui seul.

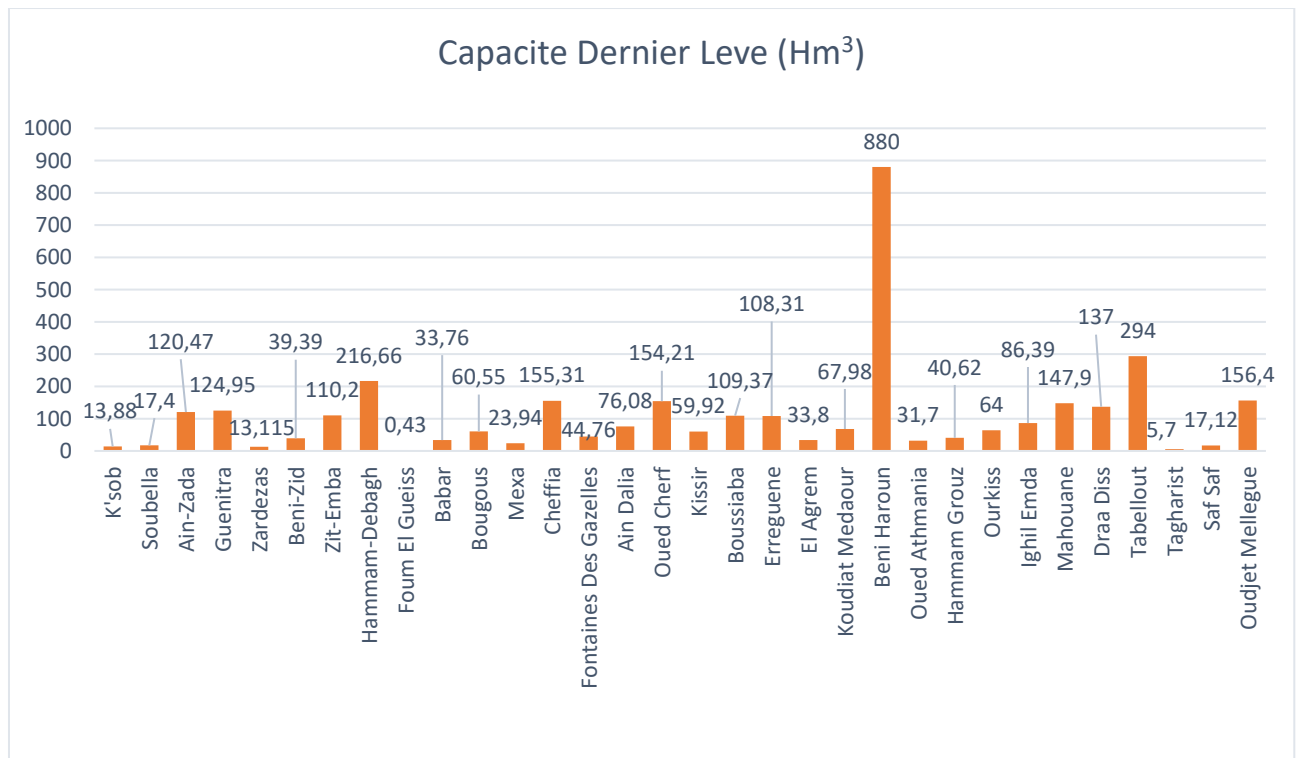


Figure II- 17 : capacité dernier levé (hm³) des barrages dans la région Est (ANBT, 2022)

Compte tenu du dernier suivi de la capacité des barrages, le barrage de Beni Haroun (Mila) reste le plus grand en termes de capacité en raison de sa grande capacité, suivi du barrage de Tabllout (Jijel) et du barrage de Hammam Debagh (Guelma), dans l'ordre.

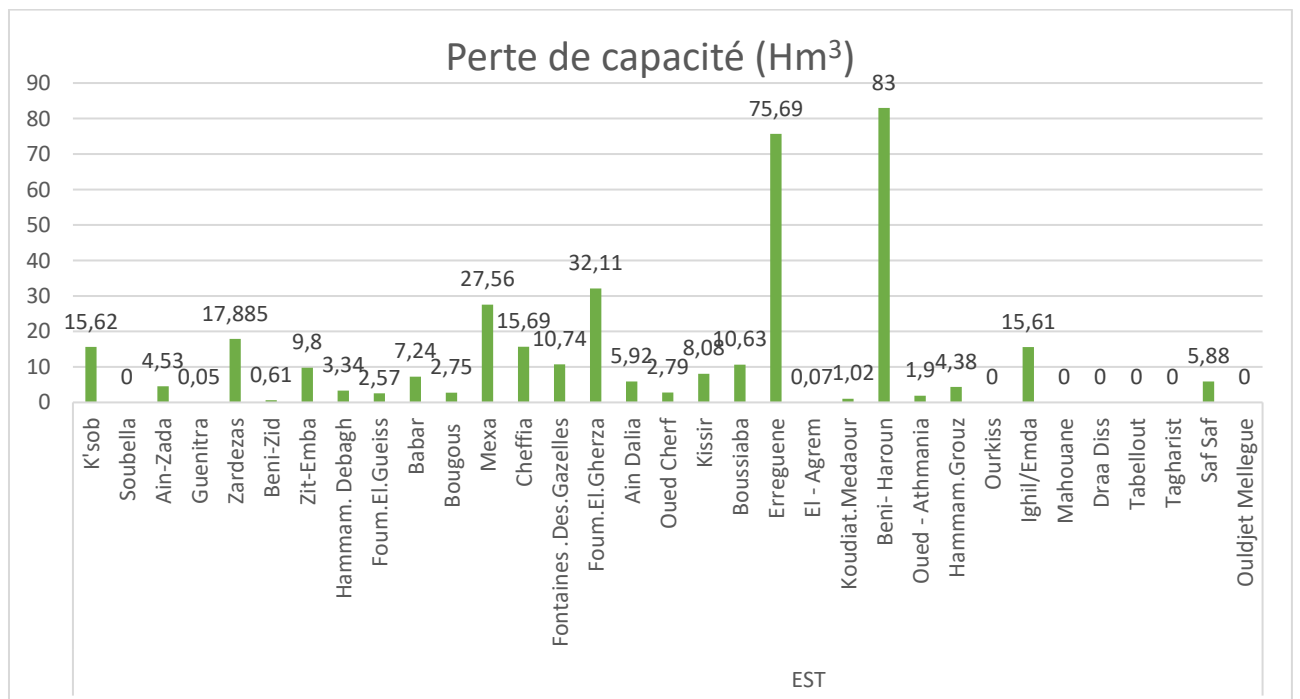


Figure II- 18 : la perte de capacité En (Hm³) des barrages dans la région Est (ANBT, 2022)

Nous remarquons à travers notre histogramme II-18 et II-19 concernant la perte de capacité et le taux de sédimentation dans la région Est qu'il y a 9 barrages avec un taux de sédimentation nul (2 sur 9 ayant un taux ne dépassant pas 1 %). C'est un indicateur positif, et il y a également 4 barrages dont le taux de sédimentation ne dépasse pas 2 %.

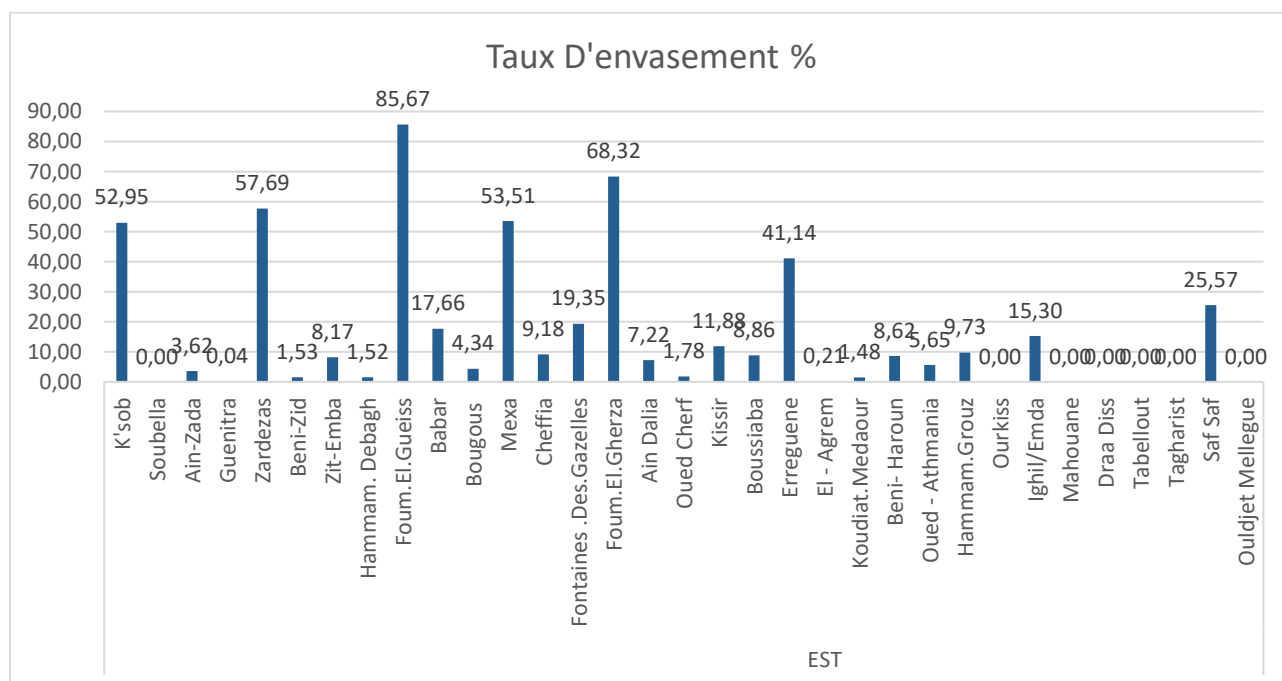


Figure II- 19 : taux d'envasement (%) des barrages dans la région Est (ANBT, 2022)

Les taux de sédimentation les plus élevés dans la région orientale varient entre 25 et 85 % et sont représentés par 7 barrages parmi 33, mais ces taux élevés ne concernent que les barrages de capacité moyenne, dont la capacité initiale totale est estimée à 346, soit 9 %. De plus, le taux moyen de sédimentation est également de 9 %.

II-6- Progression temporelle des dépôts de vases dans les barrages en Algérie :

Par la construction de barrages sur des rivières naturelles, l'homme altère le flux des éléments solides et les force à se sédimenter au fond des lacs formés par ces structures, diminuant ainsi graduellement leur capacité. Tous les barrages mondiaux sont potentiellement touchés par le processus d'envasement, mais les taux de sédimentation varient d'une région à l'autre. Il est regrettable que l'Algérie affiche les taux les plus élevés de sédimentation dans ses barrages à l'échelle mondiale. Dans cette recherche, nous avons analysé la progression de la capacité en eau des réservoirs depuis la construction du premier barrage (figure II-20) (Remini 2017).

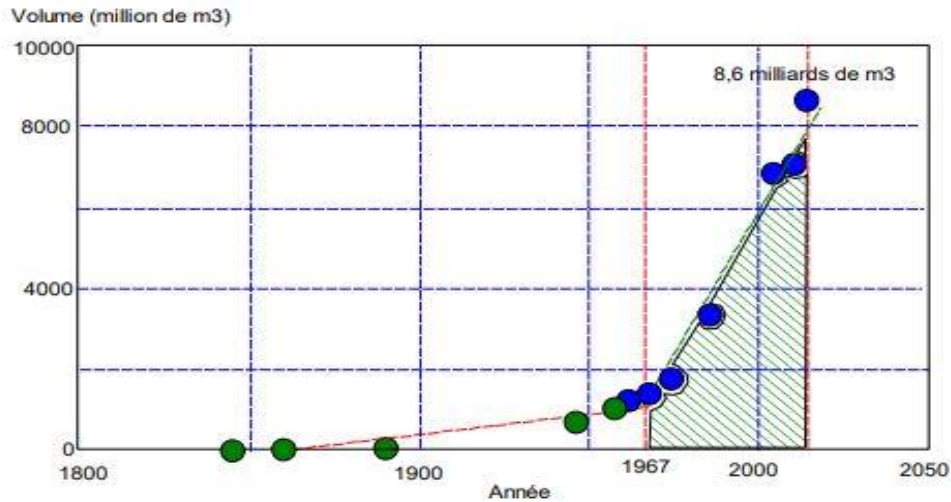


Figure II-20 : Historique de volume d'eau conservée dans les barrages. (Remini, 2017)

On note une augmentation progressive du volume d'eau emmagasinée depuis 1846, l'année de mise en service du premier barrage, le barrage de Sig, d'une capacité de 0,73 Hm³. Jusqu'à l'année 2014, la capacité des 74 barrages a grimpé pour atteindre 8650 Hm³. On note également qu'à partir des années 60, il y a une augmentation spectaculaire du volume d'eau grâce à la construction croissante de barrages de grande taille et à l'entretien des anciens barrages. Entre 1846 et 1962, la capacité d'eau a connu une hausse de 10 Hm³ par an. En revanche, entre 1962 et 2014, le volume d'eau a connu une hausse de 140 Hm³ par an. Simultanément à l'accroissement de la capacité des barrages en eaux de surface, nous avons observé la progression des accumulations de vase dans ces structures (figure II-21).

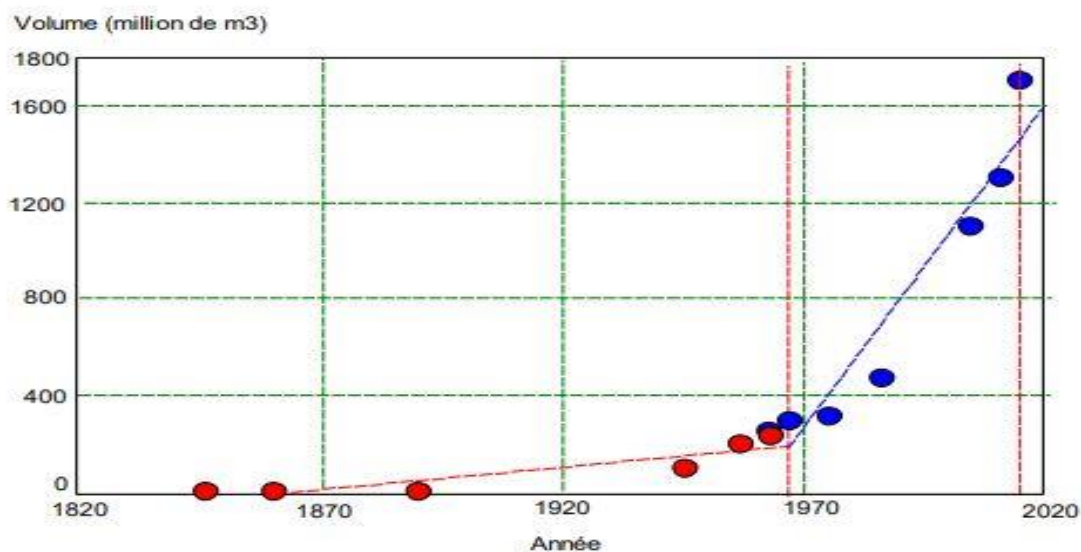


Figure II-21 : Evolution de l'envasement des barrages en Algérie (Remini 2017)

L'augmentation du volume d'eau est corrélée à un changement dans les dépôts de boue dans les barrages, qui suit une tendance similaire au volume d'eau. Depuis sa création, le barrage de Sig a connu un accroissement constant de l'envasement, qui a atteint 1700 Hm³ en 2014.

II-7- Taux de comblement ou bien sédimentation d'un barrage :

L'augmentation du taux d'envasement des barrages dépend de l'expansion de la capacité de rétention d'eau.

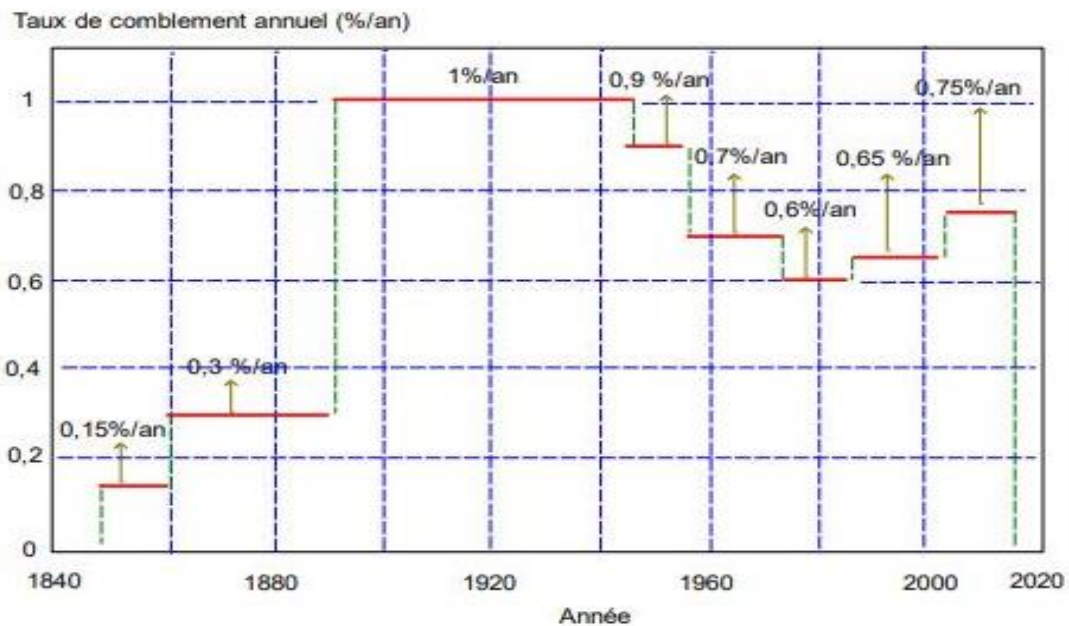


Figure II-22 : Evolution dans le temps du taux d'envasement des barrages (Remini 2017)

La figure II-22 illustre la progression du paramètre du taux d'envasement annuel de 1846 à 2014. Il est à noter que le volume moyen de sédiments accumulés par an a approché 65 millions de m³ au cours de la période 2004-2014. Toutefois, pendant la période de 1890 à 1945, le volume d'envasement n'atteint jamais 8,5 millions de m³ par an. Toutefois, nous ne sommes pas en mesure de conclure sur les fluctuations de l'envasement dans le temps.

Ainsi, nous avons illustré dans la figure II-23 les fluctuations temporelles du taux de remplissage des barrages. Il est remarquable que, en effet, le déclin annuel de capacité d'un barrage en %/an s'avère être l'indicateur le plus pertinent pour évaluer la sévérité du phénomène d'envasement.

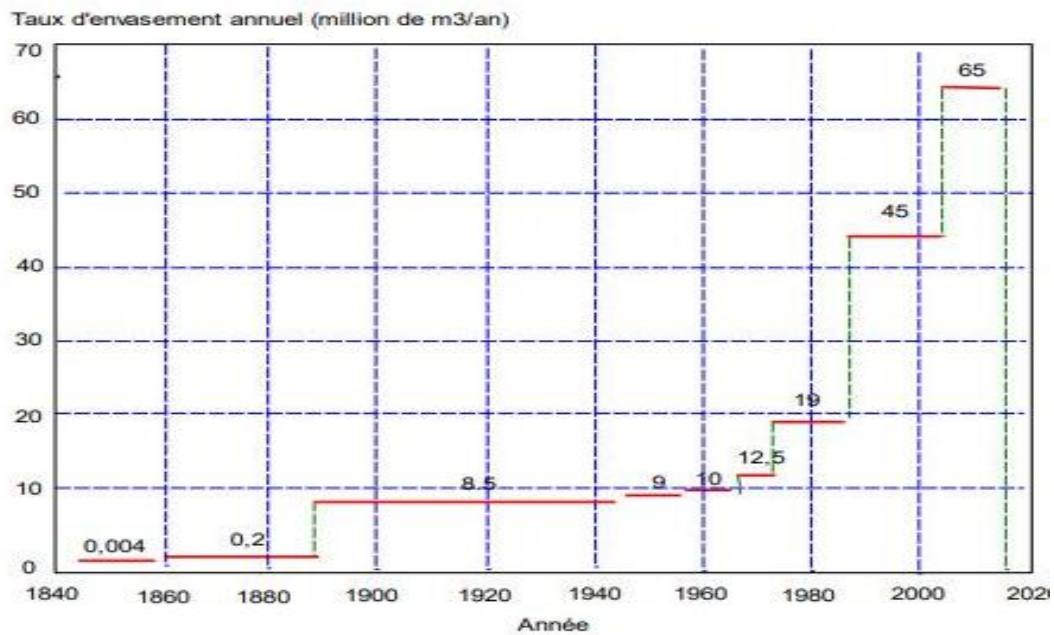


Figure II-23 : Progression temporelle du taux de remplissage des barrages (Remini 2017)

Entre 1864 et 1945, la diminution annuelle de la capacité des barrages a atteint 1 % par an, ce qui constitue le taux le plus élevé sur une période de cent cinquante ans d'exploitation des barrages.

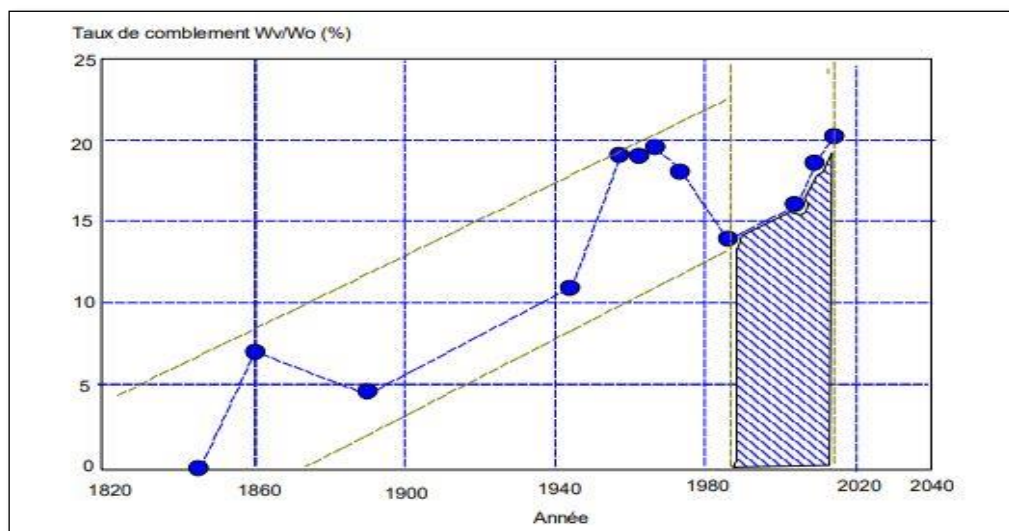


Figure II-24 : Diminution progressive de la capacité des barrages au fil du temps (Remini 2017).

Sur la figure II-24, nous avons illustré l'évolution temporelle de la diminution de capacité (%) due à l'accumulation successive de sédiments au fond des barrages, afin d'évaluer le volume perdu. Nous remarquons qu'au cours des années soixante-dix et quatre-vingt, il y a eu une réduction de volume occupée par la boue, passant de 19,5 % à 14 % en

1986. Ce résultat est attribué à la constance des saisons et aux travaux réalisés dans les bassins versants par les services appropriés. En revanche, à partir du début des années 90, le volume occupé par les boues a connu une hausse pour parvenir à un taux de remplissage de 20% en 2014. On n'a jamais atteint une telle capacité depuis 1846. Cette situation peut être attribuée à l'irrégularité des saisons, marquée par une longue période de sécheresse qui s'étend de mai à octobre. Les inondations d'automne, particulièrement destructrices pour les sols, se produisent souvent à un moment où la végétation est minimale ou absente et les sols sont rendus friables par le labour. Ces inondations entraînent une grande érosion.

II-8- Critères de classement des barrages en fonction de leur envasement :

Vitesse d'envasement

Le paramètre de l'envasement d'un barrage, exprimé en millions de mètres cubes de sédiments par an, ne représente pas fidèlement la situation réelle. Il est préférable d'utiliser le taux de comblement ou la vitesse de comblement annuel qui se mesure en pourcentage de capacité par an (%/an). Il est égal :

$$\eta = (WV/WO) / T \quad (II-1)$$

Avec :

Wv : Quantité de vase (millions de m³)

Wo : Capacité initial du barrage (millions de m³)

T : Période de fonctionnement du barrage (an)

L'évaluation du paramètre η doit être effectuée pour chaque barrage et à chaque relevé bathymétrique. Ce système permet aux départements d'hydraulique de catégoriser chaque barrage en fonction du niveau de risque d'envasement. L'évolution de l'envasement d'un barrage doit être surveillée à travers des relevés bathymétriques. Après deux années de fonctionnement, il peut être intéressant de déterminer le taux de remplissage annuel d'un nouveau barrage. Ainsi, nous sommes en mesure d'obtenir une compréhension de la catégorie du barrage dès le commencement de son utilisation. Afin de gérer efficacement le problème de l'envasement des barrages, nous avons défini un ordre hiérarchique des barrages basé sur le degré d'envasement, évalué selon le taux de colmatage annuel (%/an). Par conséquent, trois catégories de barrages se distinguent. Le tableau II-1 présente les chiffres du taux de remplissage annuel pour chaque type. Le taux de satisfaction annuel se calcule comme suit :

$(WV / WO) / T$, exprimé en pourcentage par an. Il est important de souligner que le taux de remplissage annuel reflète plus précisément l'envasement d'un barrage que le taux d'envasement.

Tableau II-1 : Les chiffres correspondant au taux de remplissage annuel pour chaque type

Classe	Type de barrage	Taux de remplissage annuel η (%an)
1	L'envasement représente une menace forte.	$\eta > 1$
2	L'envasement représente une menace moyenne.	$0,5 > \eta > 1$
3	L'envasement représente une menace faible.	$\eta < 0,5$

Au cours de son fonctionnement, le barrage accumule des sédiments lors de chaque crue. On peut évaluer le remplissage du barrage à n'importe quelle année. On peut simplement évaluer les dépôts en procédant à des levées bathymétriques. Le rapport Wv/Wo , qui détermine le taux de remplissage, peut fournir une indication sur la longévité du barrage. La classification d'un barrage en relation avec l'envasement est présentée dans le tableau II-2.

Le tableau II-2 : La catégorisation d'un barrage en fonction de son envasement.

Classification barrage selon le taux d'envasement	Taux de comblement
L'envasement du barrage est fort	$Wv / Wo > 20\%$
L'envasement du barrage est moyen	$10 \% < Wv/Wo < 20\%$
L'envasement du barrage est faible	$Wv / Wo < 10\%$

II-8-1- Classement des barrages en fonction de leur niveau d'envasement :

Afin de combattre le problème de l'envasement des barrages, Remini a suggéré une catégorisation des barrages en fonction du niveau d'envasement. Cela concerne les barrages fortement, modérément et faiblement envasés, à travers les données obtenues par la direction nationale des barrages et transfert nous avons classé chaque barrage en fonction son état actuel.

II-8-1-1- Barrages faiblement envasés :

D'après les récentes mesures bathymétriques réalisées par l'ANBT, 31 barrages peuvent être qualifiés de faiblement envasés (voir la figure II-25 et tableau II-3).

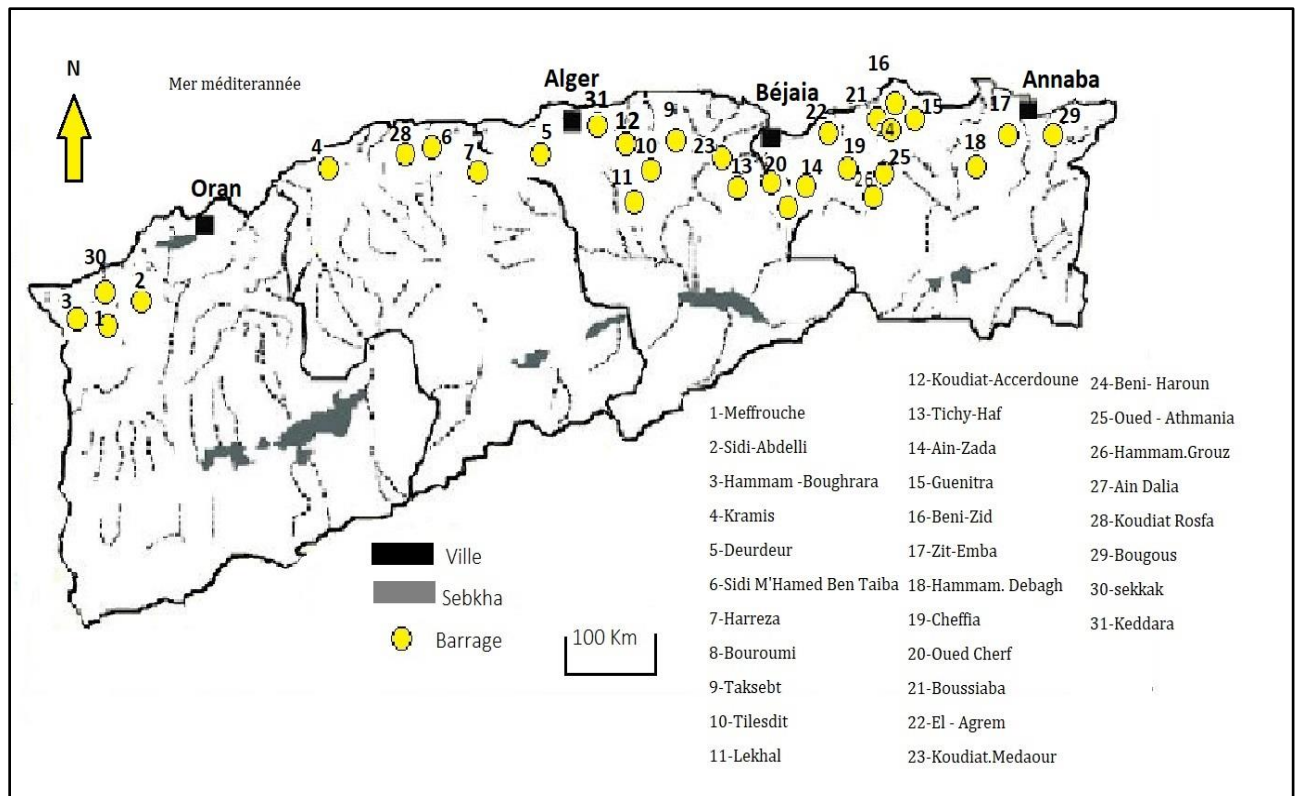


Figure II-25 : Positionnement des barrages à faible envasement

En d'autres termes, ils sont protégés contre l'envasement à court et moyen terme. Avec une capacité globale de 5175,09 Hm³ d'eau, il n'y a que 182,16 Hm³ de vases qui ont été accumulés au niveau des 31 barrages, ce qui correspond à un taux de remplissage de 5,17 % du volume total.

Tableau II-3 : Barrages faiblement envasés

N°	Barrage	Capacité initiale (Million m ³)	Capacité dernier levé (Million m ³)	Perte de capacité (Million m ³ /an)	Taux de comblement en 2020 (%)
1	Meffrouche	15	14,33	0,67	4,47
2	Sidi-Abdelli	110	102,03	7,97	7,25
3	Hammam -Bouhrara	177	161,3	15,97	9,02
4	Kramis	45,38	41,36	4,01	8,84
5	Deurdeur	115	107,54	7,46	6,79
6	Sidi M'Hamed Ben Taiba	75	70,22	4,78	6,37
7	Harreza	75,8	74,61	1,19	1,57
8	Bouroumi	188	173	15	7,98
9	Taksebt	175	171,61	3,39	1,94
10	Tilesdit	167	159,63	7,37	4,41
11	Lekhal	30	27,38	2,62	8,73

12	Koudiat-Accerdoune	640	618,54	21,46	335
13	Tichy-Haf	81,8	77,26	4,53	5,55
14	Ain-Zada	125	120,47	4,53	3,62
15	Guenitra	125	124,95	0,05	0,04
16	Beni-Zid	40	39,39	0,61	1,53
17	Zit-Emba	120	110,02	9,8	8,17
18	Hammam. Debagh	220	216,66	3,34	1,52
19	Cheffia	171	155,31	15,69	9,18
20	Oued Cherf	157	154,21	2,79	1,78
21	Boussiaba	120	109,37	10,63	8,86
22	El - Agrem	33,9	33,83	0,07	0,21
23	Koudiat.Medaour	69	67,98	1,02	1,78
24	Beni- Haroun	963	880	83	8,62
25	Oued - Athmania	33,6	31,7	1,9	5,65
26	Hammam.Grouz	45	40,62	4,38	9,73
27	Ain Dalia	82	76,08	5,92	9,73
28	Koudiat Rosfa	73	66,04	6,96	9,53
29	Bougous	63,3	60,55	2,75	4,34
30	sekkak	25,5	24,09	1,41	5,53
31	keddara	145,79	140,19	5,59	3,84
-	Total	5175,09	4250,27	182,16	5,17 %

À court et à moyen terme, l'envasement de ces barrages ne pose aucun risque. L'absence de courants de densité dans les retenues des barrages est attestée par les faibles niveaux de particules fines observés dans les oueds principaux des bassins versants.

La plupart des barrages à faible envasement sont situés dans la région Est, suivie de la région Centre et enfin de la région Ouest, où se trouvent 6 barrages, soit 19 %, sur 31 barrages.

II-8-1-2- Barrages à envasement moyen :

D'après les récentes mesures bathymétriques, nous avons identifié 11 barrages que nous jugeons comme étant moyennement envasés (figure II-26 et tableau II-4).

Avec une capacité totale de 698,1 Hm³, ces barrages ont accumulé un volume de sédiments atteignant 119,44 Hm³, ce qui équivaut à un taux de remplissage de 14,55 % de leur capacité totale. Nous considérons cette valeur comme étant moyenne. Toutefois, il est impératif que les services d'hydraulique surveillent de près ces barrages en effectuant des relevés bathymétriques réguliers.

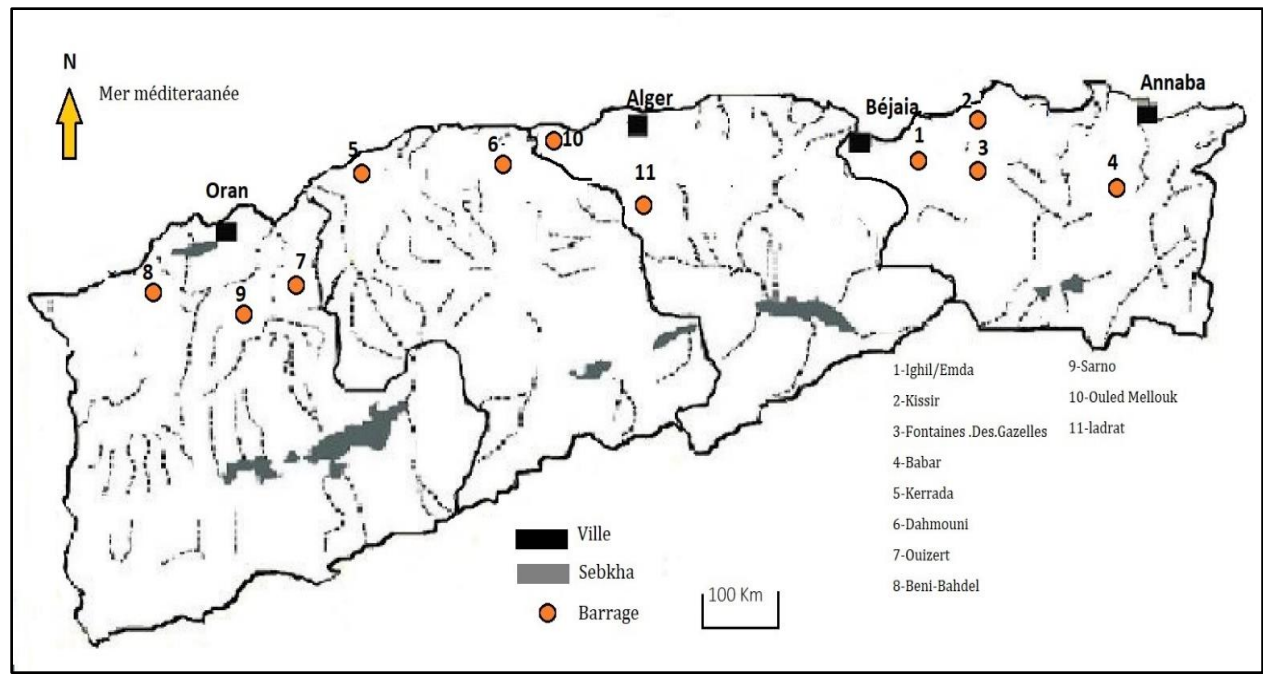


Figure II-26 : Localisation des barrages Moyennement envasés

Tableau II-4 : Barrages moyennement envasés

N°	Barrage	Capacité initiale (Million m ³)	Capacité dernier levé (Million m ³)	Perte de capacité (Million m ³ /an)	Taux de comblement en 2020 (%)
1	Ighil/Emda	102	86,39	15,61	15,30
2	Kissir	68	59,92	8,08	11,88
3	Fontaines Des Gazelles	55,5	14,89	32,11	19,35
4	Babar	41	33,76	7,24	17,66
5	Kerrada	69,50	60,65	8,85	12,73
6	Dahmouni	40,1	35,51	4,59	11,45
7	Ouizert	100	84,3	15,7	15,70
8	Beni-Bahdel	63	51,9	11,1	17,62
9	Sarno	22	19,71	2,29	10,41
10	Ouled Mellouk	127	114,1	12,09	10,16
11	Ladtrat	10	8,22	1,78	17,80
-	Total	698,1	569,05	119,44	14,55 %

Comme le montre la figure II-26 et le tableau II-4, les barrages à envasement moyen sont presque égaux dans les trois zones. En ce qui concerne les taux partiels, la région centrale est la plus basse (13,14 %), suivie de la région Ouest (14,12 %) et enfin de la région Est (16,05 %).

II-8-1-3- Barrages fortement envasés :

Parmi les 80 barrages actuellement en service, 24 d'entre eux sont fortement menacés par le processus de l'envasement (voir figure II-27 et tableau II-5). Avec un volume total de 2747,49 Hm³ ainsi que 1017,42 Hm³ de boue évacuée lors des inondations, sont actuellement entassés au fond de ces 20 barrages. Le taux de remplissage atteint 48,31 % du volume total.

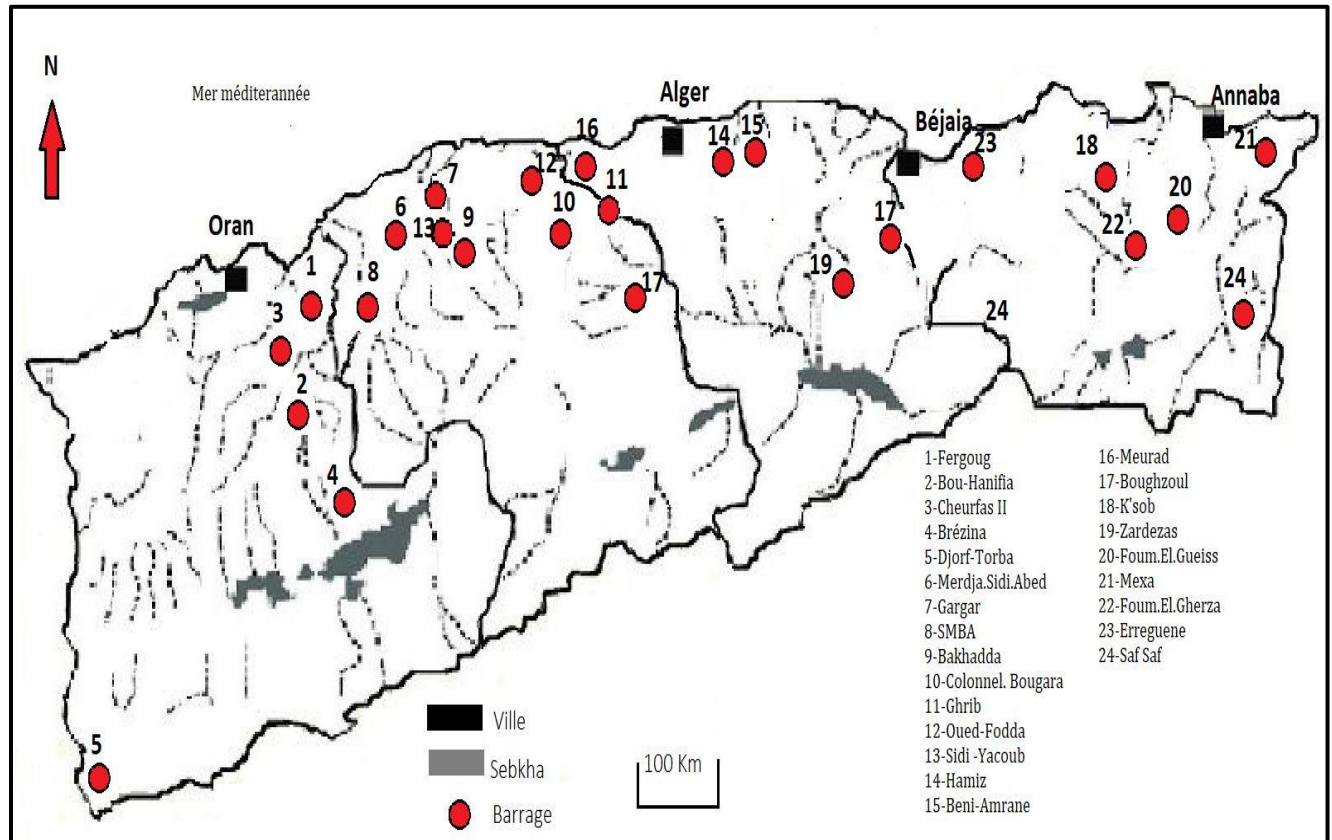


Figure II-27 : Localisation des barrages Fortement envasés

Les barrages fortement envasés sont généralement situés dans la région ouest de l'Algérie. Les barrages tels que Fergoug, Brézina et Boughzoul, qui présentent des taux d'envasement très élevés, sont situés dans les régions occidentales du pays. En revanche, certains barrages situés à l'est, comme ceux de Zerdaza (Skikda), K'soub (M'sila) et de Foum El Gherza (Biskra), subissent également des niveaux d'envasement importants, mais ils sont généralement inférieurs à ceux des barrages de l'ouest. Cela pourrait être le résultat de différences géographiques ou de facteurs environnementaux qui affectent les taux de sédimentation dans ces zones. L'analyse globale indique des défis plus importants dans la gestion des barrages dans l'ouest de l'Algérie en raison de leurs taux de sédimentation élevés.

Tableau II-5 : Barrages fortement envasés

N°	Barrage	Capacité initiale (Million m ³)	Capacité dernier levé (Million m ³)	Perte de capacité (Million m ³ /an)	Taux de comblement en 2020 (%)
1	Fergoug	18	1,02	16,98	94,33
2	Bou-Hanifia	73	34,51	38,48	52,72
3	Cheurfas II	83,19	60,03	23,15	27,83
4	Brézina	122,5	47,74	74,76	61,03
5	Djorf-Torba	350	260,25	89,75	25,64
6	Merdja.Sidi.Abed	58	44,86	13,14	22,66
7	Gargar	450	283,49	166,51	37,00
8	SMBA	241	125,32	15,68	48,00
9	Bakhadda	56	37,26	18,74	33,46
10	Colonnel. Bougara	13	10,04	2,96	22,77
11	Ghrib	280	169,35	110,56	39,52
12	Oued-Fodda	255	96,79	158,21	62,04
13	Sidi -Yacoub	286	224,06	61,39	21,66
14	Hamiz	21	14,57	6,43	30,62
15	Beni-Amrane	15,6	7,96	7,64	48,97
16	Meurad	1,2	0,2	1	83,33
17	Boughzoul	55	20,27	34,73	63,15
18	K'sob	29,5	13,88	15,62	52,95
19	Zardezas	31	13,11	17,88	57,69
20	Foum.El.Gueiss	3	0,43	2,57	85,67
21	Mexa	51,5	23,94	27,56	53,51
22	Foum.El.Gherza	47	14,89	32,11	68,32
23	Erreguene	184	108,31	75,69	41,14
24	Saf Saf	23	17,12	5,88	25,57
-	Total	2747,49	1629,4	1017,42	48,31

II-8-1-4- Nouveaux barrages mis en exploitation

Selon l'ANBT 14 barrages sont considérés comme des nouveaux barrages figure II-28 et tableau II-6). D'un volume total de 1252 million de m³, Possédant un taux d'envasement nul 0%, ces barrages peuvent classer dans les barrages faiblement envasés.

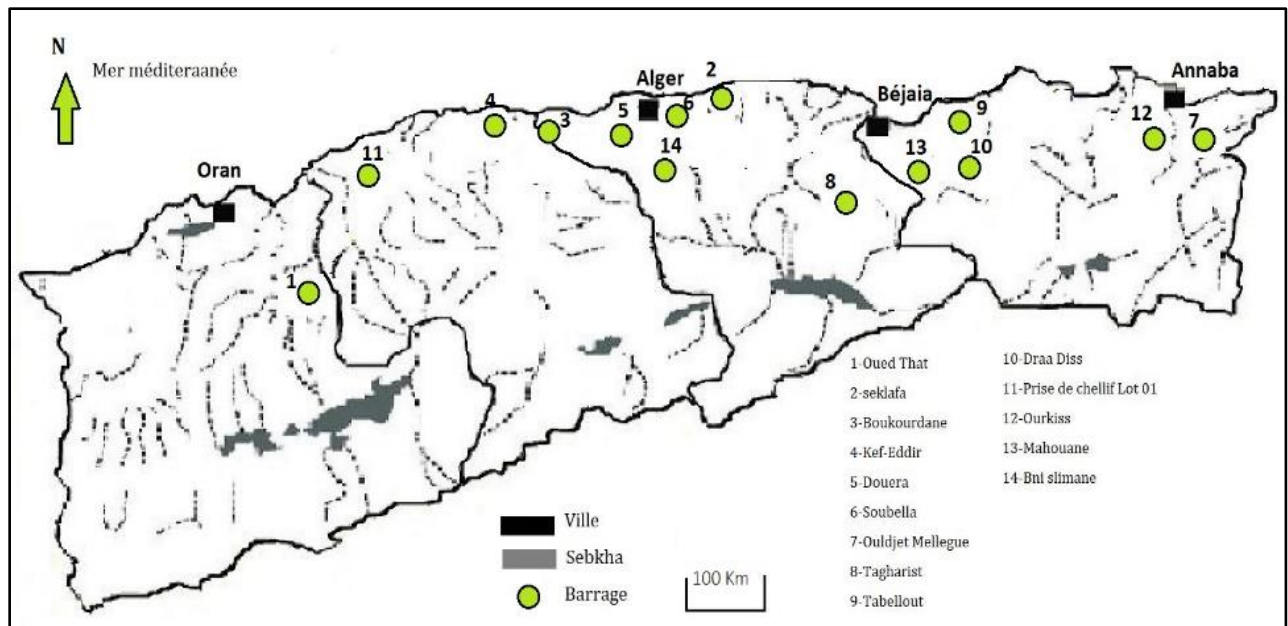


Figure II-28 : Localisation des nouveaux barrages

Ces données montrent que les nouveaux barrages en Algérie se distinguent par de fortes capacités de stockage sans aucune perte de capacité de stockage jusqu'en 2020.

Tableau II-6 : les nouveaux barrages

N°	Barrage	Capacité initiale (Hm ³)	Capacité dernier levé (Hm ³)	Perte de capacité (Hm ³ /an)	Taux de comblement en 2020 (%)
1	Oued Taht	7	7	0	0
2	Seklafa	42	42	0	0
3	Boukourdane	101,5	105	0	0
4	Kef-Eddir	125	125	0	0
5	Douera	75	75	0	0
6	Soubella	17,4	17,40	0	0
7	Ouldjet Mellegue	156,4	156,4	0	0
8	Tagharist	5,7	5,7	0	0
9	Tabellout	294,4	294,4	0	0
10	Draa Diss	137	137	0	0
11	Prise de chellif Lot 01	50	62,87	0	0
12	Ourkiss	64	64	0	0
13	Mahouane	147,9	147,9	0	0
14	Bni slimane	28,7	28,7	0	0
-	Total	1 252	1 268,37	0	0

Des barrages comme Tabellout (Jijel) et Kef-Eddir (Tipaza) et Draa Diss (Sétif) se distinguent par de grandes capacités atteignant des centaines de millions de mètres cubes, tout en conservant pleinement leur capacité de stockage d'origine. D'autre part, les barrages de plus petite capacité comme Oued Tahat (Mascara) et Tagharist (Khenchela) montrent la même efficacité sans perte de capacité. Le total montre que ces barrages sont capables de surmonter les défis liés aux sédiments par rapport aux anciens barrages, avec une capacité totale de 1 252 Hm³, qui a été dépassée dans certains cas pour atteindre 1 268,37 Hm³ grâce à un bon entretien et une planification efficace. Cela reflète le succès de l'Algérie dans la création d'une infrastructure moderne et intégrée répondant aux besoins en eau croissants du pays.

II-9– L'envasement des barrages de wilaya de Mascara :

D'après la direction des ressources en eau La région de Mascara dispose de cinq barrages (figure II-29), les quels présentent un Capacité initial total de 278 Hm³, la capacité actuelle total de 196,87 Hm³ dont le taux de remplissage est de 17,87 % et un taux d'envasement de 29,33%. Par ailleurs, et comme cela est présenté dans le tableau II-7, la réduction de l'aptitude de stockage du barrage de Fergoug est de 78 % et cette suite à l'état d'envasement dans lequel se trouve le barrage. Il est essentiel de noter à ce sujet que, pour l'Algérie, un barrage a une durée de vie comprise entre 30 et 50 ans.

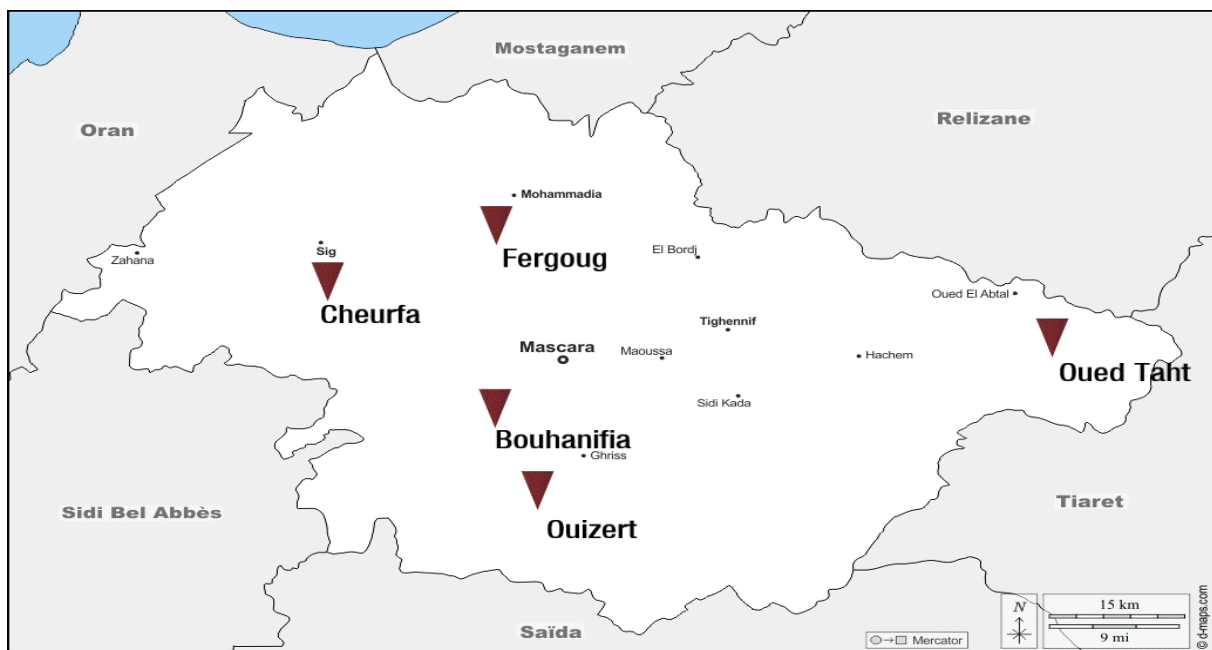


Figure II-29 : position des barrages de la Wilaya du Mascara

D'après les caractéristiques des différents barrages de la région de Mascara présentées dans le tableau II-7, la contribution du barrage de Fergoug est pratiquement négligeable. En effet, ce dernier présente un taux d'envasement relativement élevé. Parmi les huit communes approvisionnées de la wilaya se trouvent les communes de Sig et de Mohammadia qui exploitent les débits les plus importants, soit respectivement. (Semari, 2012)

II-9-1-Etat des barrages à travers la Wilaya de Mascara (2022) :

Selon la direction Des Ressources en Eau de la wilaya de Mascara, les données présentées dans le tableau II-7 reflètent les différents défis liés à la gestion des ressources en eau dans la région. Il apparaît que le barrage de Fergoug souffre du taux de sédimentation le plus élevé, atteignant 94,26 %, ce qui a entraîné une diminution significative de sa capacité opérationnelle, ne retenant qu'une très petite quantité d'eau stockée par rapport à sa capacité initiale. En revanche, le barrage de Ouled Taht conserve un excellent état, sans sédiments affectant sa capacité, avec un taux de remplissage dépassant 100 %, ce qui reflète une haute efficacité opérationnelle. Les barrages comme Bouhanifia et Chorfa montrent des défis modérés avec des taux de sédiments variant entre 27 % et 50 %, tandis que le barrage de Ouizert présente le plus bas taux de sédiments parmi les grands barrages, à 6,09 %. Cependant, son taux de remplissage reste faible à 6,28 %, ce qui indique un manque d'eau stockée par rapport à sa capacité.

Tableau II-7 : Situation des barrages en la Wilaya du Mascara

Nom de barrage	Capacité initiale (Hm ³)	Capacité actuelle du Barrage (Hm ³)	06/02/2022 (Hm ³)	Actuel volume d'eau stocké 22/03/2022 (Hm ³)	Taux de Remplissage (%)	Taux D'envasement (%)
Fergoug	18	1,033	1,03	1,033	100	94,26
Bouhanifia	70	34,52	3,85	9,29	26,91	50,69
Chorfa	83	60,003	9,423	11,695	19,49	27,21
Ouizert	100	93,91	3,72	5,9	6,28	6,09
Oued That	7	7	6,771	7,184	102,63	0

Ces chiffres soulignent l'importance de surveiller les sédiments et de mettre en œuvre des stratégies efficaces de maintenance et de renouvellement pour améliorer l'efficacité des barrages et garantir qu'ils continuent à répondre aux besoins en eau de la région.

II-10- Conclusion :

L'envasement du barrage est un phénomène mondial dont souffrent la plupart des pays et est considérée comme une menace réelle pour la durabilité du barrage. Sans aucun doute, l'Algérie fait partie des pays qui ont un taux élevé d'envasement. Dans ce chapitre, nous mettons en lumière la situation des barrages en Algérie à travers les données obtenues par l'Agence Nationale des Barrages et transferts. L'Algérie a une capacité de stockage estimée à 9 204,66 Hm³. En revanche, le volume de vase est d'environ 1 473,882 Hm³, donc le taux d'envasement total est de 17,47 %. Ce chiffre est inquiétant car il affecte négativement sur le rôle des barrages.

Chapitre III : Partie Expérimental

III-1 Introduction

Après avoir présenté les barrages de la wilaya de Mascara, les sédiments prélevés de ces barrages seront identifiés. Cette étude expérimentale vise à identifier leurs propriétés chimiques, physiques et mécaniques. Grâce à leurs propriétés, on peut identifier des approches de développement à un stade ultérieur. Avant de commencer la détermination des paramètres mentionnés précédemment, la préparation des échantillons a été le point de départ. Arrivez ensuite à la conclusion liée à ce même chapitre. Des analyses chimiques, physiques et mécaniques sont effectuées dans les laboratoires suivants:

- Laboratoire universitaire de Génie Civil de l'université de Mascara ;
- Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (LTPO), Antenne de Saïda ;
- Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC), de Sidi Bel Abbes ;
- Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (LTPO), Direction Générale-Unité d'Oran.

III-2 Préparation de l'échantillon :

III-2-1 Zone d'échantillonnage

Des échantillons ont été prélevés dans quatre zones différentes en aval où les sédiments sont présents en grande quantité. Nous avons prélevé environ 35 kg d'une profondeur de cinq à trente-cinq centimètres.

Les échantillons sont séchés avec une température ne passant pas 50 °C.



Figure III-1 : Prélèvement des sédiments dans la retenue du barrage de Fergoug (Mars 2017).



Figure III-2 : Les sédiments prélevés dans la retenue du barrage de Bouhanifia (Mars 2017).

Le sédiment est préparé de manière à ne pas modifier ses propriétés. Il se présente sous forme de masses humides (figure III-1 et III-2).

Pour réaliser des essais de caractérisation, nous nettoyons les sédiments des impuretés étrangères, puis les mettons dans l'eau pendant de longues heures (environ 48 heures), jusqu'à ce que leurs particules se séparent les unes des autres et se décantent jusqu'à pouvoir éliminer l'eau. La température de séchage ne dépasse pas 50 °C. Après le séchage, on les gratte pour les séparer. Les particules se séparent les unes des autres sans changer leur taille, et enfin on les stocke dans des récipients en plastique fermé.

III-2-2 Observation :

Visuellement, après le lavage, séchage et séparation, les sédiments des quatre barrages sont aperçus sous la forme d'une poudre grise pour les sédiments de Chorfa et Fergoug et de couleur marron clair pour les sédiments de Bouhnifia et Ouizert, comme illustré (figure III-3). Le Tuf Sidi Ali Cherif (TSC) a été tamisé dans le tamis de diamètre 5 mm.

En contact avec de l'eau, les vases (les sédiments) deviennent collantes et difficiles à utiliser. Les essais d'identification des matériaux sont présentés comme suit :

- Essais chimiques à savoir :
 - P^H (Potentiel hydrogène) ;
 - L'analyse chimique par spectrométrie à la fluorescence X « XRF » ;
 - La composition minéralogique avec la diffraction aux rayons X « XRD » ;
 - Teneur en eau (Test d'humidité) ;



Figure III-3 : Photographie des sédiments et Tuf (TSC)

- Le taux de la matière organique, M.O ;
- La valeur de bleu de méthylène VBS ;
- L'essai de la teneur en CaCO_3 , Calcimètre ;
- Essais physiques à savoir :
 - L'analyse granulométriques des vases ;
 - Limite d'Atterberg ;
- Essais mécaniques à savoir :
 - Compactage au Proctor normal et modifié ;
 - Essai de portance CBR, IPI ;

III-3 Détermination les essais chimiques sur les vases :

III-3-1 P^{H} (Potentiel Hydrogène) :

Le P^{H} est un paramètre clé de notre étude, influençant potentiellement la mobilité des éléments chimiques. Sa mesure est effectuée au LNHC conformément à la norme ISO 10390 (2005). Le principe de la méthode est l'équilibre ionique d'une masse de solide donnée avec un volume d'eau déminéralisée donné. La norme consiste à peser 10 grammes de sédiments et à ajouter 25 ml de l'eau distillée dans le récipient. La solution est ensuite agitée pendant 60 minutes en utilisant un agitateur magnétique dans une chambre à $20^{\circ}\text{C} + 2^{\circ}\text{C}$ de température.



Figure III-4 : Mesure de P^H des vases selon la norme ISO 10390 (2005).

La suspension obtenue est laissée deux heures et On utilise un P^H -mètre pour mesurer le P^H (figure III-4) (ISO 10390, 2005).

III-3-2 L'analyse chimique par spectrométrie à la fluorescence X « XRF » :

III-3-2-1 Introduction

L'analyse élémentaire globale par spectrométrie de fluorescence X permet d'identifier et de déterminer la majorité des composants chimiques d'un échantillon. Cette méthode est adaptée à une grande diversité de matériaux : produits minéraux, ciments, céramiques, verres, métaux, huiles, eau et autres qu'ils soient solides ou liquides. Elle offre la possibilité d'analyser tous les composés chimiques allant du Béryllium (Be) à l'Uranium (U) dans des doses de l'ordre de certaines ppm à 100%, avec des résultats précis et notamment reproductibles.

III-3-2-2 Principe

L'échantillon à analyser est soumis à un rayonnement X primaire. Sous l'impact de ce rayonnement, les atomes de l'échantillon absorbent de l'énergie et passent de leur état fondamental à un état excité. Cet état excité étant instable, les atomes tendent à retourner à leur état fondamental en libérant l'énergie excédentaire sous la forme de photons X. Chaque type d'atome, en raison de sa configuration électronique spécifique, émet alors des photons X possédant une énergie et une longueur d'onde qui lui sont caractéristiques. Cette émission secondaire de rayons X, propre aux atomes composant l'échantillon, est appelée fluorescence X. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet ainsi de déterminer à la fois la nature des éléments chimiques présents dans l'échantillon (analyse qualitative) et leur concentration massique (analyse quantitative).

III-3-2-3 Rayons X et fluorescence

Le rayon X est une forme d'onde électromagnétique. Des plus énergétiques aux moins énergétiques. Parmi elles, on trouve les rayons gamma (les plus énergétiques), suivis des rayons X, des ultraviolets, de la lumière visible et enfin de l'infrarouge (les moins énergétiques). La zone du spectre électromagnétique qui se situe entre 100 eV et 1 MeV est appelée rayons X. La quantité d'énergie présente dans les photons X est donc beaucoup plus élevée que celle des photons lumineux et est assez élevée pour éjecter des électrons situés au centre des atomes. L'énergie E d'un photon ($E = h.c/\lambda$) est liée à sa longueur d'onde λ d'un photon, où (c) est la vitesse de la lumière (3,108 m/s) et h correspond à la constante de Planck ($6,6.10^{-34}$ J.s).



Figure III-5 : Appareil XRF (BRUKER) au niveau de Lafarge-Holcim unité Oggaz Mascara.

Les sources de rayonnements X couramment utilisées en spectrométrie de fluorescence X sont les tubes à rayons X ou les sources radioactives (principalement pour les appareils portables, mais qui tendent à disparaître avec l'émergence des mini-tubes). Du fait de leur immense énergie, les photons X émis avec un tube peuvent tirer des électrons présents sur les strates proches du noyau des atomes. L'atome ionisé tendra alors à retrouver l'équilibre : Un électron issu d'une couche supérieure vient combler l'espace laissé vacant par l'électron éjecté. L'énergie est libérée lors de cette transition électronique sous forme d'un photon X d'énergie spécifique de l'atome. Il s'agit du processus de fluorescence X. Il est possible de réaliser différentes transitions électroniques, ce qui permet à un atome d'émettre différents types de photons X. On utilise la notation de Siegbahn pour les désigner, on dit des raies $K\alpha$, $K\beta$, $L\alpha$, $L\beta$... (Valérie Thirion-Merle, 2014).

III-3-3 La composition minéralogique avec la diffraction aux rayons X « XRD » ;

III-3-3-1 Introduction

L'analyse par diffraction des rayons X, également connue sous le nom de DRX, se base sur le phénomène de diffraction des rayons X dans les matériaux, en particulier lorsqu'elle est cristalline. Elle vise à examiner les différentes étapes de la matière. Les rayons X diffractés sont une diffusion élastique. Ce mot fait référence à la persistance de l'énergie des photons, à leur longueur inchangée. Les interférences sont plus prononcées lorsque la matière est organisée. Quant aux matériaux cristallins, il s'agit de diffusion.

III-3-3-2 Principe

La diffraction des rayons X offre ainsi la possibilité d'obtenir des données quantitatives qui se retrouvent dans l'organisation même des composants d'un matériau. Il y a aussi des données qualitatives qui permettent de repérer les divers composés cristallins d'un matériau et leurs structures cristallines.

Le dispositif de mesure est désigné sous l'appellation de chambre de diffraction lorsqu'il est utilisé pour la photographie et de diffractomètre lorsqu'il est équipé d'un système de comptage des photons. Les résultats obtenus sont utilisés pour créer un diagramme de diffraction ou diffractogramme.

La diffraction des rayons X est couramment employée dans les secteurs de la céramique, de la métallurgie, de la géochimie, du médical, etc.



Figure III-6 : Appareil DRX (BRUKER) au niveau de Lafarge-Holcim unité Oggaz Mascara.

Illustrations d'analyses possibles à l'aide de la DRX :

- Reconnaissance et quantification partielle des minéraux argileux ;
- Reconnaissance les différentes phases cristallines et l'existence de calcaire ;
- Une analyse minéralogique de la partie argileuse, incluant une identification précise et une mesure du taux en montmorillonite. ;
- Identifier et quantifier les phases minérales NaCl et KCl (<https://www.analytice.com>, 2020).

III-3-4 Teneur en eau (Test d'humidité) ;

Selon la norme ISO 17892-1 (2014), l'étuvage entraîne la diminution de l'eau dans un échantillon. Par pesage, on évalue les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée.

III-3-4-1 Mode d'opérateur :

L'essai consiste à placer la masse (m) du sol de l'étude choisi dans une bac ou un

réipient nettoyé et sec de poids connu (M_1) et placer l'ensemble dans l'étuve à une température de 50°C pour les matériaux sensibles à la chaleur et à 105°C pour les matériaux insensibles à la chaleur (sols inorganiques). Après une durée de l'étuvage de 24h, une pesée de l'ensemble s'effectue de nouveau à l'aide de la balance et noté M_2 . Dans le but de calculer la moyenne de la proportion d'eau, trois essais de mesure doivent être effectués pour le même sol (ISO 17892-1, 2014).



Figure III-7 : Pesée des échantillons après étuvage

Température de l'étuvage :

Il est nécessaire de garantir l'origine géologique ou minéralogique des matériaux et réaliser une identification par observation visuelle pour déterminer l'existence des matières organiques dans le sol de l'étude. Celles-ci sont sensibles à une température de 105°C par leur décomposition en libérant un gaz carbonique. Ceci perturbe la mesure exacte de la masse d'eau ainsi que la masse du sol sec.

III-3-4-2 Expression les résultats obtenus

- Le poids de l'eau : $M_w = M_2 - M_1$
- La masse de matériau solide : $M_s = M_1 - M_0$
- La teneur en eau : $W (\%) = M_w / M_s$

III-3-5 La teneur en matière organique, M.O ;

On utilise la méthode de la norme ISO 10694 (1995), afin de calculer la proportion de matière organique d'un sol par incinération (perte par calcination) (ISO 10694, 1995).



Figure III-8: Le four nécessaire pour la détermination de la matière organique

Principe d'essai :

La méthode de calcination consiste à porter progressivement l'échantillon sec soumis à une température variable de 450 à 550 °C pour une durée de six heures.



Figure III-9 : L'échantillon dans le four ensuite dans le dessiccateur

Après l'incinération on calcul la perte de poids obtenue.

$$MO(\%) = \frac{(masse\ sec - masse\ apres\ calcination)}{masse\ sec} \times 100$$

Cette méthode de calcination directe provoque :

- ❖ La totale oxydation de matière organique ;
- ❖ L'élimination d'une quantité des carbonates ;
- ❖ La perte d'eau adsorbée des particules argileuses constituant l'échantillon du sédiment.

III-3-6 La valeur de bleu de méthylène VBS ;

La valeur de bleu de méthylène du sol (VBS) ; selon la norme EN 933-9 (2013), représente une mesure globale de la quantité et l'activité de la composante argileuse existante dans un sol ou une matière rocheuse. Un sol adsorbe une quantité plus importante de bleu de méthylène en proportion. Cela indique :

- ❖ Qu'il renferme plus d'argile ;
- ❖ Que cette argile soit active (qu'elle présente une surface spécifique important).

III-3-6-1 Principe de l'essai :

C'est un autre indicateur qui permet d'évaluer l'argilosité (ou la propreté) d'un sol. La VBS est déterminée par l'essai au bleu de méthylène à la tache sur une fraction de 0/2 mm, puis ajustée à la fraction 0/50 mm par proportionnalité.

La VBS exprime de manière générale l'évaluation de la fraction argileuse du sol en termes de quantité et d'activité, avec une concentration de bleu indiquée en grammes pour 100 g de sol.

L'évaluation consiste à incorporer progressivement du bleu de méthylène et à contrôler son adsorption à chaque ajout. Une goutte de la suspension est ensuite prélevée et déposée sur un papier filtre, provoquant la formation d'une tache.

L'adsorption optimale est caractérisée par la présence persistante d'une auréole bleu clair en bordure de la tâche.

III-3-6-2 Les étapes de déroulement d'essai :

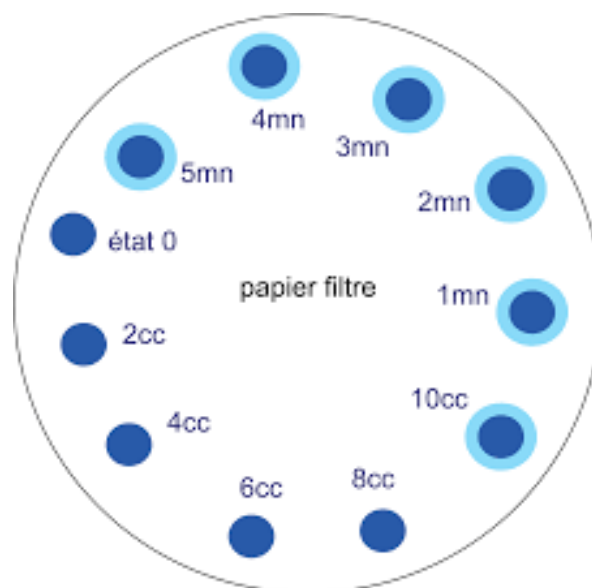
1. Prendre pour l'essai une quantité (m) de sol (de teneur en eau W connue) égale à :
 - 30 à 60 grammes : Quand le sol est argileux à fortement argileux.
 - 60 à 120 g : Quand le sol présente une faible ou une moyenne teneur en argile.

2. Ajouter la prise d'expérience dans le bêcher. La mise en suspension dans un volume de $500 \text{ cm}^3 \pm 10 \text{ cm}^3$ d'eau distillée, puis la disperser en utilisant l'agitateur à une vitesse de rotation atteignant $700 \text{ tr/min} \pm 100 \text{ tr/min}$ pendant 5 min. Dans tous les scénarios, jusqu'à ce que l'accumulation de particules d'argile dans la suspension ne soit plus visible ;
3. Porter la vitesse d'agitation permanente à $400 \text{ tr/min} \pm 100 \text{ tr/min}$;
4. Tester la tâche en utilisant du bleu de méthylène en respectant la procédure mentionnée (tableau III-1).



(a) Défloculation des sédiments

(b) L'agitation



(c) Les taches sur le papier filtre

Figure III-10 : l'essai de VBS

Tableau III-1 : Cinématique et commentaires lors d'un essai au bleu de méthylène.

Cinématique du dosage	Commentaires
1. Ajout de 5 à 10 cm ³ de bleu selon l'argilite estimée du matériau. Après 1 min ± 10 s, effectuer l'essai de la tâche.	1^{ère} étape : Ajouter le bleu de méthylène de manière grossière, puis tester à la tâche.
2. Test de la tâche : - Si le test est négatif, revenir à (1). - En cas de test positif, aller en (3).	
3. Incorpore de 2 à 5 cm ³ de bleu selon l'argilosité du sol.	2^{ème} étape : Lors du premier test immédiat positif, on ajoute progressivement du bleu par pas fin.
4. Test à la tâche (Figure III-11) : - Si le test est négatif, revenir à (3). - En cas de test positif, aller en (5).	
5. Confirmer le test cinq fois toutes les minutes pendant une durée de 5 minutes : - Si le test est négatif, revenir à (3). - En cas de test positif, finalisation du dosage.	3^{ème} étape : Validation du test positif pendant une durée de 5 minutes.

III-3-6-3 Exploitation des résultats :

La norme NF P 11-300 (1992) établit une classification des sols selon leur valeur de bleu du sol (VBS) :

- ❖ VBS < 0,1 : Sols totalement insensibles à l'eau.
- ❖ 0,2 : Seuil au-delà duquel l'eau influence systématiquement le sol.
- ❖ 1,5 : Point de séparation entre sols sablo-limoneux et sols sablo-argileux.
- ❖ 2,5 : Seuil distinguant les sols limoneux à faible plasticité de ceux à plasticité modérée.
- ❖ 6 : Marque la transition entre sol limoneux et sol argileux.
- ❖ 8 : Délimite les sols argileux des sols très argileux.

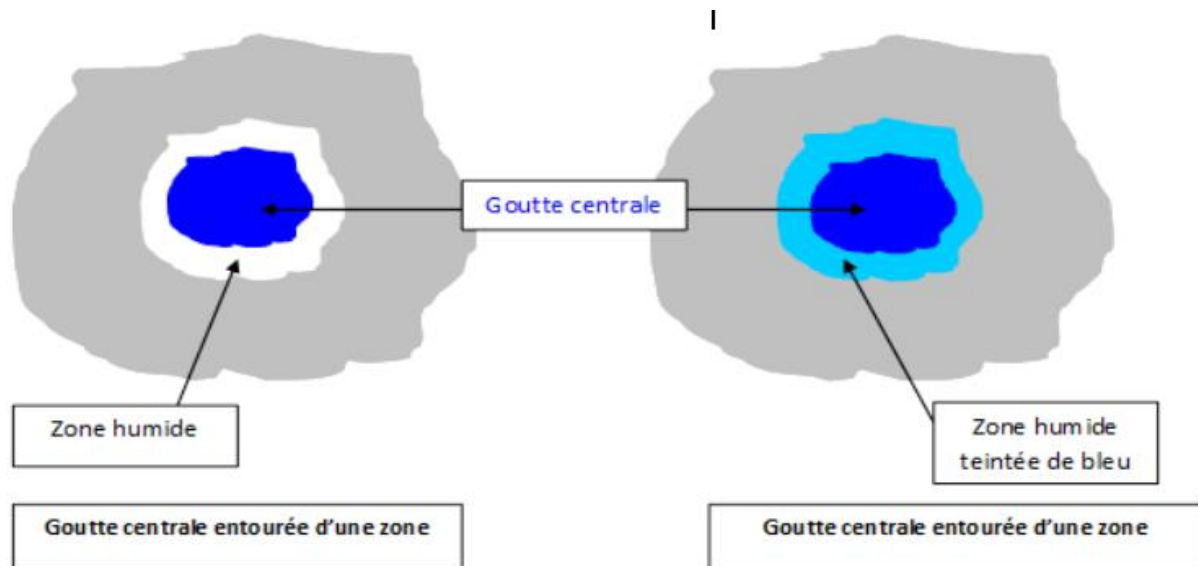


Figure III-11 : Vérifications effectuées lors de l'essai de tache

Aussi, la valeur de bleu renseigne sur la surface totale spécifique du sol qui est encore plus élevée que la fraction argileuse virée vers une montmorillonite.

SST= 21 VB.

III-3-7 Essai de teneur en CaCO_3 , Calcimètre ;

Cette analyse a été réalisée au Calcimètre Dietrich-Fruhling conforme aux normes EN 94-048. La présence de carbonate de calcium dans le sol est dissoute avec de l'acide chlorhydrique pour être déterminé. En raison de l'excès d'acide durant la réaction, la quantité de gaz carbonique (CO_2) produite est directement liée à la quantité de CaCO_3 compris dans l'échantillon.

La présence du CaCO_3 dans un sol fin joue un rôle fondamental dans sa résistance à la pression et à l'eau. Lorsque la concentration augmente, le sol passe progressivement d'un état argileux à un état rocheux, avec une transition marquée entre 60 et 70 %. Il s'agit, comme la granulométrie, d'une caractéristique stable du sol, qu'il n'est pas nécessaire de mesurer à chaque analyse, tant que la zone de prélèvement est stable et bien distinguée.

Certaines données pour interpréter la concentration totale de calcaire. Le type de sol est décrit de la manière suivante : plus ou moins calcaire. On peut le voir sous la forme d'une annotation sur les bilans de résultats d'analyses.

III-3-7-1 But d'essai :

L'essai au calcimètre permet de déterminer la teneur en carbonate (CaCO_3) d'un sol donné.

III-3-7-2 Principe de l'essai :

L'essai a pour objectif de quantifier le CO_2 libéré Grâce à l'action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO_3) contenu dans un échantillon de sol.

III-3-7-3 Appareillage :

On peut fabriquer un calcimètre avec :

- ❖ Une ampoule de niveau de 100 ml (Figure III-12).
- ❖ Une burette de dosage de 100 ml, graduée en 0,5 ml.
- ❖ Un flacon (100 cm^3) (Figure III-12).
- ❖ Un tube de verre en petite taille, à peu près deux fois plus bas que le flacon.
- ❖ Deux bouchons à un trou conçus pour être utilisés avec un tube gradué et un flacon.
- ❖ 1,5 mètre de papier anglais.

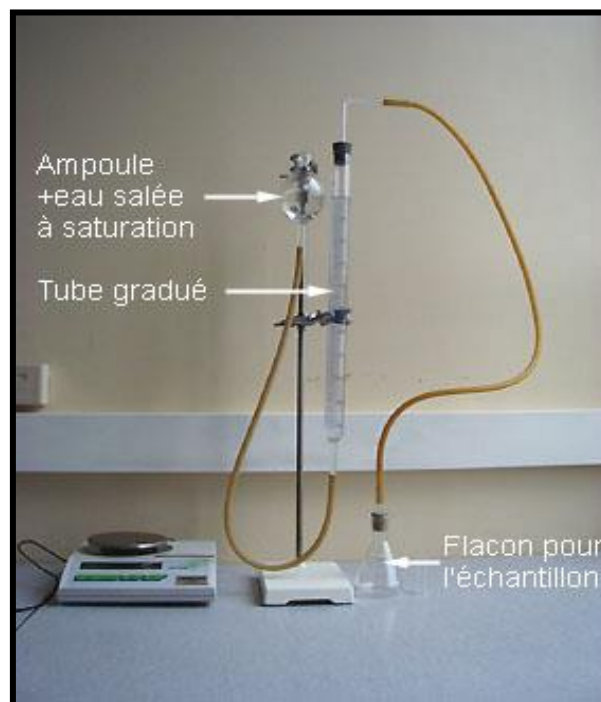


Figure III-12 : Le Calcimètre Dietrich-Fruhling

La teneur en calcaire du sol (échantillon de 1g) est donc : $C = (M \times 100) \%$

III-4 Les essais physiques sur les vases

III-4-1 Les courbes granulométriques des différents types de vases ;

Les sols sont des agrégats de particules principalement minérales, mais aussi parfois organiques, de taille et de forme différente. La caractéristique de cette phase solide réside

dans la description détaillée de la composition particulière fondamentale (dimensions, aspects, états de surface, natures chimiques et minéralogiques) ainsi que dans leur organisation.

Forme : On distingue deux formes principales selon le mode de formation des particules : forme régulière pour les fragments de la roche mère qui se forment suite à des altérations physiques ou mécaniques et forme irrégulière (plaquette ou disque) pour les particules formées par l'altération chimique.

Etats de surface : On distingue des grains à surface lisse ou grenus. Ainsi, on peut avoir des formes arrondis, sous arrondis, angulaires ou sous angulaires.

Dimension : La dimension des grains est très variable, on peut trouver des grains de taille de quelque μm et des grains d'une taille de quelques cm. On distingue suivant la dimension des particules trois fractions du sol : grenue ($D > 80 \mu\text{m}$), fine ($2 \mu\text{m} < D \leq 80 \mu\text{m}$) et très fine ($D \leq 2 \mu\text{m}$).

Granularité : La granularité correspond à la distribution de la dimension moyenne des particules du sol, en termes de proportion par rapport à la masse totale du matériau. La granularité est représentée par une courbe granulométrique représentée dans un diagramme semi-logarithmique spécifique. D'après la forme de la courbe granulométrique, on peut parler de granularité uniforme, étalée, discontinue ou continue. L'analyse granulométrique permet d'obtenir les données requises pour tracer la courbe. On pratique, il y a 2 modes d'analyse granulométrique :

- Analyse granulométrique par tamisage (par voie humide ou par voie sèche) (ISO 17892-4, 2016) ;
- Analyse granulométrique par sédimentométrie (sédimentation des grains sous l'effet de leur propre poids) (ISO 17892-4, 2016).

III-4-1-1 Analyse granulométrique avec le tamisage :

III-4-1-1-2 Définition de but d'essai :

L'évaluation de la granulométrie grâce à un tamisage est une étude qui permet d'identifier la répartition dimensionnelle de sols où la taille des particules est supérieure à $80 \mu\text{m}$. Elle s'effectue par tamisage du matériau par voie sèche pour les sols pulvérulents (sable et gravier) ou par voie humide pour les sols fins (limon et argile).

III-4-1-1-3 Principe :

L'essai implique la séparation des grains agglomérés d'une masse de matériau connue par brassage sous l'eau, le fractionnement de ce sol, une fois séché, par une série de tamis et la pesée successive du refus cumulé sur chaque tamis. La quantité totale de refus sur chaque

tamis est ajoutée au poids total sec d'échantillon en cours d'analyse. Les différents tamis utilisés sont des tamis à maille carrée.



Figure III-13 : Tamisage de la vase

III-4-1-1-4 Caractéristiques de la courbe granulométrique :

Les paramètres de la courbe granulométrique indiqués ci-après sont alors définis : coefficients de Hazen et de courbure.

A) Calcul le coefficient de Hazen (coefficient d'uniformité) :

On peut définir la répartition des tailles d'un sol en utilisant un coefficient d'uniformité. $Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ Ou d_y correspond au calibre du tamis permettant le passage d'environ y % du poids total des grains. Ce coefficient aide à distinguer si la répartition granulométrique est étalée ou serrée, notamment pour les sables. Selon que ce coefficient est plus ou moins voisin à 1, on parle d'une granulométrie serrée. Pour Caquot, au moment où le coefficient d'uniformité atteint plus de 2, une granulométrie est étalée.

B) Calcul du coefficient de courbure :

Dans l'analyse de la granulométrie d'un sol, ce coefficient est utilisé en complément de C_u pour déterminer si la granulométrie est dite correctement graduée lorsque les différentes fractions de grains se répartissent de manière équilibrée, et mal graduée lorsqu'une fraction de grains prédomine. Il est donné par cette formulé :

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}}$$

- d_{10} , d_{30} et d_{60} : les diamètres pour lequel le tamisât est de 10, 30 et 60 % respectivement.

Combinaison les deux coefficients :

- **Pour les sols** : l'étude de la granulométrie se faite selon les deux coefficients (étalé est continue, étalée discontinue ...) ;
- **Pour les sables et gravier**, la granulométrie est considérée bien graduée lorsque ces deux conditions sur C_u et C_c sont vérifiées au même temps. La granulométrie est mal graduée dans le cas contraire.

$$1 \leq C_c \leq 3$$

$$C_u > 4 \text{ (sable)}, C_u > 6 \text{ (gravier)}$$

III-4-1-2 Analyse granulométrique avec la sédimentation :**III-4-1-2-1 Définition de but de l'essai :**

Cette étude vise à caractériser la distribution des dimensions des particules fines d'un sol dont les dimensions sont inférieures à 80 μm , ou de compléter l'analyse granulométrique par tamisage de sol contenant des grains dont le diamètre se localise de part et d'autre de la borne 80 μm .

III-4-1-2-2 Principe d'essai :

L'essai de la sédimentation est un essai de décantation par gravité des grains d'un échantillon mis en suspension dans un liquide visqueux. Elle est fondée sur l'utilisation de la loi de « stockes » qui fournit la vitesse de décantation (chute) des grains sphériques de même masse volumique à l'aide d'un densimètre en fonction de leur dimension.

III-4-1-2-3 Mode opératoire :

Les opérations suivantes doivent être effectuées de manière successive dans une salle d'essai dans laquelle la température devrait être régulée.

III-4-1-2-4 Préparation du mélange eau distillée et défoulant :

L'eau distillée est mélangée avec un défoulant afin d'imbiber puis de disperser l'échantillon. Cette combinaison est composée de 440 cm³ d'eau distillée et de 60 cm³ d'une solution contenant 5 % d'hexamétophosphate de sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), préparée et conservée à l'abri de la lumière pendant une durée inférieure à un mois.



Figure III-14 : L'analyse granulométrique par sédimentométrie

III-4-1-2-5 Préparation de prise d'essai :

Le prélèvement de l'échantillon de sol et de son eau de lavage se réalise dans un bac, en utilisant un tamis de 80 μm . L'ensemble est mis à l'écart, quand l'eau dans le bac retrouve sa transparence, elle est siphonnée sans former de particules fines. Ensuite, on introduit le bac, avec tout ce qu'il contient, dans une étuve de dessiccation afin d'évaporer l'eau.

Après le séchage du matériau, il est désagréé dans le mortier avec un pilon, et par la suite, parfaitement homogénéisé.

III-4-1-2-6 Imbibition de la prise d'essai :

- Prélever une quantité nécessaire pour réaliser l'essai (soit 80 g pour une éprouvette de 2 litres) ;
- Mettre à imbiber cette prise de test dans le flacon de l'agitateur mécanique ;
- Prendre le temps d'imbiber pendant au moins 15 heures à température ambiante ;
- Placer la prise d'essai dans la solution d'eau et la décoller en utilisant l'agitateur mécanique qui doit être en marche pendant 3 minutes à une vitesse de 10 000 tr/min.



Figure III-15 : Agitateur mécanique.

III-4-1-2-7 Exécution d'essai :

- Incorporer la suspension dans une éprouvette d'essai une fois que l'agitation a été terminée.
- Plonger, dans de l'eau distillée, le récipient associé à l'arbre et les palettes de l'agitateur.
- Ajouter de l'eau distillée à la température ambiante.
- La seconde éprouvette témoin est remplie d'eau distillée pour permettre l'introduction du densimètre et du thermomètre, lesquels sont propres.
- Ajuster la suspension de manière verticale en utilisant l'agitateur manuel afin d'obtenir une concentration homogène sur toute la hauteur de l'éprouvette.
- Enlever l'agitateur manuel et mettre en marche simultanément le chronomètre.
- Dès l'activation du chronomètre, il faut plonger le densimètre dans la suspension avec soin.

III-4-2 Les limites d'Atterberg ;

En fonction de son taux d'humidité, un sol présente des comportements très différents en raison des variations de sa consistance. Le phénomène est attribuable à l'importance, plus ou moins marquée, des couches d'eau adsorbées sur les grains, de même qu'aux caractéristiques colloïdales des argiles et à leur distribution dans le sol étudié.

- Lorsque la quantité d'eau est élevée, les forces de cohésion ne sont pas suffisamment fortes pour maintenir les particules de sol en position. Son comportement est sensiblement similaire à celui d'un liquide (boue). Le sol se trouve sous forme liquide (le sol a tendance à s'étaler lorsqu'il est placé sur une surface plane).

- Lorsque la proportion d'eau baisse, le sol peut être façonné sans perdre sa cohésion et demeure solide. Ce rapprochement des particules s'explique par le partage de l'eau adsorbée, laquelle relie les grains par des molécules d'eau. Ainsi, le sol se retrouve en état plastique : une fois déposé sur une surface plane, il conserve sa forme sans s'étaler, mais n'offre aucune résistance face à une charge, même minimale.
- En diminuant davantage la proportion d'eau, les particules se rapprochent ; le sol ne peut plus être modelé et se brise lorsqu'on le travail, ce qui entraîne l'état solide. Cet état peut être divisé en deux parties distinctes :
 - En présence d'une quantité d'eau assez élevée, Les grains du sol, enrobés d'une pellicule d'eau, sont repoussés les uns des autres, ce qui engendre une augmentation de leur volume apparent. Lorsqu'on procède au séchage, leur rapprochement provoque une réduction du volume, caractéristique du retrait. Cet état correspond à l'état solide avec retrait (Figure III-16).
 - Lorsque la quantité d'eau devient encore plus faible, la rigidité du corps augmente encore mais son volume ne change pas alors que la teneur en eau diminue. On parle d'état solide sans retrait.

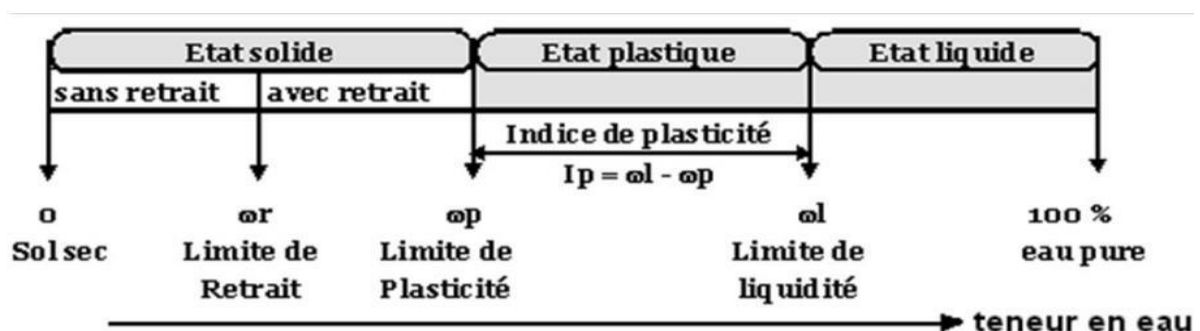


Figure III-16 : L'état du sol en fonction de la quantité d'eau.

Il existe de manière consensuelle deux bornes séparant la consistance du sol en trois domaines : solide, plastique et liquide. Ces domaines se caractérisent par les limites de liquidité (W_L) et de plasticité (W_P). Ainsi, une borne écarte l'état solide avec et sans retrait. Il s'agit de la limite de retrait (W_R) (NF P 94-051, 1993).

III-4-2-1 Détermination la limite de plasticité :

La limite de plasticité W_P : correspond à la quantité d'eau qui sépare l'état plastique de l'état solide.

Cette limite peut être déterminée expérimentalement en ce qui concerne la partie du sol qui traverse le tamis de 400 μm . Elle est exprimée en %.

A) Principe :

Cet essai a pour objectif de rechercher la proportion d'eau requise pour que se forme une fissure dans un rouleau de sol, de taille constante et réalisé manuellement.

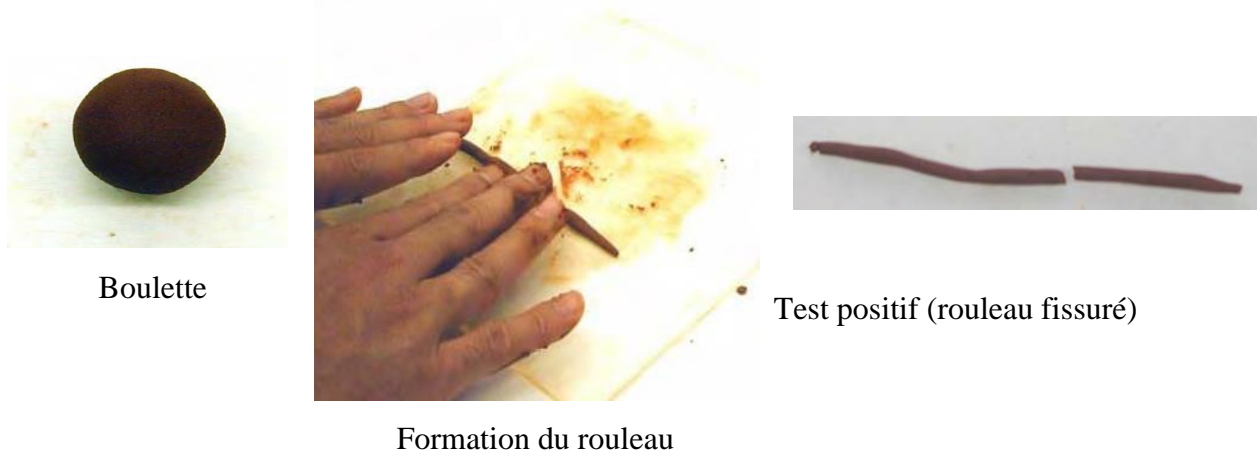


Figure III-17 : Procédure d'exécution de la limite de plasticité (W_p)

B) Mode d'opérateur :

Tamiser le sol à étudier au tamis de 400 μm ;

- Humidifier puis homogénéiser le matériau (0/400 μm) jusqu'à former une pâte ;
- Former une boulette de diamètre initiale de 1 cm environ ;
- Rouler, à la main, la boulette de façon à former un rouleau (10 cm à 15 cm) qu'on amincit progressivement jusqu'à atteindre un \varnothing de 3 mm ;
- On obtient la limite de plasticité en soulevant le rouleau vers le milieu d'environ 1 cm, il se fissure ;
- Déterminer la proportion d'eau de rouleau (fissuré) avec la méthode courante.

Boulette \rightarrow Formation du rouleau \rightarrow Test positif (rouleau fissuré)

III-4-2-2 Détermination la limite de liquidité :**A) Définition :**

La limite de plasticité W_L : La quantité d'eau qui constitue le passage entre l'état liquide à l'état plastique. Cette limite peut être déterminée expérimentalement sur La fraction de sol qui traverse le tamis de 400 μm . Elle est exprimée en %. Dans ce travail, on détermine de W_L par la méthode :

- Détermination de W_L avec l'appareil de Casagrande, suivant à la norme NF P94-051 (1993) ;

B) Principe :**A l'appareil de Casagrande :**

Le test a pour but de rechercher de la proportion d'eau nécessaire à la fermeture d'une rainure est réalisée dans un sol placé dans une coupelle aux caractéristiques définies, lorsque la coupelle et son contenu subissent des chocs répétés. La limite liquidité correspond à la proportion d'eau du sol pour laquelle les lèvres de la rainure se referment sur une largeur de 1 cm après 25 chocs. »

C) Mode d'opératoire :**Préparation de la pâte de sol humide :**

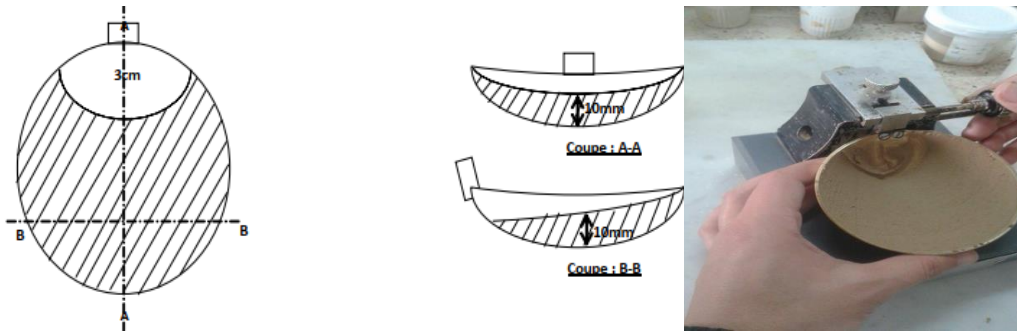
- Tamiser le sol à étudier au tamis de 400 μm ;
- Humidifier puis homogénéiser le matériau (Fraction 0/400 μm) jusqu'à former une pâte humide puis laisser imbiber pendant une durée de 24h.



Figure III-18 : Des photos de préparation de la pâte.

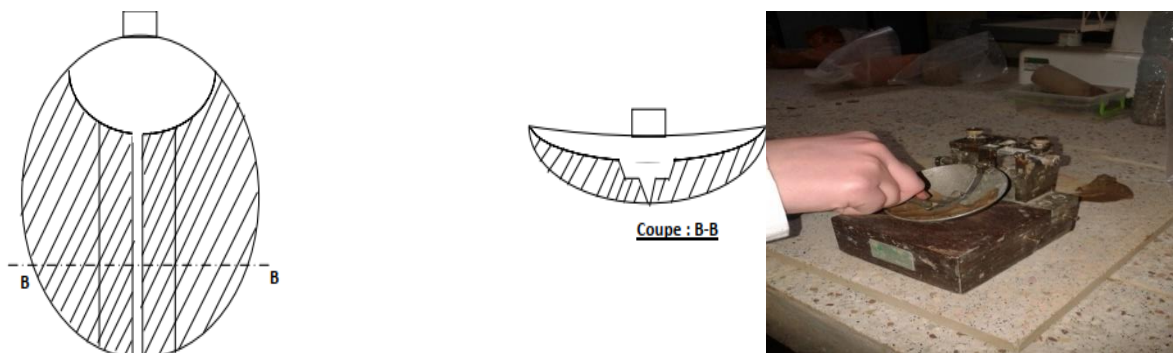
Exécution de l'essai à l'appareil de Casagrande

Placer dans la coupelle une masse d'environ de 70 g de la pâte de façon symétrique. On étale la pâte avec une spatule en nombreuses couches pour éviter de former des bulles d'air. Le fond de la coupelle est recouvert par la pâte, à l'exception d'une portion de voisinage 3 cm, dont l'épaisseur au centre varie entre 15 et 20 mm.



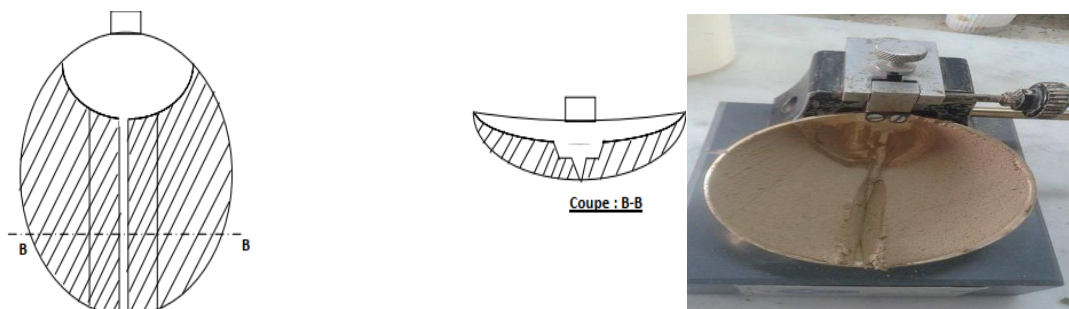
Etape 1 : Procédure remplissage de la coupelle (Casagrande)

- Partager la pâte en deux à l'aide du couteau à rainurer, en le tenant verticalement par rapport à la surface de la coupelle, en dirigeant sa partie biseautée vers le mouvement.



Etape 2 : Partage la pâte en deux avec description de la rainure

- Fixez la coupelle sur le support métallique de l'appareil Casagrande.
- Lancer la came pour exposer la coupelle à une succession de chocs, à raison de 2 impacts par seconde.
- Il est important de prendre en compte la valeur de « N », c'est-à-dire le nombre de coups qu'il faut pour que les bords de la rainure entrent en contact sur une distance approximative de 1 cm.
- Prendre alors un échantillon, de 5 g environ, de part et d'autre de la coupelle et dans les environs de l'endroit de fermeture et déterminer son teneur en eau.
- Refaire d'autres mesures avec des teneuses en eau.
- L'essai n'est poursuivi que lorsque N est compris entre 15 et 35.



Etape finale : Fermeture des lèvres de la rainure

- Dans le cas où $N < 15$, La procédure se répète en utilisant Un matériau plus sec, uniformément mélangé à nouveau.
- Lorsque $N > 35$, on recommence l'opération Sur un échantillon de pâte auquel on a incorporé une petite quantité d'eau.

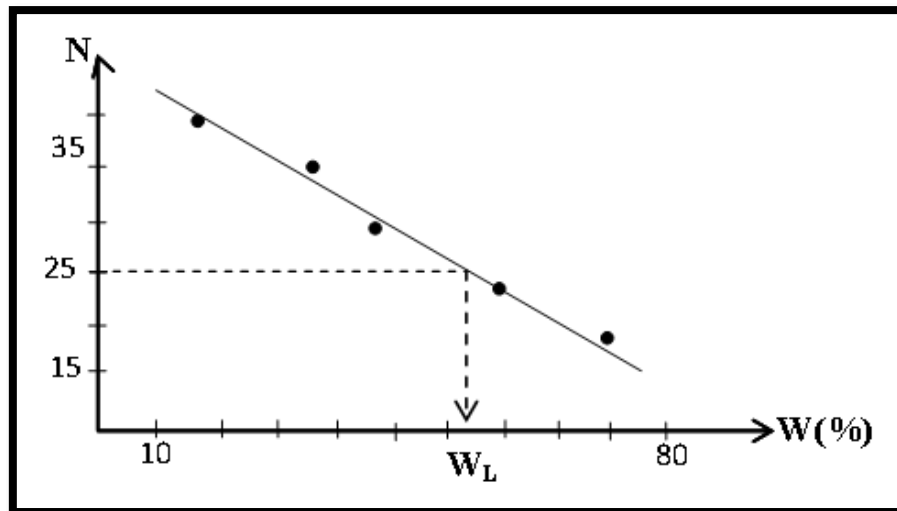


Figure III-19 : Limite de liquidité selon le nombre de coups effectués.

On définit la limite de liquidité comme la quantité d'eau présente dans le sol pour laquelle la rainure se referme sur une longueur d'environ 1 cm après 25 chocs. On peut calculer cette valeur en utilisant l'équation de la droite moyenne calculée à partir des paires de valeurs expérimentalement mesurées, à savoir le nombre de coups (N) et la proportion d'eau ($W\%$). On obtient W_L pour une valeur N de 25.

$$W_L = W_N \cdot \left(\frac{N}{25}\right)^{0,121}$$

III-4-2-3 Indice de plasticité :

L'indice de plasticité, noté I_P , correspond à la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. $I_P = W_L - W_P$

III-5 Les essais mécaniques

III-5-1 Essai Proctor normal et modifié

III-5-1-1 Domaine de l'application :

Cet essai a pour but de détermination des caractéristiques de compactage d'un matériau, à savoir la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. En fonction de l'énergie de compactage exercée sur l'éprouvette, on différencie l'essai Proctor normal (énergie modérée) et l'essai Proctor modifié (énergie élevée), entraînant des résultats différents en termes de courbes de compactage.

III-5-1-2 Préparer les échantillons.

Il est possible de sécher l'ensemble du matériau prélevé en plein air ou au sein d'une étuve réglée avec une température maximale de 50 °C jusqu'à ce qu'il soit suffisamment sec pour entamer l'essai. Après avoir séché, on tamise le matériau à une taille de 20 mm et on ne conserve que le tamisât pour l'essai.

Le matériau est uniformisé et réparti en au moins cinq parties égales par appréciation visuelle. On humidifie les parts à une proportion d'eau de même que les concentrations d'eau au nombre d'au moins trois et d'au plus quatre parts, doivent être humidifiées de sorte que leur teneur en eau se situe entre 0,8 WOPN (ou OPM) et 1,2 WOPN (ou OPM).

Une fois humidifiée, chaque partie est stockée dans des boîtes hermétiques ou des sacs étanches pendant Une durée adaptée à l'argilosité du matériau, visant à optimiser la diffusion de l'eau. Les éprouvettes seront préparées à partir de chacune de ces parts afin d'évaluer les points de la courbe Proctor, ainsi que, le cas échéant, l'Indice Portant Immédiat (IPI) et l'Indice CBR Immédiat, que ce soit avant ou après immersion des éprouvettes aux teneurs en eau étudiées.

III-5-1-3 Mode opératoire :

III-5-1-3-1 La sélection du type de moule :

Il dépend de la granulométrie du matériau ainsi que de l'usage prévu des résultats de l'essai, comme illustré dans le schéma (figure III-20).

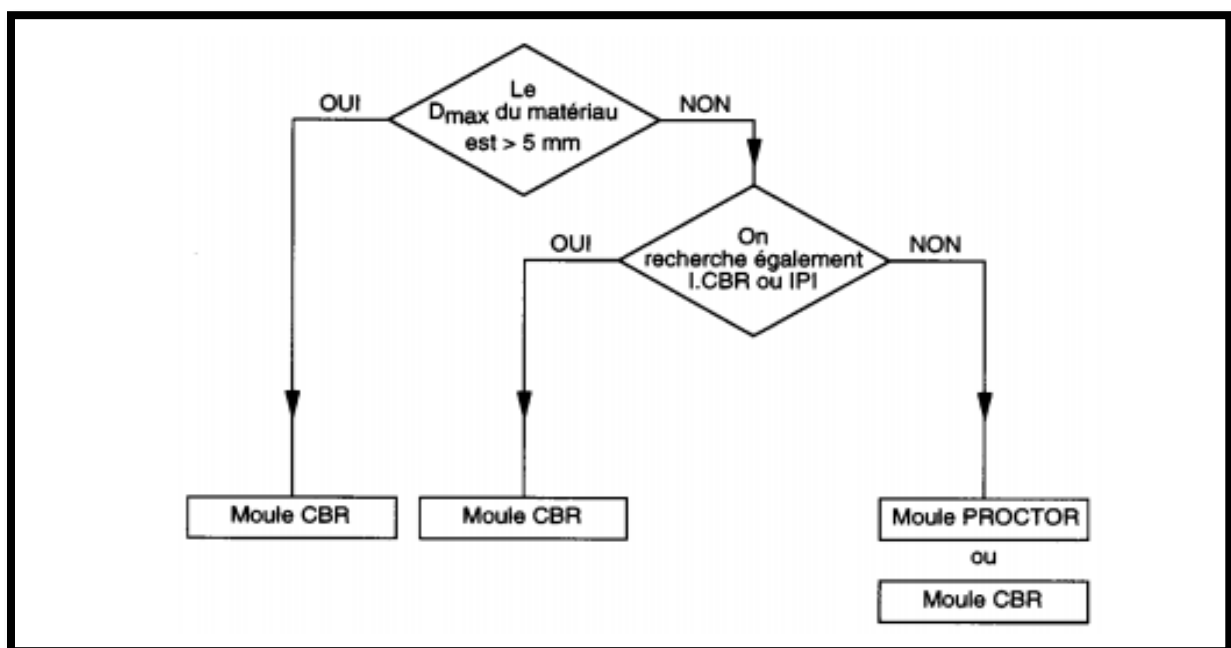


Figure III-20 : Les conditions pour le choix de type de moule

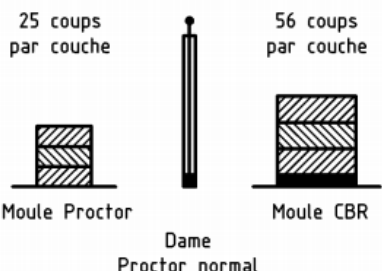
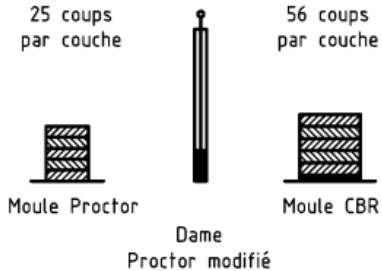
Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	<p>3 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche 56 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor Moule CBR</p> <p>Dame Proctor normal</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	<p>5 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche 56 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor Moule CBR</p> <p>Dame Proctor modifié</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

Figure III-21 : Modalités de réalisation des essais Proctor normal et modifié

III-5-1-3-2 Exécution d'essai :

Une fois que le type de moule sélectionné et la nature de l'essai spécifié, on effectue le compactage des éprouvettes humidifiées conformément aux instructions au-dessus (figure III-21).



Figure III-22 : Exécution de l'essai Proctor

Avant de placer le matériau dans le moule, il faut :

- Associer le moule, l’embase et la rehausse ;
- Au besoin, les parois du moule doivent être lubrifiées ;
- Le disque d'espacement doit être placé à la base du moule CBR lorsqu'il est employé ;
- On peut installer un papier-filtre ou un film plastique sur le disque d'espacement du moule CBR ou au fond du moule Proctor afin de faciliter le démoulage ;
- Ajouter ainsi la quantité de matériau doit être ajustée de façon à ce que, après compactage, la hauteur de la première couche soit légèrement supérieure au tiers de la hauteur du moule pour l’essai Proctor normal, et au cinquième pour l’essai Proctor modifié ;
- Dès que la couche est compactée à l’aide de la dame correspondante, appliquez, suivant le schéma ci-dessous, 25 ou 56 coups par couche, puis répétez l’opération jusqu’à atteindre le nombre de couches souhaité ;

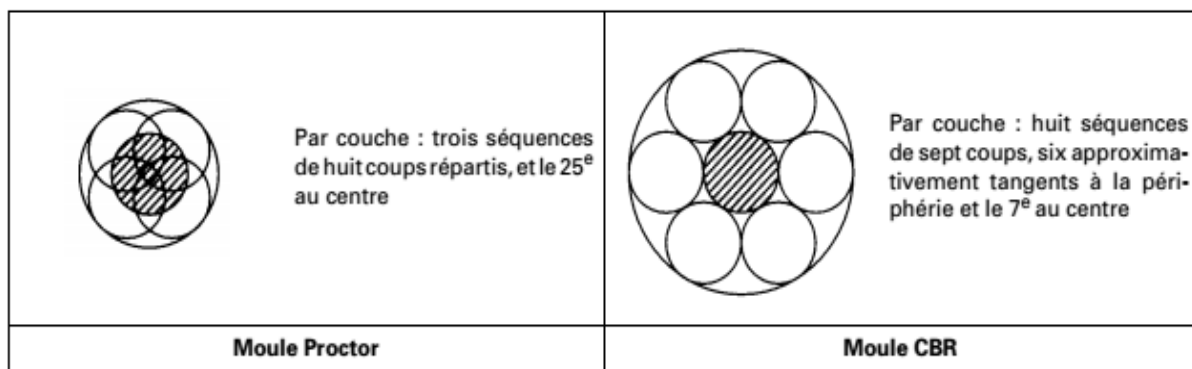


Figure III-23 : Illustration de la distribution des coups de dame sur une couche.

- Une fois la dernière couche compactée, retirez la rehausse de manière à ce que le matériau dépasse du moule d'au maximum un centimètre. L'excès est ensuite soigneusement nivelé en effectuant une rotation radiale, du centre vers la périphérie du moule. Lorsque les grains d'une taille supérieure à 10 mm sont entraînés dans cette opération, il est nécessaire de combler ces vides en utilisant des particules fines lissées grâce à la règle à araser ;
- Effectuer la pesée de l'ensemble moule et matériau ;
- Si l'essai ne doit pas être poursuivi en procédant à l'évaluation des indices CBR et/ou l'indice Portant Immédiat, l'éprouvette est démoulée. Par la suite, il est nécessaire d'extraire un échantillon représentatif afin d'évaluer sa teneur en eau.



Figure III-24 : Le remplissage des échantillons représentatifs afin de déterminer de la teneur en eau

- Dans le cas où l'Indice Portant Immédiat doit être déterminé simultanément, effectuez immédiatement, après compactage, le poinçonnement de l'éprouvette conformément à la norme NF EN 13 286-47 (2021) suivi de son démoulage et de sa dessiccation, afin d'évaluer sa proportion en eau ;
- Lorsqu'il est prévu d'obtenir simultanément l'Indice Portant Immédiat et l'Indice CBR après immersion, deux éprouvettes identiques doivent être compactées. L'initiale éprouvette est utilisée pour mesurer l'IPI et la proportion en eau, tandis que la deuxième est tenue en immersion pendant 4 jours puis poinçonnée d'après la norme NF EN 13 286-47 (2021) ;
- Enfin, lorsque l'on ne prévoit que la détermination simultanée de l'Indice CBR après immersion, l'éprouvette est directement immergée après son compactage (NF EN 13 286-47 (2021)).

On évalue alors la proportion d'eau de moulage en tenant compte de l'excédent de matériau pré-humidifié qui n'a pas servi lors de l'élaboration de l'échantillon. Les opérations sont répétées sur chaque partie du matériau pré-humidifié dans les conditions mentionnées dans la section 6.2 (NF EN 13286-2, 2005). Éléments spécifiques pour les matériaux traités par l'ajout de chaux et/ou d'un liant hydraulique.

III-5-1-3-3 Expression des résultats :

Tout échantillon compacté doit être calculée. :

- La proportion en eau ;
- La masse de matériau sec contenu dans le moule ;
- On calcule le poids volumique du matériau sec en prenant en considération le volume réel du moule utilisé, obtenu à partir de mesures géométriques effectuées à une approximation de 0,1 mm.

On présente les densités du matériau sec ainsi que les proportions en eau correspondantes sur une courbe $\rho_d = f(w \%)$. Les échelles indiquent un rapport de 2 % d'eau avec 0,1 t/m³ de poids volumique.

Suite à l'obtention des données testées, la courbe ajustée est dessinée. Hormis pour les matériaux très perméables, elle exhibe un maximum dont les coordonnées correspondent à la densité sèche optimum et à la teneur en eau Optimum Proctor Normal (ou Proctor Modifié, selon l'essai effectué). On observe ainsi une mesure précise de 0,01 t/m³ pour la masse volumique et de 0,1 point pour la proportion en eau (exprimée en pourcentage).

Il est également important de mentionner sur la courbe :

$f(W\%)$ la courbe de l'équation:

$$\rho_d = \frac{S_r \rho_s}{S_r + W \frac{\rho_s}{\rho_w}} \text{ Avec } \rho_w = 1 \text{ t/m}^3$$

Établies pour :

$$S_r = 100 \text{ et } 80 \% / \text{m}^3 \text{ et pour : } \rho_s = 2,70 \text{ t/m}^3$$

III-5-2 Indice CBR après immersion -Indice Portant Immédiat :

III-5-2-1 Domaine d'application :

Dans ce document, nous exposons l'équipement spécifique et les étapes du processus opératoire des essais afin de déterminer l'indice Portant Immédiat (IPI), l'indice CBR immédiat et de l'indice CBR après immersion d'un sol ou d'un matériau granulé employé pour

la réalisation de immeubles en terre ou pour des chaussées. L'approche de l'étude CBR utilisée pour évaluer l'indice CBR servant de référence dans le dimensionnement d'une structure de chaussée.

Selon la norme NF P 11-300 (1992), il est applicable aux sols, matériaux rocheux et sous-produits industriels, en supposant que le taux des particules dont le diamètre maximum dépasse 20 mm ne franchit pas 30 %. Ces mêmes matériaux sont également utilisés pour mélanger divers produits tels que la chaux aérienne, les liants hydrauliques ou pouzzolanique, les fibres, etc.

III-5-2-2 Définitions :

Dans le cadre de ce document, les définitions ci-après sont applicables :

Indice CBR immédiat ; indice CBR après l'immersion : Les dimensions sont employées pour désigner un sol ou un matériau conçu pour jouer le rôle de support ou de couche dans une chaussée.

Indice portant immédiate : La mesure appliquée pour déterminer la capacité d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter la circulation d'engins sur un chantier.

III-5-2-3 Principe de l'essai :

Basé sur la détermination des forces à appliquer sur un poinçon cylindrique, cet essai permet de le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Ainsi, pour des enfoncements identiques, on note différentes valeurs de force sur un matériau de référence sont respectivement comparées aux valeurs spécifiques des deux fores qui ont entraîné deux enfoncements conventionnels.

L'indice visé correspond habituellement à la valeur maximale, définie en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés (voir article III-5-2-6).

Lors de l'utilisation de l'indice CBR dans le dimensionnement d'une chaussée, le concepteur se doit de sélectionner les caractéristiques d'état du sol pertinentes, en fonction des particularités du projet. À titre d'exemple, il convient de noter que les caractéristiques suivantes sont généralement retenues:

- Teneur en eau : W_{OPM} ;
- Densité sèche : ρ_{dOPM} ;
- État de saturation : celui atteint après une immersion de quatre jours.

Ce choix est cependant généralement pessimiste, car il est peu fréquent que le sol sous la chaussée se trouve dans un état de saturation comparable à celui de l'éprouvette placée

durant quatre jours en immersion. Il convient donc de procéder à une évaluation la plus réaliste possible de l'état hydrique du sol sous la chaussée en service et de déterminer alors l'indice CBR de dimensionnement cor-répondant à cet état. Dans l'annexe A du présent document, on propose une méthode d'analyse permettant de mesurer l'impact des fluctuations des paramètres d'état (compacité et état hydrique) sur les données en matière de dimensionnement d'une chaussée par l'indice CBR.

Pour ce qui concerne l'IPI, on retient comme caractéristiques d'état :

- La proportion d'eau (ou la plage de la proportion en eau) pour laquelle on souhaite jauger la capacité du matériau à supporter le passage des engins ;
- La valeur obtenue lors de la compaction du matériau à la proportion en eau donnée, à l'énergie Proctor normale pour le sol et à l'énergie Proctor modifiée pour le matériau d'assise de chaussée, est le poids volumique du sol sec.

III-5-2-4 Appareillage :

III-5-2-4-1 Matériel d'exécution des éprouvettes :

Il comporte :

- Moule CBR ;
- Les machines de compactage ou la dames de Proctor normal et modifié ;
- Les accessoires (disque d'espacement, plaque de base, règle à araser, rehausse,) ;
- Le matériel d'utilisation habituel (bacs, étuve, balances,).

Dans la norme NF EN 13286-2 (2005) est détaillé l'ensemble du matériel.

III-5-2-4-2 Matériel pour poinçonnement :

L'appareil intègre une presse disposant d'une capacité minimale de 50 kN et d'une course d'environ 10 mm.

Cette presse est indispensable pour munir de :

- Système d'un poinçon en acier de forme cylindrique, présentant un diamètre de 49,6 mm \pm 0,1 mm (soit une section circulaire de 19,32 cm² \pm 0,08 cm²) et une longueur d'au moins une dizaine de centimètres ;
- L'utilisation d'un appareil qui permet d'enfoncer le poinçon au milieu du matériau à une vitesse constante de 1,27 mm/min \pm 0, 1 mm/min ;
- Un dispositif permettant d'évaluer l'enfoncement du poinçon avec une précision garantissant une incertitude absolue ne dépassant pas 0,1 mm ;



Figure III-25 : l'exécution de l'essai indice CBR après immersion (l'immersion)

- Un appareil qui enregistre la force appliquée par poinçonnage. La puissance de ce dispositif doit être ajustée en fonction de l'effort mesuré. Il est nécessaire que sa précision assure Une mesure dont l'incertitude relative ne dépasse pas 1 %.

III-5-2-4-3 Matériel pour l'immersion et la mesure du gonflement :

Il est indispensable d'avoir un ou nombreux bacs de hauteur adéquate afin garantir l'immersion totale des échantillons, Tout en garantissant la présence d'une lame d'eau d'une épaisseur minimale de 10 mm au-dessous de chacune d'elles (par exemple, un caillebotis).

Un disque appelé « de gonflement », fabriqué en métal ou en plastique, d'un diamètre d'environ 150 mm et pesant environ 300 g, présente sur toute sa surface au moins 25 perforations d'un diamètre de $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, distribue de manière uniforme. Ce disque est équipé d'une tige de hauteur réglable perpendiculairement à son centre. Cela permet de réinitialiser le dispositif de mesure du gonflement à zéro avant son immersion.

Chaque surcharge est composée d'au moins trois disques de $150 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre extérieur, avec un évidement central cylindrique de $\varnothing 54 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ pour faciliter le passage du poinçon. Chaque surcharge doit avoir une masse de $2,3 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$.

Les surcharges peuvent être obtenues en deux parties en coupant le disque déterminé antérieurement selon un plan diamétral ce qui facilite leur installation sur l'éprouvette de l'échantillon et alentour du poinçon. La mesure du gonflement doit être effectuée à l'aide d'un dispositif avec une erreur maximale admissible de maximale de 0,01 mm, avec une gamme de mesure minimale de 20 mm.

III-5-2-5 Exécution d'essai :**III-5-2-5-1 Confection des éprouvettes :**

On doit procéder à la sélection les différents états physiques du sol (densité sèche, le taux d'eau, état de saturation) pour lesquelles on souhaite effectuer l'essai.

Si les éléments du sol à analyser ont une dimension maximale moindre à 20 mm, l'ensemble du sol est testé.

En cas de présence d'éléments supérieurs à 20 mm dans le sol avec un taux moindre à 30 %, ils sont supprimés avec tamisage. Le test est ensuite effectué avec le reste de la fraction.

Pour tout groupe de exigences d'état envisagées, il est nécessaire de préparer d'au moins de 5,5 kg de prise d'essai pour l'examen de l'I.CBR immédiat ou de l'IPI, et un minimum de 7 kg de matériau pour la recherche d'I.CBR immersion.

Par la suite, le sol est préparé et compacté dans les moules selon les instructions décrit de la norme NF EN 13 286-2 (2005).

Si l'indice CBR est calculé après immersion, Le volume d'eau employé pour fabriquer l'éprouvette est calculée en utilisant l'excès de matériau, conformément l'une des méthodes standardisées.

Le moule contenant l'éprouvette est d'abord détaché de sa plaque de base, puis retourné afin que la face supérieure de l'éprouvette soit en contact avec l'embase, laquelle est ensuite refixée au moule. Par la suite, on retire le disque d'espacement avant de procéder soit au poinçonnement, soit à l'immersion, selon l'indice recherché.

III-5-2-5-2 Exécution du poinçonnement :

Les méthodes de poinçonnement varient en fonction de la mesure de l'IPI, de l'I.CBR immédiat ou de l'I.CBR immersion.

Lorsque l'essai vise à évaluer l'IPI, il est nécessaire de positionner L'ensemble composé de l'embase, du moule et de l'éprouvette, disposé sur la presse, aligné au centre du piston de poinçonnage, et de procéder au poinçonnage de la façon suivante :

- Étendre la surface supérieure de l'éprouvette au contact du piston ;
- Mise en marche des appareils de mesure des forces et des enfoncements ;
- Effectuer le poinçonnement en conservant une vitesse de pénétration de 1,27 mm/min avec une tolérance de $\pm 0,1$ mm/min. ;
- Créer la courbe d'effort-déformation incluant au moins les points d'enfoncement à 1,25 mm, 2 mm, 2,5 mm, 5 mm, 7,5 mm et 10 mm. ;
- Évaluer le taux d'eau de l'échantillon en utilisant l'une des méthodes normalisées.



Figure III-26 : Matériel d'essai du CBR

III-5-2-6 Calcul des résultats :

Calculez les valeurs ci-dessous.:

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

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

– La valeur de l'indice à retenir est la plus haute des deux valeurs obtenues.

III-6 Conclusion :

Cette partie concernant la création de la « carte d'identité de chaque sédiment » a permis de mettre à jour les principales caractéristiques du sédiment et des mélanges (vase-tuf de Sidi Ali Cherif). Plusieurs aspects ont été abordés. Cette partie expérimentale vise à établir les propriétés physico-chimiques et géotechniques correspondantes. Grâce à ces paramètres, il est possible de repérer plus tard les possibilités de valorisation. Après avoir préparé l'échantillon, nous avons entamé les parties relatives à l'identification des caractéristiques physico-chimiques des matériaux, ainsi qu'aux caractéristiques géotechniques et aux classifications selon les normes en vigueur. Dans le chapitre suivant, le chapitre IV nous allons exposer les résultats ainsi que les discussions de l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV- Introduction

Chaque projet nécessite de recyclage une étude approfondie basée sur des informations complètes. Cela exige une connaissance approfondie des matériaux et une bonne caractérisation des déchets (dans notre cas, les vases). L'une des méthodes les plus fiables consiste à prélever des échantillons aussi représentatifs que possible. Pour notre approche, nous avons basé sur des échantillons des vase remaniés.

En effet, l'objectif des études de valorisation est de rechercher les formulations de matériaux idéales pour garantir le comportement optimal des sols destinés à la construction des chaussées. Le processus adopté dans notre travail expérimental s'articule donc autour de trois grandes étapes. La description détaillée des trois phases est comme suit :

Dans une **première phase**, différents essais d'identification ont été réalisés sur des vases de dragage prélevés dans les quatre barrages de la wilaya de Mascara (Chorfa, Bouhanifia, Ouizert et Fergoug), ainsi que sur le tuf de la carrière de Sidi Ali Cherif (TSC), utilisé comme matériau de référence. Les caractéristiques physico-chimiques et géotechniques de ces matériaux ont également fait l'objet d'une appréciation par le biais d'une série de classification.

La **deuxième phase** consiste à trouver les formulations idéales de mélanges (tuf de Sidi Ali Cherif avec différents pourcentages de vase du barrage de Fergoug), afin d'élaborer un mélange optimal pour la construction des routes. La sélection de tous les essais à effectuer dans cette partie est expliquée dans un rapport à la fin de celle-ci, ce qui permettra de distinguer les tests essentiels à réaliser. Au terme de cette étape, un bilan des essais essentiels à réaliser sera présenté. Ces derniers permettront d'évaluer les propriétés physico-chimiques et les caractéristiques mécaniques (notamment les caractéristiques de compactage et de portance).

La **dernière phase** portera sur l'analyse du comportement mécanique des diverses formulations de vases traités par un liant hydraulique, qui seront suggérées pour être utilisées en tant que corps de chaussée (couche de base, couche de fondation et couche de forme). Une description détaillée de ces trois phases est exposée dans ce qui suit.

Phase I : Identification des vases de barrage de la Wilaya de Mascara

La première phase : Les divers essais effectués dans cette partie, relatives aux matériaux utilisés (les quatre vases de dragages + le tuf de Sidi Ali Cherif (TFC)) sont :

- P^H (Potentiel hydrogène) ;
- La composition chimique par spectrométrie à la fluorescence X « XRF » ;
- La composition minéralogique par diffraction des rayons X « DRX » ;
- Teneur en eau (Test d'humidité) ;
- La teneur de la matière organique, M.O ;
- Les courbes granulométriques des différents types de vases ;
- Limite d'Atterberg ;
- La valeur au bleu de méthylène VBS ;
- Essai de teneur en $CaCO_3$, Calcimètre ;

IV-1-2 Résultats des essais chimiques sur les quatre vases

IV-1-2-1 P^H (Potentiel hydrogène)

Le P^H est l'une des caractéristiques essentielles du sol qui permet de décrire son état : acide, alcalin (ou acido-basique). Il est généralement évalué dans une fourchette de 1 à 14, bien que cette échelle puisse varier en fonction de la concentration de certains composants, comme le carbonate de calcium. Pour mesurer le P^H , on a utilisé un pH-mètre sur une suspension de sol fin et d'eau distillée, avec un rapport sol/eau de 1/2,5. La classification du sol selon le statut acido-basique (P^H) est fournie dans le tableau IV-1.

Tableau IV-1 : Les règles d'interprétation du niveau d'acidité-basique des sols (Arfang, 2019).

Statut Acido-Basique	Degré
Extrêmement acide	< 4,5
Très acide	4,6 - 5,2
Acide	5,3 – 5,5
Modérément acide	5,6 – 6,0
Légèrement acide	6,1 – 6,6
Neutre	6,7 – 7,2
Légèrement alcalin	7,3 – 7,9
Alcalin	8,0 – 8,5
Très Alcalin	> 8,5

La mesure du P^H illustre les aspects physiques (stabilité de la structure du sol) et biologiques (humification et minéralisation des matières organiques) du sol.

D'après le tableau IV-1 et la figure IV-1 ci-dessus, les résultats des valeurs de P^H des vases de barrages montrent un caractère basique (matériau alcalin à très alcalin) dès lors que cette valeur est supérieure à 8.

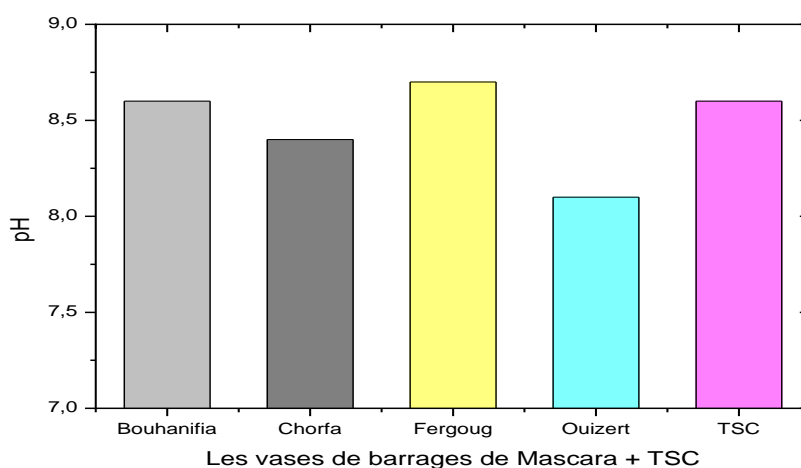


Figure IV-1 : Potentiel hydrogène des solutions de vases de barrages

Le caractère basique des différents vases peut être dû à la présence importante quantité d'argile et de matières organiques (MO), ce qui entraîne une forte capacité d'échange cationique permettant une augmentation du P^H (Bourabah, 2012). Concernant le P^H du tuf TSC (8,6) qui est proche de celui de la vase des barrages de Bouhanifia et Fergoug, selon Barakat et al (2012), on peut supposer que cette valeur très alcaline (basique) provient de la nature carbonatée du TSC (contient une grande quantité de CaCO_3).

IV-1-2-2 La composition chimique par « XRF »

Les données de la composition chimique, obtenues par fluorescence, des vases de barrages de la ville de Mascara (sous forme d'oxydes) sont présentées dans les figures IV-2, IV-3, IV-4, IV-5 et le tableau IV-2. Il est intéressant de constater que :

- L'oxyde SiO_2 est prédominant dans les vases de l'ensemble des barrages, suivis d' Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , K_2O et Na_2O .
- La teneur en silice (SiO_2) des vases de Bouhanifia et Ouizert est légèrement supérieure à celle des vases se Fergoug et Chorfa.
- La teneur en chaux CaO des vases de Bouhanifia et Ouizert est inférieure d'environ 40% à celle des vases se Fergoug et Chorfa.

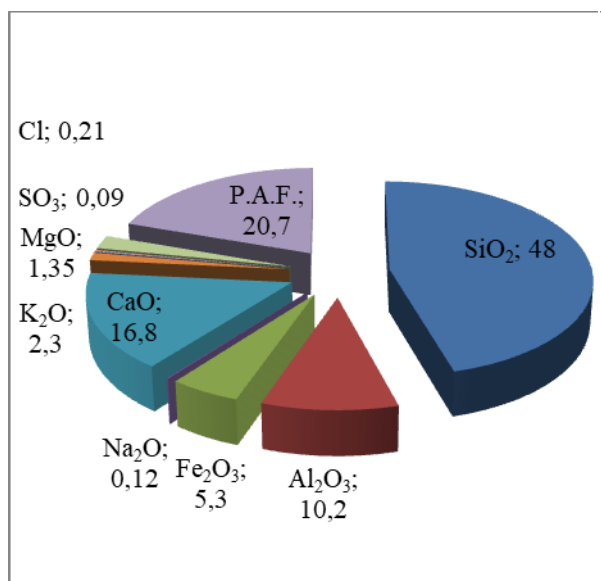


Figure IV-2 : Composition chimique de la vase de Bouhanifia

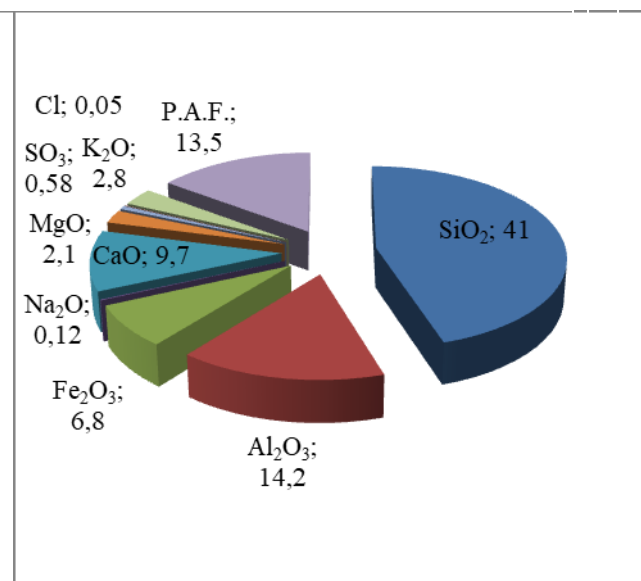


Figure IV-3 : Composition chimique de la vase de Chorfa

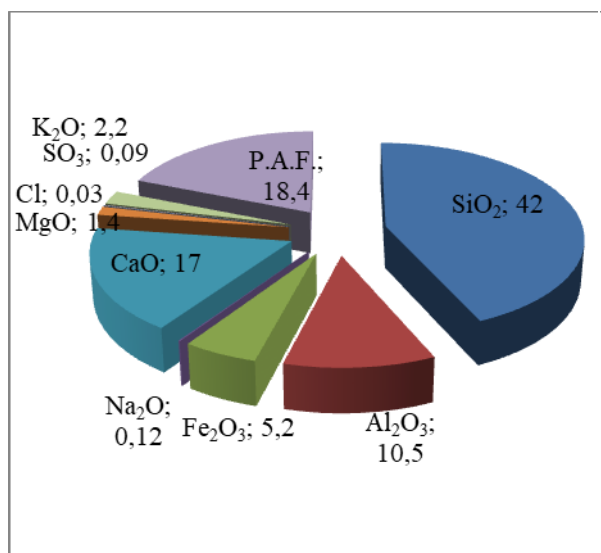


Figure IV-4 : Composition chimique de la vase de Fergoug

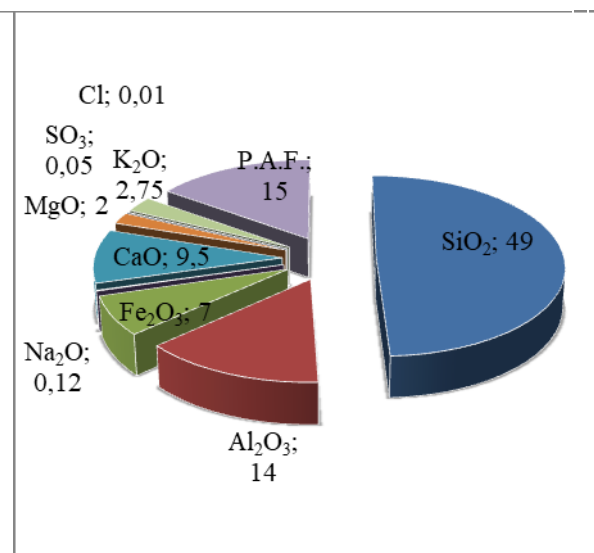


Figure IV-5 : Composition chimique de la vase d'Ouzert

- Les vases subissent des pertes au feu d'environ (14 et 20 %). La perte causée par le feu est associée à la décarbonation, à la perte des composés organique et à la diminution de l'eau qui forme les argiles. (déshydroxylation des phyllosilicates).
- Les teneurs en SO₃ et Cl⁻ des différentes vases sont très faibles par rapport aux teneurs des oxydes.
- L'alumine (Al₂O₃) est liée la plasticité, et les teneurs en cet oxyde signalées dans nos échantillons de vases, comprises entre (10 et 14 %), sont admissibles (tableau IV-2). Ces vases peuvent être valorisées dans le domaine du génie civil.

Tableau IV-2 : Résultats de l'analyse chimique des vases brute étudiées (les oxydes sont exprimés en pourcentage de leur masse)

Les éléments Majeur (%)		Bouhanifia	Chorfa	Fergoug	Ouizert	TSC
SiO ₂	Silice	48,00	41,00	42,00	49,00	9,49
Al ₂ O ₃	Alumine	10,20	14,20	10,50	14,00	2,82
Fe ₂ O ₃	Ferrite	5,30	6,80	5,20	7,00	1,22
Na ₂ O	Oxyde de Sodium	0,12	0,12	0,12	0,12	0,02
CaO	Chaux	16,80	9,70	17,00	9,50	45,21
MgO	Magnésie	1,35	2,10	1,40	2,00	0,74
SO ₃	Sulfates	0,09	0,58	0,09	0,05	0,016
Cl ⁻	Chlorures	0,21	0,05	0,03	0,01	0,014
K ₂ O	Potasse	2,30	2,80	2,20	2,75	0,30
P.A.F.	Perte au feu	20,70	13,50	18,40	15,00	39,04

La perte au feu dans le TSC est 39,04 %, elle est supérieure que celle des vases ce qui conforme la forte présence de carbonate (CaCO₃). Ils ont une structure hétéro-granoblastique formée d'une combinaison de cristaux de calcite légèrement aplatis et disposés dans une orientation privilégiée (Meziani, 2021). Des valeurs similaires ont été trouvées par Meziani (2021), PAF = 41,96 % et 39,04 % ; CaO = 52,84 % et 50,75 % pour les carrières Iboudrarene et Almaharoune Mekla (Tizi Ouzou), respectivement.

IV-1-2-3 La composition minéralogique par (DRX)

La composition minéralogique des quatre matériaux sédimentaires ainsi que le TSC ont été déterminée à l'aide de la diffraction aux rayons X. Grâce à cette analyse, nous avons pu souligner la nature des minéraux cristallisés des matières étudiées. Il est important de mentionner qu'aucunes phases amorphes n'a été détectée (vitreuse).

Les enregistrements ont été effectués entre 8° et 65° en 2θ. Les diagrammes sont obtenus avec un cumul d'intégration sur 1h. Les diffractogrammes des quatre vases, sous forme superposée ainsi que le TSC sont illustrés, respectivement dans les figures IV-6 et 7. D'après les résultats de dépouillements des spectres des analyses minéralogiques montrés par les figures IV-6 et 7 et le tableau IV-3, nous pouvons noter que :

- La vase de Bouhanifia contient le taux le plus élevé de Quartz (33,4%) ;
- La teneur en minéraux argileux (Kaolinite et Illite) des vases des barrages de Fergoug, Ouizert et Chorfa est très importante. Ces quantités leurs confèrent des propriétés d'emmagasiner l'eau. Ce qui explique leur teneur en eau élevée indiquée dans le test d'humidité (paragraphe IV-3-1) ;

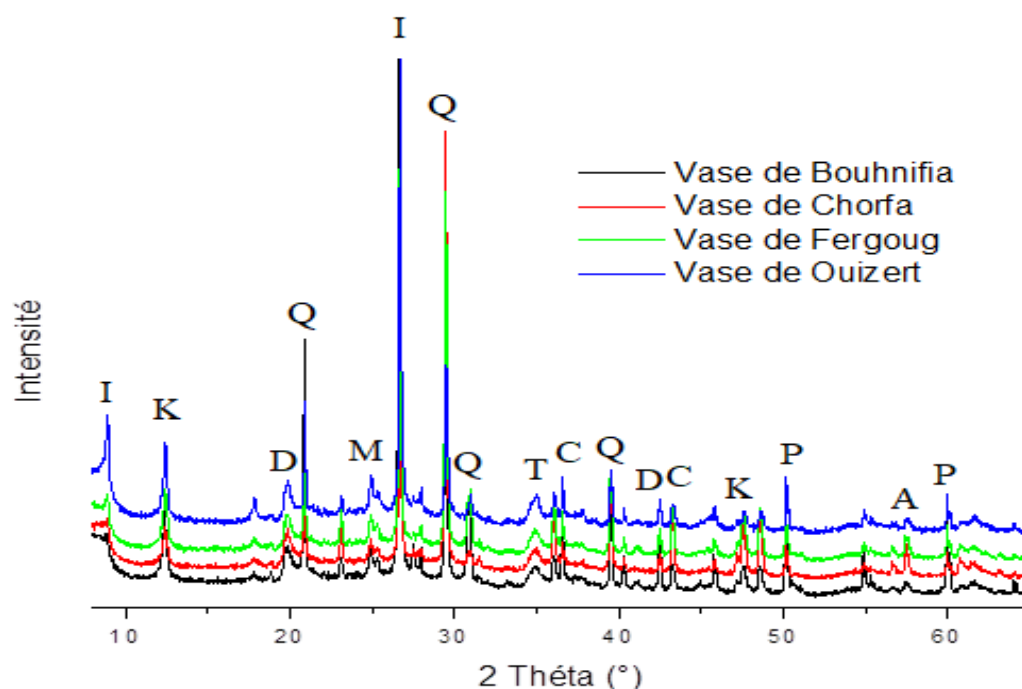


Figure IV-6 : Spectres DRX des quatre vases des barrages étudiées

Q=Quartz ; C=Calcite ; K=Kaolinite ; I=Illite ; D=Dolomite ; M=Microcline ; T=Topaz ; A=Albite ; P=Pyrophyllite

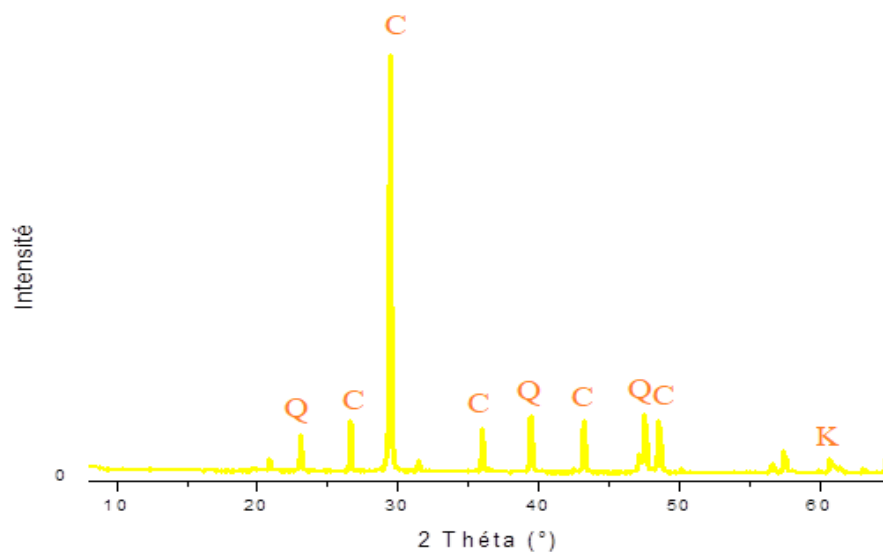


Figure IV-7 : Spectre DRX du Tuf de Sidi Ali Cherif.

Q=Quartz ; C=Calcite ; K=Kaolinite.

- La présence en taux acceptable des deux minéraux argileux (Kaolinite et Illite) est très intéressante pour donner aux différentes vases étudiées une faculté de plasticité indispensable pour leur valorisation dans le domaine routier ;
- Le tuf de la carrière de Sidi Ali Cherif, matériau de base de notre étude, est composé principalement de calcite avec un taux de 88,64 % (Figure IV-7).

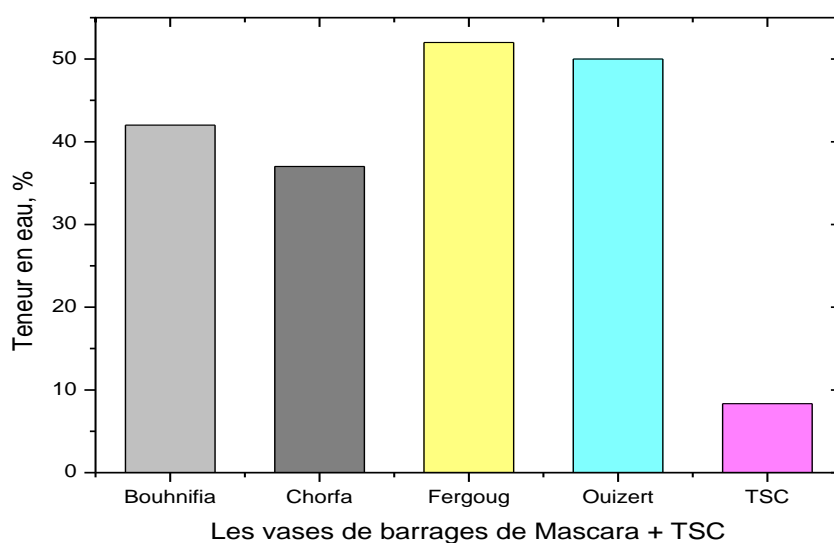
Tableau IV-3 : Diffraction des rayons X, Analyse DRX :

Composition Minéralogique (%)		Bouhanifia	Chorfa	Fergoug	Ouizert	TSC
Quartz	SiO ₂	33,40	18,61	15,25	21,64	4,64
Calcite	CaCO ₃	14,74	26,10	32,21	13,56	88,64
Dolomite	(Ca,Mg)(CO ₃) ₂	7,47	6,48	1,61	1,81	0,55
Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	7,61	8,72	9,90	10,47	0,96
Pyrophyllit	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	8,34	7,44	8,19	8,62	0,95
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	2,30	2,70	2,80	4,27	0,07
Illite	(K,H ₃ O)(Al,Mg) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ , (H ₂ O)]	21,47	26,45	27,99	32,68	3,14
Microcline	KAlSi ₃ O ₈	2,50	1,40	1,40	5,68	0,33
Topaz	Al ₂ SiO ₄ (F,OH) ₂	1,46	1,16	0,22	0,86	0,00
Diaspore	AlO(OH)	0,52	0,88	0,41	0,41	0,22

IV-1-3 Résultats des essais physiques sur les quatre vases

IV-1-3-1 Teneur en eau (Test d'humidité)

Les essais ont révélé que la proportion d'eau dans la vase des barrages de Fergoug (52 %) et Ouizert (50 %) sont largement supérieures à celle du barrage de Bouhanifia (42 %) et Chorfa (37 %). Cependant, la teneur en eau initiale du TSC était de 8,34 %.

**Figure IV-8 : Teneur en eau contenue dans les matériaux étudiés**

Selon la figure IV-8, on observe la forte capacité de l'ensemble des vases de barrages de à retenir l'eau libre comparativement au tuf de Sidi Ali Cherif (TSC). Cette propriété est certainement due à l'existence de l'illite dans la vase, qui est une argile minérale composée essentiellement de feuillets d'alumine et de silice. Ces feuillets ont la faculté d'absorber et d'emmagasinier un volume d'eau de l'ordre de 25 % (Adrianne, 2003). La présence de ce minéral a été confirmée par l'analyse minéralogique.

Par conséquent, l'exploitation des vases et leur réutilisation dans la réalisation de routes nécessitent une déshydratation par réduction de la quantité initiale d'eau ; cela rendrait certainement ce matériau plus facile à utiliser.

IV-1-3-2 La teneur en matière organique (M.O.)

Dans le domaine de la géotechnique, la matière organique a des propriétés nuisibles dans les techniques routières en raison de sa structure spongieuse, meuble et surtout de sa faible portance mécanique. La matière organique est considérée comme un élément qui influence le comportement d'un sol en fonction des fluctuations de la teneur en eau. Effectivement, elle possède une grande capacité de rétention d'eau, ce qui peut entraîner des phénomènes de retrait et de gonflement qui peuvent nuire à la stabilité d'un sol.

De plus, le guide français (GTS) recommande donc une concentration maximale de 1% de M.O pour le traitement des liants hydrauliques afin de les valoriser en couches de forme (LCPC-SETRA, 2000).

Un exemple de sol organique est la tourbe, qui est le résultat de la décomposition des végétaux. Elle est principalement constituée de fibres végétales. Le taux massique de matière organique dans le sol est très faible, généralement compris entre 1 et 5 %.

Plus de 3 % de matière organique dans les sols utilisés en remblais peuvent entraîner des problèmes de tassement à long terme (Degoutte et Royet, 2005). Il est recommandé de ne pas utiliser des sols contenant plus de 5 % de matière organique. Le tableau IV-4 suivant nous présente la classification des Laboratoires des Ponts et Chaussées (L.P.C.), des vases bruts selon leur teneur en M.O. :

Tableau IV-4 : Classification géotechnique (L.P.C.) des vases brutes selon M.O.

Teneur en M.O. (%)	Dénomination géotechnique		
0-3	Sol inorganique	--	--
3-10	Sol faiblement organique	fO	Vase
10-30	Sol moyenne organique	mO	Sol tourbeux
> 30	Sol très organique	tO	Tourbe

Les résultats de la teneur en M.O. des différents vases étudiés sont schématisés dans la figure IV-9. D'après l'organigramme de classification des Laboratoires des Ponts et Chaussées (L.P.C.), on remarque que si l'apport en matières organiques est varié de 3 et 10 %, le sol est considéré comme étant une vase « faiblement organique ».

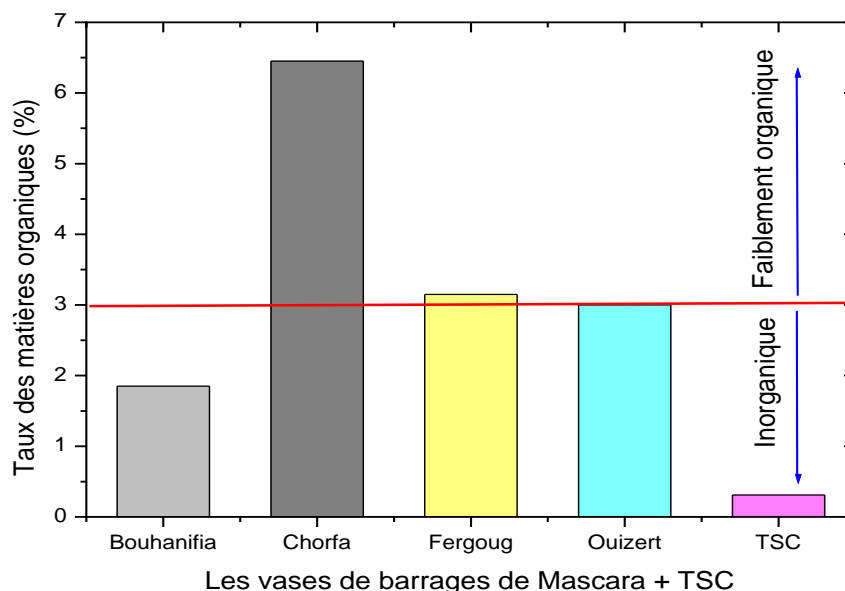


Figure IV-9 : Teneur en matière organique présente dans les vases des barrages.

Selon les résultats de la teneur en M.O. des vases des barrages de Fergoug, Bouhanifia et Ouizert, qui avoisine 3 %. Ces trois matériaux sont classés comme des matériaux faiblement organiques. Le tableau IV-4 confirme l'origine des matériaux comme étant des vases, récupérées des barrages de la ville de Mascara.

Tableau IV-5 : Teneur en M.O. des vases de dragage de quelques barrages, ports et fleuve

Origine des vases	Vases de dragage	Teneur en M.O. (%)	Références
Vases de barrage (Algérie)	Fergoug-Mascara *	03,15	Etude actuelle
	Chorfa-Mascara *	06,45	
	Bouhanifia-Mascara *	01,85	
	Ouizert-Mascara *	03,00	
	Ain Zaouia-Tizi ouzou	02,03	(Khattaoui, 2015)
	Taksebt-Tizi ouzou	01,46	(Boudlal et al, 2016)

	Bakhadda-Tiaret	07,00	(Serbah, 2011)
	Sidi Mohamed Ben Aouda-Relizane	05,52	(Bensafia, 2016)
Vases portuaire	Sédiments maritime du port ouest Dunkerque, France	08,60	(TranNgoc, 2009)
	Port de Brest (sédiment), France	05,40	(Meherzi et al, 2017)
	Port Autonome de Dunkerque, France	08,00	(Achour, 2013)
	Différents ports de la mer Manche France & Angleterre	04,80 – 17,10	(Meherzi et al, 2012)
Vases Fluvial	Brebières-Douai, France	07,20	(TranNgoc, 2009)

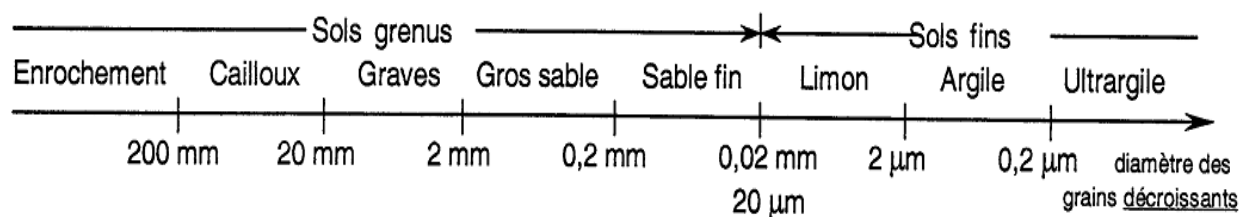
La comparaison de la teneur en M.O. de nos vases avec les vases de quelques barrages algériens montre que les taux de M.O. sont très proches et se situe dans la catégorie des matériaux faiblement organique (tableau IV-5).

Par contre, selon les valeurs de quelques sédiments (vases) marins, on relève une légère supériorité de la teneur en M.O. dans les sédiments (vases) des ouvrages marins par rapport à celle des sédiments (vases) des barrages (voir le tableau IV-5 ci-dessus).

IV-1-3-3 Les courbes granulométriques des différents types de vases

L'étude granulométrique des particules constituant nos vases et le tuf TSC est menée selon la procédure appropriée à chaque fraction de sol. Ainsi, pour la fraction dont la granulométrie est supérieure à 80 μm , la méthode de tamisage par voie humide a été appliquée. En revanche, pour la fraction de sol dont la taille des éléments est inférieure à 80 μm , déterminée par essai de sédimentation. Les deux méthodes nous ont permis d'illustrer la répartition granulométrique des vases ainsi que du TSC, comme l'indique le tableau IV-6 et comme l'illustrent les figures IV-10, IV-11, IV-12, IV-13 et IV-14 (a) et (b).

Les catégories de sols sont déterminées en fonction de la taille des grains comme suit :



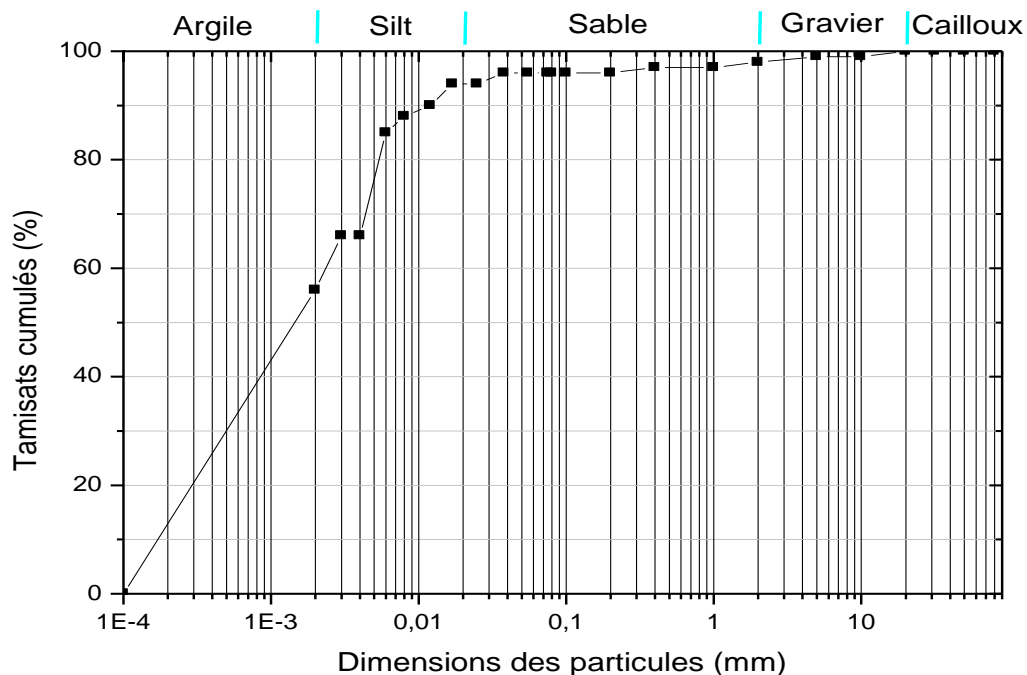
(Schéma) Classification des particules solides d'un sol

Tableau IV-6 : Distribution granulométrique des vases brutes.

Nature	Argile	Limon	Sable	Gravier
Dimensions	$d < 2\mu\text{m}$	$2\mu\text{m} < d < 20\mu\text{m}$	$20\mu\text{m} < d < 2\text{mm}$	$2\text{mm} < d < 20\text{mm}$
Bouhanifia	56	38	2	4
Chorfa	48	47	2	3
Fergoug	54,9	37,1	7	1
Ouizert	45	39	13	3
TSC	3	8	32	57

Selon l'analyse granulométrique nous constatons que les proportions des éléments des différentes vases ont une légère variation (voir tableau IV-6). Le taux d'argile des vases de Bouhanifia et Fergoug est supérieur à celui des vases de Chorfa et Ouizert. Parmi les quatre vases étudiées, nous remarquons que la vase d'Ouizert contient une quantité importante de sable comparée aux autres vases.

De cette manière, la distribution des éléments qui constituent nos vases est favorable aux grains fins dont la taille n'excède pas $2\mu\text{m}$, avec la proportion la plus élevée, à savoir (45 à 56 %) contre (37 à 47 %) pour les éléments dont la taille est comprise entre $2\mu\text{m}$ et $20\mu\text{m}$, tandis que les particules ayant un diamètre supérieur à $20\mu\text{m}$ ne représentent que (2 à 13 %).

**Figure IV.10** : Courbe granulométrique de la vase de Bouhanifia

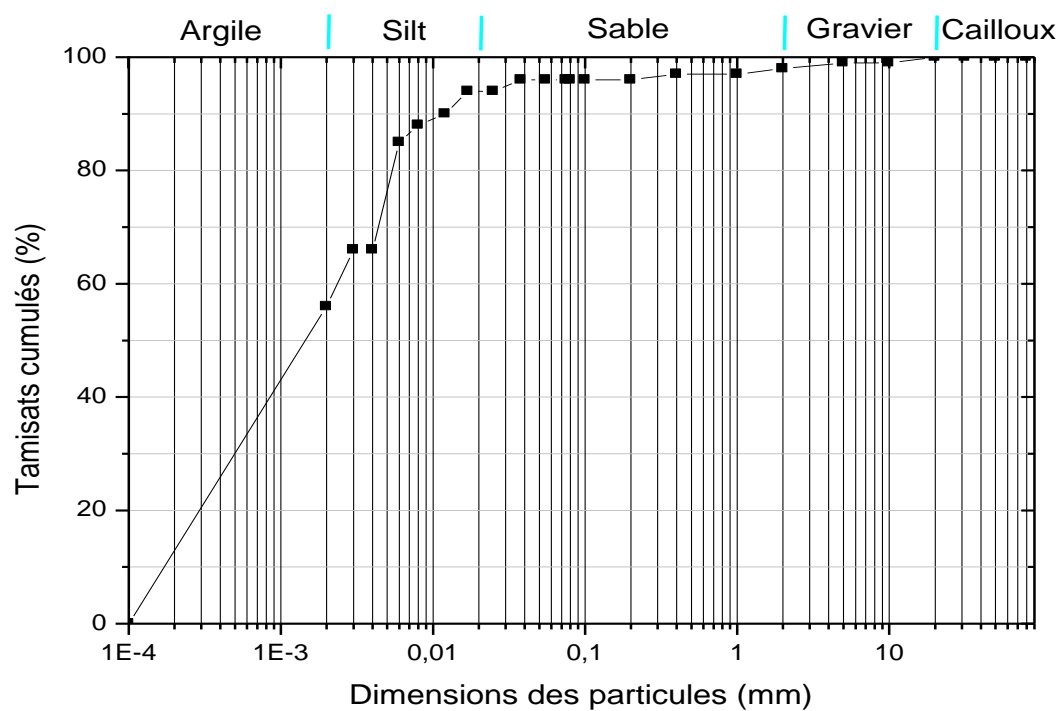


Figure IV.11 : Courbe granulométrique de la vase de Chorfa

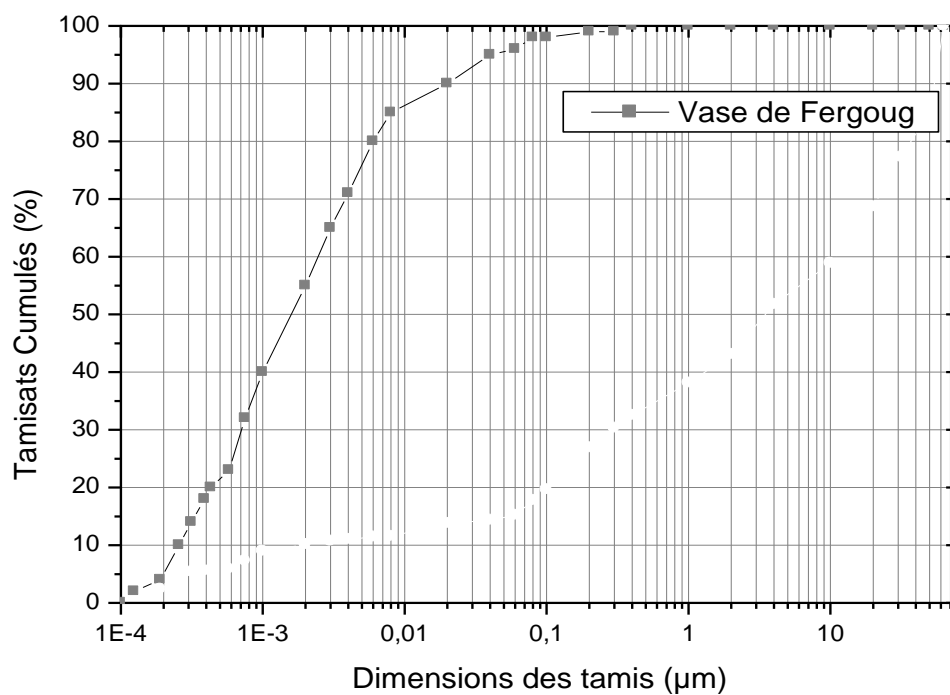


Figure IV-12 : Courbe granulométrique de la vase de Fergoug

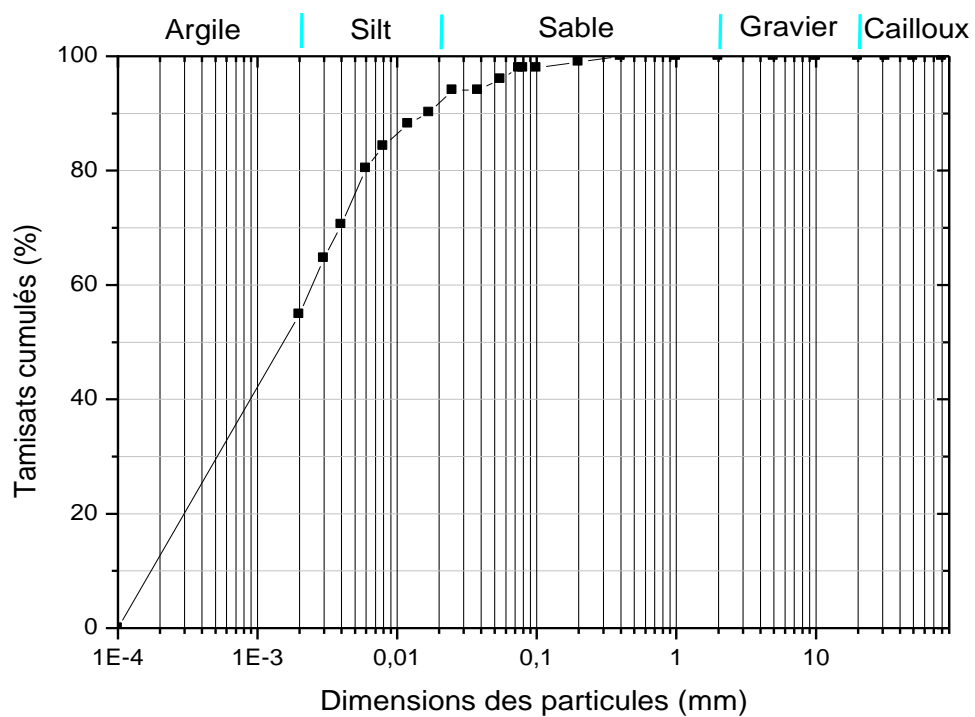


Figure IV-13 : Courbe granulométrique de la vase d'Ouizert

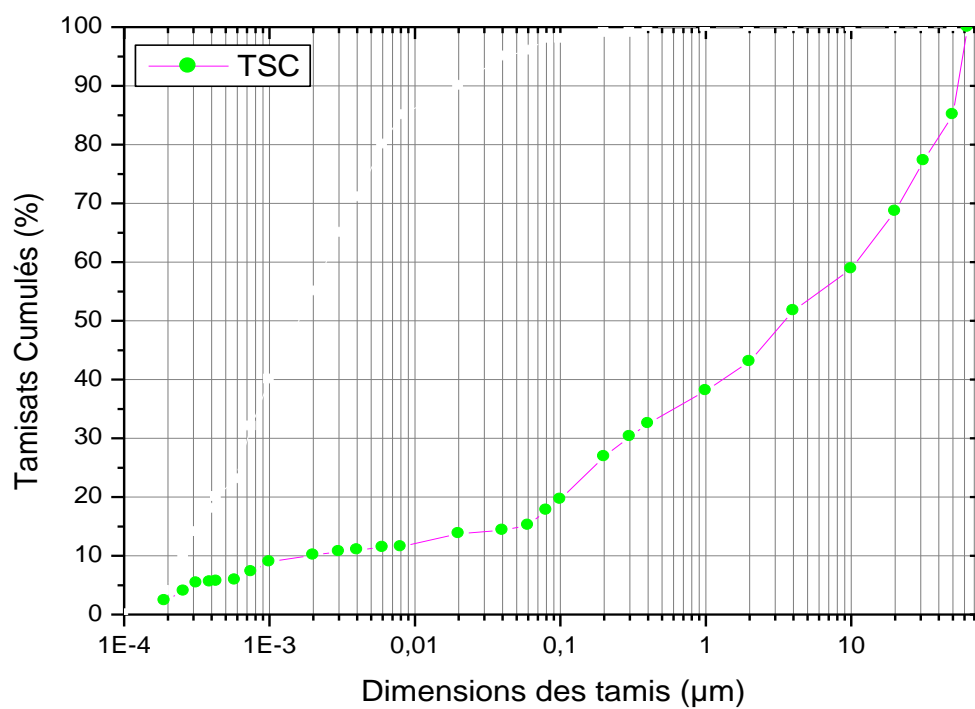


Figure IV-14 (a) : Courbe granulométrique de TSC

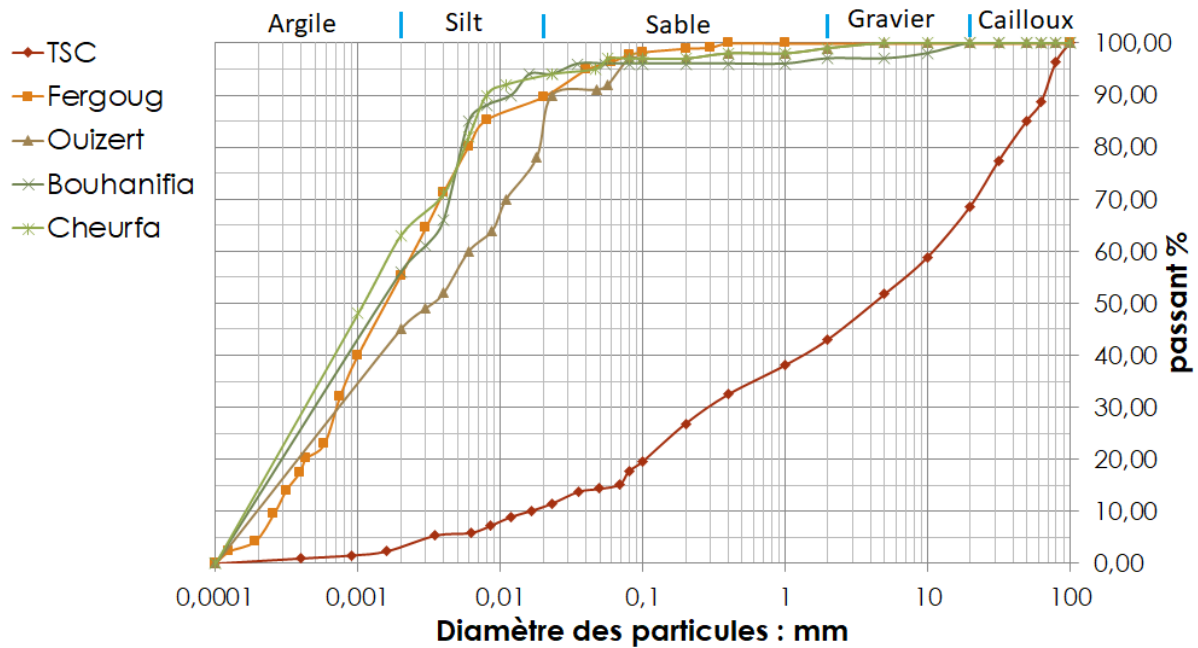


Figure IV-14 (b) : Courbe granulométrique des vases étudiés et TSC

Les résultats du tableau IV-6, ainsi que les courbes des graphes granulométriques, indiquent que tous les vases analysés sont constitués de matériaux extrêmement fins. Une telle distribution nous permet de classer les différents vases dans la catégorie des sols « Argilo-limoneux ». Cette teneur importante en particules fines est souhaitable si le sol est destiné à être utilisé comme un noyau central d'un barrage en terre (Mammeri, 2019).

Pour le cas du TSC, La distribution de ses composants est favorable aux particules grossières dont les dimensions se situent entre 2 mm et 20 mm, avec la plus forte proportion, c'est-à-dire (57 %) contre (32 %) pour les éléments ayant une taille entre 20 µm et 2 mm, alors que les particules dont les dimensions se situent entre 2 µm à 20 µm, elles représentent (8 %).

IV-1-3-3-1 Classifications élémentaires

L'analyse granulométrique nous permet notamment d'évaluer le degré d'uniformité et la courbure des courbes granulométriques des matériaux. Ces propriétés sont également utiles pour évaluer la résistance au gel ou la densité d'un sol. Il est possible d'obtenir quelques valeurs caractéristiques à partir de cette courbe.

A) Le Coefficient d'Uniformité C_u (de Hazen) :
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

- $C_u < 2$; la granulométrie est uniforme
- $C_u > 2$; la granulométrie est étalée

B) *Le Coefficient de Courbure Cc* : $Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$

- $Cu > 6$ et $1 < Cc < 3$; le sol bien gradué

En cas de prédominance d'une fraction granulométrique, le sol pourra être nommé de la manière appropriée, accompagné d'un adjectif décrivant la deuxième fraction distinguée, comme par exemple sable limoneux ou limon argileux.

Tableau IV-7 : Classification des vases brutes selon Cc et Cu.

Vases de Barrages	Cc	Cu	Classification selon le coefficient d'uniformité	Classification selon le coefficient de courbure
Bouhanifia	30	0,53	Granulométrie uniforme	Sol mal gradué
Chorfa	16	0,96	Granulométrie uniforme	Sol mal gradué
Fergoug	15	0,82	Granulométrie uniforme	Sol mal gradué
Ouizert	14	0,68	Granulométrie uniforme	Sol mal gradué
TSC	3,75	6000	Granulométrie étalée	Sol bien gradué

Selon les résultats des coefficients Cu et Cc, regroupés dans le tableau IV-7, la granulométrie des quatre vases étudiées est classée comme vase étalée et mal graduée. On outre la granulométrie des TSC comme étant une grave bien graduée avec une granulométrie étalée.

IV-1-3-3-2 Classification des vases selon l'abaque triangulaire de Taylor

De même au tableau IV-8, les qualificatifs de plasticité ont été exposés en se basant sur l'indice de plasticité. En ce qui concerne la granulométrie, il arrive parfois d'utiliser des diagrammes triangulaires comme celui de la figure IV-15 où trois éléments sont identifiés :

- **Sable** : particules de plus de 0,05 mm ;
- **Silt** (Limon) : particules de 0,05 à 0,005 mm ;
- **Argile** : particules de moins de 0,005 mm.

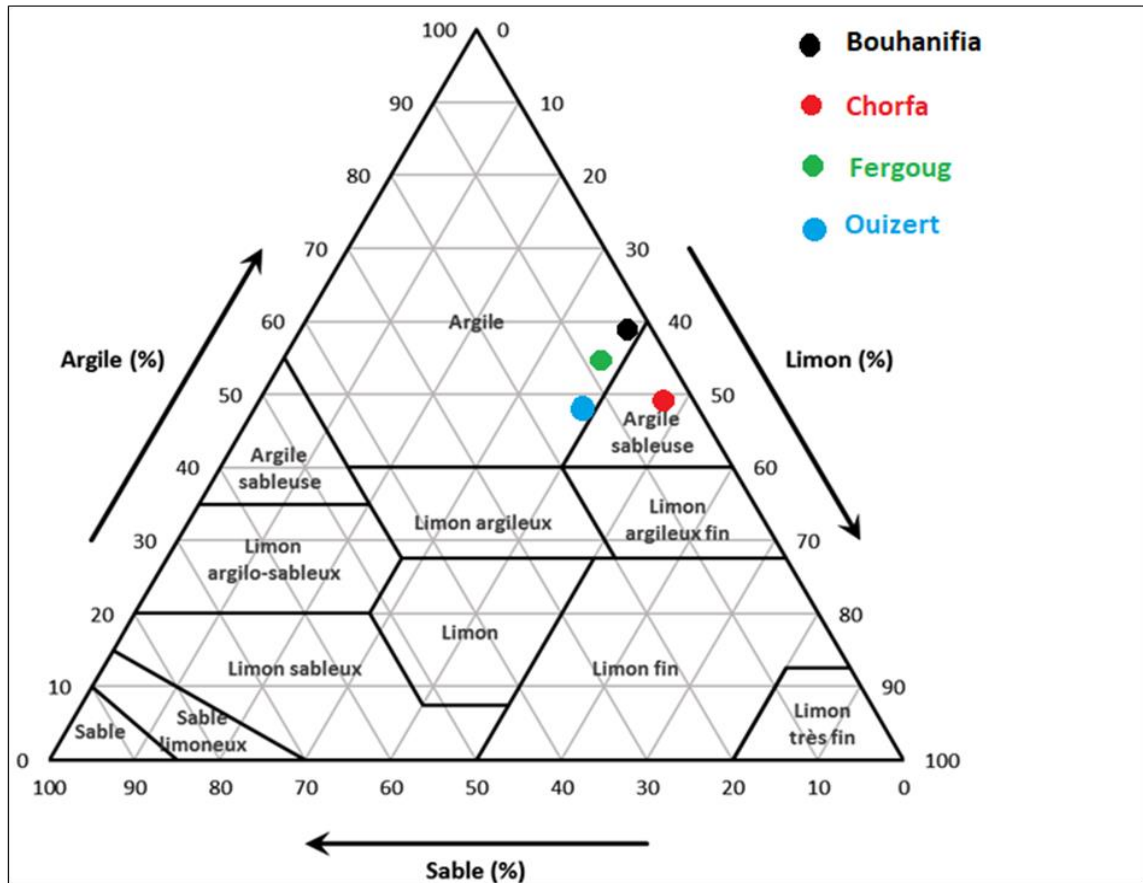


Figure IV-15 : Classement des sols fins selon le diagramme triangulaire de Taylor
(Avec moins de 30 % d'éléments de plus de 2 mm de diamètre).

Les classifications des vases, selon le diagramme triangulaire de Taylor, après projection des quantités des 03 éléments regroupés dans le tableau IV-8 (argile, limon et sable), montrent qu'il s'agit d'argiles limoneuses, pour les 4 vases de barrages étudiées.

La prédominance de la fraction sable dans le tuf TSC (85 %) place ce matériau dans la zone des sables limoneux, selon la classification de l'abaque de Taylor (Figure IV-15).

Tableau IV-8 : Classification des vases brutes selon l'abaque de Taylor (Owens & Rutledge, 2005).

Nature	Argile	Limon	Sable	Classe	Classification selon
Dimension	d < 2μm	2μm < d < 50μm	d > 50μm		L'abaque de Taylor
Bouhanifia	56	40	4	A1	Argile limoneuse
Chorfa	48	49	3	A1	Argile limoneuse
Fergoug	54,9	41,1	4	A1	Argile limoneuse
Ouizert	45	47	8	A1	Argile limoneuse
TSC	10	5	85	S	Sable limoneux

IV-1-4 Résultats des essais géotechniques sur les quatre vases

IV-1-4-1 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg (ou limites de consistance) désignent les proportions d'eau de référence correspondant aux variations d'état des vases. Au fur et à mesure que la concentration en eau augmente, le sol passe progressivement d'un matériau fragile à un matériau plastique, puis à un liquide visqueux, ce qui a un impact sur le comportement mécanique du sol.

Les limites d'Atterberg sont donc la limite de liquidité (W_L : proportion d'eau d'un sol remanié au point de passage entre l'état liquide et l'état plastique) ; la limite de plasticité (W_P : le taux d'humidité d'un sol remanié au point de passage entre l'état plastique et la solide) et l'indice de plasticité (I_P : Il s'agit de la variété des proportions d'eau pour lesquels le sol présente une forme plastique). Le calcul de cet indice repose sur la différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Il sert également à classifier les vases selon l'abaque de Casagrande (Abdelghani, 2014).

Les limites d'Atterberg des divers vases étudiés sont présentées dans le tableau IV-9 ci-dessous :

Tableau IV-9 : données des limites d'Atterberg obtenues pour l'ensemble des vases.

Vases de Barrages	Limite d'Atterberg			Classification selon « I_P »	Activités (A_c)	Classification selon A_c
	(W_L)	(W_P)	(I_P)			
Bouhanifia	55,63	28,16	27,47	Peu Plastique	0,49	Inactif
Chorfa	54,94	29,80	25,13	Peu Plastique	0,52	Inactif
Fergoug	62,54	29,29	33,26	Plastique	0,60	Inactif
Ouizert	56,52	33,42	23,10	Peu Plastique	0,51	Inactif

Ce tableau montre que les valeurs des limites d'Atterberg des divers vases sont très proches sauf pour la vase de Fergoug qui a une limite de liquidité supérieure d'environ 7% par rapport aux valeurs des autres vases. Selon la figure IV-16, l'indice de plasticité des vases de Bouhanifia, Chorfa et d'Ouizert est de classe peu plastique.

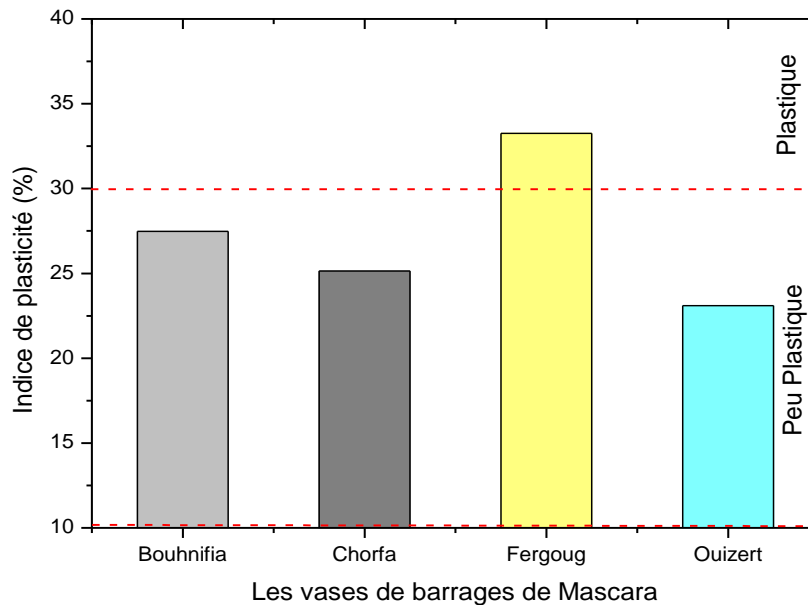


Figure IV-16 : Indice de plasticité " I_p " des vases de barrages

Par contre la valeur élevée d' I_p place la vase prélevée de barrage de Fergoug dans la catégorie des matériaux plastiques, selon la classification de l'indice de plasticité. Un assemblage de cette vase avec un matériau très peu plastique, comme le cas du tuf de Sidi Ali Cherif, nous donne un matériau plastique qui peut être utilisé comme matériau routier.

L'activité argileuse (A_c) se caractérise par la relation entre l'indice de plasticité I_p et la proportion d'argiles (éléments $< 2\mu m$) (Tableau IV-9). L'ensemble des valeurs de l'activité argileuse sont inférieures à 0,75, ce qui indique l'inactivité des quatre vases.

IV-1-4-2 La valeur au bleu de méthylène (VBS)

Cette valeur est un autre paramètre qui permet de définir l'argilosité (ou la propreté) du sol. La VBS (valeur au bleu du sol) est déterminé à l'aide de l'essai au bleu de méthylène à la tache sur une fraction de 0/5 mm. Une règle de proportionnalité est utilisée pour comparer la valeur trouvée à la fraction 0/50 mm.

Ce paramètre, connu sous le nom de VBS (valeur au bleu du sol), correspond à la quantité de bleu de méthylène qui peut s'adsorber sur les surfaces externes et internes des grains argileux présentes dans la fraction du sol étudié. Ainsi, il s'agit d'une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

La VBS exprime de manière générale la quantité et l'activité de la partie argileuse du sol. La quantité de bleu est exprimée en grammes pour 100 g de sol.

Nous pouvons observer les résultats obtenus dans la figure IV-17. La teneur en argile, estimée par l'essai au bleu de méthylène, est égale à 2,95, 5,20, 3,42 et 3,30 g/100g pour les vases de dragages des barrages de Bouhanifia, Chorfa, Fergoug et Ouizert, respectivement.

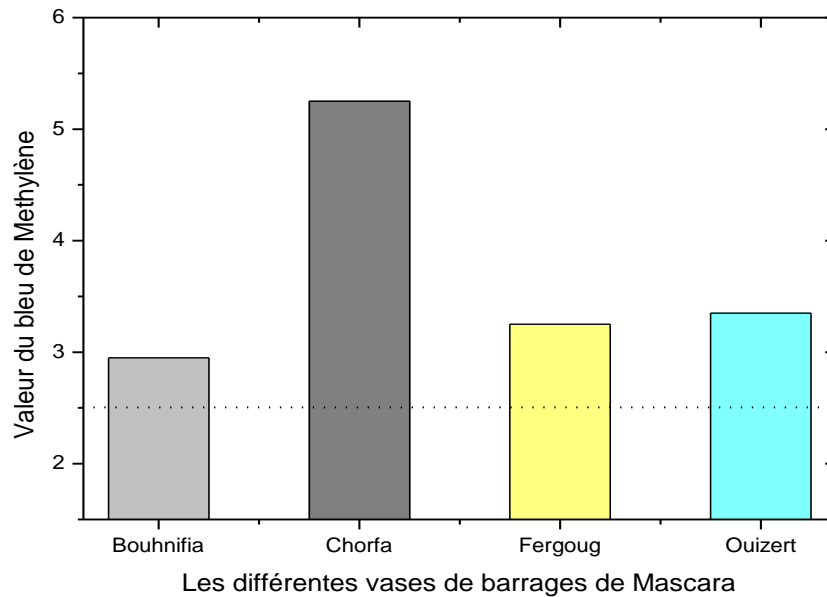


Figure IV-17 : Valeurs de bleu de méthylène "VBS" des vases de barrages étudiés

En se basant sur les seuils définis dans le GTR (2000), nous pouvons observer que tous les vases étudiés sont sensibles à l'eau ($2,5\text{g}/100\text{g} < \text{VBS} < 6\text{ g}/100\text{g}$), comme indiqué dans la figure IV-17. Ceci indique que ces vases ne sont pas utilisables à l'état brut en tant que couche de forme. Il est possible d'intégrer un pourcentage de ces matériaux avec un autre matériau de faible teneur en argile, et c'est l'objectif principal de notre travail.

Les résultats concernant la mesure au bleu de méthylène confirment la nature limoneuse-argileuse des 4 vases étudiées, montrées par la classification de l'abaque de Taylor. De plus, la valeur du bleu de méthylène (V_b) était similaire à celle des sédiments marins dragués, comme rapporté par Le Guern, (2014) et Kamali, (2008).

IV-1-5 Classification des différents vases

IV-1-5-1 Classification LPC modifiée

Les critères de plasticité associés aux limites d'Atterberg sont utilisés pour classer les sols fins. Elle est désignée dans le diagramme ci-dessous (figure IV-18). Quatre grandes catégories principales sont définies en fonction de la position du point représentatif dans le diagramme, avec la limite de liquidité en abscisse et l'indice de plasticité en ordonnée. (Le limon très plastique : L_T) ; (le limon peu plastique : L_P) ; (l'argile très plastique : A_T) ; (l'argile peu plastique : A_P).

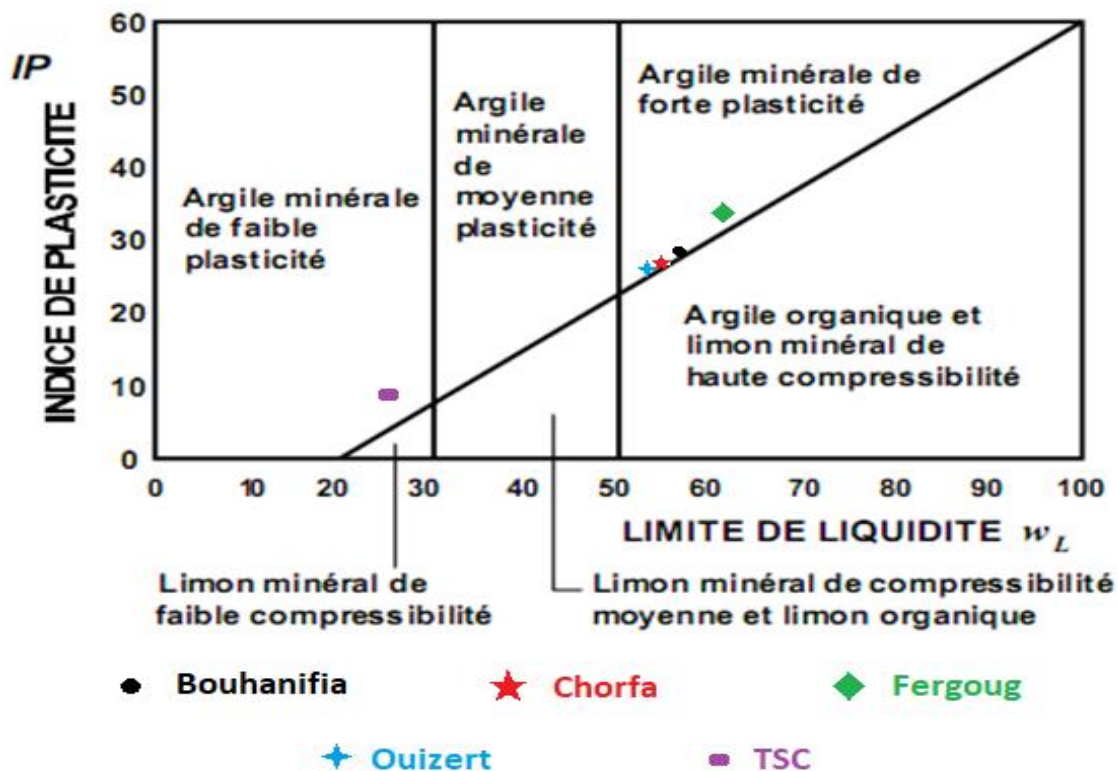


Figure IV-18 : Classification des vases selon le diagramme de Casagrande

Les laboratoires des Ponts et Chaussées ont adapté cette classification à partir de la classification américaine U.S.C.S. (Unified Soil Classification System). Les changements initiaux sont liés aux valeurs légèrement différentes d'ouverture du tamis, ce qui entraîne des différences dans les classes granulométriques.

Pour les sols fins (figure IV-18), le processus de classification tient compte des valeurs des limites d'Atterberg en positionnant le point dans le diagramme de Casagrande (w_L , IP). Comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau IV-10 : Classification des vases selon le diagramme de Casagrande

Vases de Barrages	Limite de liquidité (W _L)	Indice de plasticité (I _p)	Classification selon le diagramme de plasticité de Casagrande
Bouhanifia	55,63	27,47	Argile minérale très plastique
Chorfa	54,94	25,13	Argile minérale très plastique
Fergoug	62,54	33,26	Argile minérale très plastique
Ouizert	56,52	23,10	Argile minérale très plastique
TSC	25,19	09,32	Argile minérale de faible plasticité

Donc selon le diagramme de Casagrande tous les vases de Bouhanifia, Chorfa, Fergoug et Ouizert de la ville de Mascara sont des argiles minérales très plastiques. Par contre le tuf de Sidi Ali Cherif est classé comme étant une argile minérale de faible plasticité.

IV-1-5-2 Classification GTR des sols destinés pour les routes (norme NF P 11-300, 1992)

Pour pouvoir les utiliser dans les constructions routières, la qualité des vases doit répondre à certaines exigences, dont la granulométrie définie par la classification dite GTR (Guide des Terrassements Routiers) (SETRA-LCPC, 2000). Cette classification regroupe les sols, les matériaux rocheux et les matériaux particuliers (dont les sols contenant de 3 % en matière organique et plus) comme indiqué dans le graphique (figure IV-19).

Selon la classification géotechnique des matériaux, les sols sont classés en 6 catégories : A, B, C, D, R et F. Le tableau IV-11 est le fascicule 1 du GTR (Tableau de classification des matériaux en fonction de leur nature).

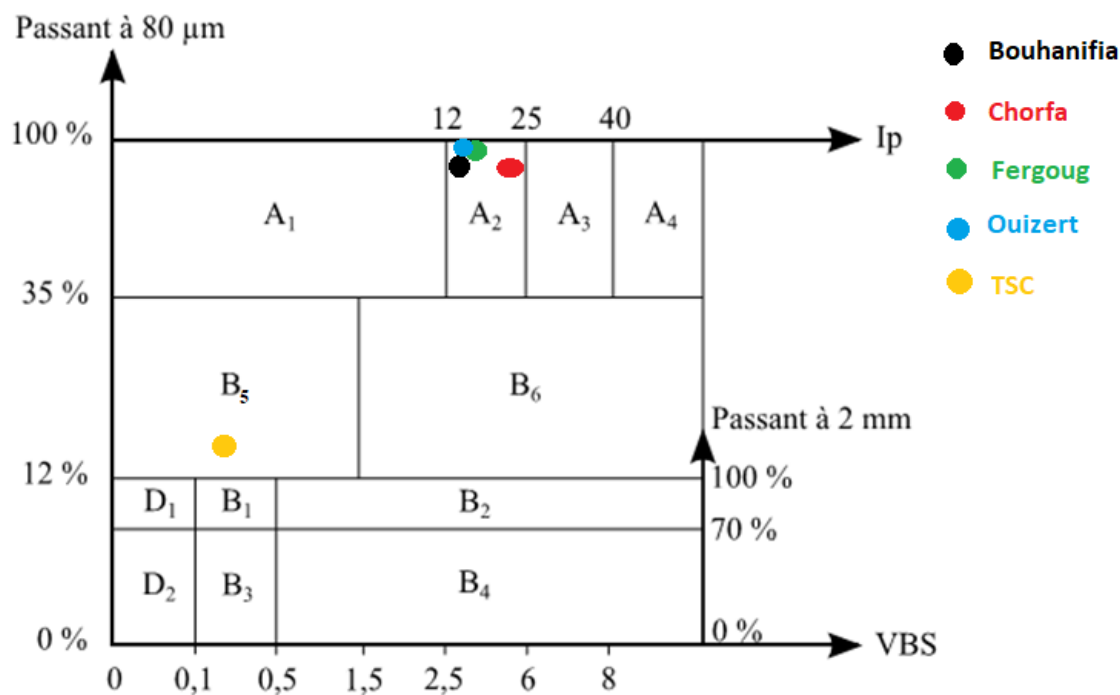


Figure IV-19 : Classification des sols ayant un D_{max} inférieur à 50 mm en fonction du GTR (SETRA-LCPC, 1992).

Les critères permettant la classification sont classés en trois catégories : les critères de nature, les critères de comportement mécanique et les critères d'état.

Tableau IV-11 : Classes principales du GTR (1992)

Classe	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50$ mm	A1 à A4 selon VBS ou IP
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50$ mm Passant à 80 $\mu m > 35\%$	B1 à B6 selon VBS ou IP et tamisât
C	Sols comportement des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50$ mm Passant à 80 $\mu m > 12\%$ Ou Passant à 80 $\mu m \leq 12\%$ + VBS $> 0,1$	30 sous-classes selon VBS Ou IP et tamisât à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq 0,1$ Passant à 80 $\mu m \leq 12\%$	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	Nature pétrographique (Norme NF P 11-300, 1992)	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Teneur en éléments chimiques (Norme NF P 11-300, 1992)	

Selon la taille maximale des éléments les plus volumineux présents dans les vases étudiés, il s'agit de la classe A pour l'ensemble des vases étudiés. Le D_{\max} est inférieure à 50 mm et le pourcentage du passant au tamis 80 μm est supérieure à 35 %, pour les quatre vases selon l'analyse granulométrique. Donc ces vases correspondent à la classe A des sols fins, mais cette classe se divise en 4 sous-classes selon le résultat de bleu du sol (VBS) et ou l'indice de plasticité (I_p).

Les vases prélevés dans les barrages des villes de Mascara ont une proportion de vases, de moins de 80 μm , supérieure à 35 % et des VBS entre (2,5 et 6). Ils appartiennent donc à la classe A₂ (sols fins argileux). Le comportement de ces sols est totalement régi par la fraction fine.

IV-1-5-3 Classification selon la teneur en CaCO_3 par Calcimètre

Cet essai a réalisé à l'aide de calcimètre de Bernard conformément aux principes de la norme EN 94-048 (1996). La méthode de détermination consiste à dissoudre le carbonate de calcium (CaCO_3) présent dans le sol avec de l'acide chlorhydrique (HCl). En raison de l'excès d'acide dans la réaction, la quantité de gaz carbonique (CO_2) produite est directement liée à la quantité de CaCO_3 inclus à l'échantillon.

La quantité de CaCO_3 présente dans un sol fin est un indicateur précieux de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau. En fonction de cette concentration, le comportement du sol varie de celui d'une argile à celui d'une roche, avec une valeur de transition de 60 à 70 %. Comme la granulométrie, il s'agit d'une caractéristique stable du sol, qu'il n'est pas nécessaire de mesurer à chaque analyse, tant que la zone de prélèvement est stable et bien identifiée.

Quelques éléments pour interpréter la quantité totale de calcaire. La nature plus ou moins calcaire du sol est décrite de la manière suivante. Il se présente sous la forme d'une annotation des rapports de résultats d'analyses (tableau IV-12).

Tableau IV-12 : Classification géotechnique des sols en fonction du taux de CaCO_3

Teneur en CaCO_3	Désignation géotechnique	
0 – 10	Argile	Sols
10 – 30	Argile marneuse	
30 – 70	Marne	
70 – 90	Calcaire marneux	Roches
90 – 100	Calcaire	

Le calcimètre de Bernard décelé les proportions de CaCO_3 d'environ 15,0%, 31,0 %, 28,0 % et 13,5 % pour les vases de Bouhanifia, Chorfa, Fergoug et Ouizert, respectivement. Ce résultat place les vases de Bouhanifia, Fergoug et Ouizert parmi les sols à dominante « Argile marneuse », et la vase de Chorfa parmi les sols « marneux », selon la classification issue de la norme EN 94-048 (1996), mentionnée dans le tableau IV-12 ci-dessus et dont la teneur est comprise entre (10 et 30) % pour les sols Argileux marneux et (30 - 70) % pour les sols marneux.

L'analyse du taux de carbonate de calcium au calcimètre du TSC enregistre une valeur d'environ 90 %. Cette valeur confirme la nature calcaire du TSC.

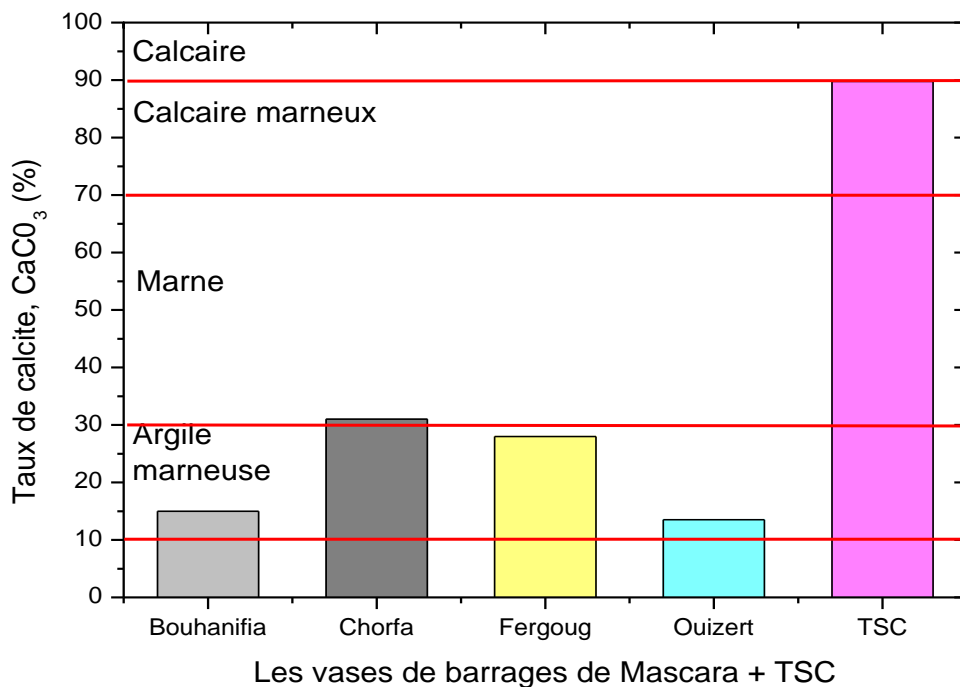


Figure IV-20 : Le taux du carbonate de calcium des vases de barrages

En fonction de la quantité de calcaire, il existe cinq (05) catégories de sols calcaires (Loz et Mathieu, 1990) :

- Sols très faiblement calcaires ($\text{CaCO}_3 < 2$ %).
- Sols faiblement calcaires (CaCO_3 de 2 à 10 %).
- Sols moyennement calcaires (CaCO_3 de 10 à 25 %).
- Sols fortement calcaires (CaCO_3 de 25 à 50 %).
- Sols très fortement calcaires ($\text{CaCO}_3 > 50$ %).

Tableau IV-13 : Classification géotechnique des vases en fonction du taux de CaCO_3 (selon Loz et Mathieu, 1990)

Les vases	Bouhanifia	Chorfa	Fergoug	Ouizert
Lecture finale	15,0	31,0	28,0	13,5
	15,5	32,0	28,5	13,0
Taux du CaCO_3	14,9	30,88	27,94	13,0
Selon Loz et Mathieu (1990)	Sol moyennement calcaires	Sol fortement calcaires	Sol fortement calcaires	Sol moyennement calcaires
Classification selon NF P 94-048 (1996)	Argile marneuse ou limon marneux	Marne	Argile marneuse ou limon marneux	Argile marneuse ou limon marneux

Les vases de Bouhanifia et Ouizert ont 15 et 13,5 % de calcaire moyen, tandis que ceux de Chorfa et Fergoug en ont 31 et 28 % respectivement, ce qui les classe comme sols fortement calcaires, selon Loz et Mathieu, (1990). Le TSC a une proportion de calcaire très élevée, proche de 90 %, ce qui le classe comme sol très fortement calcaire.

Nous allons comparer, dans le tableau qui suit (tableau : IV-14), les pourcentages de carbonate de calcium (CaCO_3) obtenus par deux essais différents, afin de vérifier leur proximité et de déterminer si l'un peut servir de référence pour l'autre.

Tableau IV-14 : Comparaison entre la quantité du CaCO_3 obtenue par le calcimètre et par DRX.

Matériau	Teneur en CaCO_3 par Le calcimètre (%)	Teneur en CaCO_3 par DRX (%)
Bouhanifia	15	14,74
Chorfa	31	26,10
Fergoug	28	32,21
Ouizert	13,5	13,56
TSC	89,77	88,64

L'analyse minéralogique par l'analyse DRX et le calcimètre de Bernard sont deux essais qui permettent de déterminer le pourcentage de carbonates. Nous avons comparé leurs résultats et nous avons constaté qu'ils sont proches, ce qui valide les deux expériences. En cas d'absence l'essai de taux de carbonate par calcimètre de Bernard, le DRX peut être suffisante.

IV-1-6 Récapitulation des résultats de la première phase

Dans la première phase de cette étude, nous avons mené un travail expérimental permettant l'analyse chimique, physique et géotechnique des vases de dragages des barrages de la wilaya de Mascara, selon l'organigramme montré par la figure VI-21. Le but principal de cette recherche est d'évaluer la potentialité d'exploitation de ces déchets minéraux comme matériaux utilisés dans la construction routière.

Nous avons sélectionné les vases des quatre barrages les plus touchés par le phénomène de dévasement. La caractérisation des différentes matières sédimentaires, et l'analyse de tous les résultats acquis, vont nous permettre de comparer entre les qualités de ces vases, ce qui va nous aider pour nos choix dans la suite du programme de recherche à réaliser. Cette première phase de notre thèse, nous sera très utile, dans la mesure où soit nous allons continuer la deuxième phase avec les quatre vases en parallèles ou bien procédé à des éliminations, d'une vase ou plus, dans le cas d'une grande similarité entre les propriétés de ces différentes vases.

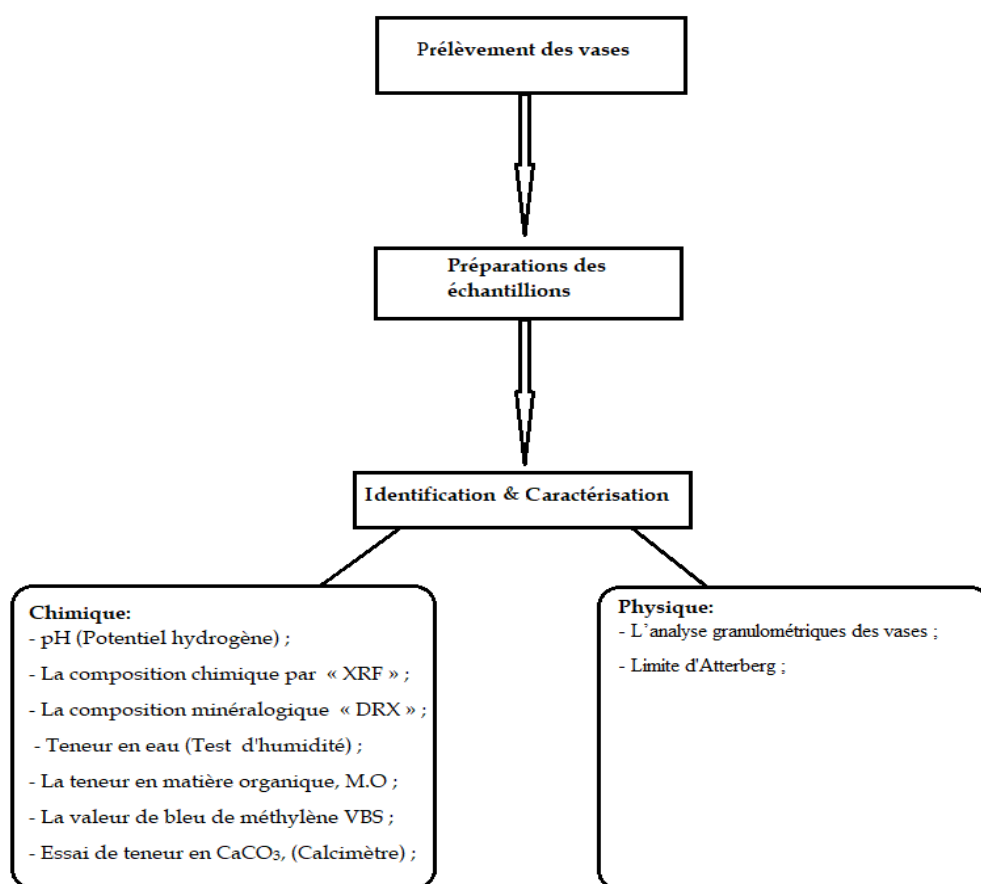


Figure IV-21 : Organigramme des travaux de la première partie.

L'analyse des résultats de la première partie, permet l'allègement du programme de la deuxième partie, ce qui va nous permettre l'élargissement des paramètres à étudier dans les parties suivantes de cette étude.

Tableau IV-15 : Récapitulation des résultats de la première partie

	Matériaux				
Paramètres	Bouhanifia	Chorfa	Fergoug	Ouizert	TSC
P^H	8,6	8,4	8,7	8,1	8,6
W(%)	42	37	52	50	8,34
M.O.	1,85	6,45	3,15	3,00	0,31
Argile d<2µm	56	48	54,9	45	3
Cu	0,53	0,96	0,82	0,68	6000
Cc	30	16	15	14	3,75
W_L (%)	55,63	54,94	62,54	56,52	25,19
W_P (%)	28,16	29,80	29,29	33,42	15,87
I_P (%)	27,47	25,13	33,26	23,12	9,32
Activités Argileuse	0,49	0,52	0,60	0,51	3,1
Classification (A_C)	Inactif	Inactif	Inactif	Inactif	Peu actif
VBS	2,95	5,20	3,42	3,3	0,247
CaCO₃ (%)	15	31	28	13,5	89,77

Selon les résultats rassemblés au tableau IV-15, on remarque une légère convergence dans les résultats des échantillons des barrages Ouizert, Bouhanifia et Fergoug en ce qui concerne le P^H, la teneur en matière organique et la valeur de bleu de méthylène. Ce qui explique ces résultats est la présence de ces trois barrages sur un même cours d'eau, en commençant par Ouizert à travers l'Oued Sidi Ibrahim, qui est divisé en deux parties à la périphérie de la commune d'Ain Fekan, puis jusqu'à Bouhanifia à travers l'Oued El Hammam,

en passant par Bouhanifia et arrivant également au barrage de Fergoug à travers Oued El Hammam (voir la figure IV-22).

Quant au barrage de Chorfa, il est situé à proximité du barrage de Sarno à Sidi Bel Abbès, ainsi qu'auprès d'Oued el-Mabtouh (Sidi Bel Abbès), loin des trois autres barrages Ouizert, Bouhanifia et Fergoug, et cela s'explique certaines différences dans les résultats évoqués ci-dessus.



Figure IV-22 : localisation des quatre barrages (Chorfa, Ouizert, Bouhanifia et Fergoug)

IV-1-7 Conclusion de la partie première

Cette partie représente une étude caractéristique (physico-chimique et géotechnique) sur les vases des barrages de Mascara. L'objectif de cette partie est de mettre en lumière les caractéristiques des différentes vases des barrages de notre wilaya et leur classification selon les normes en vigueur. Sur la base des résultats obtenus, nous avons choisis la vase des barrages de Fergoug pour les raisons :

- 1- La présence de la chaux libre CaO dans l'analyse chimique (17 %) et la calcite CaCO_3 selon l'analyse minéralogique DRX (le taux le plus élevée), ce qui assure de très bonne portance (Chou et al, 2011) ;
- 2- L'état d'envasement très élevée du barrage 97,77% selon Bettaher (2023), actuellement hors service ;
- 3- La compatibilité des propriétés entre celui-ci et le matériau routier TSC. Par exemple, l'indice de plasticité est non mesurable dans le matériau routier et dans les vases du barrage de Fergoug, il constitue la proportion la plus élevée parmi les quatre vases ;
- 4- L'influence de la matière organique est négligeable puisqu'elle est dans la classe faiblement organique ;
- 5- Les caractéristiques physico-chimiques et géotechniques des vases étudiées sont très rapprochées. Pour éviter un volume de travail très consistant, il nous suffit de choisir une seule vase pour la suite du programme expérimental.

Phase II : Valorisation de la vase de Fergoug dans le domaine routier

IV-2-1 Introduction

Actuellement, le changement du contexte socio-économique dans le secteur des ouvrages hydrauliques (barrages et retenues d'eau) montre clairement la nécessité de maximiser la réutilisation des produits provenant du dragage présent dans les zones de projet, même ceux qui ont des propriétés, en particulier mécaniques, qui sont modestes. Parfois, les méthodes de perfectionnement des propriétés mécanique ne suffisent pas à conférer aux matériaux de chaussée qui ont une portance souhaitable. Cependant, on peut les perfectionner grâce à un procédé de traitement, permettant ainsi leur réutilisation.

La mise en valeur des vases de dragage revêt une importance capitale, en accord avec la philosophie du développement durable. Elle consiste à éliminer les substances qui gênent l'activité des ports et des barrages, et à exploiter ces dépôts (vases) dans divers secteurs, avec le respect des normes environnementales. La sélection de la méthode de valorisation des vases dépend principalement des exigences techniques, économiques, environnementales et réglementaires. La mise en valeur des résidus de dragage représente une solution à la problématique de gestions. Il existe plusieurs méthodes pour valoriser les vases issus de dragage. Effectivement, les domaines d'activité des travaux publics, de l'agriculture ou encore l'environnement sont capables d'absorber un volume important de ces matériaux et constituer ainsi des emplacements potentiels.

Cette deuxième partie se concentre sur la mise en valeur des vases de dragage, extraits du barrage de Fergoug, pour leur utilisation dans le domaine routier, selon l'organigramme de la figure IV-23 et en tenant compte de l'intensité de cette activité et de sa grande demande en matériaux naturels non renouvelables.

La taille des granulés et la teneur en matières organiques sont des facteurs essentiels dans l'utilisation des vases de dragage dans le domaine routier, comme nous l'avons déjà établi lors dans la partie précédemment. La caractérisation géotechnique des vases de barrage de Fergoug draguée révèle une forte teneur en eau initiale, une plasticité élevée, une quantité importante de fractions fines et un faible taux de matières organiques. Ce genre de matériau présente des désagréments d'utilisation, à l'état brut dans la réalisation des routes, en raison de leur propriété d'absorption d'eau très élevée et de leur capacité à être compressées. De plus, une analyse Proctor-IPI menée sur les vases bruts a mis en évidence un indice portance immédiat faible.

Afin d'améliorer la valorisation en technique routière, nous avons opté pour une substitution partielle du tuf de la carrière de Sidi Ali Cherif par différents pourcentages de vase de barrage de Fergoug (5, 10, 15, 20 et 25 %). Les 5 formulations ont été choisies pour comparer leurs résultats à celle du TSC sans substitution et d'identifier le mélange le plus approprié pour le traitement. L'ensemble des essais réalisés dans cette partie sont illustré par l'organigramme de la figure IV-23.

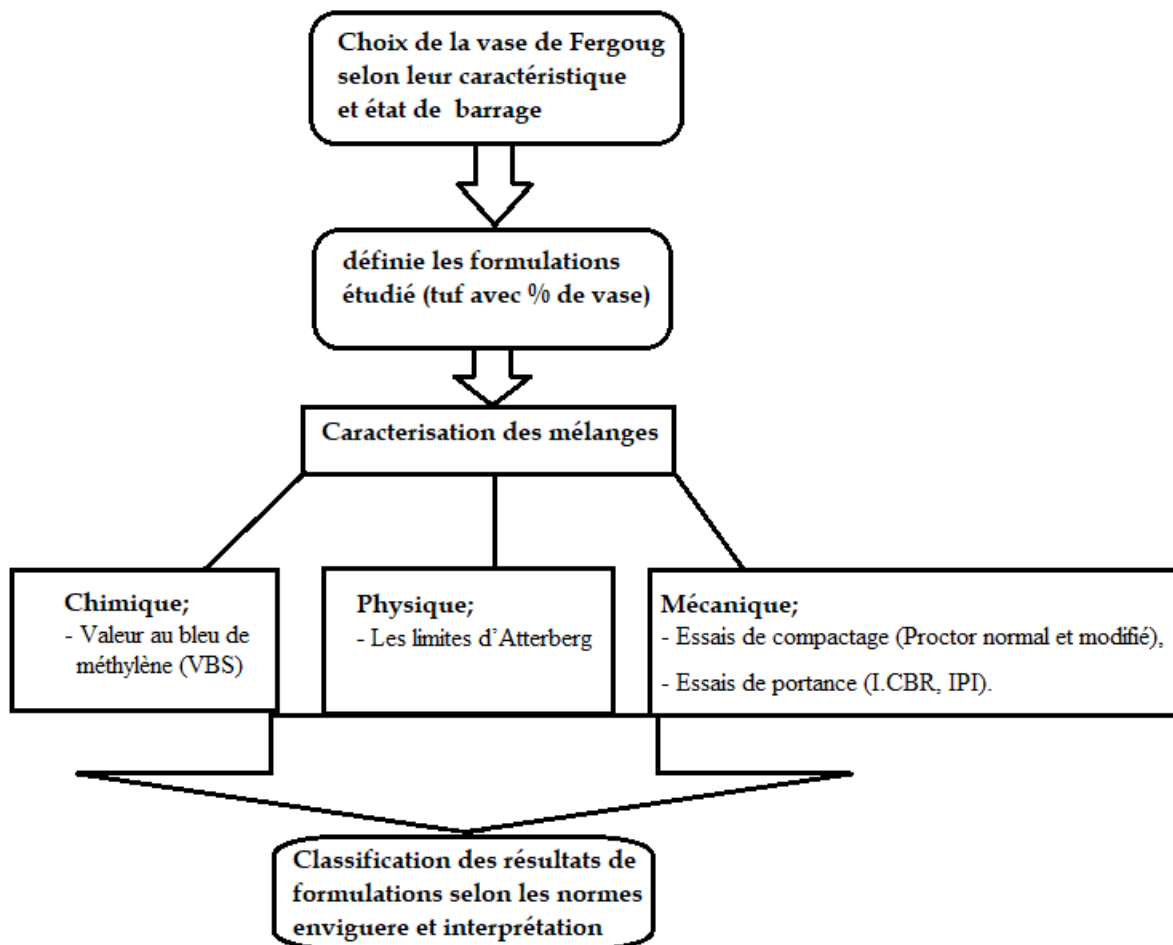


Figure IV-23 : L'organigramme des travaux réalisés dans la deuxième partie

IV-2-2 Résultats des essais chimiques

IV-2-2-1 valeur au bleu méthylène (VBS)

Comme mentionné ci-dessus, cet essai permet de définir l'argilosité (ou la propreté) des mélanges préparés. La valeur de bleu du sol (VBS), correspond à la quantité de bleu de méthylène qui peut s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses présentes dans la fraction des mélanges en question. Ainsi, la valeur VBS exprime la quantité et l'activité de la fraction argileuse présente dans le matériau.

Le tableau IV-16 et la figure IV-24 présentent les résultats expérimentaux de la valeur VBS, conformément à la norme EN 933-9 (2013), du VBF amélioré par la présence du TSC. La substitution de Tuf de Sidi Ali Cherif par la vase du Fergoug montre une augmentation élevée (19 % et 180 % pour les combinaisons de 5 et 25 % respectivement), par rapport au TSC + 0 % de vase. L'augmentation de la valeur au bleu de méthylène est due principalement à l'augmentation de la partie argileuse dans le mélange.

Tableau IV-16 : Valeur de l'essai VBS

L'échantillon	Valeur de VBS g/100g	Appréciation des mélanges selon GTR (2000)
TSC+0 % vase (Témoin)	0,247	
TSC+ 5 % vase	0,361	Limoneux
TSC+ 10 % vase	0,481	Limoneux
TSC+ 15 % vase	0,590	Limoneux
TSC+ 20 % vase	0,694	Limoneux
TSC+ 25 % vase	0,850	Limoneux
Vase Fergoug	2.58	Limon argileux

Selon les indications du guide technique (GTR, 2000) pour les remblais et des couches de forme (Tableau IV-16), les mélanges avec 5, 10, 15, 20 et 25 % de VBF sont classés comme sols limoneux.

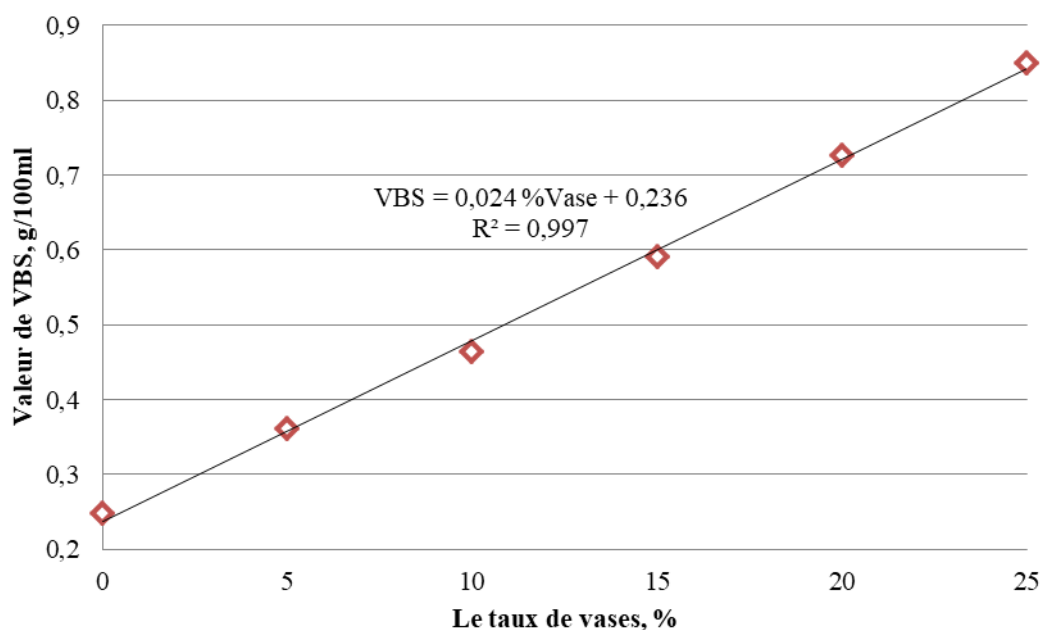


Figure IV-24 : Valeur au bleu de méthylène des mélanges TSC-Vase

L'équation (Eq. IV-1) représente la relation entre la valeur du VBS et le taux de la substitution du TSC par les vases de dragage. Le VBS augmente selon une fonction linéaire avec un coefficient de corrélation égal à 99,7 %. Cette valeur très élevée du coefficient de corrélation indique que l'argilosité des mélanges TSC-Sédiment a une forte relation avec la quantité des vases de dragage.

$$W_p = 0,024 (\text{VBF}) + 0,236 ; \text{ où } R^2 = 0,997 \text{ (Modèle Linéaire)} \quad (\text{Eq. IV-1})$$

IV-2-3 Résultats des essais physiques

IV-2-3-1 Limites d'Atterberg

La mesure des limites d'Atterberg des mélanges TSC-VBF, réalisée selon la norme (ISO 17892-12) concernant les formulations analysées et représentée dans la figure IV-25 de même que le tableau IV-17, nous avons observé une augmentation de la limite de liquidité, passant de 4.24% à 31% pour une substitution de 5% à 25% par de la vase, respectivement. L'augmentation de la limite de liquidité est due à l'augmentation de la surface totale des particules des mélanges en raison des grains fins du vase ajoutée. L'augmentation de la surface spécifique du TSC composé avec l'accroissement du taux de substitution de la vase conduit à une demande de plus en plus élevée d'eau. Selon leur granulométrie, la finesse de la vase est très élevée par rapport à celle du tuf TSC.

Le lien entre la limite de liquidité (W_L) et l'augmentation du taux de sédiment du barrage est représentée par la figure IV-25. Cette augmentation à une relation linéaire, selon l'équation (Eq. IV-2). Le coefficient de R^2 égal à 99,5% indique une corrélation forte entre (W_L) et le taux de sédiment.

$$W_L = 0,294 (\% \text{ Vase}) + 25,40, \text{ avec } R^2 = 0,995 \text{ (Modèle linéaire)} \quad (\text{Eq. IV-2})$$

Les résultats concernant les mesures de W_p de l'ensemble des formulations ont été regroupé dans la figure IV-25. De la même manière que les résultats de W_L , l'accroissement du taux de vase de Fergoug indique une augmentation des valeurs de W_p . La combinaison TSC-Vase indiquait une croissance de près de 1,4 et 7,5 % concernant les mélanges (TSC + 5 % VBF) et (TSC + 25 % VBF) respectivement.

On a observé que la limite de plasticité à diverses concentrations en vase a mis en évidence une faible modification, comparativement aux valeurs de la limite de liquidité (W_L). La limite de plasticité a augmenté immédiatement en raison de la floculation des particules d'argile.

De plus, l'incorporation de vase augmente la limite de plasticité est principalement due au remplacement des particules plus grosses des TSC (Sidi Ali Cherif) par des particules plus fines de vase brut de Fergoug.

L'équation (Eq. IV-3) représente la relation entre la valeur de la limite de plasticité et le taux de la substitution du TSC par les vases. La W_P augmente linéairement avec un coefficient de corrélation égal à 92,8 % (figure IV-25). Cette valeur du coefficient de corrélation indique que la plasticité des mélanges TSC-Vase à une forte relation avec la quantité de vase du barrage de Fergoug.

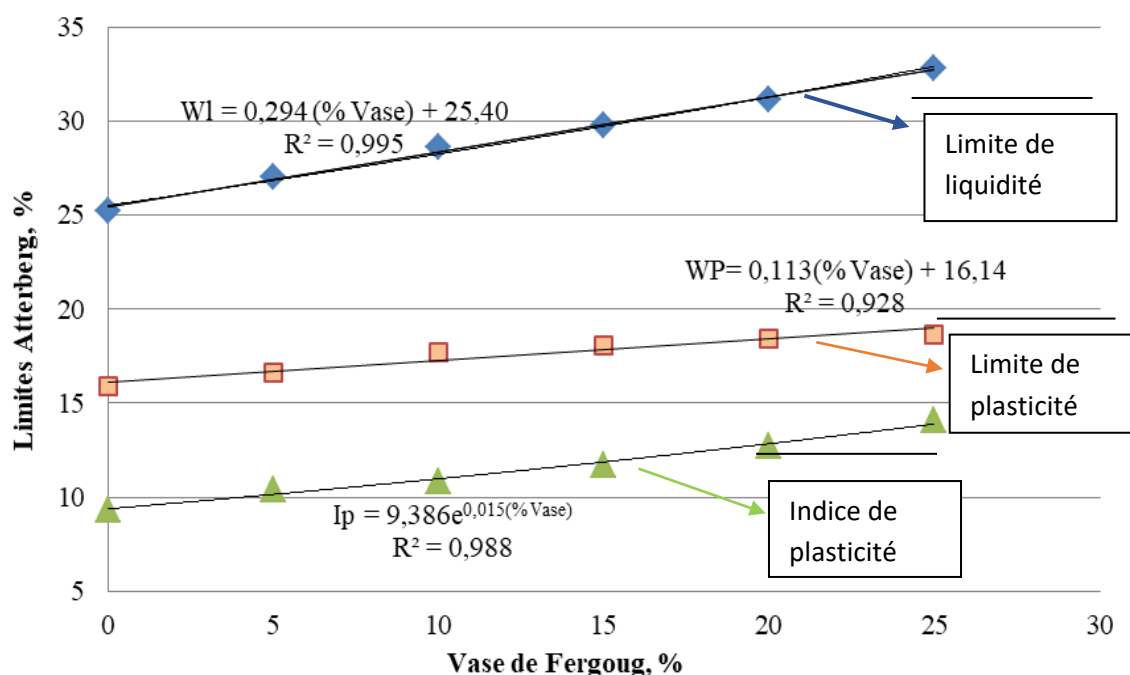


Figure IV-25 : Limites Atterberg des mélanges TSC-VBF avec 0, 5, 10, 15, 20 et 25% de VBF

$$W_P = 0,113 (\% \text{ VBF}) + 16,14, \text{ où } R^2 = 0,928 \text{ (Modèle linéaire)} \quad (\text{Eq. IV-3})$$

L'indice de plasticité, également appelé « I_P », se situe entre les états liquides et plastiques. La plasticité est une propriété des particules très fines ou argileuses du sol, en lien avec les couches d'eau adsorbée, avec ou sans électrolytes dissous. Il est donc possible de comprendre que les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité d'un sol changent en fonction du poids de sa fraction argileuse et aussi en fonction des minéraux argileux et des cations adsorbés dans ce sol.

Les résultats de la figure VI-25 montrent une modification faible de l'indice de plasticité après l'ajout du VBF, comparativement aux changements des W_L et W_P . Il est clair que l'addition de 5 % à 25 % du VBF fait augmenter l'état de liquidité de 11,7 à 31,3 %.

L'augmentation de l'indice de plasticité dans les mélanges contenant la vase indique une progression dans la maniabilité du mélange TSC-VBF. La quantité et la nature des minéraux argileux présents dans le matériau influencent fortement l'indice de plasticité (Boughazi et Grine, 2017). Ces résultats sont conformes au test au bleu de méthylène du mélange TSC-VBF (VBS) car ils sont explicitement corrélés de manière linéaire.

De la même manière, la corrélation entre l'indice de plasticité « I_P » et le taux de vase a été établie. D'après l'équation (Eq. IV-3), il existe une relation exponentielle entre l' I_P des mélanges TSC-VBF et le taux d'ajout de vase. Le coefficient de régression de cette relation est de l'ordre de 98,8 %.

$$I_P = 9,386e^{0,015VBF}, \text{ ou } R^2 = 0,988 \text{ (modèle exponentiel)} \quad (\text{Eq. IV-3})$$

Tableau IV-17 : Classement des mélanges TSC-Vase selon Burmister. (1967)

Formulations	W_L	W_P	I_P	Classement selon Burmister
Sidi Ali Cherif (Témoin)	18,62	13,47	5,15	Faiblement plastique
Sidi Ali Cherif +5 % vase	19,41	13,64	5,77	Faiblement plastique
Sidi Ali Cherif +10 % vase	20,42	13,83	6,59	Faiblement plastique
Sidi Ali Cherif +15 % vase	21,84	14,02	7,82	Faiblement plastique
Sidi Ali Cherif +20 % vase	22,81	14,15	8,66	Faiblement plastique
Sidi Ali Cherif +25 % vase	24,51	14,46	10,13	Faiblement plastique

Les résultats des limites d'Atterberg obtenus classent l'ensemble des mélanges TSC-VBF comme un matériau faiblement plastique, d'après le classement établi par Burmister (1967) (tableau IV-17).

IV-2-4 Résultats des essais mécaniques

IV-2-4-1 Les essais de compactage (Proctor normal et Proctor modifié)

Le compactage a pour but de rendre un sol plus dense, ce qui contribue à optimiser ses caractéristiques mécanique et hydrauliques. Le compactage aide le sol à renforcer sa texture, à minimiser ses déformations et à optimiser sa portance et sa résistance. On a utilisé l'essai Proctor pour réaliser le compactage des mélanges TSC-VBF.

On distingue deux sortes d'essai Proctor qui ont des énergies de compactage diverses. L'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié. Pour la création des remblais, on se sert de l'essai Proctor normal tandis que pour l'exécution des couches de chaussée, on procède au compactage en utilisant l'essai Proctor modifié qui requiert une plus grande d'énergie (Matthieu, 2023).

IV-2-4-1-1 Proctor Normal

En premier lieu, nous avons évalués l'aptitude des mélanges TSC-vase bruts à être utilisés pour la construction des remblais. Le test Proctor normal ainsi, a été sélectionné comme essai de compactage conformément à la norme EN 13286-1 (2022). Ensuite nous avons évalué la possibilité d'utilisé les différents mélanges comme couches de chaussée, en utilisant l'essai Proctor modifié.

Selon l'essai Proctor, développé par Ralph R. Proctor, les résultats de compactage des différents mélanges sont représenter par les graphiques des figures IV-26, IV-27 et IV-28 (Proctor Normal) et les graphiques des figures IV-29, IV-30 et IV-31 (Proctor Modifier).

La courbe Proctor prend la forme d'une cloche progressivement, lorsque la teneur en eau du mélange augmente, la densité sèche s'accroît, indiquant que le matériau devient plus compact et résistant. La courbe atteint ensuite un maximum pour une valeur spécifique de la teneur en eau, connue sous le nom d'optimum Proctor (OPN %). Pour cette valeur de l'OPN, la densité sèche est maximale. Si l'augmentation de la teneur en eau se poursuit, le sol se fragilise de nouveau.

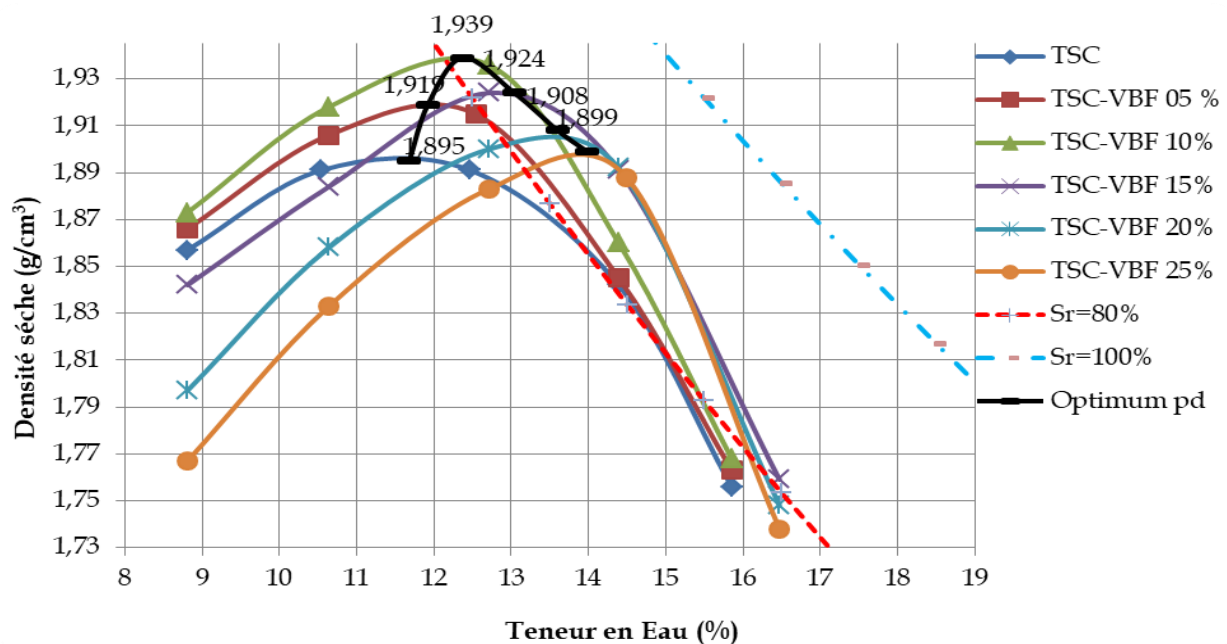


Figure IV-26 : L'ensemble des courbes de compactage Proctor normal (OPN)

Les données de l'essai Proctor normal pour les mélanges TSC-VBF bruts sont regroupées sur la figure IV-26. Les courbes de degré de saturation 80 % et 100 % sont également présentées. On peut remarquer qu'en ajoutant de l'eau, la densité sèche augmente jusqu'à atteindre un pic pour chaque mélange.

Cette étape de compactage est associée à la lubrification et l'aménagement des particules, ce qui permet d'améliorer la compacité des mélanges. Les teneurs en eau optimale pour obtenir les densités sèches optimales sont regroupées sur la figure IV-27. Au-delà de ces teneurs, l'eau commence à interdire aux grains de combler certains endroits et les densités sèches diminuent avec la croissance du contenu en eau (Intervalles de saturation allant de 80 à 100 %).

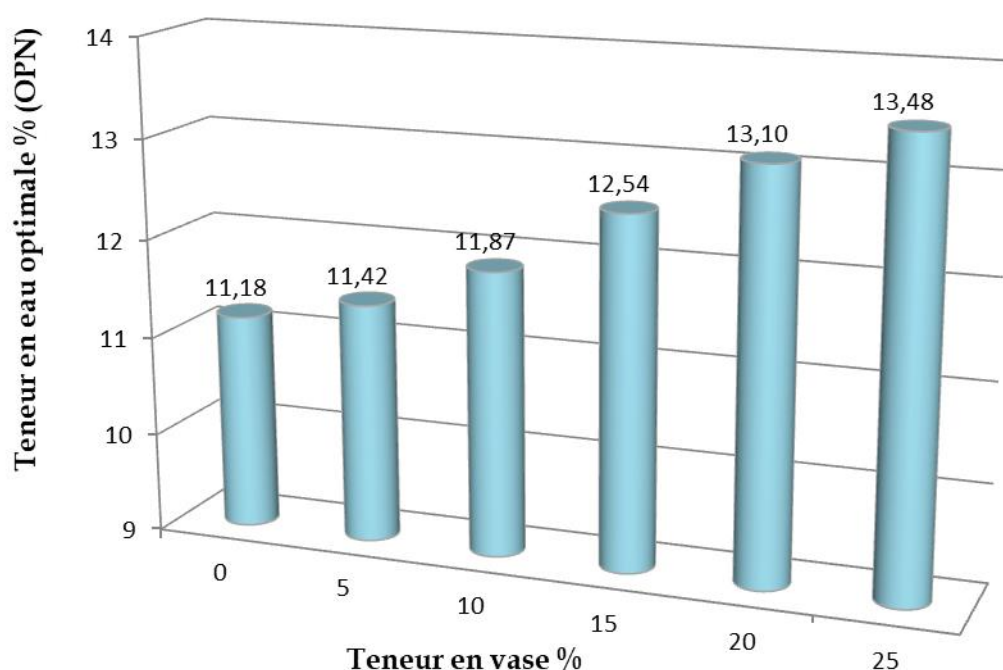


Figure IV-27 : Variation de la teneur en eau de l'optimum en fonction de la teneur en vase (OPN)

La récapitulation des densités sèches maximales obtenues pour les différents mélanges du tuf avec 5, 10, 15, 20 et 25 % de vase sont regroupées sur la Figure IV-28. Il est perceptible que la densité à sec optimale de $1,94 \text{ g/cm}^3$ est obtenue lorsque le TSC est remplacé par 10 % de vase de barrage. Cela s'explique par le fait que cette quantité appropriée de vase pénètre facilement entre les granulats routiers, diminuant ainsi le volume des vides et compactant les mélanges.

Une quantité de vase qui excède 10 % du volume des vides présents entre les granulats routiers, elle débute à entourer ces derniers ce qui engendre des structures désorganisées des mélanges avec des densités sèches réduites, la réduction de la densité maximale est due au poids volumique de la vase ($1,779 \text{ t/m}^3$) en comparaison des granulats routiers seuls ($2,025 \text{ t/m}^3$). Ces résultats sont suffisants pour un matériau destiné aux voies routières (Autret, 1983).

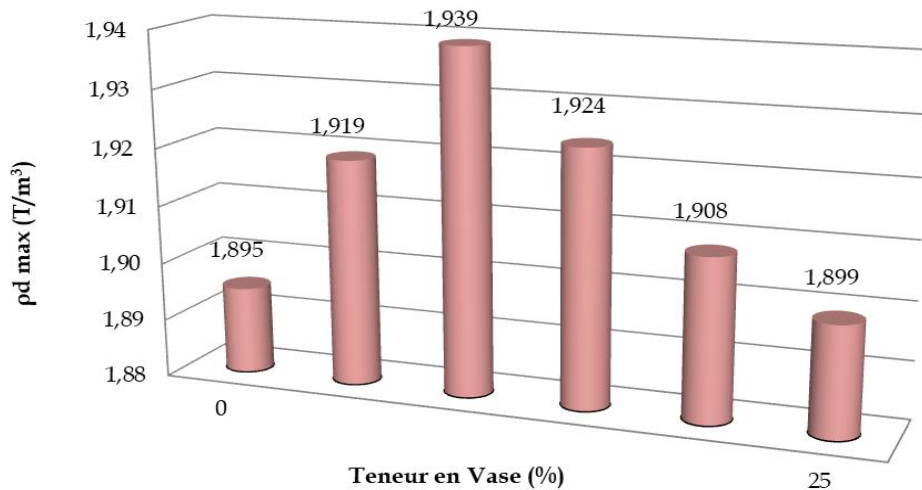


Figure IV-28 : Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en vase (OPN)

Nous avons observé un comportement semblable par Boudlal et al, (2016). Selon Mellal et Lamri, (2010), l'élévation de la teneur en eau optimale des mélanges est attribuée à l'augmentation de la surface spécifique des particules, grâce aux grains fins de la vase. Dans la pratique il faut être attentif à toujours travailler autour de la valeur optimale pour permettre un bon compactage du matériau.

IV-2-4-1-2 Proctor modifié

Concernant les résultats du test Proctor modifié présentés dans la figure IV-29, nous remarquons que l'aspect global des graphiques Proctor modifiés des TSC-VBF est pareil à celui des courbes Proctor normale, montrés par la figure IV-26, avec un écart dans les valeurs concernant la quantité d'eau optimale est à la densité à sec.

Effectivement, pour un faible pourcentage de VBF et avec les particules de TSC plus grossières, les particules de VBF pouvaient prendre place dans les interstices et rendre les mélanges TSC- VBF plus denses, comme illustré dans la figure IV-29. Mais lorsque le pourcentage de la VBF a augmenté, ils ont commencé à créer une ségrégation dans le mélange, ce qui a conduit à réduire la densité sèche maximale des mélanges TSC-VBF.

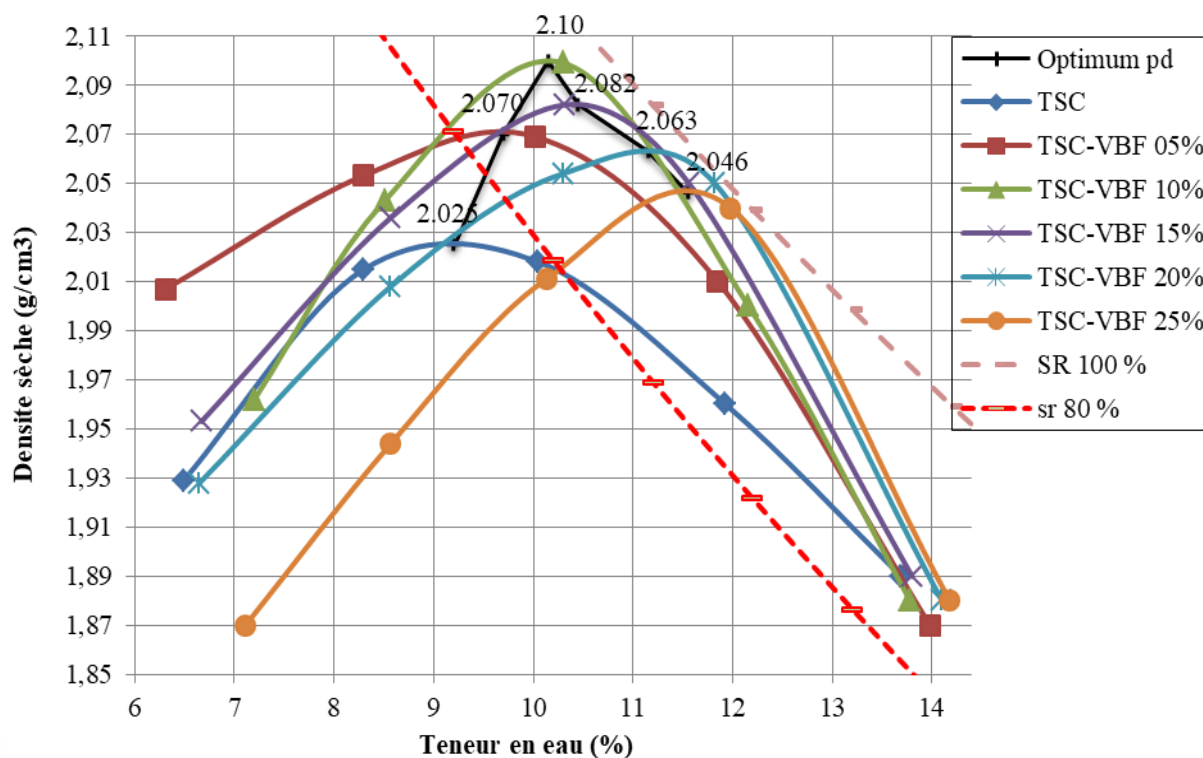


Figure IV-29 : L'ensemble des courbes de compactage Proctor modifié (OPM)

Selon la figure IV-29, il est évident que lorsque la quantité de vase dans le mélange TSC-VBF augmente, les courbes de compactage Proctor modifié adoptent une forme très intensifiée, ce qui justifie la sensibilité du mélange à l'eau par rapport à son état naturel.

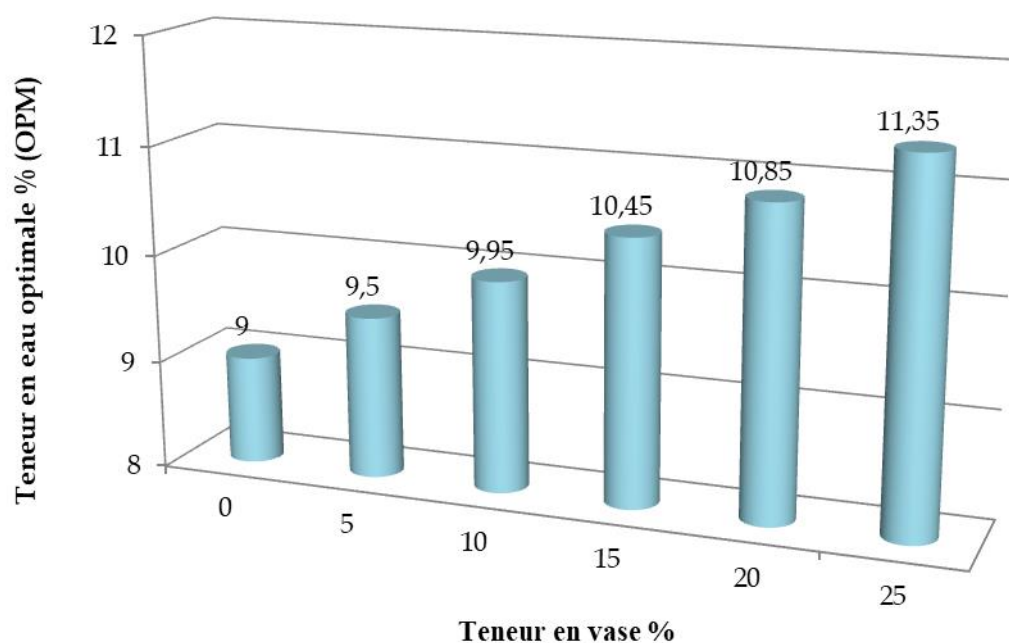


Figure IV-30 : La teneur en eau de l'optimum en fonction de la teneur en vase (OPM)

Ces résultats suggèrent que la structure poreuse des mélanges TSC-VBF est un facteur clé qui doit être évalué et optimisé afin d'assurer une densité sèche maximale satisfaisante. Par conséquent, il était essentiel d'incorporer une quantité appropriée du VBF sélectionné afin d'obtenir une distribution granulométrique optimale.

En outre, il a été noté que les quantités d'eau optimales passent de 9 à 11,35 % lorsque la teneur en VBF passe de 0 % à 25 % (Figure IV-30). L'accroissement de la quantité d'eau idéale des mélanges TSC-VBF se résulte de l'accroissement de la surface spécifique des particules présentes dans les mélanges.

Un bon empilement de particules lors du compactage nécessite beaucoup d'eau (Mellal et Lamri, 2010). Il semble également évident que l'aptitude à absorber l'eau par les vases fins dragués (de nature argile) était beaucoup plus importante que celle des particules TSC.

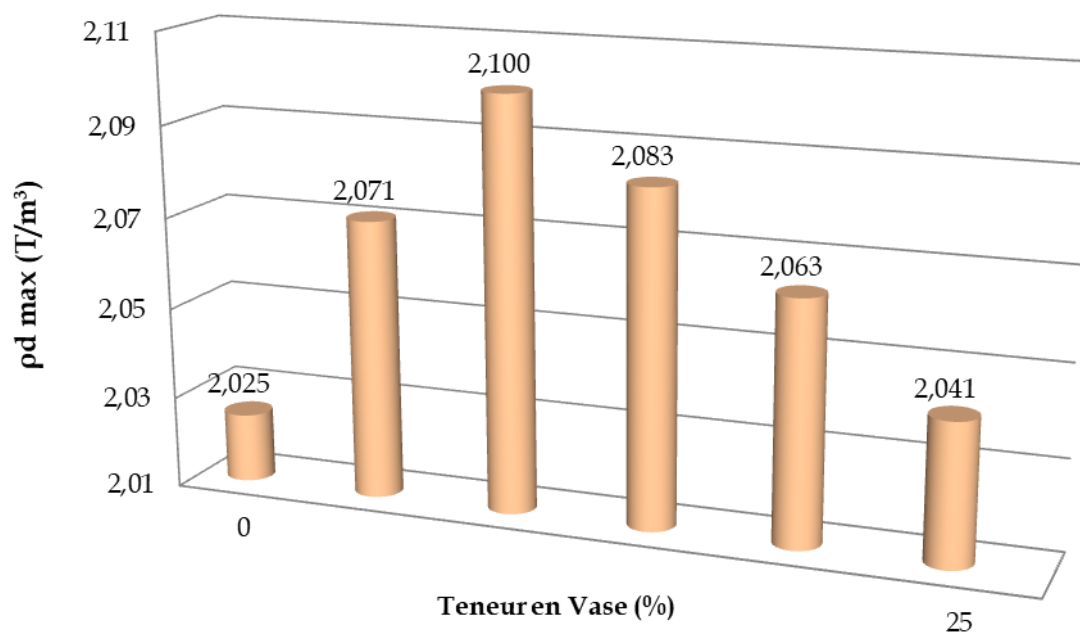


Figure IV-31 : La densité sèche en fonction de la teneur en vase (OPM)

Un comportement inverse constaté par Boudlal et al (2016). Il a remarqué que Le volume d'eau requis pour le compactage qui occupera les vides restants dans les mélanges est réduite, Parce que la plupart des espaces sont occupés par des vases.

En Addition, même si l'allure des courbes est identique, on note que selon la figure IV-31, qui récapitule les densités sèches maximales des compositions exhibées selon la quantité des vases, une modification de l'optimum Proctor vers une masse volumique sèche supérieure pour des teneurs en eau réduites.

La masse volumique sèche élevée, pour le sédiment TSC+10 % Vase, passe de 1,94 g/cm³ à 2,10 g/cm³ lorsque le mode de l'essai Proctor passe du normal au modifier. La teneur en eau de l'optimum présente des teneurs en eau de 11,87 % et 9,95 %, avec les mélanges TSC+10 % de VBF, pour les essais Proctor normal et Proctor modifié, respectivement.

Des modèles de comportement similaires ont été observés par Boudlal et al. (2016) et Cabalar & Mustafa (2015). Boudlal et al (2016) ont constaté que l'addition de 5 et 10 % de vase de barrage de Taksebt (Tizi-Ouzou) dans le granulat routier exhibe une densité sèche supérieure au témoin, par contre une densité sèche maximale inférieure au témoin a trouvé par un ajout de 15 à 25 % de vase. Les zones de saturation du sédiment variant entre 80 et 100 % atteignant les caractéristiques idéales du Proctor modifié. Ceci est généralement constaté lors de la compaction des matériaux. Comme l'eau est un fluide incompressible, il ne faut pas que la courbe Proctor excède des niveaux de saturation dépassant 100 %.

Après l'évaluation des paramètres de compactage (ρ_{dopt}) pour chaque formulation par les essais Proctor normal et Proctor modifier, l'indice portant immédiat IPI et indice CBR après immersion I_{CBR} sont ensuite mesurés.

IV-2-4-2 Indice CBR après Immersion

Les mesures de l'indice CBR, après immersion (I_{CBR}), exécutés suivant la norme ISO 13286-47 (2021), sont utilisés pour estimer la portance des sols avec les conditions hydriques les plus défavorables (intempéries, pluie, neige, orage, ...), comme illustré par les figures IV-32 (a), IV-32 (b), IV-33 (a) et IV-33 (b).

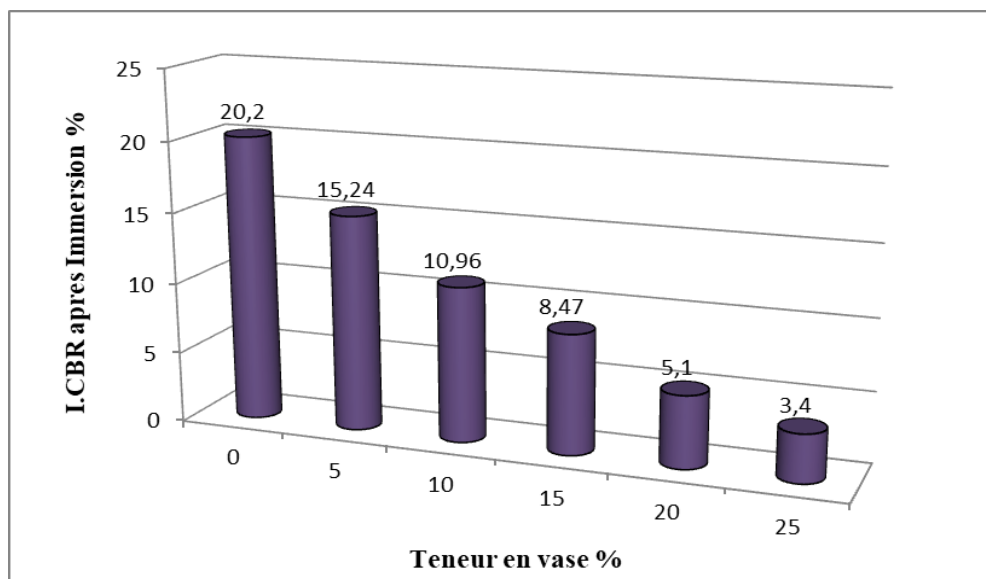


Figure IV-32 (a) : évolution de l'indice CBR après Immersion (OPN) en fonction du % vase.

Selon l'allure des histogrammes, l'indice CBR après immersion a diminué dans le premier ajout de la vase (5 % VBF) et continue à diminuer de plus en plus jusqu'au dernier pourcentage d'ajout (25 % VBF), comme illustré dans les figures IV-32 (a) et IV-33 (a).

La portance des mélanges TSC-Vase abaisse dès l'ajout initial de 5% de VBF. Effectivement, les courbes de forces et d'enfoncements qui correspondent aux combinaisons et illustrées par les Figures IV-32 (b) et IV-33 (b) diminues de plus en plus que le taux de vase augmente et ils diffèrent de ceux associés aux granulats routiers uniquement (témoin).

Malgré l'ajout de la vase et l'augmentation de la densité pour le premier et le deuxième ajout (5 et 10 %), les portances ont commencé à diminuer, et cela s'explique par l'accumulation des grains fins de la vase qui se déposent dans les espaces interstitiels du tuf et réduisent le frottement, ce qui le rend moins durable qu'auparavant.

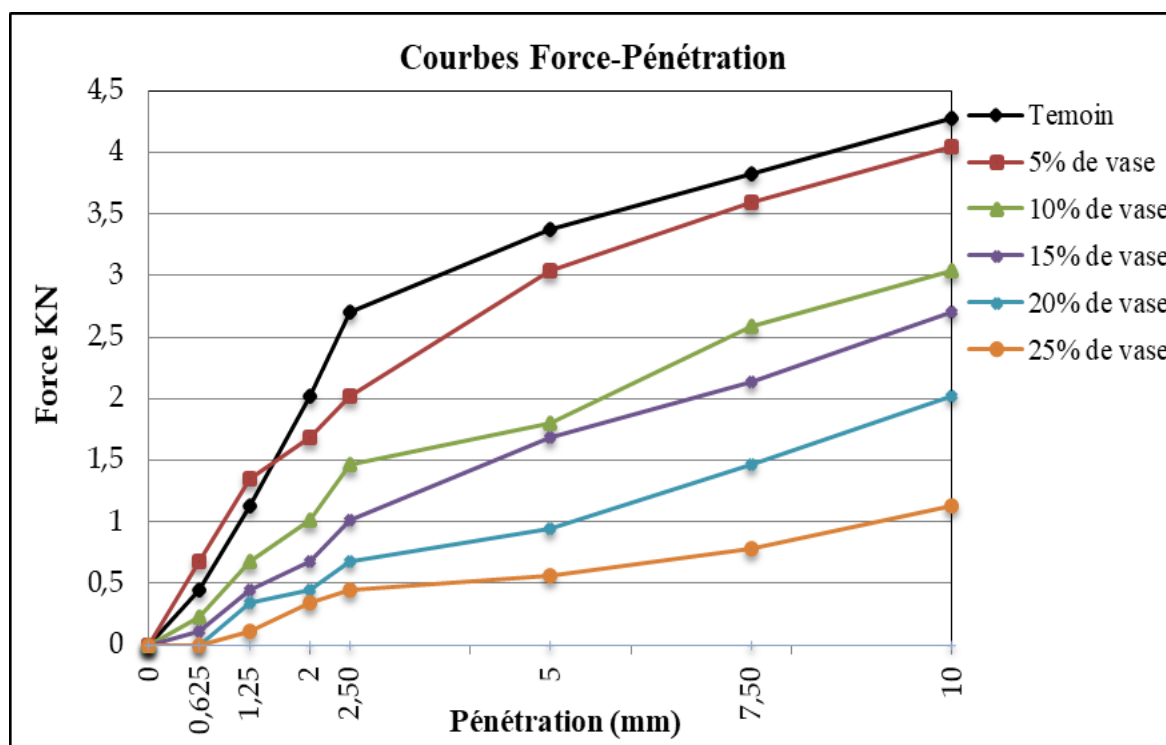


Figure IV-32 (b) : Effort pénétration CBR après Immersion (OPN).

La vase humide, même avec une faible proportion, peut affaiblir la portance des mélanges TSC-VBF. Un comportement similaire a été trouvé par Cabalar et Mustafa (2015). Ils ont utilisé l'argile et les produits de polissage avec les pneus déchiquetés dans les mélanges avec des pourcentages 0 %, 5 %, 10 % et 15 %. Cabalar et Mustafa, (2015) ont constaté que l'indice CBR a diminué de 4,5, 3,3, 1,75 et 1,5 % respectivement par rapport au mélange témoin.

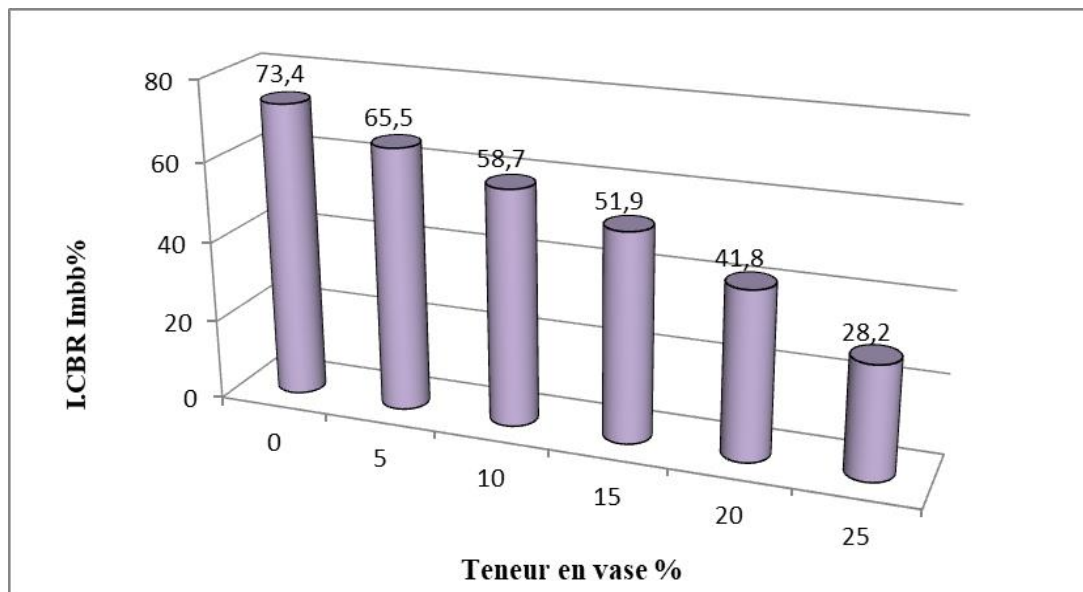


Figure IV-33 (a) : évolution de l'indice CBR après Immersion (OPM) en fonction de la teneur en vase.

Les comportements des indices CBR par immersion, soit pour Proctor Normal ou Proctor Modifié, sont les mêmes. Nous remarquons la différence dans les intensités de ces indices et cela est due à l'énergie de compactage qui n'est pas la même.

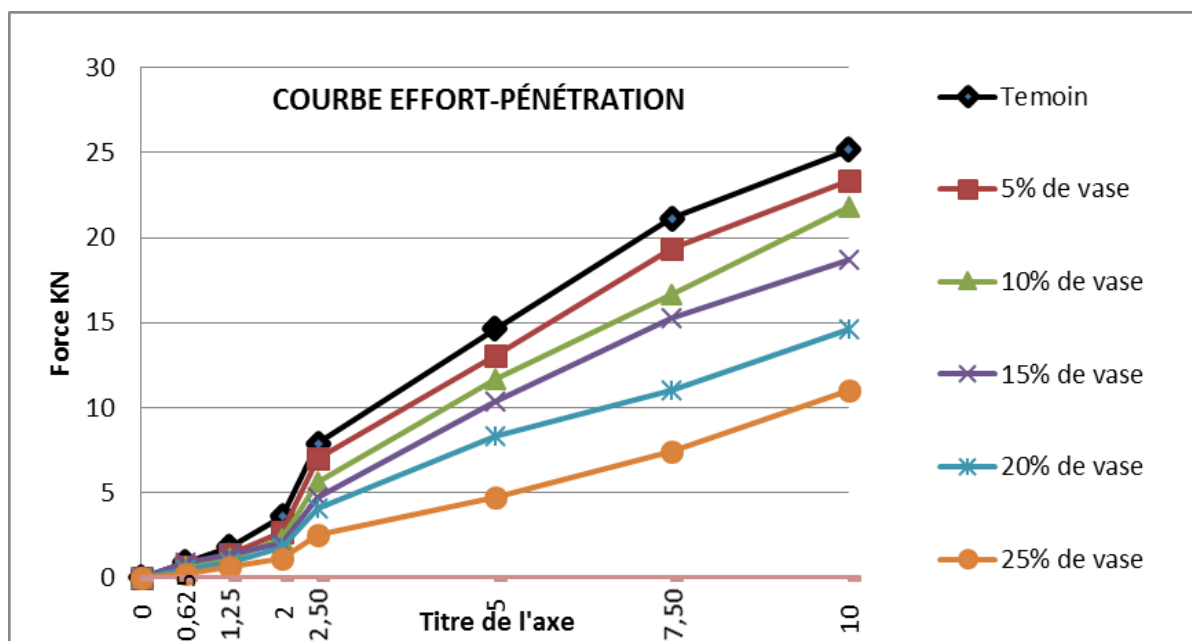


Figure IV-33(b) : effort pénétration CBR après Immersion (OPM)

Effectivement, les caractéristiques au poinçonnement sont extrêmement faibles dans le vase humide. Les particules enveloppées de vase résistent aisément aux contraintes provoquées par le vérin du dispositif de poinçonnement en se dirigeant vers des zones de faible pression. L'ajout de vase favorise encore davantage ces mouvements.

IV-2-4-3 L'indice portant immédiat (IPI)

L'indice portant immédiat (IPI) est un paramètre qui permet d'évaluer la capacité d'un matériau à résister au poinçonnement suite au compactage selon la norme ISO 13286-47 (2021). En d'autres termes, sa capacité a supporté des charges importantes comme le mouvement des engins sur site (chantier).

Les graphes représentant les forces liées aux enfoncements des mélanges contenant entre 5 et 25 % de vase sont schématisés par les figures IV-34 et IV-35 pour le cas de l'essai Proctor Normal et les figure IV-36 et IV-37 pour l'essai Proctor Modifier.

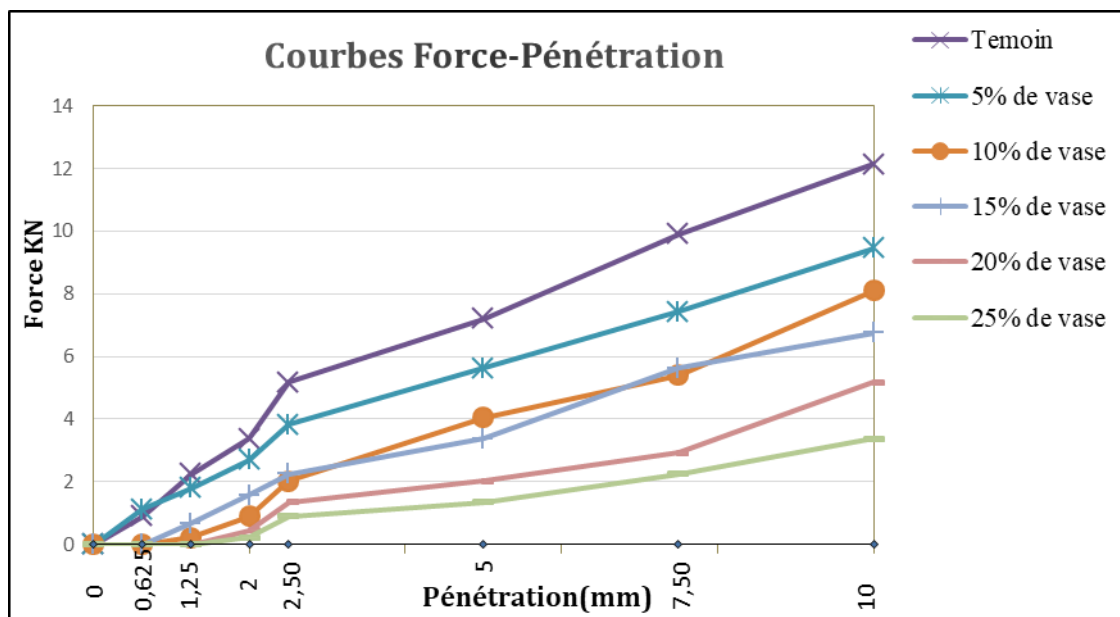


Figure IV-34 : Les courbes Efforts-Pénétration IPI (OPN).

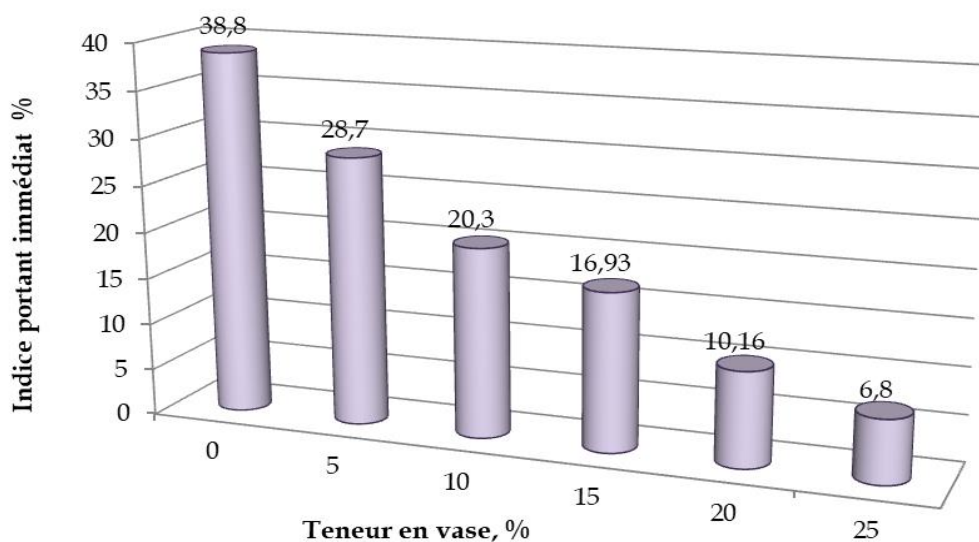


Figure IV-35 : Evolution de l'IPI (OPN) en fonction de la teneur en vase.

D'après la figure IV-35, l'IPI affiche des valeurs en fonction du taux en VBF qui changent entre 38,8 % (pour le TSC témoin) et 6,8 % (pour le TSC+25 % de vase). La valeur la plus élevée est obtenue pour le granulat routier sans ajout de sédiment, ce qui permet de dire que le remplacement du TSC par de teneur élevée de vase s'accompagne par une réduction de la résistance au poinçonnement et donc les mélanges TSC-Vase possèdent une capacité inférieure à supporter le passage des engins suite au compactage normal à l'OPN.

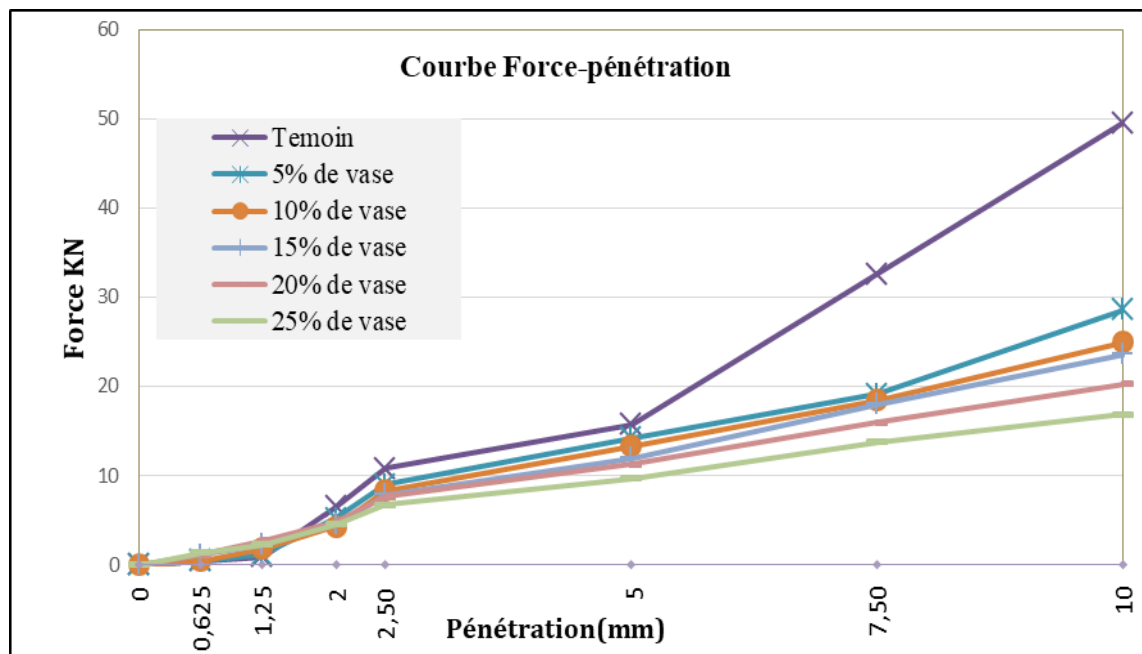


Figure IV-36 : Les courbes Efforts-Pénétration IPI (OPM).

La diminution de l'effort de pénétration lorsqu'on ajoute la vase peut être expliquée par la distribution des grains de la vase autour des grains de TSC, ce qui réduit le frottement entre elles et facilite la pénétration. Ceci s'explique par la divergence de la courbe de l'échantillon témoin lorsque la pénétration atteint 5 mm. La résistance augmente deux fois par rapport à l'échantillon 10 % de VBF lorsqu'elle atteint 10 mm de pénétration, même si ce dernier présente une densité plus élevée que l'échantillon témoin.

Dès le premier ajout de vase, la portance des mélanges baisse. Cependant, les mélanges contenant 5% de vase ont des portances supérieures par rapport aux autres mélanges (10, 15, 20 et 25). Néanmoins, ces derniers demeurent nettement inférieurs par rapport aux granulats routiers seulement observés lors des tests de compactage. La raison pour laquelle la portance du sol diminue est due aux fines particules de la vase qui enveloppe les granulats de la route, ce qui facilite de plus en plus le poinçonnement en fonction de la quantité d'addition de vase.

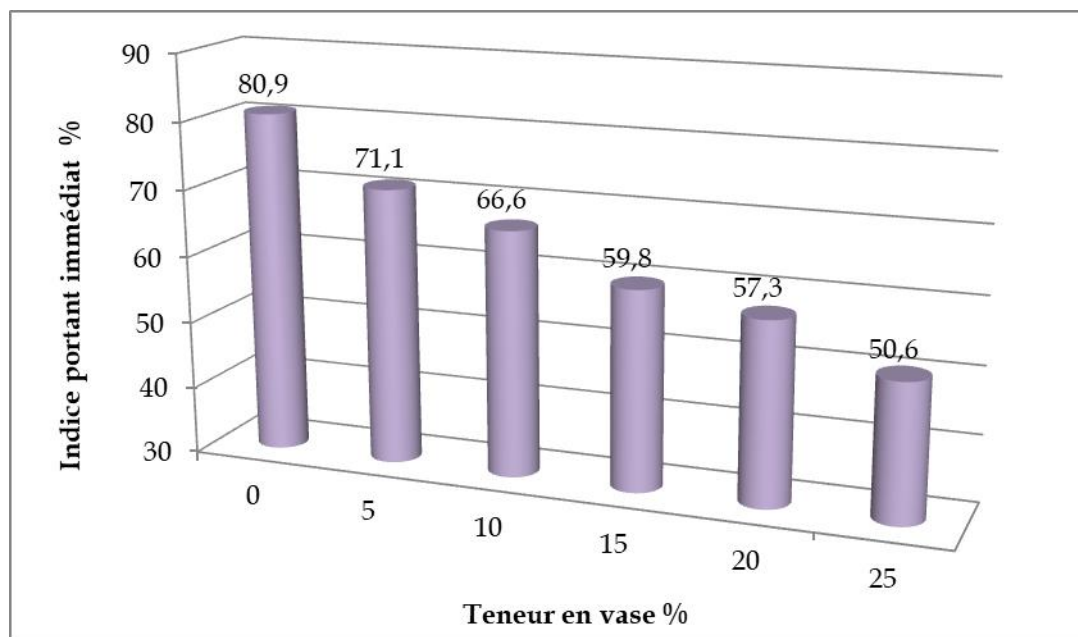


Figure IV-37 : Effort pénétration IPI (OPM).

IV-2-5 Classification GTR des formulations

Le tableau IV-18 suivant récapitule les résultats des caractéristiques physiques des mélanges (TSC+VBF %) selon le pourcentage de vase substitués. Suivant le guide pour la catégorisation des matériaux routiers GTR (2000), et selon les pourcentages des diamètres max > 50 mm et les tamis à 80 μ m > 12 %, les mélanges (TSC+VBF) étudiés sont classés dans la catégorie des sols contenant des particules fines et gros composants C Annexe 1 GTR (2000).

Tableau IV-18 : Récapitulatif des essais pour la classification

L'échantillon	VBS	WL%	WP%	IP%	>80 μ m%	>2mm%	Wn%	Wopn%
TSC + 0 % Vase	0,304	18,62	13,47	5,15	17,77	43,07	4,51	11,18
TSC + 5 % Vase	0,361	19,41	13,64	5,77	18,49	42,62	6,015	11,42
TSC + 10 % vase	0,481	20,42	13,84	6,59	19,63	42,21	7,078	11,87
TSC + 15 % vase	0,590	21,84	14,02	7,82	22,85	47,05	8,58	12,54
TSC + 20 % vase	0,694	22,81	14,15	8,66	25,99	47,32	10,09	13,10
TSC + 25 % vase	0,850	24,51	14,46	10,13	26,89	47,13	11,6	13,48

Pour le deuxième palier de classement le matériau anguleux dont le taux de la partie 0/50 mm se situe entre 60 et 80 % est classé dans la sous-classe C1B5, car le passant à 80 μm est généralement entre 12 et 35 %, $\text{VBS} < 1,5$ C1B5 dont l'état hydrique varie de S et TS. Les conditions d'utilisation de ces classes matériaux sont estimées selon le GTR (2000) Annexe 3.

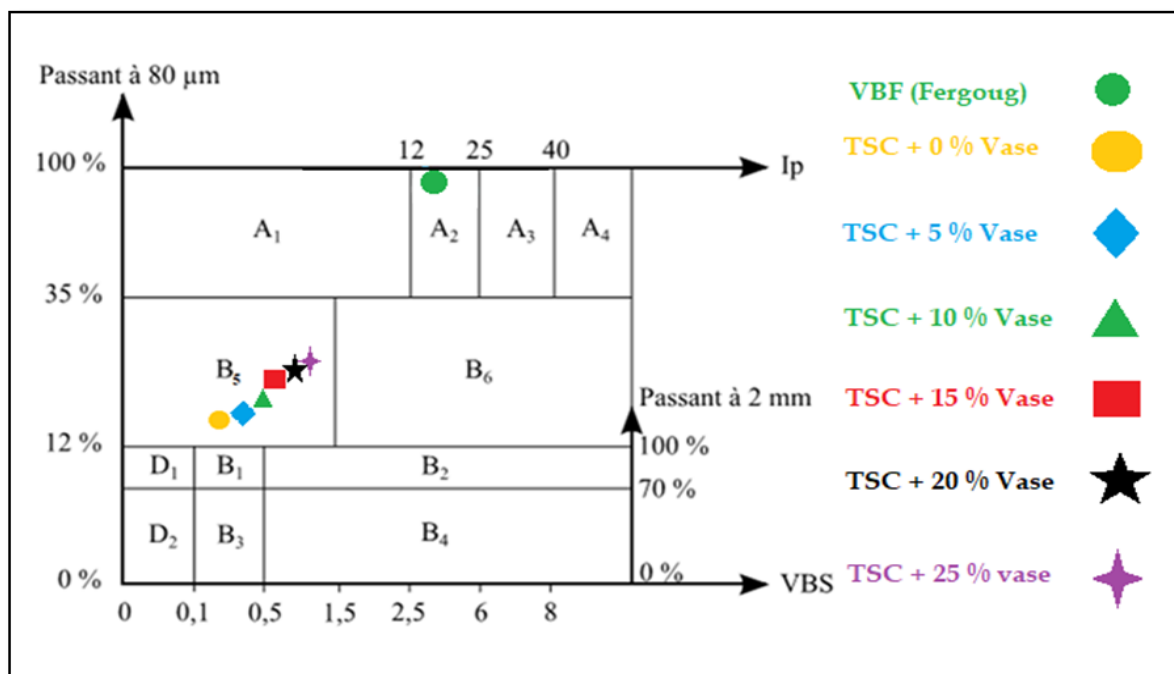


Figure IV-38 : Classification des sols avec un D_{\max} inférieur à 50 mm (SETRA-LCPC, 1992)

Après l'ajout de vase dans le matériau routier et après avoir effectué des essais physiques et mécaniques, nous avons procédé au classement de ces différents mélanges, en fonction de leurs propriétés, selon la classification GTR. Nous avons remarqué que tous les mélanges passaient d'un sol de class A2 (Sols fin), limons argileux et de faible capacité portante à un sol sableux et graveleux, qui a une portance moyenne acceptable et très bonne portance par rapport aux résultats des essais de Proctor Normal et Modifier, respectivement.

Nous constatons dans les Tableaux IV-19 et IV-20 ci-après, que les résultats de l'essai Proctor normal des mélanges TSC + 25 % vase, TSC + 20 % vase, TSC + 15 % vase sont inférieurs aux normes requises. Par contre les mélanges TSC + 10 % vase, TSC + 5 % vase, TSC + 0 % vase ont une capacité de charge moyenne sur la route, donc ils peuvent être utilisés sur les routes communal à moyenne trafic. Quant au le Proctor modifié, l'échantillon « TSC + 25 % vase » a une bonne tolérance, et les cinq autres échantillons représentés par « TSC + 20 % vase, TSC + 15 % vase, TSC + 10 % vase, TSC + 5 % vase, TSC + 0 % vase » ont une excellente tolérance. (Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves, Fascicule 1, 2001).

Tableau IV-19 : Classes de portance des sols étudiée.

Portance (Si)	CBR	CBR (OPN)	CBR (OPM)	Remarque
S4	<5	TSC + 25 % vase	/	Très faible portance
S3	5-10	TSC + 15 % vase TSC + 20 % vase	/	Faible portance
S2	10-25	TSC + 10 % vase TSC + 5 % vase TSC + 0 % vase	/	Portance moyenne
S1	25-40	/	TSC + 25 % vase	Bonne portance
S0	>40	/	TSC + 0 % vase TSC + 5 % vase TSC + 10 % vase TSC + 15 % vase TSC + 20 % vase	Très bonne portance

Cependant cette vase pourra être stabilisés par traitement à la chaux. Selon le rapport présenté dans le tableau ci-dessous, comme indiqué dans la norme ISO 13286-47 (2021). La pérennité du traitement d'une partie supérieure du terrassement est assurée quand :

$$I. \frac{CBR_i}{IPI} \geq 1$$

Tableau IV-20 : le rapport d'indice CBR Imb sur l'Indice Portant Immédiat (IPI).

Proctor Normal						
Vase %	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00
I.CBR Imbb	20,20	15,24	10,96	8,47	5,10	3,40
IPI	38,80	28,70	20,30	16,93	10,16	6,80
I.CBR Imbb/IPI	0,52	0,53	0,54	0,50	0,50	0,50
Proctor Modifie						
	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00
I.CBR Imbb	73,40	65,50	58,70	51,90	41,80	28,20
IPI	80,90	71,10	66,60	59,80	57,30	50,60
I.CBR Imbb/IPI	0,91	0,92	0,88	0,87	0,73	0,56

IV-2-6 Conclusion :

Dans cette deuxième partie nous avons exécuté divers essais des propriétés physico-mécaniques, ayant permis d'identifier certaines caractéristiques des mélanges de vase de barrage de Fergoug avec le Tuf de Sidi Ali Cherif (TSC). Notre but était la valorisation de vase du barrage de Fergoug en couches constitutives des routes. Par conséquent, nous avons mis en pratique la méthodologie d'étude décrite dans le guide des terrassements routier (GTR, 2000). Les conclusions tirées ont démontré que les mélanges composés et compacter à l'optimum Proctor modifié, manifestent un comportement extrêmement satisfaisant face aux diverses sortes de sollicitations effectuées notamment les mélanges (TSC+5 % VBF) (OPM) ; TSC+10 % VBF (OPM) ; TSC+15 % VBF (OPM) ; TSC+25 % VBF (OPM) ; TSC+25 % VBF (OPM)). Par contre pour le Proctor normal, nous avons obtenue des résultats peu satisfait (TSC+5 % VBF (OPN) ; TSC+10 % VBF (OPN)). Ainsi, ils peuvent être suggérés dans la construction des voies routières, en tant que couches de base et de fondation pour les chaussées à faible à moyen trafic. Les résultats de rapport entre $I.CBR/IPI < 1$ %, donc, afin de valoriser les matériaux dans les couches de forme, le matériau doit être améliorés par traitement aux liants hydrauliques (ciment ou la chaux).

Dans la partie suivante nous avons choisi d'avoir les taux de vase comme suit 10, 20 et 30 % de VBF avec une fourchette entre un mélange et l'autre égale à 10 % afin d'avoir une vision claire sur le comportement du mélange soumis à un traitement. Nous avons choisi le traitement à la chaux avec des taux entre 0 et 8 % et un pas de 2 %. La raison de ce choix vise à atteindre un mélange idéal en termes de propriétés géotechniques et être économique, et c'est le plus important car nous visons à résoudre un nombre de problèmes à des coûts très raisonnables.

Phase III : La stabilité par le traitement des sols

IV-3-1 Introduction de la partie du traitement

La mesure de l'impact écologique en fonction des seuils définis selon le guide SETRA a démontré que la vase peut présenter des opportunités dans le domaine routier. En outre, la caractérisation des mélanges Tuf-vase dans la deuxième partie a révélé que l'ajout de la vase du barrage de Fergoug cause des désagréments sur les certaines performances du tuf TSC, ce qui a limité l'utilisation des mélanges Tuf-vase dans des routes de faibles catégories. Le but de cette partie est de proposer la technique de stabilisation au liant hydraulique, pour améliorer les performances des mélanges Tuf-vase.

Le procédé de stabilisation des sols à l'aide de la chaux s'est popularisé dans les années 1980s (Vénuat, 1980). Les aspects méthodologiques permettant d'évaluer la pertinence d'un sol pour ce type du Guide de Traitement des Sols « GTS 2000 » résume les processus de traitement. En Algérie, cette méthode gagne en popularité grâce aux directives des divers secteurs du BTP en faveur de l'exploitation des ressources locales. Par exemple, le projet de réalisation de l'autoroute Est-Ouest, section Oued Fodda - Khemis Miliana, a incorporé le traitement des sols par chaux (Mellal et al, 2010). À l'heure actuelle, presque partout dans le monde, les projets de construction routière privilégient les sols améliorés grâce au traitement à la chaux. Les utilisations des sols argileux traités par la chaux sont nombreuses et reconnues dans de nombreux pays.

Dans cette section, après les essais de portance après immersion décrits dans la partie 2, où l'accroissement du taux en vase a complètement décroissante la portance grâce à la distribution de VBF autour de TSC, nous avons tenté d'augmenter les performances mécaniques par l'utilisation de la chaux. L'intention est de résoudre le problème d'instabilité dans un environnement saturé et d'accroître l'emploi de ce matériau dans les routes à trafic moyen et lourd. Le processus de traitement à la chaux permet de modifier un matériau plastique, visqueux et très ardu à compacter. La chaux est un matériau plus facile d'utilisation et de mise en place, et ayant une capacité portante forte (Melbouci, 2017). C'est ce qui nous a menés à choisir le traitement à la chaux dans notre étude.

Nous avons choisi le ratio de 2 % dans le traitement à la chaux pour les mélanges conformément le guide SETRA (2000) avec un taux de vase comme suit 10, 20 et 30 % de VBF afin d'avoir une vision claire sur le comportement du mélange traité à la chaux, ainsi que dans le but d'utiliser une quantité importante de vase.

Le déroulement de cette partie est résumé dans l'organigramme ci-après :

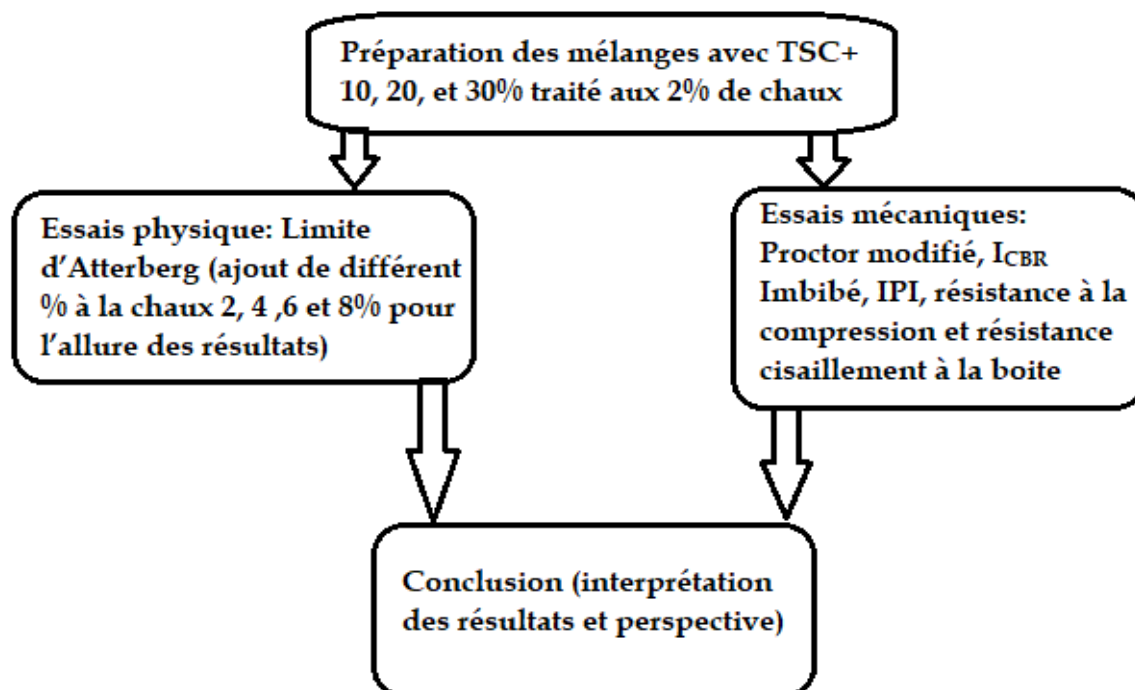


Figure IV-39 : Organigramme des travaux de la troisième partie

- **La chaux utilisée :**

La chaux utilisée dans notre étude est de la chaux vive (Chaux BMSD Saïda)

Tableau IV.21 : Les caractéristiques physico-chimique de la chaux en (%) massique

Paramètre	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Insoluble dans le HCl	Densité
Valeur (%)	82,77	1,83	0,87	3,27	1,35	0,11	0,151	0,064	<1,00	0,731 g/cm ³

IV-3-2 Caractéristiques physiques des mélanges traitées

IV-3-2-1 Les résultats de l'essai de limite d'Atterberg :

Les résultats des essais sur la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité sur les échantillons traités à la chaux sont présentés dans les tableaux IV-21, IV-22 et IV-23 avec les figures IV-40, IV-41 et IV-42 respectivement. Dans les tests physiques pour le traitement à la chaux, nous avons traités les mélanges avec les proportions de la chaux hydrauliques suivantes de 2, 4, 6 et 8 %, pour clarifier l'évolution des résultats.

IV-3-2-1-1 Variation de la limite de liquidité

La limite de liquidité du VBF brute de l'ordre de 62,5 %. D'ailleurs, sa limite de plasticité (W_P) c'est du 29,3 %. Enfin, l'indice de plasticité est évalué à 33,2 %.

Tableau IV-22 : Ensemble des résultats des limites de liquidité de TSC+%VBF avec différents pourcentages de chaux

Limite de liquidité (W_L)					
	0%	2%	4%	6%	8%
TSC+10% VBF	31,95	30,78	29,02	28,09	27,53
TSC+20% VBF	35,16	33,81	32,34	31,65	31,16
TSC+30% VBF	38,92	37,24	35,09	34,08	32,87

L'histogramme de la figure IV-36 montre que la limite de liquidité varie en relation avec la quantité des stabilisants. Comme y indiqué, la limite de liquidité a diminué dans le mélange de TSC+10 % VBF de 13,83 % pour l'ajout d'une teneur à la chaux de 8%, dans les mélanges de TSC+20 % VBF et de TSC+30 % VBF on remarque le même comportement une diminution de 11,38 % et de 15,55 % respectivement. Le même comportement a été remarqué par Kavak et Akyarh (2006) où la limite de liquidité à diminuer de 71 % jusqu'à 63 % avec un ajout de 3 % de chaux dans l'argile brune et de 57 % à 49 % dans le cas de l'argile vert pour le même pourcentage d'ajout de la chaux. En plus Bozbey et Garaisayev (2009) ont signalé que le seuil de liquidité de l'argile d'Istanbul diminue de l'ordre de 35% par une stabilisation à la chaux avec un taux égal à 9 %.

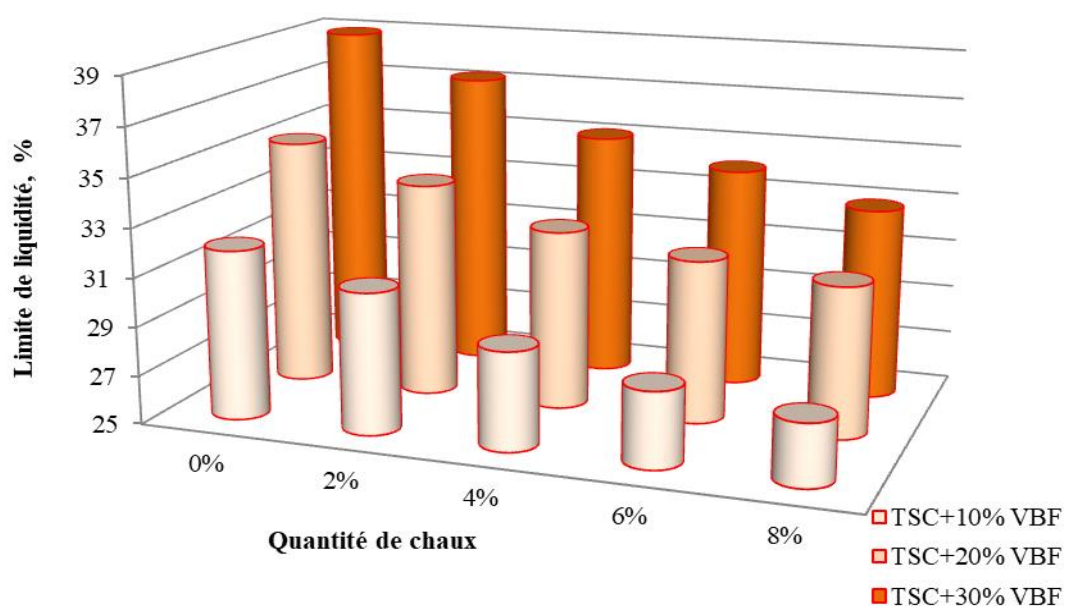


Figure IV-40 : Valeurs W_L des mélanges TSC+ Vase en fonction de % de la chaux

On attribue la diminution de la limite de liquidité à l'échange cationique engendré dans le sol par les ions du calcium divalent (Goswami et al, 2005). En outre, les argiles contenant des cations de valence moindre comme le sodium manifeste un important échange cationique, ce qui entraîne une diminution significative de la limite de liquidité avec une augmentation du taux de chaux (Miller et al, 2000 ; Khattab et al, 2008 ; Bozbey et al, 2010).

IV-3-2-1-2 Variation de la limite de plasticité

En conséquence, dans la figure IV-41, Il est clair que l'incorporation de la chaux influence la plasticité des mélanges analysés. On remarque qu'une augmentation remarquable a été observée de la limite de plasticité du mélange de TSC+10 % VBF de l'ordre de 19,06 % pour une teneur à la chaux ajoutée égale à 6 %. Dans les mélanges de TSC+20 % VBF et de TSC+30% VBF on remarque le même comportement des augmentations importantes de 18,78 % et 15,35 % respectivement. Nous avons constaté le même comportement dans les travaux de Khattab et al. (2008), ou l'inclusion de 2 % de chaux augmente la limite de plasticité de l'argile Al-Masoul (Iraq) de 37 %.

Tableau IV-23 : Ensemble des résultats des limites de plasticité de TSC+%VBF avec différents pourcentages de chaux

Limite de plasticité (W_P)					
	0%	2%	4%	6%	8%
TSC+10% VBF	17,73	18,88	20,23	21,11	21,98
TSC+20% VBF	19,43	21,26	22,33	23,08	24,19
TSC+30% VBF	21,75	23,13	24,65	25,9	26,77

Nalbantoglu (2006) a souligné que la limite de plasticité d'une argile expansée traitée à la chaux s'est accrue de 68,91 % pour un taux d'inclusion de chaux égal à 7 %. Un accroissement Plus important a été mentionné dans les travaux de Rahman (1986) ou la limite de plasticité a augmentée de 91,57 % pour une teneur à la chaux équivalente à 10 %.

La floculation des particules du sol provoque une augmentation instantanée de la limite de plasticité. Selon Goswami et al (2005), la limite de plasticité est l'indicateur le plus précis du seuil de chaux nécessaire pour obtenir l'amélioration requise. (Goswami et al, 2005). Selon la quantité de chaux et le temps de cure, habituellement la limite de plasticité se réduit (Osula, 1996). On constate une tendance similaire par Al-Rawas (2005), dans laquelle la limite de plasticité d'un sol expansée à Oman a augmenté de 16 et 50 % pour une teneur de 3 et 9 % à la chaux.

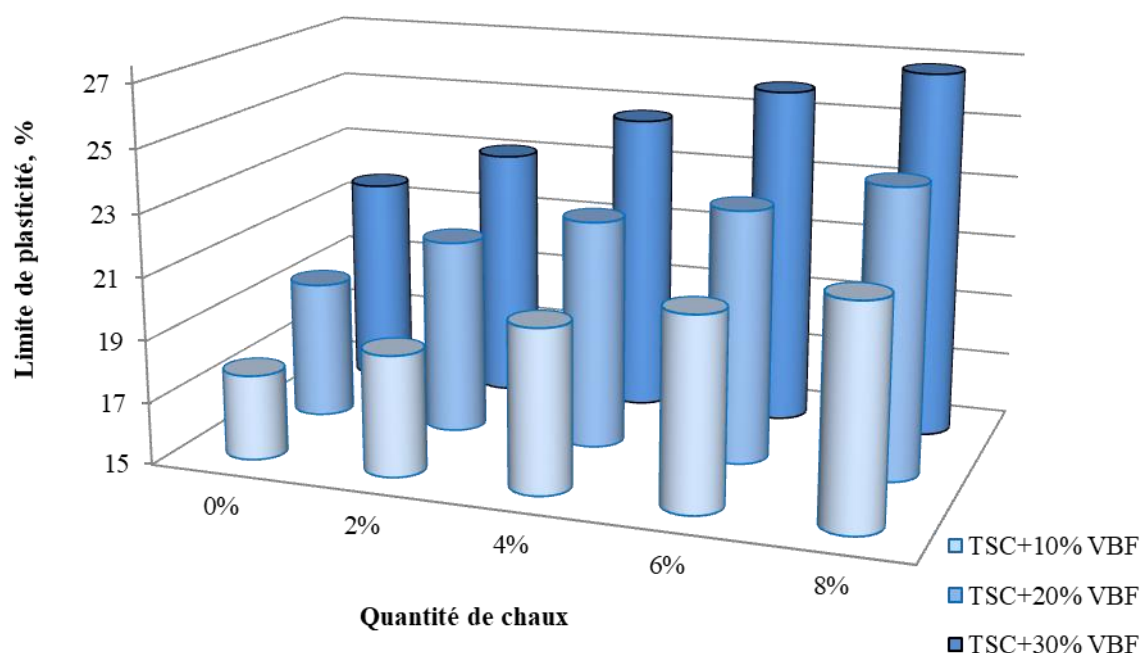


Figure IV-41 : Valeurs W_p des mélanges TSC+ Vase en fonction de % de la chaux

Selon Melbouci (2017), l'incorporation de chaux engendre, en seulement quelques minutes, la floculation des grains des sols. Cette action conduit à un renforcement de la consistance, ce qui se manifeste par une hausse du seuil de plasticité. Cette transformation engendre une transition du domaine de la plasticité vers des teneurs d'eau plus significative. L'indice de plasticité présente un décalage de la quantité en fonction de la quantité de chaux employée. (Melbouci, 2017)

IV-3-2-1-3 Variation de l'indice de plasticité

La diminution de l'indice de plasticité implique une progression dans la facilité d'utilisation du sol. Comme illustré dans la figure IV-38 et par le tableau IV-24 pour l'ensemble des analyses et les résultats de l'indice de plasticité.

Tableau IV-24 : Ensemble des résultats des indices de plasticité de TSC+%VBF avec différents pourcentages de chaux

L'indice de plasticité (I_p)					
	0%	2%	4%	6%	8%
TSC+10% VBF	14,22	11,9	8,79	6,98	5,55
TSC+20% VBF	15,73	12,55	10,01	8,57	6,97
TSC+30% VBF	17,17	14,11	10,44	8,18	6,1

Nous remarquons une réduction instantanée de l'indice de plasticité, obtenue suite à l'incorporation de la chaux. Il est clair qu'une addition de 2 % représente une quantité suffisante de chaux pour améliorer la maniabilité du sol en diminuant son indice de plasticité, de 16,31 %, 20,21 % et 17,82 % pour les mélanges TSC+10 % VBF, TSC+20 % VBF et TSC+30 % VBF, respectivement.

Le même comportement a été trouvé par Harichane et al (2011a), dans lesquels l'indice de plasticité a baissé de 19,87 % pour une proportion en chaux de 8 %. De la même façon, Nalbantoglu (2006) a constaté une similitude en observant une baisse significative de 70,40 % de l'indice de plasticité lorsque la teneur en chaux augmente de 7 %.

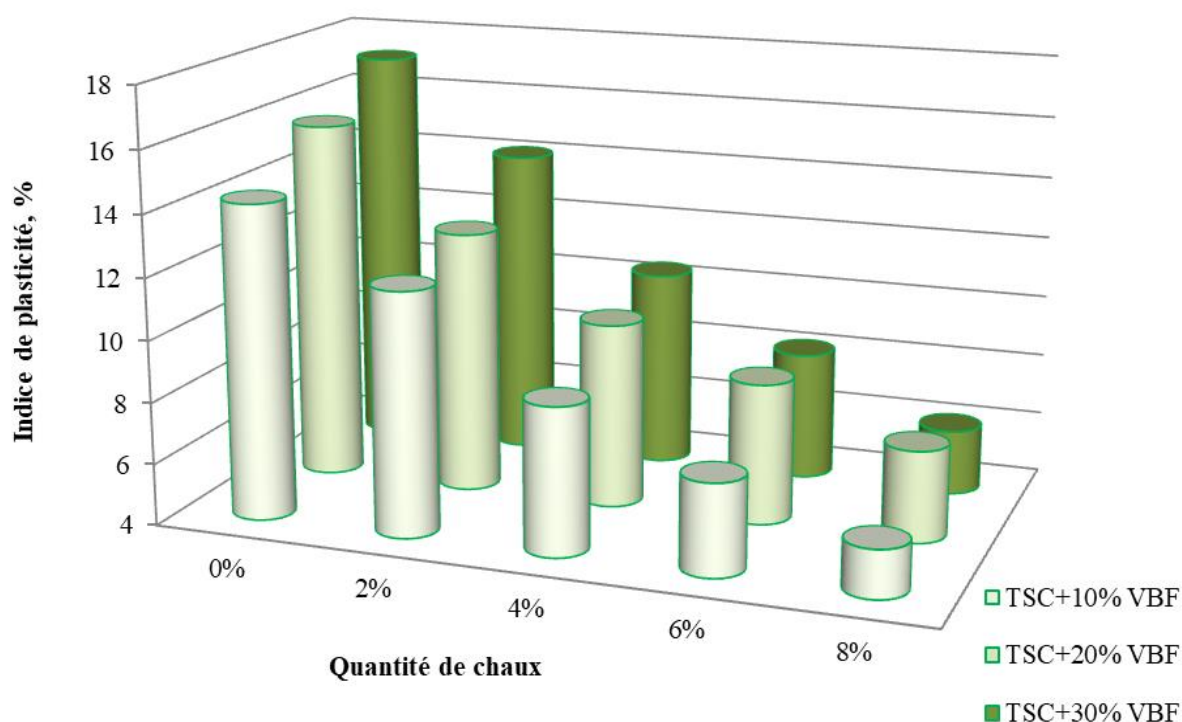


Figure IV-42 : Valeurs I_p des mélanges TSC+ Vase en fonction de % de la chaux

De nombreux chercheurs ont mentionné une tendance similaire dans leurs recherches. Attoh (1995) a trouvé que l'indice de plasticité d'un sol latéritique a diminué lorsqu'on ajout de la chaux. Bagherpour et al (2003) ont trouvé que l'indice de plasticité d'un sol fine a réduit par l'ajout de micro silice et de chaux. Khattab et al (2008) indique que l'ajout de 2 % de chaux a fait réduire l'indice de plasticité de l'argile Al-Masoul (Iraq). Walid (2009) confirme que l'addition de 8 % de chaux est suffisante pour amoindrie l'indice de plasticité de 50 %. Bozbey et al (2010) ont indiqué que l'indice de plasticité de l'argile d'Istanbul diminue de 79 % pour une teneur à la chaux de 9 % avec cure d'une heure (1h).

IV-3-3 Caractéristiques Mécaniques des mélanges traitées

IV-3-3-1 Caractéristiques de compactage (Proctor modifié).

Nous adoptons la version rectifiée du « Proctor modifié », qui nécessite une plus grande énergie de compactage. Étant donné la nature très variable des tufs calcaires les plus tendres, il est préférable de ne pas utiliser le même échantillon pour les divers points de teneur en eau (Goual, 2012). Comme nous l'avons vu dans la deuxième partie, les résultats du compactage des mélanges références, à l'essai Proctor normale, étaient très faibles, et leur utilisation s'est limitée pour les routes avec un sol support déformable et très déformable. D'un autre côté, le Proctor modifié a une énergie de compactage plus élevée que le Proctor normale. Les performances de portance sont supérieures à ceux de l'essai Proctor normale et les mélanges peuvent être utilisés dans les couches supérieures (couche fondation, couche forme et couche base) qui sont le plus vulnérable au trafic.

De nombreux auteurs (Bell, 1996 ; Bernert et al, 2000 ; Tremblay et al, 2002 ; Bahar, 2004 ; Cabane, 2004 ; Rekik et al, 2006 ; Tran Ngou, 2009 ; Saussaye, 2013 et Melbouci, 2017) ont étudiés l'effet de la solidification stabilité à la chaux sur les paramètres de compactage.

Gay et Schad (2000) ont étudié la stabilité à la chaux de l'argile et du limon. Ils ont conclu que l'addition de la chaux engendre une forte diminution initiale de la densité maximale, pour une faible quantité d'additif (2 %). Selon Bell (1996) et Bozbey (2005), Une densité de séchage idéale la plus haute est obtenue en ajoutant 2 % de chaux, ce qui correspond à la teneur en eau idéale la moins (GTS, 2000), c'est-à-dire la densité sèche a diminué dans le premier ajout de chaux. Cela ne s'applique pas au ciment qui présente une densité sèche idéale jusqu'à 10 % d'ajout, tandis que sa teneur en eau idéale est obtenue pour un taux inférieur de ciment.

À l'opposé de la chaux, nous prétendons à une densité sèche idéale inférieure à 2 % de ciment et une teneur en eau idéale supérieure à ce pourcentage (Melbouci, 2017). Cela justifie notre choix de traitement à la chaux au lieu du ciment. Les densités sèches optimales baissent alors que les teneurs en eau idéales augmentent (voir les figure IV-43, IV-44 et IV-45). Cela représente un bénéfice pour les sols présentant une forte teneur en eau naturelle. L'accroissement de la concentration optimale en eau est attribuable à l'expansion globale des particules des mélanges traités par les fines particules de chaux ajoutée. La faible masse volumique de la chaux entraîne une baisse de sa densité sèche maximale.

• Effet de la chaux sur le compactage :

Le traitement à la chaux des mélanges comme nous avons vu dans les figures IV-43, IV-44 et IV-45, réduit donc la valeur maximale de la densité sèche de plus en plus et accroît la quantité optimale d'eau. La hausse de la teneur en eau optimale est attribuée à l'expansion globale des particules des mélanges traités par les fines particules de chaux ajoutée. De plus, la faible densité maximale sèche est due au poids volumique réduit de la chaux par rapport aux grains de mélange substituée.

Ces résultats sont confirmés par de plusieurs chercheurs (Ola, 1977 ; George et al, 1992 ; Attoh-Okine, 1995 ; Bell, 1996 ; Gay et Schad, 2000 ; Hossain et al, 2007 ; Kavak et Akyarh, 2007 et Manasseh et Olufmi, 2008). Ces derniers (Manasseh et Olufmi, 2008) ont étudié les sédiments Turonien de Nigeria et ils ont trouvé que la densité sèche diminue dès le premier ajout de la chaux.

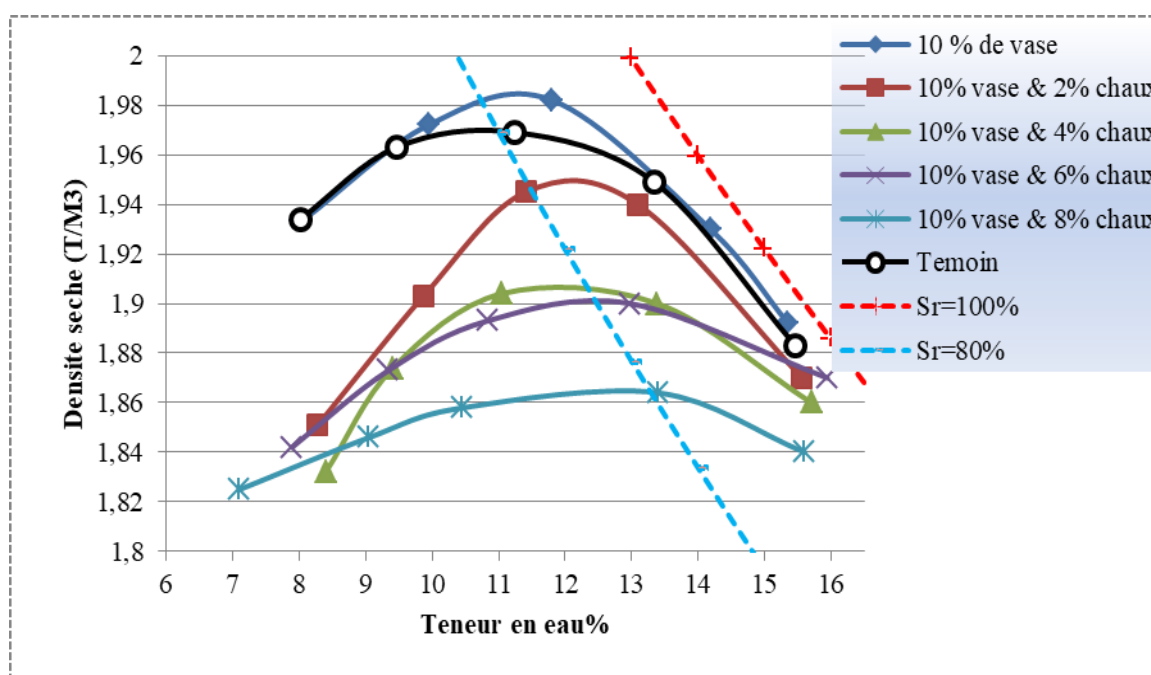


Figure IV-43 : Evolution de la densité sèche maximale de (Tuf+10% vase) +2, 4, 6 et 8% de la chaux en fonction de la teneur en eau.

Le mélange du Tuf de Sidi Ali Cherif, à densité élevée, avec la chaux hydraulique de faible densité ($< 1 \text{ T/m}^3$), entraîne une diminution de la densité du mélange global. Attoh-Okine (1995) a indiqué, la diminution de la densité maximale sèche qui est principalement due à la formation des particules d'agrégat qui occupent un large espace, contribuant ainsi à la graduation du sol. En second lieu, la densité spécifique de la chaux est inférieure à celle du sol latéritique, Ce même résultat a été confirmé par Ola (1977).

La teneur en eau optimale des combinaisons mélanges-liant hydraulique est réduite pour plusieurs raisons :

- L'ajout de matières sèches ;
- L'usage d'eau indispensable pour l'hydratation de la chaux ;
- L'évaporation de l'eau est causée par la chaleur produite par le processus d'hydratation et l'aération engendrée par le mélange.

En pratique et à titre indicatif, la réduction moyenne de la proportion en eau d'un sol traité est d'environ 1 à 2 % pour chaque 1 % de chaux ajoutée.

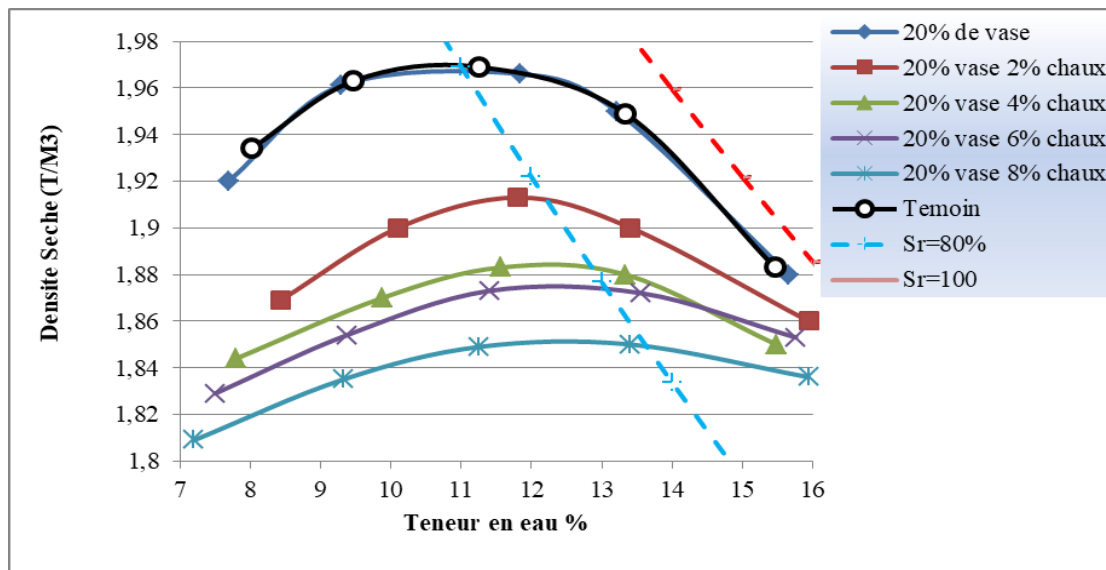


Figure IV-44 : Evolution de la densité sèche maximale de (Tuf+20% vase) +2, 4, 6 et 8% de la chaux en fonction de la teneur en eaux.

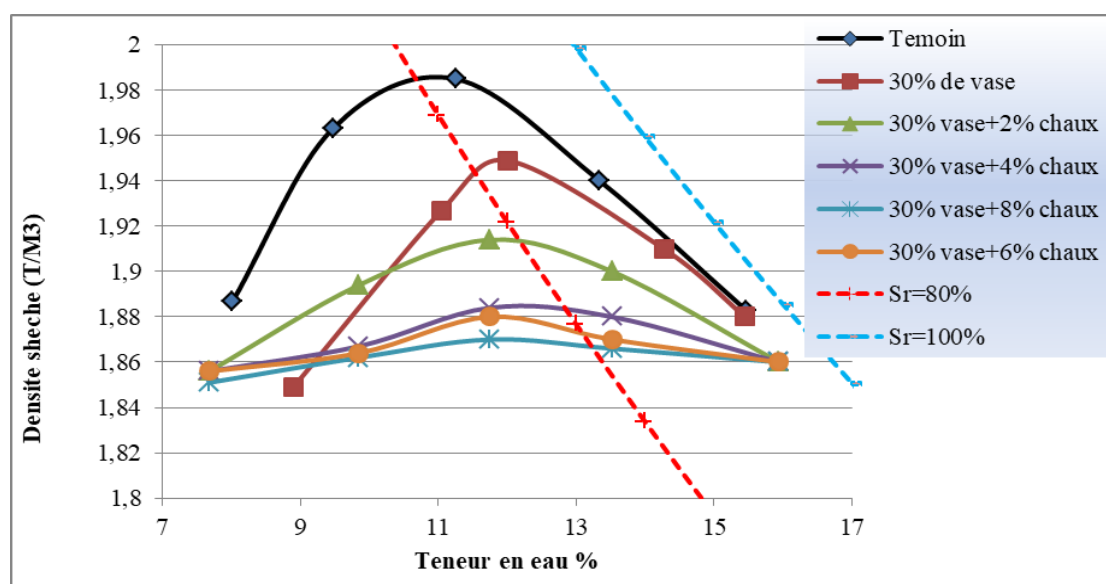


Figure IV-45 : Evolution de la densité sèche maximale de (Tuf+10% vase) +2, 4, 6 et 8% de la chaux en fonction de la teneur en eaux.

Par ailleurs, l'augmentation du taux en eau idéal, associée à l'élévation de la chaux, résulte du besoin en eau supplémentaire pour les réactions pouzzolanique (Manassah et Olufmi, 2008).

Selon les figures IV-44 et IV-45, nous pouvons observer aussi la forme aplatie des courbes de compactage traitée à la chaux (4, 6 et 8 %) par rapport aux autres courbes, ce qui explique une faible sensibilité à l'eau de ces mélanges stabilisé. Ce constat est conforme aux résultats des travaux de Mellal (2009).

IV-3-3-2 Les essais de portance (CBR après immersion, IPI).

IV-3-3-2-1 Indice CBR après immersion

L'ajout de vase réduit sensiblement l'indice CBR du mélange (TSC + VBF) de plus en plus, il passe de 68,9 % pour le TSC (granulats routiers seuls) à 56,4 % pour un mélange de (TSC+10 % VBF), respectivement. Après traitement à la chaux, les mélanges reprennent leurs portances et développent des indices CBR très importantes égales à 60 %, c'est-à-dire ((TSC+10 % VBF) +2%chaux) atteignant $I_{CBR}=110,6$ % et dépassant de ce fait les valeurs enregistrées dans le cas du mélange sans traitement.

L'ajout de la chaux a amélioré l'indice CBR, qui augmente instantanément suite à cette addition et continue d'augmenter en fonction du taux de la chaux.

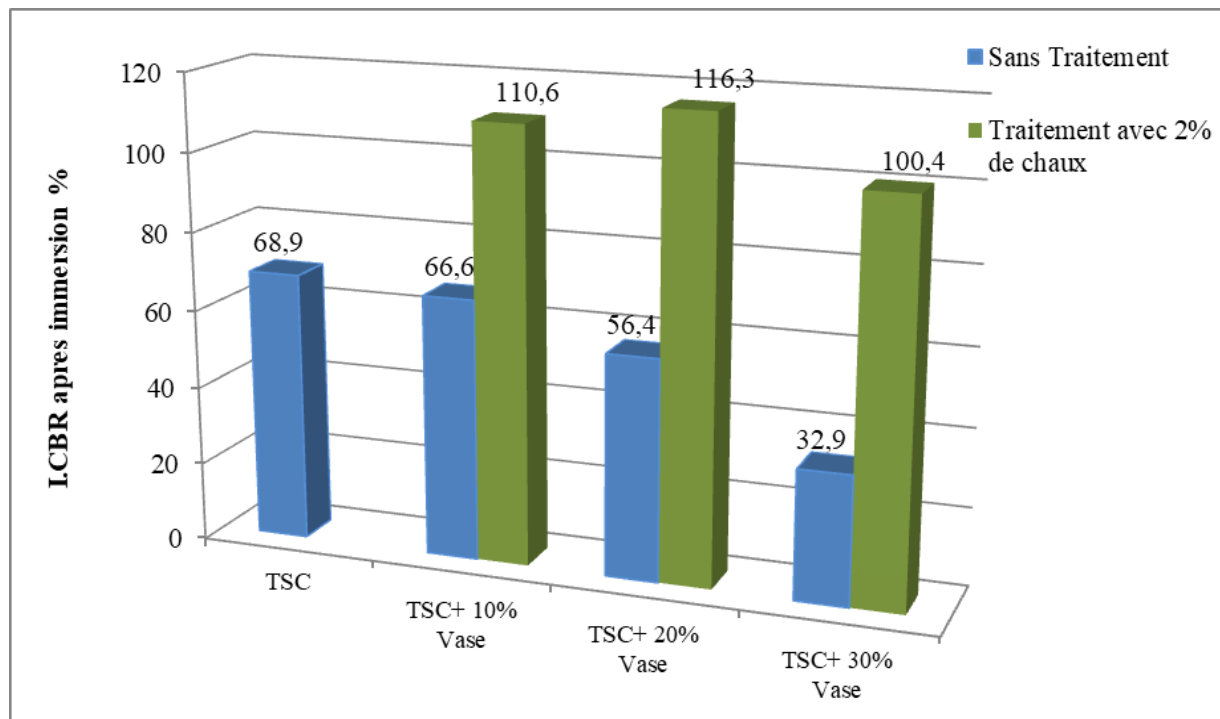


Figure IV-46 : Evolution de l'indice CBR après immersion en fonction de la teneur en vase (avant traitement).

Les graphiques de progression de l'indice CBR après immersion selon la concentration en eau, pour les mélanges traités en utilisant des pourcentages variables de chaux, montrent une croissance rapide de cet indicateur en fonction du taux traitement. L'augmentation de la portance des mélanges traités (CBR) peut être expliquée par la réduction du volume des vides dans le mélange, résultant d'une distribution adéquate des grains du sol par rapport aux particules fines de chaux. L'indice CBR s'élève jusqu'à 68 % pour le mélange (TSC + 20 % VBF) avec 2 % de chaux par rapport au mélange témoin et ensuite décroît après cette proportion.

Quand la chaux entre en contact avec une substance qui renferme des silicates et des aluminates, elle forme des aluminates et des silicates de calcium hydratés, cela en cristallisant, forment une véritable « prise » des substances en contact. Le résultat de cette réaction est une hausse de l'indice CBR et par conséquent une stabilisation avec le gel C-S-H (Melbouci, 2017).

IV-3-3-2-2 Indice Portant Immédiat IPI

Dès un apport de chaux en petites quantités, la transformation des performances du sol sont significatives (Nicolas, 2004). Ceci s'applique à nos mélanges, comme la montre dans la figure ci-dessous.

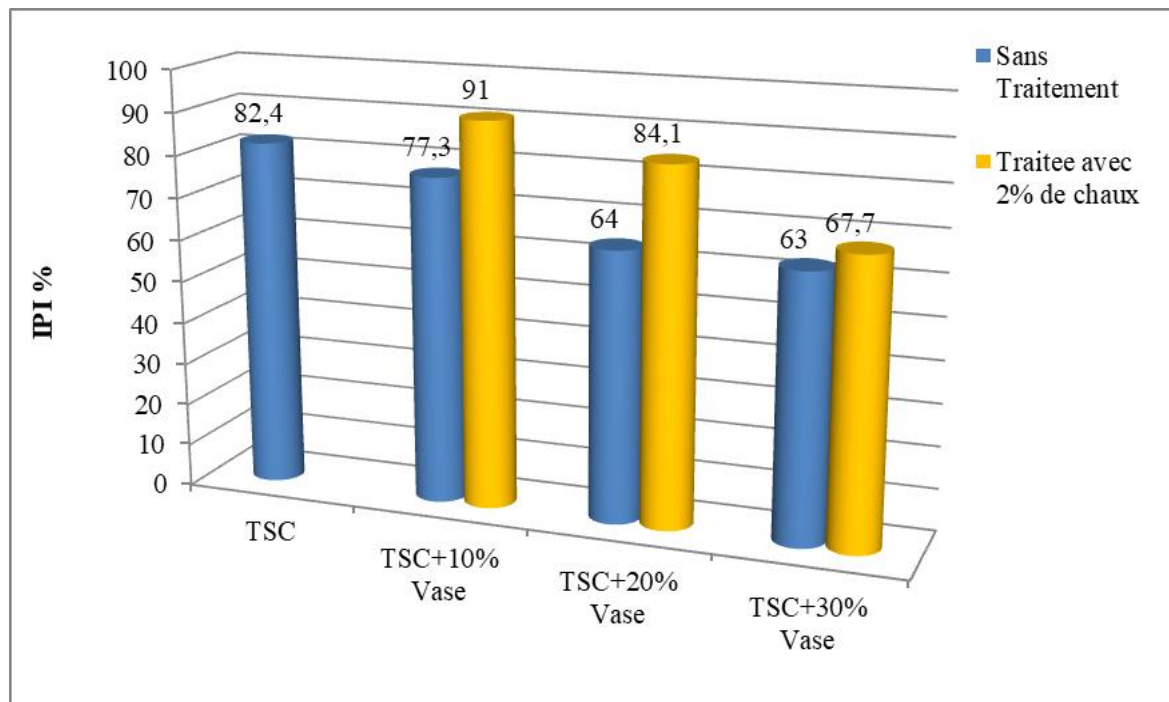


Figure IV-47 : Évolution de l'indice portant immédiat en fonction de la teneur en vase (avant traitement).

Ainsi, pour une même quantité d'eau, la résistance du sol traité à augmentée. Par conséquent, suite au traitement, le processus de compactage est simplifié et l'augmentation de la capacité portante du matériau se révèle nettement.

Lorsque le taux de chaux est le plus bas (2 %), la valeur IPI = 91 répond parfaitement au premier critère pour effectuer le remblai. Le rapport CBR 4j immersion/IPI doit être égal ou dépasser 1 (Hang Nguyen, 2015). L'IPI commence à diminuer progressivement. Cela se justifie par la hausse de la teneur élevée de la vase.

IV-3-3-3 Résistance à la compression

L'ajout de chaux entraîne une hausse de la résistance à la compression « Rc » des sols traités en comparaison aux sols non traités avec des proportions variables selon le dosage. Hyang Nguyen (2015) a obtenu un sol de class A₂ traité avec 1,5 % de chaux a une résistance de Rc = 0,82 MPa et de Rc = 3,23 MPa pour un dosage de chaux de l'ordre de 3 % (témoin, Rc = 0,16 MPa).

L'ajout de la chaux renforce la capacité des échantillons du sol argileux stabilisé à résister aux efforts de la compression. Cela correspond parfaitement aux résultats d'autres travaux de recherche précédents menés par divers chercheurs (Ola, 1977 ; Rahaman, 1986 ; Attoh Okine, 1995 ; Sivapullaiah et al, 2003 ; Osinubi et al, 2006 ; Hossain et al, 2007 ; Khattab et al, 2007 ; Lin et al, 2007 ; Khattab et al, 2008 ; Manasseh et al, 2008 ; Sharma et al, 2008 ; Solanki et al, 2009 ; Walid, 2009 ; Bozbey et al, 2010 et Hang Nguyen, 2015).

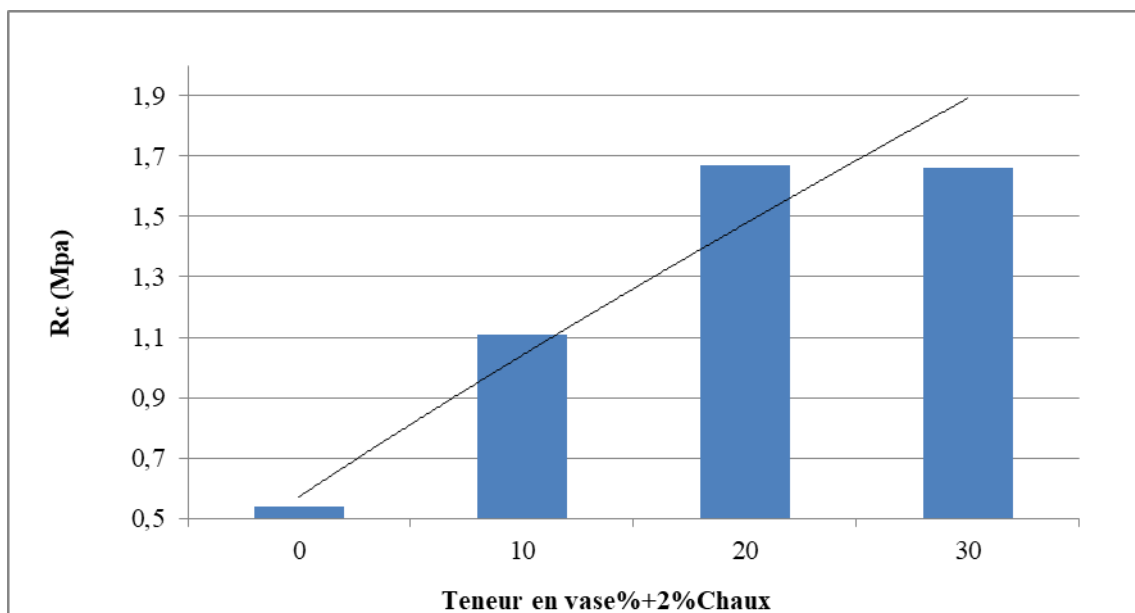


Figure IV-48: l'évolution de la résistance à la compression à 28 j des mélanges étudiées.

Osinubi et al (2006) a mené des recherches sur l'argile noire tropicale au Nigeria, où il a effectué un test de compression avec des mélanges traités à la chaux par rapport à des échantillons témoins et a découvert que la résistance à la compression à 28 jours augmentait de 0,8 à 1,4 MPa pour une combinaison de 2 à 6 % de chaux, respectivement.

Khatab et al. (2008) ont trouvé une amélioration de la résistance mécanique optimale d'une argile de la région de Al-Hadbaa (Tebessa), partie de la ville de Mossoul traité avec un taux de 4% à la chaux. Walid (2009) a étudié la résistance mécanique de vase du barrage d'Oued El Fodda (ville) à la chaux et la combinaison de chaux et pouzzolane naturelle et il a constaté que la résistance à la compression a augmenté dès le premier ajout de la chaux et avec la combinaison de la chaux avec la pouzzolane la résistance augmente plus.

L'accroissement de la résistance à la compression est causé par des changements structuraux et minéralogiques à court terme (changement de granulométrie et d'angle de friction) et par le processus de cimentation des particules (augmentation de la cohésion) générée au fil du temps. L'augmentation de résistance commencera le premier jour (Walid, 2009) et entraîne des hausses de la résistance. Par contre, la création des hydrates (C-S-H et C-A-H).

Cependant, l'augmentation de la cimentation des particules en fonction de l'ajout d'additifs engendre des résistances mécaniques qui se forment progressivement à mesure que la réaction pouzzolanique progresse lentement à température ambiante (Lasledj, 2009).

Selon Bell (1996) la résistance mécanique des sols argileux augmente avec l'addition de la chaux, ce qui est conforme avec les résultats de Walid (2009) et khatab et al (2008).

IV-3-3-3 Résistance au cisaillement

Il s'agit de quantifier l'effort tangentiel de la fracture du sol sous un effort de compression spécifique. Il offre la possibilité d'identifier les propriétés mécaniques d'un sol (cohésion et angle de frottement interne)

Les résultats de l'effet de la chaux pour les contraintes de cisaillement sont montrés sur la figureIV-49 ci-après.

L'ajout de la chaux influence significativement le maximum de la contrainte de cisaillement. Pour les trois additions de la vase, on observe aussi une augmentation de la valeur de cohésion avec l'addition de la chaux notamment l'ajout de 20 % de VBF.

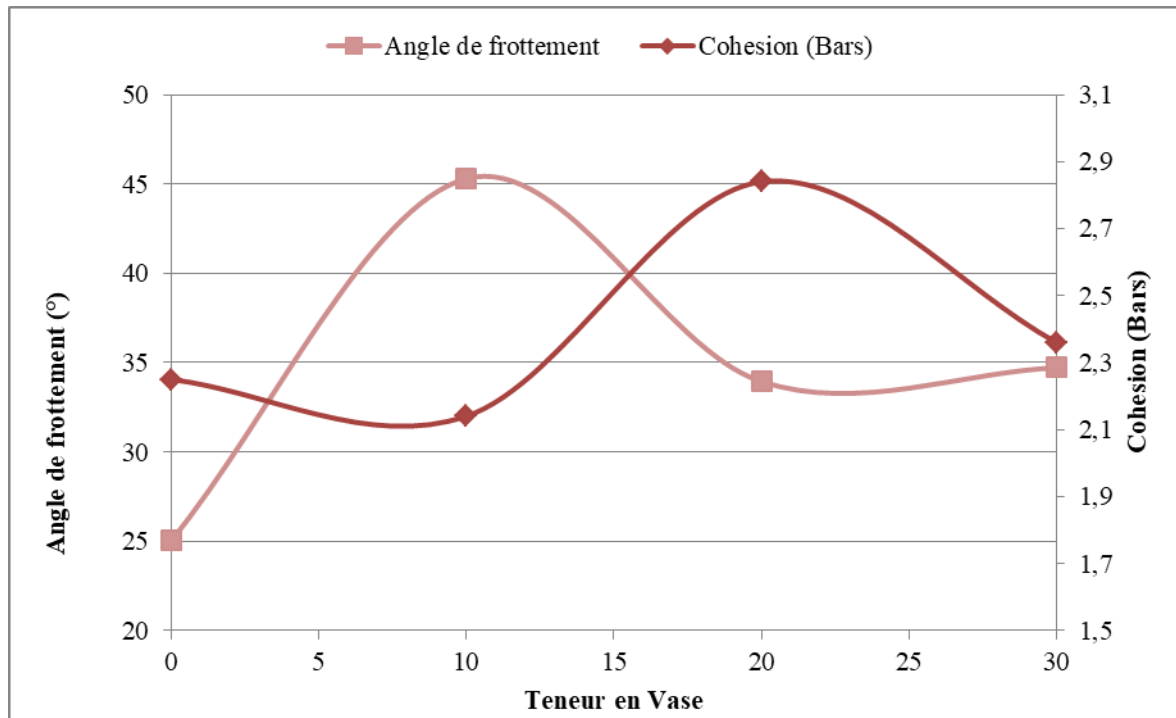


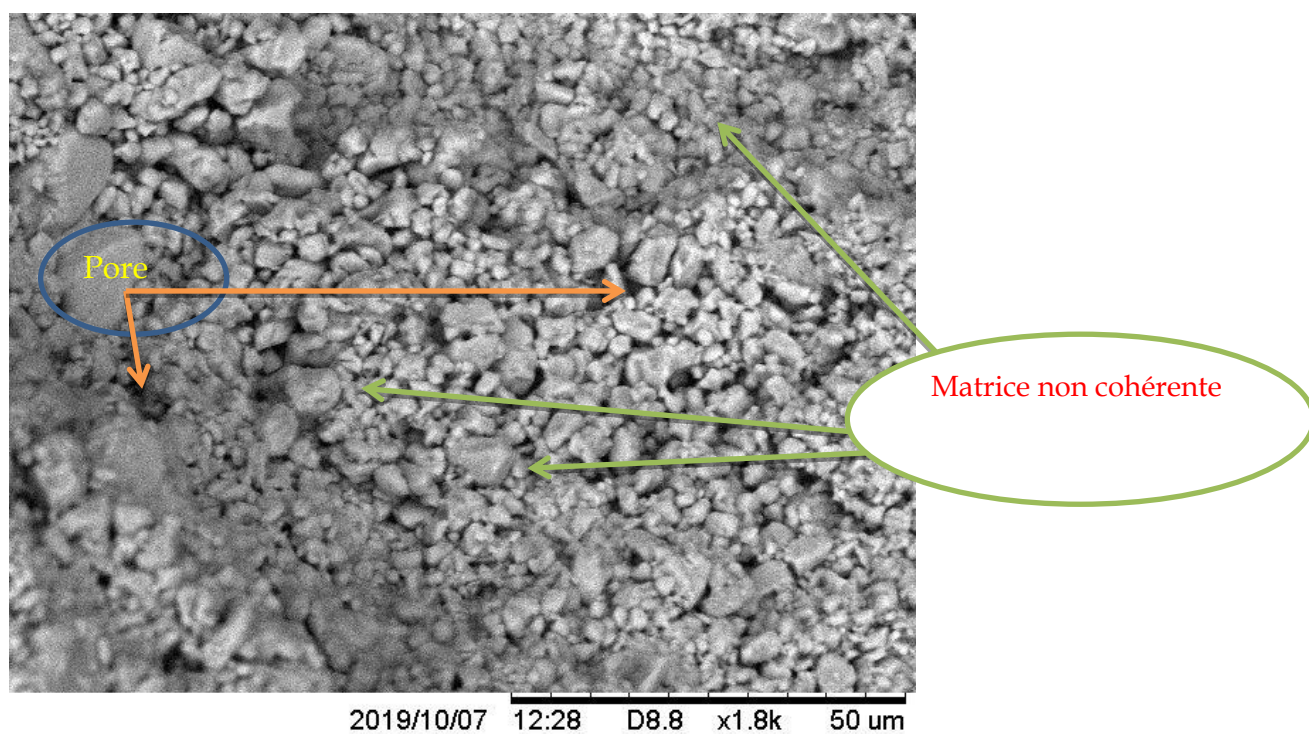
Figure IV-49: Les paramètres de l'essai de cisaillement à la boîte Casagrande à 28 j des mélanges étudiées avec 2% de chaux

L'angle de frottement présente un pic à 10% d'addition de vase par contre la cohésion présente un pic à 20% d'ajout. Un comportement similaire a été trouvé par Melbouci (2017). Il annonce que la cohésion se développe sans interruption, peu importe le liant utilisé et c'est la chaux qui présente une stabilité supérieure par rapport au ciment.

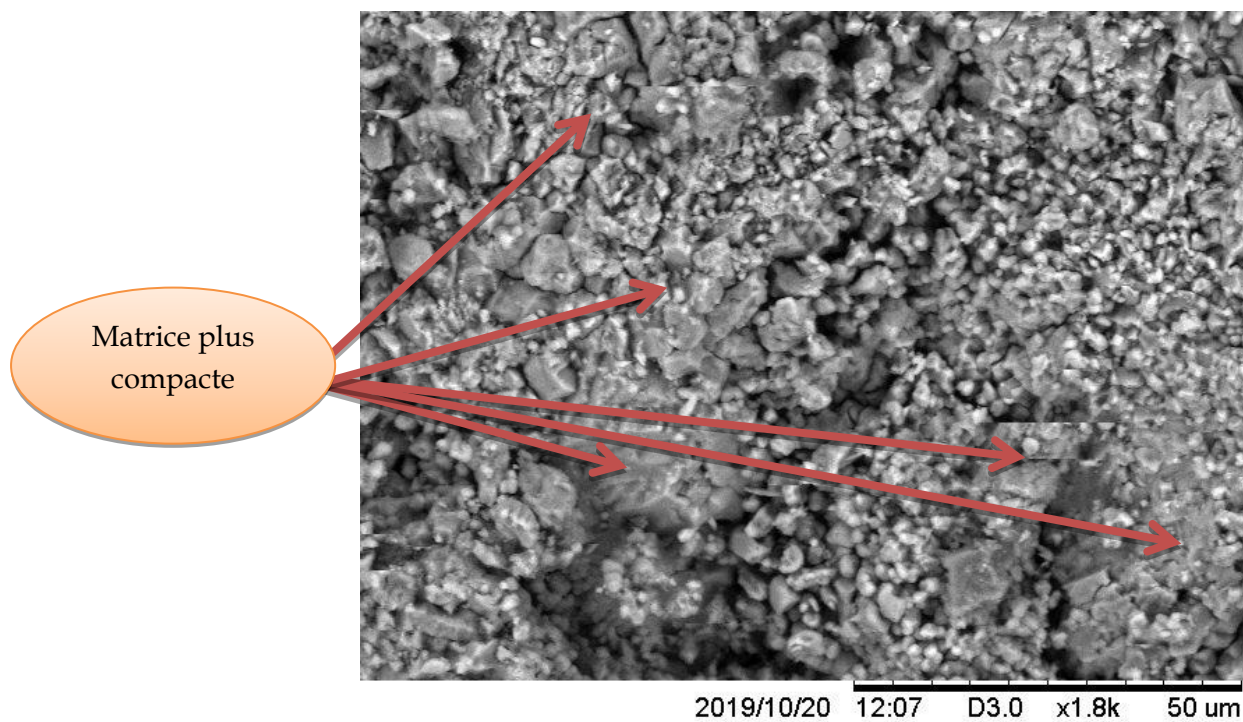
IV-3-4 Analyse de la microstructure de la vase traitée

Un examen microscopique a été effectué pour examiner et déterminer la création de nouveaux composés de ciment dans la composition des mélanges TSC+VBF traités à la chaux. La figure IV-50 (A) et (B) illustrent les images du microscope électronique à balayage (MEB) sur les échantillons du mélange TSC+VBF sans traitement.

Nous constatons que la microstructure présentée est plutôt ouverte, comportant quelques particules qui ne sont pas cohérentes et assemblées dans une structure dispersée (voir la figure IV-50 (A)). Cependant, l'effet du traitement modifie considérablement la structure du mélange TSC+VBF. La configuration dispersive de TSC+VBF se transforme en une forme plus compactée.



(A) ; TSC+ 20% VBF, agrandissement (1,8k)



(B) ; TSC+20% VBF +2% chaux, agrandissement (1,8k)

Figure IV-50 : Observation MEB d'échantillons

L'image indique aussi que la structure du TSC+VBF stabilisé est robuste grâce à la création de nouveaux produits d'hydratation, qui se manifestent sur l'image MEB sous une forme anguleuse (arêtes). Ces produits d'hydratation se composent principalement de silicates et de calciums hydratés (C-S-H), issus de l'hydratation des minéraux argileux dans le vase et la chaux. Au niveau global, la vase stabilisée présente une porosité peu significative. Cependant, sa microstructure est plus robuste et rigide que celle du mélange non traité, ce qui justifie l'accroissement de la résistance.

IV-3-5 Conclusion de la partie du traitement :

L'objectif principal est de valoriser la vase draguée du barrage de Fergoug (Mascara) dans le secteur routier via un traitement à la chaux. Les tests physico-chimiques et mécaniques ont montré que l'ajout de chaux améliore la compacité et la stabilité du matériau en optimisant la densité sèche et la teneur en eau optimale. La présence de matière organique, en proportion limitée, n'affecte pas la portance, permettant ainsi l'utilisation du mélange dans la construction routière.

Cette méthode simple et économique facilite la réutilisation des vases, réduisant les déchets, les coûts de transport et la consommation de granulats naturels. Elle offre une solution durable, stable et résistante aux déformations, tout en contribuant à la protection de l'environnement et à la préservation des ressources naturelles.

IV- Conclusion

Cette étude a porté sur la caractérisation et la valorisation des vases dragués des barrages de Mascara, avec un focus particulier sur la vase du barrage de Fergoug, choisie pour son fort envasement (97,77 %) et ses propriétés physico-chimiques et géotechniques proches des matériaux routiers classiques (TSC). La faible teneur en matière organique et la présence significative de chaux libre (CaO) et de calcite (CaCO₃) confèrent à cette vase un potentiel intéressant pour la construction routière.

Les essais réalisés sur les mélanges de vase de Fergoug avec le Tuf de Sidi Ali Cherif (TSC) ont montré que, sous compactage Proctor modifié, ces mélanges présentent un comportement mécanique satisfaisant, adapté aux couches de base et de fondation des chaussées à trafic faible à moyen. En revanche, le compactage Proctor normal donne des résultats moins performants, indiquant la nécessité d'un traitement pour améliorer la portance, notamment par l'ajout de liants hydrauliques comme la chaux.

Le traitement à la chaux s'est révélé être une solution efficace et économique pour optimiser la compacité, la stabilité et la durabilité des mélanges, tout en maintenant une bonne répartition granulométrique et en minimisant l'impact de la matière organique. Cette approche permet de valoriser localement les vases, réduisant ainsi les déchets, les coûts liés au transport et à l'extraction de granulats naturels, tout en contribuant à la préservation de l'environnement.

En somme, cette étude démontre que le recours aux vases dragués traités à la chaux constitue une alternative technique, économique et écologique prometteuse pour la construction et la réhabilitation des infrastructures routières dans la région de Mascara.

Conclusion générale et perspectives

Cette thèse présente des recherches qui s'articulent autour de la question de la gestion des sédiments, spécifiquement les sédiments des barrages de la wilaya de Mascara (Bouhanifia, Chorfa, Fergoug et Ouizert), un enjeu économique et environnemental crucial.

Dans le cadre d'une gestion écologique axée sur le développement durable, l'utilisation technique des sédiments en tant que matériau routier représente actuellement un défi intéressant. Elle offre la possibilité de prévenir la dispersion de contaminants potentiellement nuisibles après leur immersion ou stockage, tout en contribuant à la préservation des ressources naturelles en granulats.

L'objectif de cette étude est de décrire la méthodologie générale de valorisation. L'emploi des sédiments de dragage extraits des barrages de la wilaya de Mascara, situé au nord-ouest de l'Algérie, dans la composition d'un matériau routier, notamment dans une couche de forme. Étant donné qu'il s'agit d'un matériau inédit, une caractérisation précise des caractéristiques physico-chimiques et géotechniques des sédiments a d'abord été requise.

Dans ce cadre, nous avons réalisé une série d'analyses physiques, chimiques et mécaniques sur les échantillons de sédiments prélevés des barrages de la wilaya de Mascara dans les laboratoires L.N.H.C à Sidi Bel Abbes et Génie-Civil à l'université Mustapha Stambouli de Mascara. Dans cette recherche, nous démontrons l'impact de l'incorporation des sédiments dans les granulats routiers avec un traitement avec de la chaux sur l'amélioration des paramètres géotechniques, les caractéristiques parfaites de densification et de portance du matériau ainsi que leurs résistances mécaniques.

Le but de ce travail doctoral était d'examiner la viabilité et les conditions d'application des sédiments dans les matériaux de la construction routière, spécifiquement pour l'utilisation dans une couche de forme.

Les caractéristiques géotechniques définies en fonction du secteur de valorisation choisi ont permis de classer ce sédiment naturel selon le guide technique GTR (LCPC, SERTA, 2000) en classe A2 (sols fins argileux), qui comporte une majorité des particules minérales inférieures à 80 μm et une teneur en matières organiques entre (3 % à 10 %) soit, faiblement organique, sauf la vase de Bouhanifia est de sol inorganique (<3 %), ainsi que la valeur de

bleu méthylène de tous les sédiments étudiés ($2,5\text{g}/100\text{g} < \text{VBS} < 6\text{ g}/100\text{g}$) sont sensibles à l'eau.

L'état d'envasement élevé des sédiments du barrage de Fergoug, qui atteint 97,77 % selon ANBT, nous a conduits à le sélectionner, car cela signifie que le barrage est actuellement hors service. De surcroît, les caractéristiques de ces sédiments sont en adéquation par rapport au matériau routier TSC, à l'instar de l'indice de plasticité qui constitue une part significative dans l'argile. L'impact de la matière organique est insignifiant puisqu'elle est faiblement organique.

Dans la deuxième partie de cette étude, diverses propriétés physico-mécaniques des mélanges de sédiments du barrage de Fergoug et du Tuf de Sidi Ali Cherif (TSC) ont été évaluées. L'objectif était de valoriser ces sédiments pour les utiliser en tant que couche de forme, suivant la méthodologie du guide des terrassements routiers (GTR, 2000). Les résultats des test Proctor soit normal ou modifié ont montré que :

- La classification des mélanges TSC+ 5 %VBF jusqu'à TSC+25 %VBF est B₅ (sols sableux et graveleux avec fines selon GTR ;
- La densité sèche maximale augmente jusqu'à l'ajout de 10 % d'argile et commence à diminuer progressivement ;
- L'augmentation progressive de la teneur en eau optimale des mélanges TSC-VBF résulte de l'augmentation de la surface spécifique des particules présentes dans les mélanges ;
- Les tests Proctor normaux pour les mélanges comportant 15 %, 20 % et 25 % de vase ne parviennent pas à atteindre les niveaux de performance escomptés ;
- Les mélanges contenant 0 %, 5 % et 10 % de vase montrent une résistance moyenne pour les essais Proctor normal, ce qui les rend appropriés pour des chemins communaux à circulation légère ;
- Pour les essais Proctor modifié, l'échantillon contenant 25 % de vase montre une portance acceptable, alors que les cinq autres échantillons (0 %, 5 %, 10 %, 15 % et 20 % de vase) présentent une portance énorme.

Ces matériaux peuvent être utilisés dans la construction des routes comme couches de base et de fondation pour les chaussées à faible à moyen trafic. Cependant, pour améliorer leur performance en couche de forme, un traitement au ciment ou à la chaux est nécessaire.

Dans la partie du traitement au liant (partie trois), l'objectif principal est d'améliorer les caractéristiques des mélanges les sédiments de dragage-matériau routier grâce à un traitement

à la chaux. Différentes formulations ont été testées pour trouver des solutions simples et abordables. Les tests ont montré que l'ajout de chaux a conduit à :

- Réduction de la valeur maximale de la densité sèche en raison de la faible densité de la chaux et l'augmentation de la proportion d'eau optimale due à l'hydratation de la chaux ;
- La portance est considérablement accrue ($25 \% < IPI$ (entre 67 et 91 %) lorsqu'elles sont employées en tant que couche de forme ;
- La combinaison 2 % de chaux (TSC +20 % VBF) est idéale pour améliorer significativement les propriétés géotechniques du limon étudié, toujours pour cette même combinaison, la résistance à la compression de cette combinaison à 28 jours est 3 fois supérieure à celle de la valeur du mélange non traité ;
- L'incorporation de la chaux joue un rôle déterminant dans l'augmentation du maximum de contrainte de cisaillement ;
- L'amélioration de la cohésion grâce à l'incorporation de chaux, spécifiquement avec 20 % de VBF ;
- L'angle de frottement atteint un sommet à une proportion de 10 % de vase ajoutée, tandis que la cohésion atteint son pic avec 20 % d'ajout ;
- Le traitement à la chaux permet une modification significative de la composition du mélange TSC+VBF. La forme dispersive de TSC+VBF se transforme en une version plus compactée.

Au terme de cette étude, nous sommes en mesure de conclure que plusieurs voies ont été considérées et qu'un grand nombre d'autres demeurent à explorer. Pour des perspectives à court terme, je recommanderais :

- La simulation numérique du comportement d'une chaussée composée de tuf et de sédiments traités selon diverses formulations, basée sur les critères des lois de comportement établis dans cette recherche. Le but est d'améliorer le traitement tout en adhérant aux normes actuelles de résistance et de déformation (modules) ;
- La mise en œuvre d'une planche d'essai d'une structure routière selon les formulations étudiée. L'examen du comportement face à diverses sollicitations normalisées permettra de confirmer ou non la modélisation et donc de sélectionner les lois de comportement adéquates pour ce genre de matériau non conventionnel.

Références bibliographiques

Achour, 2013. Achour, R., (2013), Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage, Thèse en cotutelle, Université de Sherbrooke et Université des Sciences et Technologies de Lille, France.

Adrianne P, 2003. L'argile, médecine ancestrale de la tradition aux preuves scientifiques, éditions Amirys SPRL, dépôt légal : 4e trimestre, ISBN : 2-930353-155.

Al-Rawas et al. 2005. Al-Rawas, A.A., Hago, A.W. and Al-Sarmi, H, 2005, Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolan) on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman, Building and Environment, Vol. 40, pp.681-687.

Amara Abdelkader et Boulabbase Ilyas. 2023. Evolution De L'envasement Du Barrage De Foum Elgherza. Mémoire master Hydraulique. Université Blida 1.

ANBT, 2022. ANBT (Agence Nationale des Barrages et Transferts) 2022. Rapport annuel d'activité sur l'état des barrages Algériens. Kouba, Algeria,

Anton J. Schleiss et Henri pougatsch, 2011. « Les barrages du projet à la mise en service » Ed : Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne SUISSE, 715p.

Arfang et al, 2019. Arfang O.K.G, Siré D, Paul D and Ibrahima N, 2019. Effets de la distance de prélèvement par rapport au pied de Eucalyptus camaldulensis dehn sur les paramètres physico-chimiques du sol en zone sudsoudanienne côtière (Sénégal –Base Casamance). European Scientific Journal February 2019 edition Vol.15, No.6.

Attoh Okine, 1995. Attoh-Okine, N.O., (1995), Lime Treatment of Laterite Soils and Gravels-Revisited, Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 5, pp.283-287.

Autret P, 1983. Institut des sciences et des techniques de l'équipement et de l'environnement pour le développement (ISTED), Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), pp. 40

Bagherpour et al, 2003. Bagherpour, I. and Choobbasti, A.J., (2003), Stabilization of Fine-grained Soils by Adding Microsilica and Lime or Microsilica and Cement, EJGE.

- Bahar, 2004.** R. Bahar, M. Benazzoug, S. Kenai 2004. Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement & Concrete Composites* 26 (2004) 811–820
- Barakat et al 2012.** A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais and S. Nadem, 2012. Assessment of Heavy Metal in Surface Sediments of Day River at Beni-Mellal Region, Morocco. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 4(8): 797-806.
- Bell, 1996.** Bell, F.G., (1994), An Assessment of Cement-PFA and Lime-PFA Used to Stabilize Clay-Size Materials, *Bulletin International Association of Engineering Geology*, No. 49, pp.25-32.
- Ben Abdelghani et al, 2014.** Ben Abdelghani F, Maherezi W Et Boutouil M (2014). Caractérisation géotechnique des sédiments de dragage marins en vue de leur valorisation en techniques routières. *Environnement, Ingénierie & Développement*, 2014, N°66 - mars 2014, pp.4-13
- Bensafia, 2016.** Bensafia, D., (2016), Érosion et sédimentation des barrages : perspectives et mise en œuvre de nouvelles formes d'ingénierie, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Mohamed Khider, Biskra.
- Berthier, 1970.** Paul Berthier, Les anciennes sucreries du Maroc et leurs réseaux hydrauliques. *Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée* Année 1970 7 pp. 225-229
- Bettaher, 2023.** BETTAHER Hamza. Problème des barrages en l'Algérie (Ain kahla). Mémoire Master Académique. Université Abdelhamid ibn Badis Mostaganem.
- Boudlal O, Ferri N, Khattaoui K, Idres S, Ouerd R (2016)** Valorisation of Taksebt dam sediments (Algeria) in road construction. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Nancy* 2016.
- Bourabah M A., 2012.** Bourabah M A. Comportement mécanique des sols fins, application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière, Thèse de doctorat en sciences, Université de Tlemcen, Algérie (2012).
- Boutin R, 2000** « Dragage et rejets en mer- les produits de type vase », Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. 2000; 307p.

Bozbey et al, 2010. Bozbey, I, Garaisayev, S., (2010), Effects of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay, *Earth and Environmental Science*, Vol. 60, N°6, pp. 1137-1151.

Bozbey, I., & Garaisayev, S. (2009). Effects of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay. *Environmental Earth Sciences*, 60(6), 1137–1151.

Cabalar AF, Mustafa WS (2015) Behaviour of sand–clay mixtures for road pavement subgrade. *International J Pavement Engineering*, 18 (8) :714–726.

Cabane, 2004. Cabane. N, 20 décembre 2004 « sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques (contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation) ». Thèse de doctorat préparée au centre des matériaux de grande diffusion de l'école des Mines d'Alés.

Chou et al, (2011). Chou C. W., Seagren E. A., Aydilek A. H., et Lai M. (2011). Biocalcification of sand through ureolysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 137(12), 1179-1189.

Demmak, 1982. « Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides. Thèse de docteur- ingénieur Université de Pierre et Marie Curie Paris XI.

Gay et Schad, 2000. Gay, G. and Schad, Herman., (2000), Influence of Cement and Lime Additives on the Compaction Properties and Shear Parameters of Fine-Grained Soils, *Otto-Graf-Journal*, Vol. 11.

Geode, 2012. Suivis environnementaux des opérations de dragage et d'immersion. Guide méthodologique. Décembre 2012.

Géographie, 2012. Collège des sciences de la vie et de l'environnement, Université d'Exeter, 2012

George et al, 1992. George, S.Z., Ponniah, D.A. and Little, J.A., (1992), Effect of Temperature on Lime-Soil Stabilization, *Construction and Building Materials*, Vol. 6, No.4, pp.247-252.

Goswami et al, 2005. Goswami, R.K. and Singh. B., (2005), Influence of Fly Ash and Lime on Plasticity characteristics of Residual Lateritic Soil, *Ground Improvement*, Vol. 9, No. 4, pp.175-182.

Goual I 2012, Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat : Application en construction routière, thèse de Doctorat, spécialité : Génie civil, Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen 2012.

GTS (2000). Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques-Guide technique, LCPC SETRA, 240p

Guern, 2014. Le Guern M, Boutouil M, Saussaye L, Lescarmontier D, Geotechnical and mechanical characterisation of three marine dredged sediments treated with hydraulic binders. Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction, Rostock, (2014)

Guide technique. Fascicules I et II, 200 p. Guide Des Terrassements Des Remblais Et Des Couches De Forme Fascicule N°2 Annexes Techniques Edition Mai 2023.

Harichane K, Ghrici M, Kenai S (2011). Effet de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur le comportement de plasticité des sols argileux, 1er Congrès International – GCDD2011- 17-19 octobre 2011, Tébessa Algérie.

Hossain et al, 2007. Hossain, K.M.A., Lachemi, M. and Easa, S., (2007), Stabilized Soils for Construction Applications Incorporating Natural Resources of Papua New Guinea, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 51, pp.711-731.

Kamali et al, 2008. S. Kamali, F. Bernard, N. Abriak, P. Degrugilliers, Marine dredged sediments as new materials resource for road construction, Waste Manag. 28 (2008) 919-928

Kavak et Akyarh, 2007. Kavak, A. and Akyarh, A. 2007. A field application for lime stabilization. Environment Geology.51: 987-997.

Khattab et al, 2007. Khattab, S.A.A., Al-Juari, K.A.K., Al-Kiki, I., (2008), Strength, durability and hydraulic properties of clayey soil stabilized with lime and industrial waste lime, Al-Rafidain Engineering, Vol. 16, N°1, pp. 102-116.

Khattab et al, 2008. Khattab, S.A.A., Al-Juari, K.A.K., Al-Kiki, I., (2008), Strength, durability and hydraulic properties of clayey soil stabilized with lime and industrial waste lime, Al-Rafidain

Khattaoui et al, 2015. Khattaoui, M., Boudlal, O., Hamza, A., Ferri, N., (2015), Etude Du Comportement Mécanique De La Vase Du Barrage De Ain Zaouia (Algérie) Pour Une Valorisation Dans La Construction Routière, 22ème Congrès Français de Mécanique, Lyon.

Lasledj, 2009. Lasledj, Abdelmadjid., (2009), Traitement des sols argileux à la chaux : processus physicochimique et propriétés géotechniques, Thèse, Université d'Orléans.
ftp://ftp.univ-orleans.fr/theses/abdelmadjid.lasledj_1914.pdf

LCPC-SETRA, 2000. Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Editions du SETRA-LCPC, Fascicules I and II, (2000) 98-102.

Loz J. et Mathieu C., 1990. Dictionnaire de science du sol. Lavoisier 2ème (Ed), Paris, 266 p.

Maherzi et al 2012. Maherzi, W., Saussaye, L., Boutouil, M., (2012), Aptitude au traitement et comportement mécanique des sédiments de dragage, XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Cherbourg, France, 12-14 juin.

Maherzi et al, 2017. Maherzi, W., Benzerzour, M., Mamindy-Pajany, Y., Van Veen, E., Boutouil, M., & Abriak, N. E., (2017), Beneficial reuse of Brest Harbor (France) dredged sediments as alternative material in road building: laboratory investigations, Journal of Environmental Technology.

Mammeri, 2019. Mammeri. Kh, 2019 « Etude Statique D'un Barrage En Remblais Par La Méthode Des Eléments Finis En Utilisant Une Loi Elastoplastique », mémoire master en géotechnique, Université Saïda, Dr Tahar Moulay.

Manap et Voulvoulis, 2015. Environmental management for dredging sediments-the requirement of developing nations. Journal of Environmental Management 147 (2015) 338-348

Manasseh et al, 2008. Manasseh, J., and Olufemi, A.I., 2008. Effect of lime on some geotechnical properties of Igumale shale. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 13(A), 1-12.

Matthieu, 2023. Matthieu ORLÉ. Protocole de l'essai Proctor. Lanisol, 2023.
<https://lanisol.com/protocole-de-lessai-proctor/>

Melbouci, 2017. Etude comparative du traitement du sol marneux a la chaux et au ciment dans les couches de forme des chaussées. Communication Science & technology vol 18. January 2017.

Mellal et Lamri, 2010. Etude du comportement d'un remblai routier traite a la chaux cas de l'autoroute est-ouest. "siczs_2010" symposium international sur la construction en zone sismique. Universite hassiba ben bouali de chlef (algerie), 26 – 27 octobre 2010

Mellal, 2010. Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte, cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana. Chlef : Thèse Magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, Algérie.

Meziani et al, 2021. Meziani et Thiziri. Caractérisation géotechnique des granulats des carrières : EL MAHAROUN et IBOUDRARENE en vue de leur exploitation dans le domaine routier. Mémoire master 2021. Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou (UMMTO)

Miller et al, 2000. Miller, G.A. and Azad, S., (2000), Influence of Soil Type on Stabilization with Cement Kiln Dust, Construction and Building Engineering, Vol. 14, pp.89-97.

Nalbantoglu 2006. Nalbantoglu, Z. and Tawfiq, S., (2006), Evaluation of the Effectiveness of Olive Cake Residue as an Expansive Soil Stabilizer, Environnement Geology, Vol. 50, pp. 803-807.

Nicolas, 2004. Sols Traites A La Chaux Et Aux Liants Hydrauliques : Contribution A L'identification Et A L'analyse Des Eléments Perturbateurs De La Stabilisation Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Jean Monnet et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne Discipline : Génie des Procédés

Ola, 1977. Akinlabi Ola, S., (1977), the Potentials of Lime Stabilization of Lateritic Soils, Engineering Geology, Vol. 60, pp.223-233.

Osinubi et al, 2006. Osinubi, K.J., (2006), Influence of compactive efforts on lime-slag treated tropical black clay, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, N°2, pp. 175-181.

Osula 1996. Osula, D.O.A., (1996), A Comparative Evaluation of Cement and Lime Modification of Laterite, Engineering Geology, Vol. 42, pp.71-81.

Owens Et Rutledge, 2005. Owens P.R. et Rutledge E.M. (2005) « Morphology » Encyclopaedia of Soils in the Environment, Earth Systems and Environmental Sciences, 511-520.

Pardos, 2003. PARDOS M, DOMINIK J, HOURIET JP. 2003. Micropolluants dans les sédiments. Métaux et micropolluants organiques dans les matières en suspension et sédiments superficiels des grands cours d'eau suisses. Cahiers de l'environnement n° 353. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne, 58p.

Parzonka, 1984. - Parzonka W. : 1984 « Caractéristiques rhéologiques des barrages retenues, rhéologie des fluides hétérogènes », C.R. 21ème colloque GFR, PP : 5-26.

Rahaman, 1986. Rahman M.D.A., « The potentials of some stabilizers for the use of lateritic soil in construction», Building and Environment, vol. 21, 1986, p. 57-61.

Remini, 2003. La Sédimentation Dans Les Barrages De L'Afrique Du Nord. LARHYSS Journal Volume 2, Numéro 1, Pages 45-54

Remini, 2016. Envasement Des Barrages Dans Les Régions Arides Exemples Algériens. Larhyss Journal, n°27, Sept 2016, pp. 63-90

Remini, 2017. Remini B., toumi A., 2017. Le réservoir de Beni Haroun (Algérie) est-il menacé par l'envasement. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°29, Mars 2017, pp. 249-263.

Saussaye, 2012. Saussaye L., 2012. Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspect géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse Normandie.

Semari, 2012. K. Semari, L. Benayada, M. Chergui, B. Alam 2012. État des ressources hydriques de la wilaya de Mascara (Algérie). Techniques Sciences Méthodes (TSM).

Serbah, 2011. Serbah, (2011), Etude et valorisation des sédiments de dragage du barrage Bakhadda Tiaret, Mémoire de Magister, Université Aboubakr Belkaid Tlemcen.

SETRA-LCPC, 1992. Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) Guide technique, Fascicule II.

Tran Ngoc, 2009. Tran, N. T., (2009), Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France.

Valérie Thirion-Merle, 2014. Valérie Thirion-Merle. Spectrométrie de fluorescence X. Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes, Editions des archives contemporaines, 2014, Collection Sciences Archéologiques,

Vénuat, 1980. Michel Venuat ; (1980) : Le traitement des sols à la chaux et au ciment, 459 p.

Walid, 2012. Walid Zoubir. Effet des résidus minéraux sur l'amélioration Des sols argileux de la région de Chlef. These Magister. Université Hassiba Ben-Bouali -Chlef-

Zentar, 2009. Rachid ZENTAR, Nor-Edine ABRIAK, Ngoc Thanh TRAN. Caractérisation et étude de l'impact sur l'environnement de sédiments dragués dans le nord de la France. Revue Paralia, Volume 2 (2009) pp 4.1-4.12.

Les Normes

EN 13286-1. Partie 1 : Méthode d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et la teneur en eau. (2022)

EN 933-9. Tests for the Geometrical Properties of Aggregates - Part 9: Assessment of Fines—Methylene Blue Test, European Committee for Standardization, Belgium, 2009+A1. (2013)

EN 94-048. Sols : Reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en carbonate Méthode du calcimètre. (1996)

ISO 10390. Soil quality - Chemical characteristics of soils. Determination of pH, International Organization for Standardization. (2005)

ISO 10694. Soil quality - Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis), International Organization for Standardization. (1995)

ISO 17892-1. Geotechnical investigation and testing -- Laboratory testing of soil. Part 1: determination of water content. (2014)

ISO 17892-4. Geotechnical investigation and testing, Laboratory testing of soil. Part 4: determination of particle size distribution, combination of sieving and sedimentation, International Organization for Standardization. (2016)

NF EN 13 286-2. Méthodes d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau - Compactage Proctor. (2005)

NF EN 13 286-47. Méthode d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice de portance immédiate (IPI) et du gonflement linéaire. (2021)

NF P 11-300 : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. (1992)

NF P 94-051. Sols : reconnaissance et essai – Détermination des limites d'Atterberg – limite de liquidité à la coupelle- limite de plasticité au rouleau. (1993)

NF P94-052. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration. (1995)