

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DJILLALI LIABES
SIDI BEL ABBES
Laboratoire de Génie Civil et Environnement



FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL & TRAVAUX PUBLICS
THESE DE DOCTORAT EN SCIENCE

Option : **Materiaux**

Présentée par

Melle : **BENAISSA Assia**

Intitulé de la thèse

Valorisation de la vase pour l'utilisation dans la technique routière

Composition du jury :

| | | | |
|---------------------------|-----|--------------------|-----------------|
| Mr MEGACHOU Mourad | Pr | Président | UDL SBA |
| Mr SBAIBI Yahya | Pr | Directeur de thèse | UDL SBA |
| Mr EZZIANE Mohamed | MCA | Examineur | ENP Oran |
| Mr GHOMARI Abdelhamid | Pr | Examineur | U de Mostaganem |
| Mr GHEMBAZA Moulay Smaïne | Pr | Invité | UDL SBA |

Année universitaire 2016-2017

Remerciements

Remerciements

Je voudrais d'abord remercier ALLAH le Tout Puissant de m'avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce travail et d'avoir éclairé mon chemin.

A l'issue de ce modeste travail je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à sa réalisation et son suivi de près ou de loin. Je souhaite en premier lieu adresser mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, le Professeur **SEBAIBI Yahia**. Je tiens à vous exprimer toute ma gratitude pour m'avoir fait confiance et m'avoir encadré pendant ces années et pour les conseils toujours pertinents et enrichissants.

Je tiens à présenter mes sincères remerciements au professeur **Meghachou Mourad**, vice recteur de la faculté de technologie de m'avoir fait l'honneur de présider le jury et Je le remercie également pour son accueil chaleureux à chaque fois que j'ai sollicité son aide, ainsi que pour ses multiples encouragements.

Je tiens à dire merci du fond de mon cœur à madame **Aloui Zehour, Pr. Daniel Levacher, Pr. Ghembaza S. Moulay**. J'ai traversé des moments si difficiles que plus d'une fois j'ai pensé que je ne verrai jamais le bout du tunnel. A chacun de ces moments, tu étais là pour me reconforter et m'aider à trouver des solutions. Je te remercierai jamais assez pour tout ce que tu as fait pour moi.

Mes vifs remerciements sont adressés à **Pr. Ghomari Abdelhamid, Dr. Ezziane Mohamed**, pour avoir accepté d'examiner ce travail et enrichir des débats, chacun dans son domaine de spécialité.

Je n'oublierai pas non plus de remercier à toute l'équipe du laboratoire **LHCO à Sidi bel Abbes, LTPO à oran**, qui m'a aidé pour la réalisation des essais ou j'ai pu effectuer plusieurs essais et analyses.

L'aboutissement de cette thèse a aussi été encouragé par de nombreuses discussions avec des collègues de disciplines variées. Je ne citerai pas de noms ici, pour ne pas en oublier certains

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille et mes amis, leur confiance me portent et me guident tous les jours. Un grand merci.

Benaissa Assia

ملخص

لين توحد السودان ظاهرة طبيعية تمس معظم السودان في العالم و لكن بمعدل يختلف من منطقة إلى أخرى. للأسف، منطقة شمال إفريقيا تسجل أعلى نسبة في العالم من حيث رواسب السودان. تفقد الجزائر سنويا 32 مليون متر مكعب من الماء من إجمالي حجم 5.2 مليار متر مكعب من السودان القيد الاستغلال البالغ عددها 114 سد.

سد فرغوغ يقع في غرب الجزائر واحد من العديد من السودان المعرضة للتوحد، هذه الظاهرة تحدث اساسا بسبب تآكل نشطة جدا خاصة في المناطق شبه القاحلة. لهذا الغرض تم تنفيذ عمليات التجريف و البعض الآخر مبرمج في محاولة لإنعاش كميات من الخزلن فقدت بسبب الرواسب (الطمي). هذه الدراسة تدخل في إطار البحث عن منهجية لإدارة الرواسب المجرودة في منطقة الغرب الجزائري، الهدف منها هو اقتراح صياغات اقتصادية تنافسية و سهلة التنفيذ في الموقع الارضى و التي تسمح في علاج هذه المواد في هندسة الطرق.

هذه الدراسة هي جزء من منهجية البحث لإدارة الرواسب المستخرجة من المنطقة الغربية في الجزائر. والهدف هو تقديم صيغ قادرة على المنافسة اقتصاديا و سهلة التنفيذ في المواقع و التي تسمح باسترداد هذه المواد في جيوتقنية الطريق.

تحقيقا لهذه الغاية، أجرينا سلسلة من التجارب الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية على عينات من الرواسب المأخوذة من سد خزلن فرغوغ Fergoug بولاية معسكر.

نعرض في هذه الدراسة تأثير إضافة المواد الحبيبية (الرمل) و الماسكات الهيدروليكية بصفاتها محسن لحجم الجسيمات و الميكانيكية و لتحسين العوامل الجيوتقنية ، و الخصائص المثلى من التكتيف و أصناف مقاومتها الميكانيكية.

عدة تركيبات مختلفة تم تحليلها لأجل تثمينها و استخدامها في الطرق بمطابقة توصيات الادلة تقنية GTR و GTS (LCPC - SETRA، 2000). النتائج المحققة يجب أن توافق هذه المعايير و المواد المستخدمة في قطاع الطرق.

الكلمات الرئيسية : التوحد ، الرواسب المستخرجة ، المعالجة ، هندسة الطرق ، المقاومة ، ماسكات هيدروليكية ، الخصائص الميكانيكية .

RESUME

L'envasement des barrages est un phénomène naturel qui touche pratiquement toutes les retenues du monde, mais avec un taux d'envasement qui varie d'un endroit à un autre. Malheureusement, la région de l'Afrique du nord est celle où l'envasement des barrages enregistre les valeurs les plus élevées de la planète. L'Algérie perd annuellement un volume d'eau de 32 millions de m³ sur un volume total de 5,2 milliards de m³ des 114 barrages en exploitation. Le barrage de Fergoug situé au nord-ouest de l'Algérie est l'un parmi les plusieurs barrages envasés, ce phénomène est dû principalement à une érosion très active surtout dans les zones semi aride. Pour cela des opérations de dragage ont été effectuées et d'autres sont programmées pour essayer de réanimer des volumes de la retenue perdue par l'envasement.

Cette étude s'inscrit dans la recherche d'une méthodologie de gestion de sédiments dragués dans la région de l'Ouest Algérien. L'objectif est de proposer des formulations économiquement compétitives et faciles à mettre en oeuvre in situ qui permettent une valorisation de ces matériaux en géotechnique routière.

A cet effet, nous avons mené une série d'analyses physiques, chimiques et mécaniques sur des échantillons de sédiments prélevés de la retenue du barrage de Fergoug (Mascara).

Nous montrons dans cette étude l'influence d'ajout de matériau granulaire et de liants hydrauliques en tant que correcteur à la fois granulométrique et mécanique permettant d'améliorer ces paramètres d'état géotechniques, ces caractéristiques optimales de densification et de portance ainsi que leurs classes de résistances mécaniques.

Différentes formulations ont été alors analysées pour la valorisation en technique routière conformément aux recommandations des guides techniques GTR et GTS (LCPC-SETRA, 2000). Les résultats obtenus vérifient bien ces normes d'un matériau utilisé en domaine routier.

Mots clés : envasement, sédiments de dragage, valorisation, technique routière, traitement, portance, liants hydrauliques, comportement mécanique.

ABSTRACT

The silting of dams is a natural phenomenon that affects virtually all deductions the world, but with siltation rate that varies from place to place. Unfortunately, the North Africa region is where siltation of dams recorded the highest values of the planet. The Algeria annually loses a water volume of 32 million m³ of total volume of 5.2 billion m³ of the 114 dams in operation. Dam Fergoug located north-west Algeria is one among several silted dams, this is due primarily to a very active erosion especially in semi-arid areas. For this dredging operations have been completed and others are programmed to try to revive the lost volumes retained by siltation.

This study is part of the search for sediment management methodology dredged in the western region of Algeria. The aim is to offer economically competitive formulations and easy to implement in situ which allow recovery of such road in geotechnical materials.

To this end, we conducted a series of physical, chemical and mechanical analyzes of sediment samples collected from the dam of Fergoug (Mascara).

We show in this study the influence of adding granular material and hydraulic binders as correcting both size and mechanics to improve the condition of geotechnical parameters, the optimal characteristics of densification and lift as well as their classes of mechanical strengths.

Different formulations were then analyzed for road enhancement technique as recommended by technical guides GTS and GTR (LCPC-SETRA, 2000). The results verify these good standards of material used in road sector.

Key words: siltation, dredging sediments, recovery, road engineering, processing, lift, hydraulic binders, mechanical behavior.

SOMMAIRE

| | |
|----------------------------|----|
| RESUME..... | 2 |
| ABSTRACT..... | 3 |
| LISTE DES FIGURES..... | 10 |
| LISTE DES TABLEAUX..... | 13 |
| LISTE DES PHOTOS..... | 16 |
| LISTE DE SYMBOLES..... | 17 |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 19 |

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|--|----|
| I.1 Introduction..... | 25 |
| I.2 Notion sur les sédiments..... | 25 |
| I.2.1 Définition..... | 25 |
| I.2.2 Origine et formation des vases..... | 26 |
| I.2.3 Constitution des sédiments..... | 27 |
| I.2.4 Granulométrie des sédiments..... | 30 |
| I.3 Caractérisation des polluants rencontrés dans les sédiments..... | 31 |
| I.3.1 Origine et comportement des polluants..... | 31 |
| I.3.2 Nature des polluants..... | 31 |
| I.3.2.1 matières organiques..... | 31 |
| I.3.2.2 métaux lourds..... | 32 |
| I.4 Les différents Traitement utilisées..... | 34 |
| I.4.1 Traitement physique..... | 34 |
| I.4.2 Traitement chimique..... | 34 |
| I.4.3 Traitement biologique..... | 34 |
| I.4.4 Traitement par stabilisation / immobilisation..... | 34 |
| I.4.5 Traitement thermique..... | 34 |
| I.5 La problématique du dragage..... | 35 |

| | |
|---|-----------|
| I.5.1 Les techniques de dragage..... | 35 |
| I.5.1.1 Le curage mécanique..... | 35 |
| I.5.1.2 Le curage hydraulique..... | 35 |
| I.5.1.3 Le curage pneumatique..... | 35 |
| I.5.2 Réglementation vis-à-vis de la gestion des sédiments..... | 36 |
| I.5.2.1 Le statut juridique d'un déblai de dragage extrait de son milieu d'origine..... | 36 |
| I.5.2.2 Réglementation des sédiments vis-à-vis de l'application en technique Routière..... | 37 |
| I.5.3 Mode de gestion des sédiments..... | 40 |
| I.5.3.1 Immersion..... | 40 |
| I.5.3.2 Mise en dépôt..... | 41 |
| I.5.3.3 Valorisation des sédiments de dragage..... | 41 |
| I.6 Valorisation des sédiments de dragage en technique routière..... | 43 |
| I.6.1 Description d'une structure de la chaussée..... | 43 |
| I.6.2 Les différentes couches d'une chaussée..... | 44 |
| I.6.3 Caractérisation et classification des sédiments selon le guide technique GTR..... | 45 |
| I.6.3.1 Classification GTR..... | 45 |
| I.6.3.2 Classification USCS..... | 47 |
| I.6.4 Critère de classification des sédiments dans les travaux routiers..... | 47 |
| I.6.4.1 Critère de granulométrie..... | 48 |
| I.6.4.2 Critère de portance..... | 48 |
| I.6.4.3 Critère de durabilité au jeune age..... | 48 |
| I.6.4.4 Critère de résistance..... | 49 |
| I.6.4.5 Critère d'aptitude des liants au traitement..... | 50 |
| I.7 Généralité sur le mode de traitement des sédiments de dragage par les liants hydraulique..... | 51 |
| I.7.1 Traitement a la chaux..... | 52 |
| I.7.1.1 Différents types de chaux..... | 52 |
| I.7.1.2 Caractéristiques chimiques et physiques..... | 53 |
| I.7.1.3 Spécification de la chaux à usage routier..... | 55 |
| I.7.1.4 Action de la chaux..... | 55 |

| | | |
|---------|--|----|
| I.7.2 | Traitement au ciment..... | 58 |
| I.7.2.1 | Action du ciment..... | 60 |
| I.7.3 | Correcteur granulométrique (sable)..... | 61 |
| I.8 | Facteurs perturbateurs dans les traitements..... | 61 |
| I.8.1 | Influence des matières organiques sur le sol..... | 61 |
| I.8.2 | Influence des matières organiques sur le traitement | 62 |
| I.8.2.1 | Exemple de l'effet des matières organiques sur les performances Mécaniques..... | 63 |
| I.8.3 | Influence des métaux lourds..... | 64 |
| I.8.4 | Substances inorganiques..... | 65 |
| I.9 | Travaux de recherche..... | 65 |
| I.10 | Conclusion..... | 70 |

Chapitre II : PROLEMATIQUE DE L'ENVASEMENT DES BARRAGES EN ALGERIE

| | | |
|----------|---|----|
| II.1 | Introduction..... | 72 |
| II.2 | Phénomène de l'envasement des barrages..... | 73 |
| II.2.1 | L'érosion dans les bassins versants..... | 73 |
| II.2.2 | Mécanisme de l'envasement..... | 74 |
| II.2.3 | L'envasement des retenues..... | 75 |
| II.2.3.1 | Envasement des retenues dans le monde..... | 75 |
| II.2.3.2 | Envasement des retenues Algériens..... | 76 |
| II.2.3.3 | Influences économiques..... | 78 |
| II.2.3.4 | Moyens de lutte contre l'envasement en Algérie..... | 78 |
| II.2.4 | Quantité des matériaux dragués et immergés en Europe..... | 79 |
| II.3 | Conclusion..... | 80 |

Chapitre III : IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES SEDIMENTS DU BARRAGE DE FERGOUG

| | |
|--|-----|
| III.1 Introduction..... | 82 |
| III.2 Présentation du barrage de Fergoug..... | 82 |
| III.2.1 Historique du barrage de Fergoug..... | 82 |
| III.2.2 Localisation du sous bassin versant de l'oued Fergoug..... | 84 |
| III.2.3 Entraînement des sédiments en aval..... | 85 |
| III.2.4 Les conséquences environnementales..... | 86 |
| III.3 Présentation des échantillons..... | 87 |
| III.4 Etude d'identification géotechnique..... | 87 |
| III.4.1 Teneur en eau naturelle W(%)..... | 88 |
| III.4.2 Analyse granulométrique..... | 89 |
| III.4.3 Mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre (γ_s) (NF P 94-054)..... | 92 |
| III.4.4 Limites d'Atterberg..... | 93 |
| III.4.5 Essai au bleu de méthylène (VBS)..... | 96 |
| III.4.6 Teneur en matières organiques (MO%)..... | 98 |
| III.4.6.1 Classification géotechnique des sols organiques..... | 99 |
| III.4.7 Teneur en carbonate de calcium CaCO ₃ | 100 |
| III.4.8 Caractérisation chimique et minéralogique du sédiment..... | 101 |
| III.4.8.1 Analyse chimique..... | 101 |
| III.4.8.2 Diffraction des rayons 'X'..... | 102 |
| III.4.8.3 Observation MEB..... | 103 |
| III.4.8.4 Analyse thermique différentielle (ATD)..... | 103 |
| III.4.9 Détermination du pH..... | 104 |
| III.4.10 Caractérisation de portance et de compactage du sédiment Etudié..... | 105 |
| III.4.10.1 Essai Proctor Normale..... | 105 |
| III.4.10.2 Détermination de l'IPI..... | 106 |
| III.5 Classification du sédiment Fergoug selon le GTR (LCPC-SETRA, 2000)..... | 108 |
| III.6 Conclusion..... | 110 |

**Chapitre IV : VALORISATION DES SEDIMENTS DU BARRAGE DE FERGOUG
EN COUCHE DE FORME**

| | |
|---|-----|
| IV.1 Introduction..... | 113 |
| IV.2 Méthodologie de traitement des Sédiments du barrage de Fergoug en technique routière..... | 113 |
| IV.3 Préparation de la vase du barrage de Fergoug..... | 115 |
| IV.3.1 Constitution du squelette de la formulation..... | 116 |
| IV.3.1.1 Sables de carrière, Correcteurs granulaires..... | 116 |
| IV.3.1.2 Ciment..... | 116 |
| IV.3.1.3 Chaux..... | 118 |
| IV.3.2 Les formulations retenues..... | 118 |
| IV.3.3 Influence de la matière organique sur les formulations étudiées..... | 119 |
| IV.3.4 Influence des paramètres physico-chimiques des formulations d'étude..... | 120 |
| IV.3.5 Détermination de la densification et la portance des formulations étudiées..... | 122 |
| IV.3.6 Portance des formulations en immersion..... | 124 |
| IV.3.6.1 Propriété de gonflement..... | 124 |
| IV.3.6.2 Principe..... | 124 |
| IV.3.6.3 Mesure du gonflement vertical..... | 125 |
| IV.3.6.4 IPI et ICBR..... | 126 |
| IV.3.7 Aptitude au traitement et résistance à la compression..... | 127 |
| IV.3.7.1 Confection des éprouvettes..... | 127 |
| IV.3.7.2 Essai de rupture en compression simple..... | 130 |
| IV.3.8 Age autorisant la circulation sur la couche de forme..... | 132 |
| IV.3.9 Résistance à l'immersion aux jeunes âges..... | 132 |
| IV.3.10 Résistance au gel..... | 134 |
| IV.3.11 Campagnes d'essais en compression diamétrale..... | 135 |
| IV.4 Conclusion..... | 138 |

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....140
REFERENCE.....144

Liste de figures

Chapitre I

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Origine des sédiments dans l'environnement aquatique [MAE, 07]..... | 26 |
| Figure I.2 : Schéma de la composition simplifié des sédiments portuaires (IDRA..... Environnement, 2006) [5]..... | 27 |
| Figure I.3 : Processus d'évolution des matières organiques [Mustin, M., 1987] [9]..... | 28 |
| Figure I.4 : Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins..... | 30 |
| Figure I.5 : Les différentes techniques de traitements [4]..... | 34 |
| Figure I.6 : Processus d'évaluation environnementale pour une valorisation en technique..... routière..... | 37 |
| Figure I.7 : Schéma de fonctionnement d'une structure de chaussée sous l'application d'une..... charge roulante, d'après Abdo (2009) [43]..... | 43 |
| Figure I.8 : Les différentes couches d'une chaussée (Pouteau, 2004)[18]..... | 44 |
| Figure I.9 : Photo d'une coupe-type de chaussée..... | 44 |
| Figure I.10 : tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature,..... selon la norme NF P 11-300..... | 45 |
| Figure I.11 : Critère de l'IPI pour les différentes couches de la chaussée [Norme NF P 98 115]..... | 47 |
| Figure I.12 : Classification de matériaux traités aux liants hydrauliques [Norme NF P98 113]..... | 48 |
| Figure I.13 : Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide relative à..... l'introduction de chaux vive, d'après le GTS (2000)..... | 55 |
| Figure I.14 : Observation MEB d'échantillons d'un sol de type argileux de Nanjing (Chine) :.... (A) sols non traités (B) 8% de chaux ajoutés (grossissement 500 fois), (Cai et al, 2006) [18].... | 55 |
| Figure I.15 : Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol traite de chaux vive (GTS (LCPC-SETRA,..... 2000))..... | 57 |
| Figure I.16 : Courbe de compactage du sol en fonction de la quantité de matière organique..... [Hussein, AI., et al. 1999]..... | 61 |
| Figure I.17 : Relation entre les résistances Rc à 28 jours et les matières organiques d'un..... sédiment traité de Cherbourg..... | 62 |
| Figure I.18 : Courbe Proctor du sédiment avant et après traitement..... | 65 |

| | |
|--|----|
| Figure I.19 : Evolution de la résistance à la compression simple en fonction du temps de conservation pour les limons traités à la chaux. [28]..... | 67 |
| Figure I.20 : Sédiments de Seine traités avec ajout ou non de sable fin [22]..... | 67 |

Chapitre II

| | |
|---|----|
| Figure II.1 : Processus de la sédimentation..... | 73 |
| Figure II.2 : Propagation d'un courant de densité (Remini. B et al, 2005) [41]..... | 74 |
| Figure II.3 : Quelques exemples des retenues de type « canal »..... | 74 |
| Figure II.4 : Nombre de barrages en Afrique du nord..... | 76 |
| Figure II.5 : Capacité de stockage..... | 76 |
| Figure II.6 : Envasement annuel en Afrique du nord..... | 76 |
| Figure II.7 : Quantité de matériaux dragués et immergés dans quelques pays européens de l'Atlantique Nord-Est en 2001 et 2002 (source OSPAR commission, 2003) [4]..... | 78 |

Chapitre III

| | |
|---|-----|
| Figure III.1 : Carte de localisation du sous-bassin- versant de l'oued Fergoug..... | 82 |
| Figure III.2 : Le barrage du Fergoug, ses ouvrages annexes et ses affluents..... | 83 |
| Figure III.3 : Carte lithologique du sous bassin versant de l'oued Fergoug (Bouchetata. A et..... Bouchetata. T, 2006) [49]..... | 84 |
| Figure III.4 : Tamis à mailles carrées..... | 89 |
| Figure III.5 : Courbe granulométrique de la vase brut..... | 90 |
| Figure III.6 : Coupelle de Casagrande..... | 93 |
| Figure III.7 : Rouleau de sol fin..... | 93 |
| Figure III.8 : Définition des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité..... | 94 |
| Figure III.9 : Diagramme de plasticité de Casagrande pour les sédiments du barrage de Fergoug [6]..... | 95 |
| Figure III.10 : a) Mise en œuvre de l'essai au bleu de méthylène ; b) Test de la tache..... | 96 |
| Figure III.11 : Seuils de teneur en matière organique dans la classification LPC..... | 98 |
| Figure III.12 : Seuils de teneur en matière organique dans la classification GTR [25]..... | 99 |
| Figure III.13 : Courbe DRX de la vase de Fergoug | 102 |
| Figure III.14 : Micrographie MEB de la vase du barrage de Fergoug | 103 |
| Figure III.15 : Courbe ATD de la vase de Fergoug..... | 103 |
| Figure III.16 : Matériel de l'essai Proctor Normale..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| Figure III.17 : a) Protocole de compactage b) Aspect du moule à la fin de l'essai..... | 106 |
| Figure III.18 : Evolution de la masse volumique sèche et de l'IPI en fonction de la teneur en eau du sédiment du barrage de Fergoug)..... | 107 |
| Figure III.19 : Classification du sédiment du barrage de Fergoug selon la classification du GTR. (LCPC-SETRA, 2000)..... | 109 |

Chapitre IV

| | |
|--|-----|
| Figure IV.1 : Démarche de valorisation suivie des sédiments du barrage de Fergoug en couche... de forme..... | 113 |
| Figure IV.2 : Etat des sédiments avant le traitement..... | 114 |
| Figure IV.3 : Evolution du pH en fonction du dosage de ciment..... | 116 |
| Figure IV.4 : Evolution du pH en fonction du dosage de chaux..... | 117 |
| Figure IV.5 : Influence de la matière organique sur les mélanges étudiés..... | 118 |
| Figure IV.6 : Distribution des courbes granulométriques par laser des composants de..... Formulations étudiées..... | 119 |
| Figure IV.7 : Combinaison des résultats (WL, IP) des formulations étudiées..... Placées dans le diagramme de plasticité de Casa grande..... | 120 |
| Figure IV.8 : Evolution de la densité sèche en fonction de la teneur en eau pour les formulations étudiées..... | 122 |
| Figure IV.9 : Evolution de l'indice portant immédiat en fonction de la teneur en eau pour les..... formulations étudiées..... | 122 |
| Figure IV.10 : IPI et ICBR en fonction des formulations étudiées..... | 125 |
| Figure IV.11 : Illustration des éprouvettes pour écrasement..... | 129 |
| Figure IV.12 : L'évolution des résistances mécaniques en compression simple des formulations étudiées en fonction du temps..... | 130 |
| Figure IV.13 : Immersion des éprouvettes destinées à la détermination de Rci..... | 132 |
| Figure IV.14 : Rc60 et Rci en fonction des formulations étudiées..... | 132 |
| Figure IV.15 : Illustration de l'essai de compression diamétrale..... | 135 |
| Figure IV.16 : Positionnement de formulations étudiées à 360 jours dans l'abaque de classement du GTS 20000..... | 136 |

Liste des tableaux

Chapitre I

| | |
|---|----|
| Tableau I.1 : Classes granulométriques d'un matériau..... | 29 |
| Tableau I.2 : Sources de pollution des métaux lourds citée dans le guide méthodologique..... 'enlèvement des sédiments, (Baize et Janiec,1994)[6]..... | 32 |
| Tableau I.3 : Seuils indicatifs de VNF sur les éléments traces et l'indice Hydrocarbure (mg/kg... sèche) [Eau – Artois – Picardie. 2005] [10]..... | 36 |
| Tableau I.4 : Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation. en technique routière [AMATR, Sétra, 2012]..... | 38 |
| Tableau I.5 : Valeurs limites en percolation (niveau 2) permettant de justifier certaines..... utilisations visées par le présent guide [AMATR, Sétra, 2012]..... | 39 |
| Tableau I.6 : Le système de Classification Unifié des Sols USCS (réglementation USCS)..... | 46 |
| Tableau I.7 : Critère d'aptitude au traitement pour la classification des matériaux traités aux..... liants hydrauliques [Norme NF P94-100]..... | 49 |
| Tableau I.8 : Récapitulatif des critères de jugement pour l'utilisation d'un matériau traité en..... couche de chaussée..... | 50 |
| Tableau I.9 : Spécification de la chaux à usage routier (NF P 98-101)..... | 54 |
| Tableau I.10 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition dans.. la norme NF P 15-301, (1994)..... | 58 |
| Tableau I.11 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe..... | 58 |
| Tableau I.12 : Effets de certains métaux lourds sur les phases hydratées du ciment [Imyim..... 2000][21]..... | 63 |
| Tableau I.13 : Variations des résistances mécaniques en fonction de la nature du traitement et de la maturation des éprouvettes [26]..... | 66 |
| Tableau I.14 : Travaux de recherche sur les sédiments de dragage..... | 68 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Tableau II.1 : Taux d'envasement de quelques retenues dans le monde..... | 75 |
| Tableau II.2 : L'envasement de quelques barrages [Agence Nationales des Barrages..... Algériens, 1990] [39]..... | 77 |
| Tableau II.3 : Conséquences économiques futures de l'envasement..... | 77 |

Chapitre III

| | |
|---|-----|
| Tableau III.1 : Caractéristiques géographiques du barrage de Fergoug | 83 |
| Tableau III.2 : La teneur en eau naturelles des deux sédiments dragues du barrage Fergoug... | 88 |
| Tableau III.3 : Caractéristiques granulométriques des sédiments du barrage de Fergoug..... | 91 |
| Tableau III.4 : Limites d'Atterberg des sédiments du barrage de Fergoug..... | 95 |
| Tableau III.5 : Paramètres tirés de l'essai au bleu..... | 97 |
| Tableau III.6 : Classification des sols d'après Philipponat..... | 97 |
| Tableau III.7 : Classification d'après Holtz et Gibbs..... | 97 |
| Tableau III.8 : Estimation du pourcentage de la matière organique..... | 98 |
| Tableau III.9 : Classification du sol en fonction de la Teneur en CaCO ₃ [51]..... | 100 |
| Tableau III.10 : Analyse chimique de la vase de barrage Fergoug (L.N.H.C du Sidi Bel Abbes... en septembre 2013)..... | 101 |
| Tableau III.11 : Résultats de l'essai Proctor – IPI sur les sédiments bruts..... | 108 |
| Tableau III.12 : Récapitulatif des résultats des caractéristiques des sédiments du barrage de..... Fergoug..... | 108 |

Chapitre IV

| | |
|--|-----|
| Tableau IV.1 : Les analyses physiques du sable de carrière..... | 115 |
| Tableau IV.2 : Analyse chimiques du ciment CPJ 42,5 (L.T.P.O)..... | 116 |
| Tableau IV.3 : Formulation des mélanges étudiés..... | 118 |
| Tableau IV.4 : Pourcentages des éléments granulaires et coefficients de courbure et..... D'uniformité des composants dans les formulations étudiées..... | 121 |
| Tableau IV.5 : Caractéristiques physico-chimiques des formulations de mélanges Etudiées... | 121 |
| Tableau IV.6 : Synthèse de l'essai Proctor-IPI pour les formulations étudiées..... | 122 |
| Tableau IV.7 : Gonflement final en fonction des formulations étudiées..... | 125 |
| Tableau IV.8 : IPI et ICBR en fonction des formulations étudiées..... | 126 |
| Tableau IV.9 : Paramètres de mise en œuvre en fonction du type d'éprouvette..... | 128 |
| Tableau IV.10 : Répartition des éprouvettes en fonction des essais et quantité de mélange..... préparé (pour un formulation)..... | 128 |
| Tableau IV.11 : Resistances en compression simple des sédiments avec et sans Traitement.... | 130 |
| Tableau IV.12 : Rci / Rc60 en fonction des formulations étudiées..... | 132 |

| | |
|---|-----|
| Tableau IV.13 : Détermination des facteurs de conversion entre les résistances en compression.. (Rc) et en traction brésilienne (Rtb)..... | 133 |
| Tableau IV.14 : Age à partir duquel $R_c = K_{c/t} \times 0,25$ en fonction des formulations étudiées..... | 134 |
| Tableau IV.15 : Paramètres mécaniques en traction des formulations de mélanges étudiés à 28j et 90j de maturation..... | 135 |

Liste des photos

Chapitre II

Photos II.1 : Envasement au niveau de la vidange du fond du barrage Fergoug.....72

Photos II.2 : Envasement à l'amont du barrage (oued El Hamam) à environ 500m.....72

Chapitre III

Photo III.1 : Envasement au pied du barrage.....84

Photo III.2 : Envasement à l'amont du barrage à environ 100.....84

Photo III.3 : Rejet de la vase draguée.....85

Photo III.4 : Entraînement de la vase déposée en aval du barrage.....85

Photo III.5 : Prélèvement de La vase.....86

Photo III.6 : La vase dans des bacs.....86

Photo III.7 : Détermination de la distribution granulométrique par l'essai de sedimentometrie.90

Photo III.8 : Appareil de calcimétrie..... 100

Photo III.9 : Mesure de l'acidité de sédiment de drague par un appareil de PH-mètre –
LTPO.....104

Photo III.10 : la presse pour mesurer l'IPI.....107

Chapitre IV

Photo IV.1 : Description de l'essai CBR pour mesurer les indices de portances (IPI.....
ICBRimmédiat et ICBRimmersion).....124

Photo IV.2 : Illustration de la confection des éprouvettes.....127

Photo IV.3 : Eprouvette en cours de démoulage.....128

Liste des symboles

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
CBR: Californian Bearing Ratio
COT: Carbone organique total
GTR : Guide des terrassements routiers
GTS : Guide du traitement des sols
MO : Matières organiques
Cu : Coefficient d'uniformité
Cc : Coefficient de courbure
d₁₀ : Diamètre de particules pour 10 % de passants cumulés
d₃₀ : Diamètre de particule pour 30 % de passants cumulés
d₆₀ : Diamètre de particule pour 60 % de passants cumulés
ρ_d : Masse volumique sèche
ρ_s : Masse volumique des grains solides
ρ_w : Masse volumique de l'eau
W_n : Teneur en eau naturelle
W_L : Limite de liquidité
W_P : Limite de plasticité
VBS : Valeur au bleu du sol
I_c : l'indice de consistance
IP : Indice de plasticité
OPN : Optimum Proctor Normale
ρ_{dOPN} : Masse volumique apparente maximale de OPN
E : Module élastique
E_{tb} : Module d'élasticité en compression diamétrale
IPI : Indice Portant Immédiat
G_v : Gonflement volumique
IC.B.R. : Indice CBR
R_c : Résistance à la compression simple
R_{tb} : Résistance en traction indirecte (brésilienne)
R_t : Résistance à la traction directe

Liste des symboles

Al₂O₃ : oxyde d'aluminium

CaO : monoxyde de calcium

Cl : Chlore

SiO₂ : dioxyde de silicium

Fe₂O₃ : oxyde de fer

Na₂O : oxyde de sodium

Al : Alumine

As : Arsenic

Ba : Baryum

C₃A : Aluminate tricalcique (3 CaO Al₂O₃)

C₂S : Aluminate tricalcique (3 CaO Al₂O₃)

C₃S : Silicate tricalcique (3 CaO SiO₂)

C₄AF : Aluminoferrite tétracalcique (4 CaO Al₂O₃ Fe₂O₃)

C : Carbone

Ca : Calcium

Cd : Cadmium

Cr : Chrome

Cu : Cuivre

Fe : Fer

Hg : Mercure

K : Potassium

Mg : Magnésium

Mn : Manganèse

Mo : Molybdène

Na : Sodium

Na₂SO₄ : Sulfate de sodium

Ni : Nickel

O : Oxygène

P : Phosphore

Pb : Plomb

S : Soufre

Introduction générale

Introduction générale

En technique routière, pour la construction des chaussées à faible trafic, on cherche de plus en plus à utiliser des matériaux locaux (granulats tendres, matériaux recyclés, sous-produits industriels, vase de dragage,...) afin de réduire les coûts de transport et d'économiser les ressources en granulats. Ces matériaux locaux présentent en général une ou plusieurs caractéristiques non conformes aux spécifications pour les matériaux routiers. L'utilisation de ces nouveaux matériaux « hors spécifications », nécessite donc des études au laboratoire et sur chantier, pour vérifier qu'ils présentent un comportement satisfaisant, pour l'application envisagée et qu'ils peuvent être employés au prix de quelques restrictions.

Les volumes des sédiments dragués sont chaque année considérables et sont estimés environs 600 millions de m³ dans le monde [Boutin R, 1999], qui pose une problématique liée à la gestion de ces sédiments, qui sont considérés comme des déchets et ils peuvent parfois avoir un impact environnemental non négligeable.

Ces grands volumes de matériaux peuvent représenter une source des matières premières très intéressantes, notamment pour un secteur consommateur de granulats tel que le génie civil.

En Algérie, les déchets sont souvent stockés dans des conditions qui ne répondent pas aux normes. A cet effet, il faut mettre en place une gestion écologiquement rationnelle des déchets, notamment la prévention et la réduction de la production.

Les méthodes actuelles de prise en charge de ces sédiments dragués tendent seulement à gérer le caractère opérationnel des installations sans se préoccuper du devenir réel de ces vases et boues de dragage.

Actuellement, deux solutions sont adoptées : le rejet en mer et la mise en dépôt à terre. Pendant longtemps, ce sont les considérations techniques et économiques qui l'ont emporté lors des prises de décisions. Aujourd'hui, une meilleure prise de conscience de la teneur anthropique en substances contenues dans un grand nombre de ces matériaux, et leurs

relations avec des considérations humaines et environnementales, intéresse beaucoup de chercheurs.

L'Agence Nationale des Barrages (ANB), dans son diagnostic de Janvier 2011, montre l'ampleur des risques pressentis dans un avenir très proche, si rien n'est entrepris.

La construction de nouvelles réserves n'est pas la seule solution à envisager, il faut préserver les capacités existantes avec le même intérêt. Pour notre part, on s'intéresse particulièrement à la valorisation des vases qui proviennent du barrage du Fergoug, qui situe au nord-ouest algérien, dont la capacité de stockage était de 17 millions de m³ en 1970, a été soumis a un envasement progressif ou au bout de sept années (en 1977) sa capacité a chute a 9,67 millions de m³ ; soit un taux annuel d'envasement dépassant un million de m³. Après une première opération de dragage (1984-1986) ou plus de 10 millions de m³ ont été récupérés par dragage et largage de vases, l'envasement du barrage est estime actuellement a plus de 14 millions de m³ [Semcha, 2006]. Ce premier dragage a cause beaucoup de désordres en aval, suite au largage des sédiments.

Ainsi, ces grands volumes de matériaux peuvent représenter une source de matières premières très intéressante, notamment pour un secteur consommateur de granulats tel que le Génie-Civil. Parmi les différents secteurs du Génie-Civil, le domaine routier sollicite le plus grand besoin en matériaux vue qu'il consomme une quantité importante de granulats avec différentes propriétés mécaniques. Ainsi, l'étude présentée propose une nouvelle source d'approvisionnement en granulats pour le domaine routier, par l'utilisation de sédiments fins de dragage des barrages.

Il est donc nécessaire de mieux connaitre les sédiments étudiés a travers leurs propriétés intrinsèques et leur comportement, afin de mieux les utiliser en tant que matériau constitutif d'une couche de structure routière.

L'étude présentée propose un matériau à base de sédiments de dragage d'un barrage pour une utilisation dans le domaine routier. Le matériau étudié est d'origine fluviale. Il comporte une majorité de particules fines inférieures à 63 μm et une teneur en matière organique faible. Une telle composition induit une faible résistance mécanique, une compressibilité élevée et une forte sensibilité à l'eau. Ces propriétés ne peuvent pas satisfaire les critères mécaniques requis pour les matériaux routiers. Ainsi, il est indispensable d'améliorer leurs performances mécaniques. Pour ce faire, nous avons traiter les sédiments par ajout de la chaux , liant aériens et ajout d'un sable de carrière en vue d'apporter une correction de la granulométrie du

matériau final obtenu et créer une cohésion de cimentation permettant l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sédiment de base.

Cette étude s'intéresse à l'élaboration d'une démarche globale pour une meilleure gestion de la valorisation de la vase du barrage de Fergoug pour assurer une valorisation convenable des matériaux étudiés dans le domaine routier, il est donc fondamental d'améliorer leurs durabilités et leurs propriétés mécaniques. Ces travaux ont été réalisés dans le laboratoire de mécanique de sol de la faculté de génie civil à Sidi Bel Ab

Ce travail s'organise autour de quatre chapitres :

- En premier on a commencé avec une introduction générale consacrée à la description du problème et les objectifs de l'étude.
- Le premier chapitre est consacré essentiellement à une étude bibliographique, il comporte la problématique de gestion des sédiments de dragage. Après une revue des principaux constituants des sédiments, des polluants présents dans ces matériaux, des réglementations en vigueur pour leur gestion, les critères et les conditions d'utilisation de matériaux en technique routière sont exposés. Dans ce chapitre, le point est mis sur les méthodes de formulations de matériaux mais également les méthodes de traitement aux liants hydrauliques
- Le deuxième chapitre fait le point sur la complexité et la Problématique de l'envasement des barrages en Algérie qui s'appuie sur les articles publiés dans la littérature scientifique et les rapports techniques mis à notre disposition.
- Le troisième chapitre consiste à une présentation des techniques expérimentales, dans lequel les résultats des essais d'identification sur les vases et leurs comportements mécaniques sont présentés. Nous abordons ce chapitre, après avoir donné une représentation générale des vases étudiés et de leur provenance par une étude d'identification géotechnique. Ceci permettra de fournir les éléments qui identifient et classent ces matériaux selon certaines propriétés et caractéristiques.
- Dans le quatrième chapitre, également expérimental, détaille les traitements proposés pour la valorisation de ce sédiment en techniques routières plus

Introduction générale

précisément en couche de forme conformément aux recommandations du guide technique GTR (LCPC-SETRA, 2000). Des formulations de mélanges sédiments-ajout matériau granulaire et/ou traitement aux liants sont présentes. L'objectif étant d'arriver à proposer un matériau traité économiquement compétitif et facile à mettre en œuvre in situ.

Une conclusion générale et perspective résume les principaux résultats obtenus lors de ce travail de recherche.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

L'étude bibliographique met la lumière sur la problématique complexe de gestion des sédiments de dragage, à laquelle sont affrontés les responsables de la gestion de ces matériaux. Cette étude bibliographique nous amènera, en premier lieu, à d'écrire la problématique de gestion des sédiments, les différents constituants et les polluants existants dans ces matériaux, afin de mieux comprendre leur comportement et anticiper les problèmes qui peuvent être posés dans le processus de valorisation.

En deuxième lieu, l'étude traite les techniques de leur traitement, puis nous présentons les différents modes de gestion des sédiments ainsi que le cadre réglementaire régissant la gestion globale des sédiments.

Enfin on va présenter un historique des travaux déjà réalisés ainsi que la thématique de traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques seront présentées, dans lesquelles on trouvera les moyens d'amélioration des performances mécaniques des sédiments dans la géotechnique routière ce qui est le but de cette thèse.

I.2 Notion sur les sédiments

I.2.1 Définition

Dans le dictionnaire de géologie [Foucault et al, 1980], Les sédiments, plus communément appelés vases (mot emprunté au Néerlandais), sont définis comme « un ensemble constitué par la réunion des particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport ». La sédimentation désigne l'ensemble des processus par lesquels ces particules organiques ou minérales en suspension et en transit cessent de se déplacer.

Les sédiments, le plus souvent de couleur foncée, grise ou noire, pouvant atteindre des teneurs en eau très supérieures à la limite de liquidité. Les termes de vase et d'argile sont trop imprécis pour caractériser les sols mous [Boutin R, 2000] [1].

A cause de la complexité de ce matériau aux apparences et aux composants très diversifiés, nous citons certaines définitions venant de plusieurs pédologues [2] :

- **Rajcevic, 1957** : définit la vase comme étant un ensemble de substances minérales sableuses et poussiéreuses, dont la cohérence est due à un complexe organique ;
- **Rivière, 1965** : montre la complexité des propriétés physiques et mécaniques qui résultent de l'association de nombreux constituants ou phases. Sols fins, peu denses, normalement consolidés et situés sous la surface de l'eau depuis leur dépôt ;
- **Bourge et al, 1973** : leur formation est due à un dépôt en eau douce ou salée. Ses constituants couvrent une gamme granulométriques étendue en dessous de 0,2 mm avec une majorité de grains de 1 à 2 μ m formant un réseau en flocons constitué de minéraux (quartz, calcaire, glauconie, mica, frustales de diatomées, grains de pollens et débris végétaux) ;
- **Mignot, 1976** : définit comme étant des sédiments complexes qui couvrent une gamme étendue de particules inférieures à 40 μ m mais peuvent contenir en quantité notable des éléments sableux.
- **Vidalie, 1977** : matériau à la fois colmatant, plastique, rigide, compressible et imperméable, pouvant avoir en fonction de la granulométrie et de la nature des colloïdes associés, de fortes teneurs en eau (jusqu'à 200%).

I.2.2 Origine et formation des vases

La formation d'une vase est due à la sédimentation de particules élémentaires ou agglomérées, provenant de l'érosion des sols et des roches, des volcans, des restes d'organismes aquatiques et de leur transport sous l'effet d'hydrodynamique [3]. Les vases ne sont pas neutres d'un point de vue électrostatique, les fines sont chargées négativement, ce qui occasionne une agglomération en présence de cations provenant de l'eau. La formation de ces flocons en présence de leur poids accélère les vitesses de chute de ces particules, qui sédimentent plus rapidement (Figure I.1).

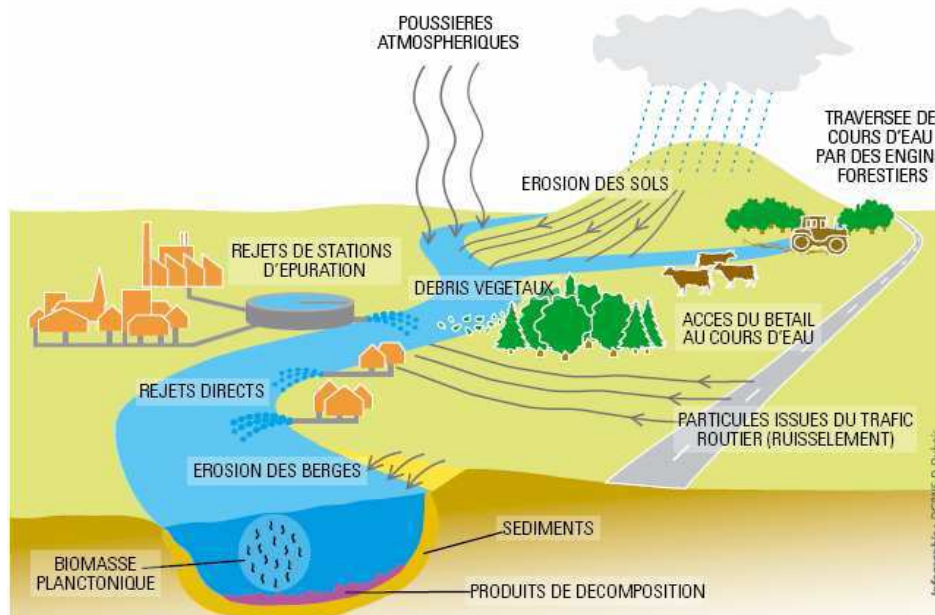


Figure I.1: Origine des sédiments dans l'environnement aquatique [MAE, 07]

[Schneider, 2001], [8] a déclaré deux origines aux sédiments :

- ✚ **Origine endogène** : les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Il s'agit de débris de macrophytes comme les plantes aquatiques, les cadavres de microphytes et d'animaux ;
- ✚ **Origine exogène** : il s'agit des particules qui sont issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents. D'origine naturelles ou anthropiques, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, de matières organiques, de nutriments ou de micro-polluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques.

I.2.3 Constitution des sédiments

Schématiquement les vases sont constituées en général de 4 éléments principaux [Agence de l'eau (1), 2002] :

- La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates) ;
- La fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite) ;
- La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acides fulviques et humiques) ;
- Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

Nous montrons sur la figure I.2 un exemple sur la composition des sédiments portuaires. Ces matériaux représentent des volumes considérables de déchets qui renferment des substances polluantes

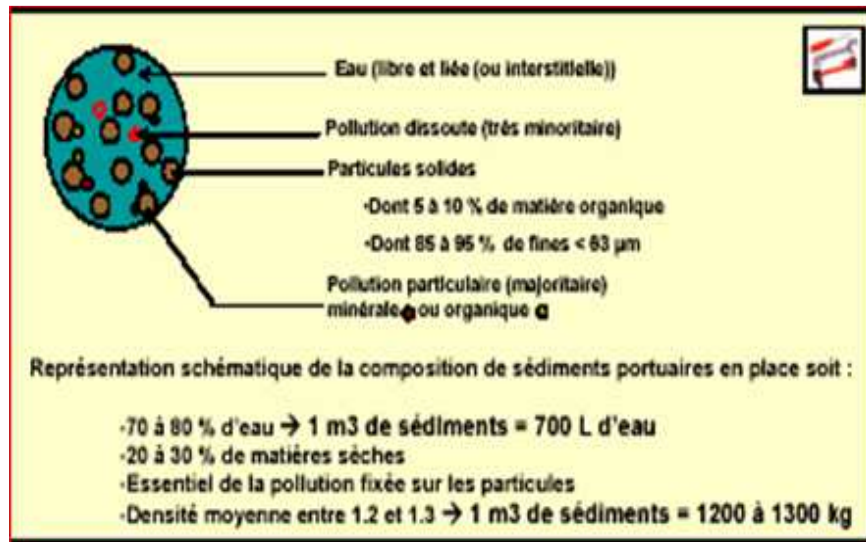


Figure I. 2 : Schéma de la composition simplifiée des sédiments portuaires (IDRA Environnement, 2006) [5]

Les argiles sont des silicates d'aluminium hydratés qui présentent une structure cristalline en feuillets. Cette constitution permet l'hydratation des argiles, avec parfois un phénomène de gonflement très important. La plupart des argiles sont thixotropiques. Elles perdent leur rigidité en présentant le comportement d'un liquide lorsqu'elles subissent une sollicitation mécanique, et retrouvent leurs caractéristiques initiales au repos. La souplesse des liaisons entre les feuillets, permet aux argiles d'avoir un comportement plastique. La dernière propriété des argiles est l'interaction avec les espèces ioniques. En effet, les charges négatives des argiles sont neutralisées par des cations compensateurs. Or, ces cations peuvent s'échanger avec ceux présents dans le milieu et notamment avec les métaux lourds c'est le phénomène d'adsorption.

En ce qui concerne la **matière organique** des sédiments peuvent se présenter sous formes diverses, il s'agit de débris végétaux, soit des micro-organismes algaires, virus, bactéries ou débris végétaux.

D'après Schneider (Schneider 2001) [6] La proportion de matière organique dans la matière sèche des sédiments varie entre 90%, dans le cas de la tourbe, et 2% pour les sables de rivière. La composition de cette matière organique est généralement identique d'un type de sédiment à

un autre. En général, la proportion de matière organique est de l'ordre de 2 à 10% pour les sédiments des cours d' "eaux vives" et elle est constituée à 60% de composés humiques.

Les matières organiques du sol, en général, sont réparties en quatre classes (Mustin, 1987) [cité par Dubois. V, 2006] [7] voir (Figure I.3) :

- la matière organique vivante (biomasse active) ;
- la matière organique fraîche (débris végétaux, cadavres, excréments,...) ;
- les composés en cours d'évolution dits transitoires ;
- les composés organiques stabilisés, appelés communément humus.

L'humus se divise en trois groupes : la fraction humine, les acides humiques, et les acides fulviques.

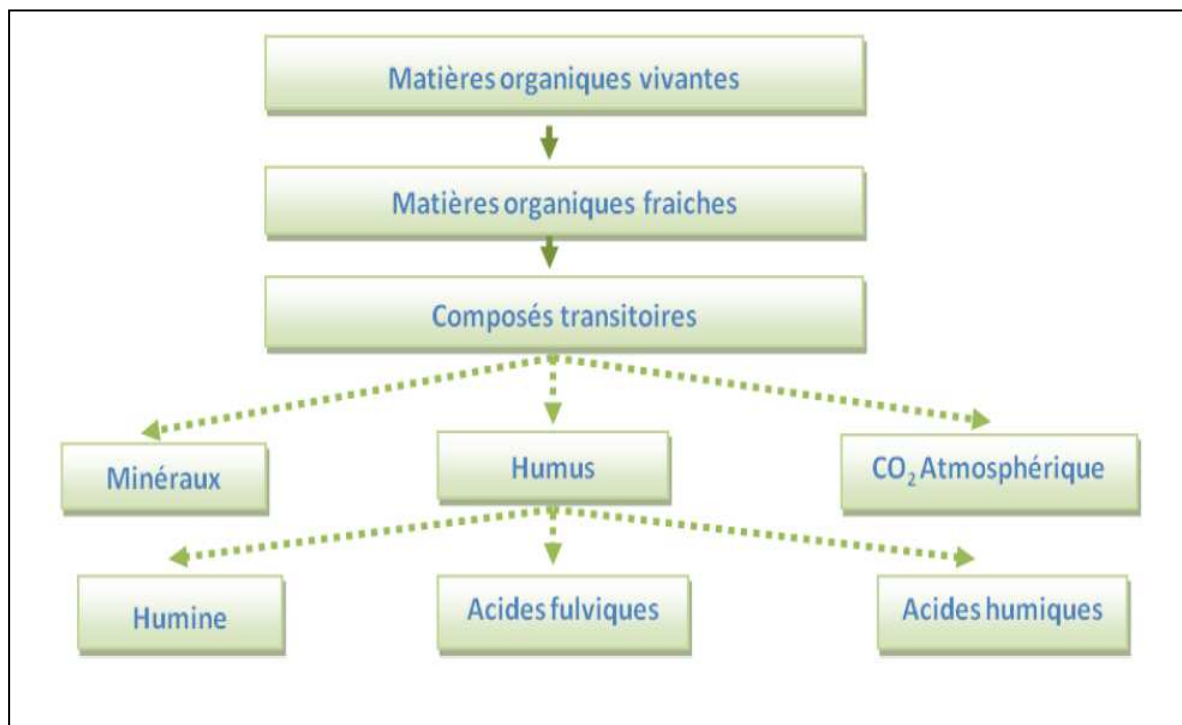


Figure I.3: Processus d'évolution des matières organiques [Mustin, M., 1987] [9].

Enfin, la nature de l'eau contenue dans les vases, appelée « eau interstitielle » peut être divisée en quatre catégories : [LIFE, 2002] [4] :

- L'eau libre qui n'est pas liée aux fines ;
- L'eau capillaire, liée aux fines par des forces de capillarité ;
- L'eau colloïdale qui hydrate les colloïdes ;
- L'eau adsorbée qui est liée à la surface des particules et constitue un film autour d'elles.

I.2.4 Granulométrie des sédiments

La distribution granulométrique d'un sédiment détermine les caractéristiques granulaires des matériaux et leur distribution statistique de tailles d'une population d'éléments. D'autre part, la répartition de fréquence de taille des grains explique la répartition des sédiments dans un milieu aquatique. En effet, les grosses particules restent en amont tandis que les plus fines se retrouvent en aval.

Les différentes classes granulométriques couramment utilisées sont présentées dans le Tableau I.1.

Tableau I.1: Classes granulométriques d'un matériau

| Taille | Dénomination |
|------------------------------------|----------------------------|
| > 20 cm | Blocs |
| 2 cm à 20 cm | Galets et cailloux |
| 2 mm à 2 cm | Graviers |
| 63 μm à 2 mm | Sables (grossiers et fins) |
| 2 μm à 63 μm | Limons (ou silt) |
| < 2 μm | Vases, boues argileuses |

Une vase est généralement constituée des 3 dernières classes : sables, limons et argiles. Précisons que le terme d'argile utilisé en minéralogie n'a pas le même sens que celui utilisé en granulométrie. Ici, c'est un critère uniquement basé sur la taille des particules et non sur leur composition chimique et minéralogique.

Pour classer les matériaux fins dont la taille des particules est inférieure à 2 mm, les géotechniciens utilisent le diagramme triangulaire des sols fins de la figure 2. Ce type de diagramme est particulièrement adapté aux sédiments [Bonnet, 2000] [8].

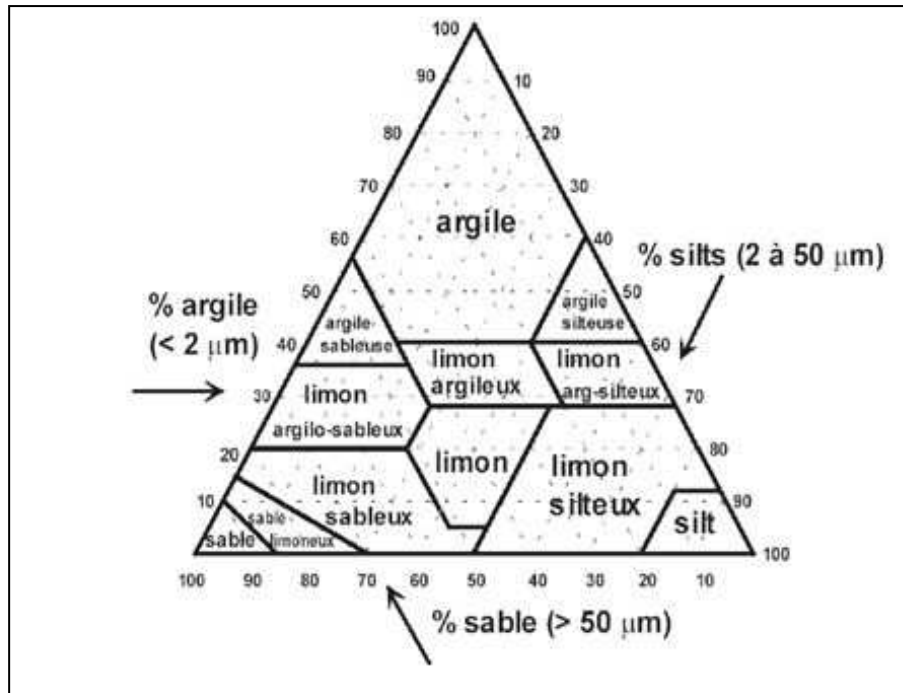


Figure I.4 : Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins

I.3 Caractérisation des polluants rencontrés dans les sédiments

I.3.1 Origine et comportement des polluants

Dans le milieu naturel et notamment les cours d'eau, les lacs, les canaux et les estuaires sont principalement dues aux rejets industriels, urbains et agricoles, entraînant l'apport d'un grand nombre de substances toxiques. Dans des conditions normales, ces polluants sont peu solubles dans l'eau et prédominent dans les matières en suspension et dans les sédiments qui deviennent alors des réserves de composés toxiques.

I.3.2 Nature des polluants

On distingue 2 grandes familles de polluants : les composés organiques et les métaux lourds.

I.3.2.1 matières organiques

les composés des matières organiques sont à base de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. Ce sont pour la plupart des produits fabriqués par l'homme. Il en existe des dizaines de milliers, dont 60 000 sont couramment utilisés. On distingue particulièrement 3 familles de composés organiques :


- ❖ **Le TBT (Tri-Butyl-Etain)** : c'est une molécule biocide incorporée dans la composition de certaines peintures. Son rôle est d'assurer une barrière toxique pour empêcher la colonisation des coques des navires (Alzieu, 1998)
- ❖ **Le PCB (Poly-Chloro-Biphényles)** : sont des substances organiques de synthèse, considérées comme des polluants chimiques prioritaires. Ces produits sont ininflammables, inertes vis-à-vis des acides. Dont la formule chimique est : $C_{10}H_{(10n)}Cl_n$. Le PCB est introduit dans l'environnement, et en particulier dans les sédiments par différentes activités humaines : combustion incomplète des matériaux, déchets des décharges des produits pétroliers, post-dépôt de la transformation des précurseurs biogéniques (Ramaroson, 2008) [11].
- ❖ **Le HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques)** : cette appellation désigne les substances dont la structure chimique est constituée de plusieurs noyaux aromatiques ayant en commun plus d'un atome de carbone. L'effet des HAP sur l'environnement dépend de leurs propriétés physico-chimiques, qui sont caractérisées par : une solubilité faible dans l'eau de mer, une forte affinité pour les solvants organiques et une adsorption élevées sur les matières en suspension et colloïdes.

I.3.2.2 métaux lourds

Les métaux lourds proviennent principalement de l'érosion des roches et des sols et des activités humaines. Comme pour les matières organiques, les métaux lourds sont repartis dans des diverses fractions des sédiments. Les métaux lourds liés aux phénomènes de précipitation représentent sous les différentes formes : ions, complexes, adsorbés à la surface des particules, et peuvent être fixés sur les particules minérales et les matières organiques des sédiments.

Les principaux métaux que l'on retrouve dans les sédiments sont présentés dans le Tableau I.2

Tableau I.2: Sources de pollution des métaux lourds citée dans le guide méthodologique 'enlèvement des sédiments, (Baize et Janiec,1994)[6]

| | | |
|----------|---|--|
| Cadmium |  | <p>Engrais phosphates, industries de traitement de surface des métaux ; industrie de stabilisation des matières plastiques ; fabrication des accumulateurs et des radiateurs automobiles ; fabrication de caoutchouc ; colorants ; eaux de ruissellement des voies de circulation.</p> |
| Cuivre |  | <p>Canalisation d'eau ; fils électriques ; radiateurs automobiles ; appareils de chauffage ; traitement de surface.</p> |
| Zinc |  | <p>Produits pharmaceutiques ou domestiques ; conduites d'eau ; peintures ; piles ; galvanisation ; traitement de surface.</p> |
| Nickel |  | <p>Fabrication d'aciers et d'alliages spéciaux ; recouvrement de surface pour électrolyse ; hydrogenation des huiles et substances organiques ; fabrication de peintures ; de laque et de produits cosmétiques.</p> |
| Mercure |  | <p>Produits pharmaceutiques ou domestiques ; production et utilisation d'antifongiques, appareils électriques ; produits électrolytiques du chlore et de la soude ; peintures ; pâte à papier ; fabrication de chlore de vinyle et d'urethane</p> |
| Chrome |  | <p>Tannerie ; fabrication d'alliages spéciaux ; industries de traitement de surface.</p> |
| Plomb |  | <p>Canalisations d'eau ; bacs de batteries peintures ; additifs pour l'essence ; eaux de ruissellement des voies de circulation ; industries pharmaceutiques et sidérurgiques ; ateliers photographiques ; télévisions.</p> |
| Selenium |  | <p>Fabrication de peintures et colorants ; verre ; semi conducteurs ; insecticides ; alliages.</p> |
| Arsenic |  | <p>Pesticides ; herbicides ; fongicides ; insecticides ; raticides ; defoliants ; conservateurs du bois ; cellules solaires ; semi-conducteurs ; électrographie ; catalyse ; pyrotechniques ; céramiques ; produits pharmaceutiques ; épilages des peaux en tannerie et mégisserie ; durcissement du cuivre et du plomb ; fabrication des batteries.</p> |

Les origines de la présence des métaux dans les vases sont variées et chaque étal comme le montre le tableau I.2 détaille les sources de pollution des métaux lourds d'après Baize et Janiec (1994) [6]

I.4 Les différents Traitement utilisées

D'après l'Agence de l'eau (Artois-picardie) [10] et (Life, 2002) [8], définissent le traitement comme étant une action de détruire, extraire, immobiliser ou neutraliser les contaminants, et éventuellement de modifier les caractéristiques de ce matériau pour lui permettre de respecter les critères de valorisation choisie.

Les différents traitements utilisés sont les suivants :

I.4.1 Traitement physique : il est utilisé afin de modifier la structure physique des sédiments en réduisant les volumes, les teneurs en eau ou en séparant les fractions polluées. Le traitement consiste à extraire la pollution, son principe est basé à ce que les polluants sont préférentiellement fixés sur les fines et les matières organiques ;

I.4.2 Traitement chimique : il sert à enlever ou transformer la contamination chimique des sédiments de façon à abaisser les teneurs en polluants et d'éliminer son caractère toxique ;

I.4.3 Traitement biologique : il vise la modification de la nature et de la structure du sédiment selon des approches mettant en jeu des êtres vivants (bactéries, champignons, végétaux) et leur métabolisme pour dégrader les polluants ;

I.4.4 Traitement par stabilisation / immobilisation : l'objectif est d'immobiliser les polluants des sédiments soit en les piégeant au sein de barrières actives (confinement...) ou soit en les stabilisant en y ajoutant des liants destinés à les rendre inertes (*c'est le cas de nos travaux de recherche*) ;

I.4.5 Traitement thermique : Il vise à détruire, extraire ou immobiliser les polluants, essentiellement organiques, en utilisant la chaleur. Selon la température de traitement, les polluants peuvent être volatilisés ou détruits. Les rejets de sous-produits doivent être contrôlés.

Ces différentes techniques de traitement sont en lien les unes avec les autres et sont détaillés selon le schéma suivant :

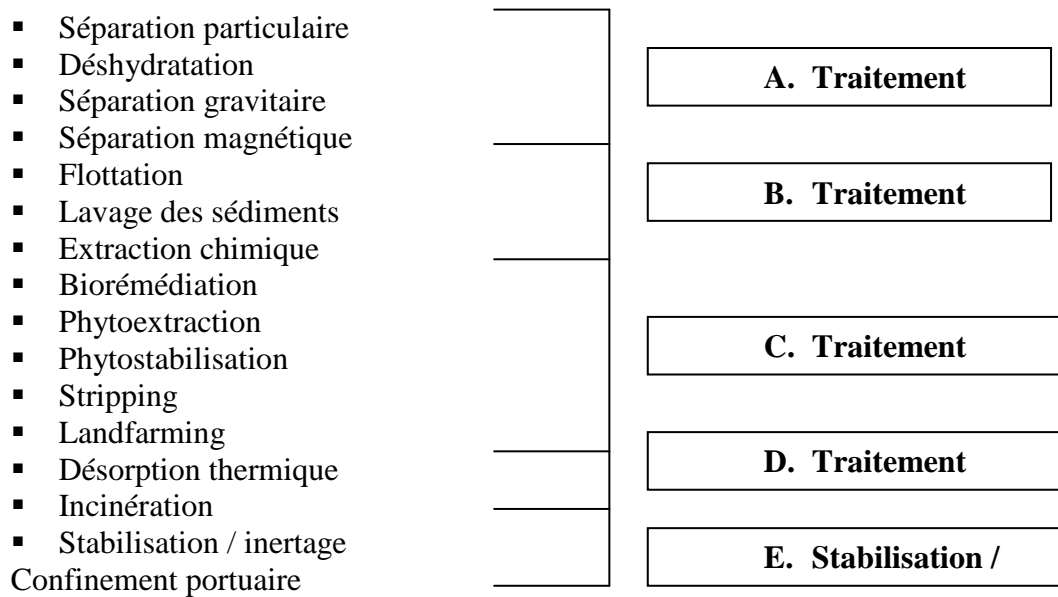


Figure I.5: Les différentes techniques de traitements [4]

I.5 La problématique du dragage

I.5.1 Les techniques de dragage

Il existe trois techniques traditionnelles de curage : mécanique, hydraulique et pneumatique.

I.5.1.1 Le curage mécanique

Il est réalisé à partir d'engins à godets qui opèrent soit depuis les berges soit depuis la surface. Il s'agit de récupérer, selon divers procédés, les sédiments qui sont ensuite déversés dans un puits, un chaland ou à terre. Ce mode de curage est le plus répandu.

I.5.1.2 Le curage hydraulique

Les dragues hydrauliques aspirent les sédiments au moyen d'une pompe centrifuge, à travers un long tube à embout appelé élince. La profondeur de dragage tourne généralement autour de 30 m, et peut aller jusqu'à 60 m pour une drague autoportée. Les sédiments, aspirés sous forme de boue liquide, sont ensuite rejetés, selon les dragues, dans un puits, un chaland ou une zone de dépôt via des conduites.

I.5.1.3 Le curage pneumatique

Les dragues fonctionnent par aspiration et sont équipées d'un système à air comprimé. Un vide d'air est créé dans un cylindre, provoquant une arrivée de sédiments. Une fois le cylindre plein, les valves sont inversées, l'air comprimé y pénètre alors et expulse les sédiments.

Une fois dragues, reste à transporter les sédiments jusqu'à leur destination finale. Le choix est réalisé en fonction de la distance au chantier, des caractéristiques des matériaux dragués et des contraintes environnementales.

I.5.2 Réglementation vis-à-vis de la gestion des sédiments

Depuis qu'il a été établi que la matrice sédimentaire constitue une zone de condensation de polluants, plusieurs textes réglementaires qui régissent la gestion et le devenir des sédiments :

I.5.2.1 Le statut juridique d'un déblai de dragage extrait de son milieu d'origine

Une des principales difficultés que l'on rencontre face à cette problématique est le manque de réglementation claire et précise concernant les sédiments fluviaux. Leur statut n'est pas clairement défini et surtout, il n'existe pas de valeurs guides permettant de juger de la dangerosité de ce type de matériaux. Face à ce vide Plusieurs études menées par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, le Groupe d'Etude et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement (GEODE), les Voies Navigables de France (VNF),... ont été réalisées pour la mise en place d'une réglementation sur la gestion des sédiments. En effet, d'après l'article L541-1 du code de l'environnement [8], est considéré comme un déchet « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». Les sédiments étant issus du « processus » de dragage, ils peuvent avoir cette étiquette de « déchets ».

Le décret N° 2002-540 du 18 Avril 2002 [4] qui reprend la nomenclature européenne des déchets a classé les sédiments sous la rubrique 17 05 05* « Boues de dragage contenant des substances dangereuses » ou 17 05 06 « Boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05* ». L'astérisque indique qu'il s'agit alors d'un déchet dangereux. Cette notion de dangerosité est définie dans l'annexe I du décret sus cité : un déchet est considéré dangereux s'il possède un des 14 critères (H1 à H14) explicites dans le décret. Mais ces critères sont inadaptés aux sédiments, en particulier le H14 relatif à l'écotoxicité du déchet. A ce jour, il n'existe aucune méthode permettant de juger si un déchet est écotoxique ou non.

Cependant, en admettant que les sédiments soient des déchets, il est possible de quantifier leur toxicité en utilisant les seuils de relargage à la lixiviation fixes par la décision du Conseil Européen du 19 Décembre 2002 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges [8]

En absence de valeurs guides, des acteurs de gestion des curages/dragages ont été amenés à développer leurs propres valeurs guides. On cite ici des consignes de caractérisation des sédiments fluviaux des Voies Navigables de France (VNF). Selon lesquelles, trois catégories des sédiments ont été établies (Tableau I.3) :

Tableau I.3: *Seuils indicatifs de VNF sur les éléments traces et l'indice Hydrocarbure (mg/kg sèche) [Eau – Artois – Picardie. 2005] [10]*

| Eléments | Catégorie 1 | Catégorie 2 | Catégorie 3 |
|-----------------------------|-------------|----------------|-------------|
| Arsenic | < 20 | de 20 à 45 | > 45 |
| Cadmium | < 2 | de 2 à 6,4 | > 6,4 |
| Chrome | < 150 | de 150 à 250 | > 250 |
| Cuivre | < 100 | de 100 à 300 | > 300 |
| Mercure | < 1 | de 1 à 3 | > 3 |
| Nickel | < 50 | de 50 à 150 | > 150 |
| Plomb | < 100 | de 100 à 367,5 | > 367,5 |
| Zinc | < 300 | de 300 à 500 | > 500 |
| Indice hyd. CH ₂ | < 100 | de 100 à 2500 | > 2500 |

Catégorie 1 : La valorisation des produits de dragage est recommandée, elle peut être faite sur des terres agricoles alimentaires ; il n'existe aucune restriction dans le devenir de ces produits.

Catégorie 2 : Il est possible de valoriser ou de stocker les produits de dragage de cette catégorie, seul le régalage sur des terres agricoles est à proscrire.

Catégorie 3 : La valorisation ou le stockage des produits nécessite la mise en place d'une étude de faisabilité relative à la destination du produit de dragage.

I.5.2.2 Réglementation des sédiments vis-à-vis de l'application en technique routière

Dans le développement durable, la valorisation des sédiments de dragage dans des conditions environnementales maîtrisées est nécessaire afin de réduire l'incidence globale liée à l'utilisation de ce matériau en technique routière. La gestion des matériaux de dragage représente aujourd'hui un vrai problème en raison des fortes quantités de sédiments chaque année. Cette gestion est complexe, évolutive, et demande des moyens importants [Boutin, R., 2000][1].

L'évaluation de l'acceptabilité environnementale est un sujet qui a fait l'objet de débats et de groupes de travail afin de mettre au point un guide méthodologique pour l'acceptabilité des matériaux alternatifs en techniques routières.

Actuellement, plusieurs recherches sont orientées pour trouver des solutions à cette problématique. Cette gestion dépend du degré de pollution des sédiments et les méthodes envisagées pour le traitement. Les sédiments de dragage représentent une véritable filière de traitement et de valorisation en tant que matière première dans le domaine de génie civil.

A. Étude méthodologique d'évaluation environnementale

Le guide méthodologique présente une démarche permettant de valider l'utilisation d'un matériau alternatif pour un usage routier. De point de vue impact environnemental et comportement géotechnique, cette approche peut être schématisée comme sur la Figure I.6.

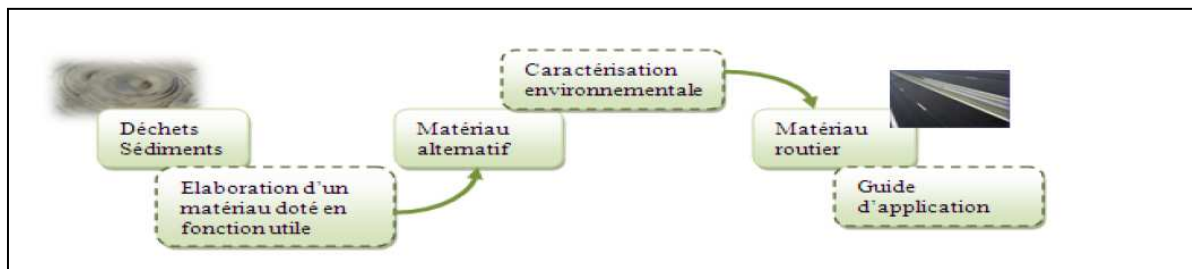


Figure I.6: Processus d'évaluation environnementale pour une valorisation en technique routière.

La démarche d'évaluation de l'impact environnemental envisage trois niveaux permettant de monter le risque que présentent les matériaux alternatifs vis-à-vis de l'environnement.

❖ Niveau 1

Le niveau 1 permet de justifier l'acceptabilité en technique routière des matériaux sur la base **d'essais de lixiviation NF EN 12457**, le Tableau I.4. représente les valeurs obtenues pour le matériau routier comparer aux valeurs seuils.

Tableau I.4 : Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation en technique routière [AMATR, Sétra, 2012]

| <i>Quantité relarguée cumulée à L/S=10 l/kg (Essai de lixiviation NF EN 12-457-2)</i> | | | | |
|---|---|---|--|---|
| <i>Éléments</i> | <i>Valeur à respecter par au moins 80% des échantillons (mg/kg de MS)</i> | <i>Valeur à respecter par au moins 95% des échantillons (mg/kg de MS)</i> | <i>Valeur à respecter par au moins 100% des échantillons (mg/kg de MS)</i> | <i>Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation TR (mg/kg de MS)</i> |
| As | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 |
| Ba | 20 | 40 | 60 | 100 |
| Cd | 0,04 | 0,1 | 0,12 | 1 |
| Cr | 0,5 | 1 | 1,5 | 10 |
| Cu | 2 | 4 | 6 | 50 |
| Hg | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,2 |
| Mo | 0,5 | 1 | 1,5 | 10 |
| Ni | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 10 |
| Pb | 0,5 | 1 | 1,5 | 10 |
| Sb | 0,06 | 0,12 | 0,18 | 0,7 |
| Se | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 |
| Zn | 4 | 8 | 12 | 50 |
| Fluorure | 10 | 20 | 30 | 150 |
| Chlorure | 800 | 1600 | 2400 | 15000 |
| Sulfate | 1000 | 2000 | 3000 | 20000 |
| Fraction soluble | 4000 | 8000 | 12000 | 60000 |
| pH | 5,5-12,5 | 5,5-12,8 | 5,5-13 | |
| <i>Valeurs limites à ne pas dépasser en contenu total pour être candidat à une utilisation en T.R (mg/kg de MS)</i> | | | | |
| COT | 3000 | | 6000 | |
| PCB | 1 | | 1 | |
| BETX | 6 | | 6 | |
| HCT | 500 | | 500 | |
| HAP | 50 | | 50 | |

Si un dépassement est enregistré, l'acceptabilité est donc invalidée, il convient donc d'envisager la réalisation de la caractérisation environnementale **niveau 2**.

❖ Niveau 2

Le niveau 2 permet de justifier l'acceptabilité en technique routière sur la base **d'essais de percolation NF CEN/TS 14405** en comparant les résultats obtenus aux valeurs seuils présentées dans le Tableau I.5. Si un dépassement est enregistré, l'acceptabilité est invalide, donc il faut passer au **niveau 3**.

Tableau I. 5: Valeurs limites en percolation (niveau 2) permettant de justifier certaines utilisations visées par le présent guide [AMATR, Sétra, 2012]

| Éléments | Scénario « sous-couche de chaussée ou d'accotement revêtus » | Scénario « remblais technique ou d'accotement recouverts » |
|----------|--|--|
| | Quantité relarguée cumulée à L/S=10 (essai de percolation NF CEN TS 14405) (mg/kg de MS) | Quantité relarguée cumulée à L/S=10 (essai de percolation NF CEN TS 14405) (mg/kg de MS) |
| As | 0,8 | 0,5 |
| Ba | 56 | 28 |
| Cd | 0,12 | 0,16 |
| Cr | 4 | 2 |
| Cu | 50 | 50 |
| Hg | 0,08 | 0,04 |
| Mo | 5,6 | 2,8 |
| Ni | 1,6 | 0,8 |
| Pb | 0,8 | 0,5 |
| Sb | 0,4 | 0,2 |
| Se | 0,5 | 0,4 |
| Zn | 50 | 50 |
| Fluorure | 60 | 30 |
| Chlorure | 10000 | 5000 |
| Sulfate | 10000 | 5000 |
| pH | 5,5-12,5 | 5,5-12,8 |

❖ Niveau 3

Le niveau 3 se base sur une étude spécifique si les conditions positives n'ont pas été tirées des deux premières. Cela permet de laisser la possibilité de justifier l'acceptabilité du matériau alternatif par une étude spécifique.

I.5.3 Mode de gestion des sédiments

L'opération de dragage génère des quantités importantes de sédiments, le mode de gestion de ces matériaux dépend, entre autres, de leurs caractéristiques (nature, qualité et quantités impliquées) et leurs impacts sur l'environnement, du coût de l'opération, des conditions réglementaires...etc. La gestion des sédiments peut être réalisée selon deux modes; l'immersion dans une zone autorisée ou la mise en dépôt.

I.5.3.1 Immersion

C'est un procédé qui consiste à transférer les matériaux du site de dragage à un lieu de rejet ou de confinement situé aussi en milieu aquatique. L'immersion par relargage permet, dans un milieu marin agité, la dispersion de la matière solide ainsi que des polluants, susceptibles d'y être présent, et par suite diminuer la concentration des contaminant. [13]

a. Précautions pour l'immersion en eau.

Avant l'immersion des sédiments en eau il est nécessaire de:

- Prendre les mesures de confinement, et éviter de claper dans une zone où le courant est non nul
- Minimiser la remise en suspension des sédiments en déversant convenablement les matériaux, et en envisageant l'utilisation d'écrans de protection et surtout en cas de confinement
- Minimiser les entraves à la navigation en prévoyant une signalisation adéquate
- Minimiser les effets négatifs sur l'écosystème (la faune et la flore) [14]

I.5.3.2 Mise en dépôt

Les sédiments provenant de dragage peuvent être stockés sous forme de remblais sur terre ou dans un milieu aquatique, mais le souci de protection contre la pollution de l'environnement marin tend à privilégier le dépôt terrestre.

Le dépôt à terre constitue une solution alternative quand l'immersion présente des risques pour des zones sensibles, et nécessite d'importantes surfaces de stockage.

a. Précautions pour le stockage en terre

Au moment de stockage en terre des sédiments il faut :

- Minimiser la remise en suspension des sédiments,
- Collecter et traiter les eaux de ruissellement et d'assèchement, par un choix approprié pour la construction du site (pas de pente, étude du réseau de drainage.)
- Protéger les bassins de stockage par l'utilisation de géo membranes ou matériaux imperméables, digues.
- Intégrer le site dans le paysage par la plantation de végétation.
- Minimiser le rejet incontrôlé des contaminants en nettoyant les outils de travail.
- Limiter les quantités d'eau dues aux précipitations s'infiltrant dans la masse des déblais
- Empêcher les eaux de surface et/ou souterraines de s'infiltrer dans le dépôt.
- Recueillir les eaux contaminées et les lixiviats. [14]

I.5.3.3 Valorisation des sédiments de dragage

La valorisation des sédiments de dragage est une solution très intéressante qui s'inscrit dans la philosophie de développement durable, visant à la fois le dégagement des matériaux entravant l'activité portuaire, et l'exploitation de ces ressources (sédiments) dans plusieurs domaines tout en respectant les critères environnementaux.

Le choix de la filière de valorisation d'un sédiment est essentiellement guidé par les conditions techniques, économiques, environnementales et réglementaires.

I.5.3.3.1 Les filières de valorisation des sédiments de dragage

La valorisation des sédiments de dragage constitue une issue pour le problème de gestion de ces matériaux. Nombreuses sont les voies possibles de valorisation des sédiments de dragage. En effet, les secteurs de travaux publics, l'environnement, ou l'agriculture et aquaculture peuvent absorber des quantités importantes de ces matériaux, et constituer par conséquent des destinations potentielles pour les sédiments de dragage.

a- Génie civil et BTP

Dans le domaine de génie civil et BTP, les sédiments de dragage peuvent constituer une alternative des granulats produits en carrières et gisements terrestres. Ceci est justifié par la raréfaction et la limitation d'extraction des matériaux nobles, et le souci de développement durable et protection de l'environnement.

Ces sédiments peuvent être employés comme matériaux de construction dans les aménagements de routes et ferroviaires, ou la fabrication de ciments, des briques, des agrégats, des carreaux et du béton, ils peuvent également être employés comme remblais, digues, barrages, barrière antibruit ou pour le rechargement des plages ...etc. Chacune de ces utilisations dépend des caractéristiques (physico-chimiques et mécaniques) requises dans le domaine. Parfois une correction granulométrique ou un traitement des sédiments s'avère nécessaire pour répondre aux exigences de l'utilisation [15].

b - Environnement

Dans cette filière, il est possible de réutiliser les sédiments à titre d'exemple pour :

b.1 - Amendement des sols : C'est une opération qui consiste à dresser de grandes quantités de matériaux, sur une épaisseur pouvant atteindre un mètre, couvrant des sols érodés ou en friches, le sol évoluera ainsi par lui-même pour obtenir en quelques années une prairie permanente, par exemple. Les sédiments peuvent être aussi utilisés comme matériau permettant de réaliser des modelés de terrains dans le cadre d'aménagements des paysages ou de reprofilage de certains terrains, et pour le rechargement d'anciennes carrières et ballastières dans le cadre de la remise en état des lieux. Il peut être utile pour la création des espaces pour les industriels, pour des parcs de loisirs, pour des aménagements ferroviaires ou routiers ou encore pour la création d'îles artificielles [16].

b.2 - Réhabilitation de sites naturels : L'un des emplois possibles des matériaux de dragage est leur réutilisation pour restaurer l'environnement; ils peuvent servir, par exemple, à la

construction d'habitats aquatiques ou terrestres pour la faune (oiseaux, poissons.), ou pour la création de parcs naturels (îles.) et la restauration de zones humides[14].

c - Agriculture

L'épandage des sédiments sur un sol cultivable est une technique de valorisation très intéressante qui peut enrichir les sols pauvres en éléments nutritifs et améliorer par conséquent sa qualité et son rendement, ou corriger leurs PH et rendre les terres plus adaptées au développement des plantes. Il peut être utile pour améliorer des aires de loisirs, des parcs, des terrains de golf. Cette opération doit être entreprise sans porter atteinte au milieu récepteur.

Alors cette partie nous a été une occasion intéressante pour s'approcher du domaine et toucher la problématique complexe de la gestion des sédiments, et d'apprécier une fois de plus les effets de la pollution sur l'environnement.

I.6 Valorisation des sédiments de dragage en technique routière

Comme nous l'avons dit précédemment (paragraphe 5.1), les sédiments de dragage ont déjà fait l'objet de plusieurs études de valorisation : dans les mortiers, les bétons, briques. La faisabilité de leur utilisation dans les matériaux de construction nous ont permis d'accroître nos connaissances sur leurs propriétés et leur comportement, le principal obstacle à la valorisation des sédiments fins dans les couches de chaussée, est le caractère organique des sédiments. Aussi, l'existence des métaux lourds et des éléments toxiques peut causer un problème environnemental incompatible avec leur emploi. Dans cette partie, nous présentons les raisons qui nous ont amenés à explorer les possibilités de valorisation des sédiments dans les matériaux routiers ainsi que les objectifs que nous nous sommes fixés.

I.6.1 Description d'une structure de la chaussée

La structure d'une chaussée routière doit avoir la possibilité de supporter diverses sollicitations, induites dans le sol de fondation comme la charge de trafic par les véhicules, et de supporter la déformation en flexion des couches de la structure qu'une charge roulante induit. Cette flexion entraîne des sollicitations en compression au droit de la charge et des sollicitations en traction à la base des couches d'enrobés (Figure I.7).

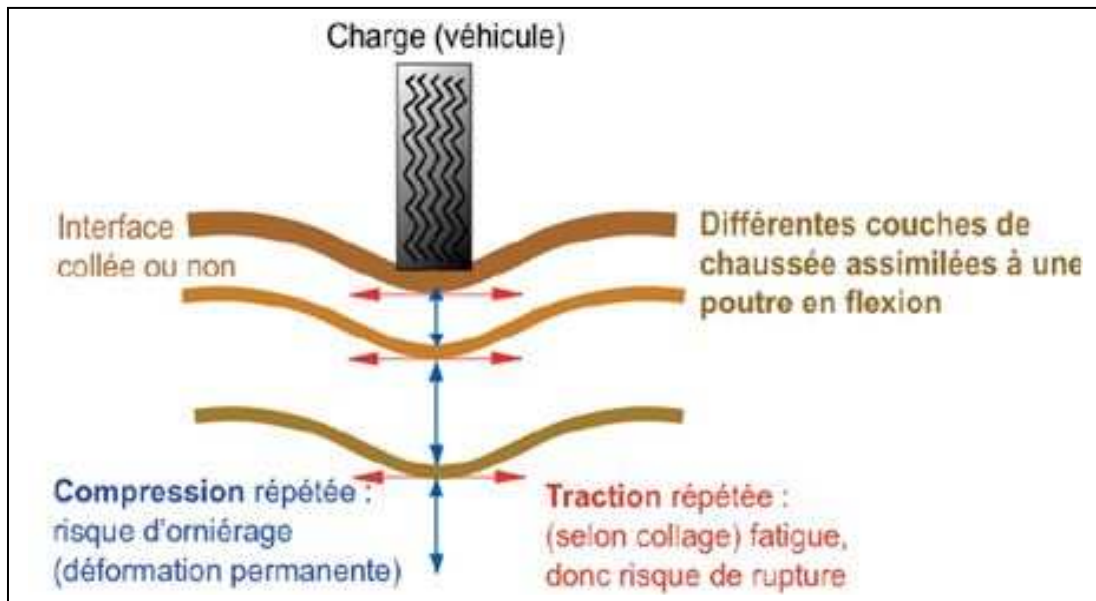


Figure I.7 : Schéma de fonctionnement d'une structure de chaussée sous l'application d'une charge roulante, d'après Abdo (2009) [43]

I.6.2 Les différentes couches d'une chaussée

La structure d'une chaussée routière, telle qu'elle apparaît à la figure I.8, est constituée 3 couches différentes. Chaque couche a différentes fonctions :

- ✚ **Couche de surface** : elle est composée de deux couches : la couche de roulement qui est la couche supérieure où s'appliquent les actions du trafic et du climat et la couche de liaison qui lie la couche d'assise et qui assure la protection vis-à-vis des infiltrations des eaux et des sels et les pollutions en surface.
- ✚ **Couche d'assise** : elle comprend deux sous-couches: la couche de fondation et la couche de base. Ces couches de la chaussée sont les plus importantes pour supporter la résistance mécanique et la déformation dans une limite admissible.
- ✚ **Couche de forme** : pendant les travaux, elle contribue au nivellement du sol et garantit le déroulement du chantier. Elle permet d'homogénéiser les caractéristiques du sol support et de contrer le gel.

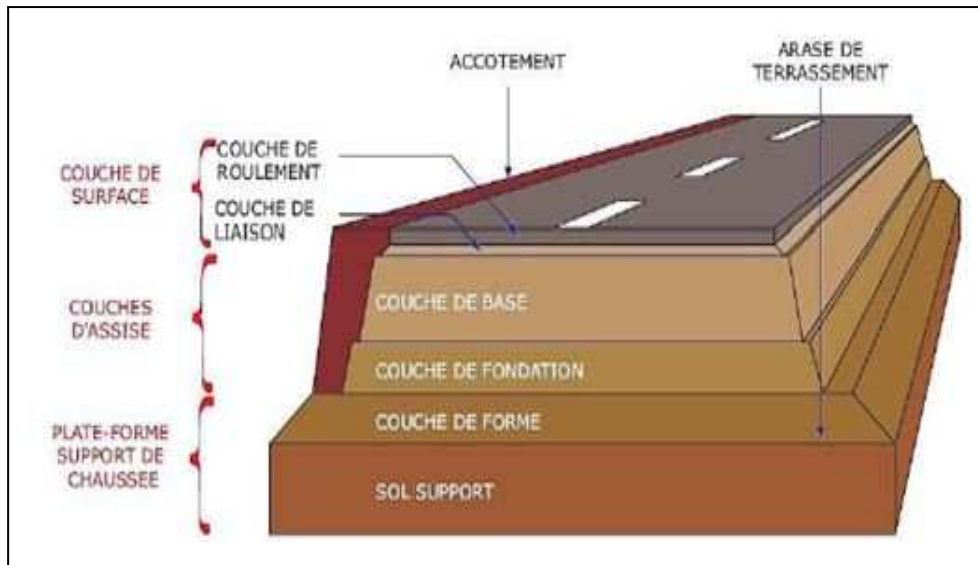


Figure I.8 : Les différentes couches d'une chaussée (Pouteau, 2004)[18]

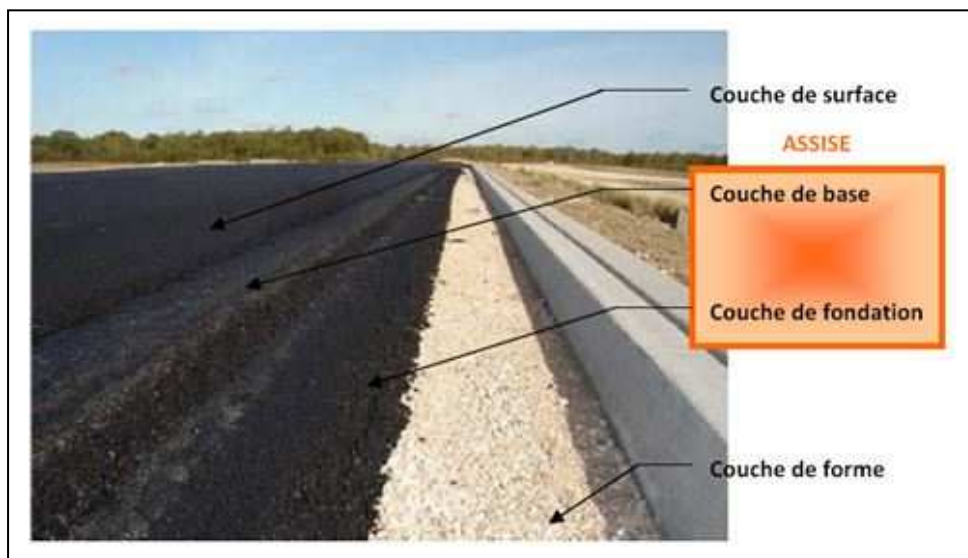


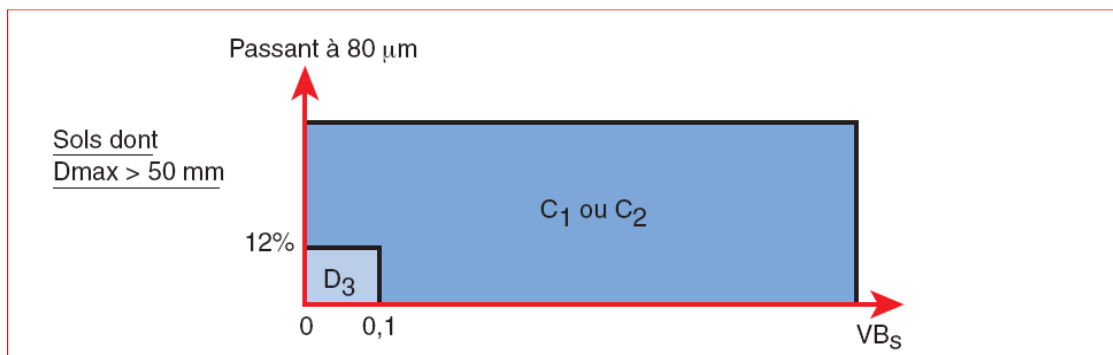
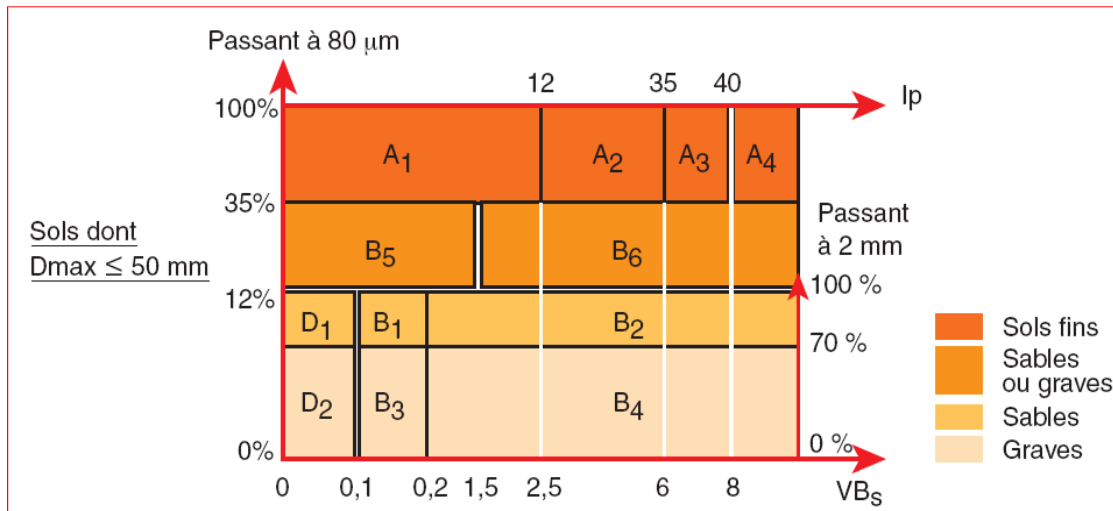
Figure I.9: Photo d'une coupe-type de chaussée

I.6.4 Caractérisation et classification des sédiments selon le guide technique GTR

L'utilisation d'un matériau en couche de chaussée nécessite la connaissance de ses propriétés physiques et géotechniques. La classification peut se faire selon différentes approches.

I.6.3.1 Classification GTR

Le « Guide des Terrassements Routiers, réalisation des remblais et des couches de forme » [GTR] est un guide spécifique aux travaux routiers. Les paramètres d'entrées sont comme illustré dans la figure I.10. Ils sont essentiellement les caractéristiques physiques du matériau. Ces paramètres sont la granulométrie, l'activité argileuse et la plasticité du matériau.



| | | | | |
|-------------------------------|--|---|-------------------------------|----------------|
| Matériaux rocheux | Roches sédimentaires | Roches carbonatées | Craies | R ₁ |
| | | | Calcaires | R ₂ |
| | | Roches argileuses | Marnes, argilites, pélites... | R ₃ |
| | | Roches siliceuses | Grès, poudingues, brèches... | R ₄ |
| | | Roches salines | Sel gemme, gypse | R ₅ |
| | Roches magmatiques et métamorphiques | Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers... | | R ₆ |
| Matériaux particuliers | Sols organiques et sous-produits industriels | | | F |

Figure I.10: tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature, selon la norme NF P 11-300

I.6.3.2 Classification USCS

Le système de Classification Unifié des Sols (ou USCS) est un système de classification des sols utilisés dans la disciplines de la géologie et de l'ingénierie pour décrire la texture et la taille des grains d'un sol. Il est représenté par un symbole à deux lettres (à l'exception de Pt)

Tableau I.6.

Tableau I.6 : Le système de Classification Unifié des Sols USCS (réglementation USCS)

| Grandes divisions | | | Symbole du groupe | Nom du groupe |
|--------------------------------------|--|---|-------------------|---------------------------------------|
| Sol à grains grossiers 50% > 75µm | Gravier 50% > 4,75 µm | Gravier propre | GW | Gravier bien classé |
| | | | GP | Gravier mal classé |
| | | Gravier avec une proportion de fines >12% | GM | Gravier limoneux |
| | | | GC | Gravier argileux |
| | Sable 50% < 4,75 µm | Sable propre | SW | Sable bien classé |
| | | | SM | Sable mal classé |
| | | Sable avec une proportion de fines >12% | SP | Sable limoneux |
| | | | SC | Sable argileux |
| Sols à gains fins 50% < 75µm | Limon et argile w _L < 50 | Inorganique | ML | Limon |
| | | | CL | Argile |
| | | Organique | OL | Limon organique, argile organique |
| | Limon et argile w _L ≥ 50 | Inorganique | MH | Limon très plastique, limon élastique |
| | | | CH | Argile de haute plasticité |
| | | Organique | OH | Limon organique, argile organique |
| Sol très organique | | | Pt | Tourbe |

I.6.4 Critère de classification des sédiments dans les travaux routiers

Ces dernières années, les besoins en matériaux du BTP (Bâtiment et Travaux Publics) en Algérie se sont élevés, et beaucoup de granulats restent inexploitable. Pour être valorisés en technique routière, les sédiments doivent donc respecter des règlements plus exigeants. Dans cette partie, nous présentons les critères et les raisons qui ont amené à explorer les possibilités de valorisation des sédiments dans les travaux routiers. En Algérie, les principaux paramètres jugeant l'adéquation d'un matériau pour une utilisation en assise de chaussée sont l'Indice Portant Immédiat (IPI), la résistance en traction (Rt) et le module d'élasticité (E). Selon la norme française, l'essai Proctor (Normal et Modifié) (NF P 94-093,1997) est les

essais les plus importants pour évaluer l'appropriation de sédiments comme matériaux routiers. On peut citer en général les critères suivants :

I.6.4.1 Critère de granulométrie

La granulométrie et la proportion en matières organiques représentent les facteurs clés de l'utilisation des sédiments en technique routière. Il est préférable que la proportion de sédiments ne soit pas voulue majoritaire afin d'opter à une couche de sol ayant un squelette granulaire constitué d'une matrice résistante à granulométrie étalée, et limiter les matières organiques et les éléments fins pour leur sensibilité à l'eau.

I.6.4.2 Critère de portance

La portance du matériau caractérisée par son indice portant immédiat (IPI) est évaluée à partir de l'essai Proctor –L'indice IPI (Indice Portant Immédiat) permet d'évaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins suivant la norme française (NF P 94-078,1999). Selon les valeurs de l'IPI, les caractéristiques des différentes couches sont présentées dans la figure I.11 d'après les recommandations de la norme française (NF P98-115,1992). Les valeurs souhaitables de l'IPI ne doivent pas être inférieures à 25% pour la couche de forme, 35% pour la couche de base et 45% pour la couche de fondation. D'après Colin (2003) [19] a indiqué que les sédiments dragués peuvent être utilisés comme les matériaux routiers pour la couche de fondation de la chaussée

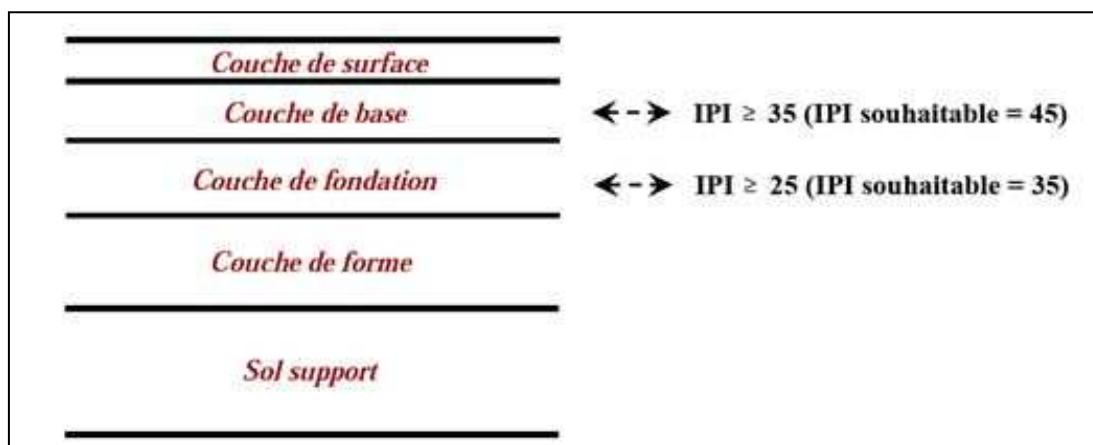


Figure I.11 : Critère de l'IPI pour les différentes couches de la chaussée [Norme NF P 98 115]

I.6.4.3 Critère de durabilité au jeune âge

Afin de déterminer la durabilité du traitement ainsi que le comportement de la couche en cas d'immersion aux jeunes âges. Le paramètre ICBRimmersion 4jours/IPI est essentiel à vérifier car lorsqu'un sol fin est saturé en eau, il peut perdre totalement sa cohésion, notamment si le

liant n'a pas débuté sa prise. La durabilité est jugée satisfaisante si ce paramètre ICBRimmersion 4jours/IPI est supérieur à 1.

I.6.4.4 Critère de résistance

Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques, le module d'élasticité et la résistance en traction sont mesurés grâce à l'essai de traction. Ces valeurs sont ensuite reportées sur le diagramme de classification afin d'évaluer la stabilité du matériau. La norme française [Norme NF P98 113] a cité les 6 classes de S0 à S5 (Figure I.12). Elle a également recommandé que les matériaux de classe inférieure à S2 ne soient pas utilisables en couche d'assise de chaussée.

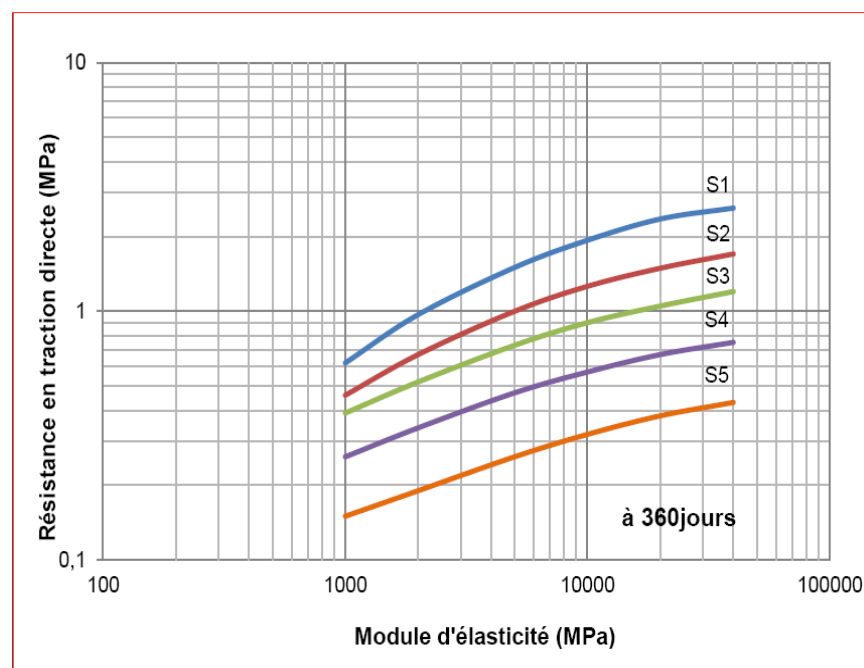


Figure I.12 : Classification de matériaux traités aux liants hydrauliques [Norme NF P98 113]

En général, la classification des matériaux est effectuée en raison de la valeur de la résistance en traction à 360 jours. Si la période ne permet pas de mesurer la résistance en traction à 360 jours et le module d'élasticité, on peut obtenir la résistance en traction et le module d'élasticité à 28 jours ou 90 jours. La résistance en traction et le module d'élasticité à 360 jours sont déterminés à partir des équations empiriques suivants : Equation I.1 et I.2 indiqués dans la norme française [NF P98-114-1] Ces derniers sont choisis en fonction de la nature du liant utilisé

$$\frac{R_{t28 \text{ jours}}}{R_{t360 \text{ jours}}} = 0,60 ;$$

$$\frac{E_{t28 \text{ jours}}}{E_{t360 \text{ jours}}} = 0,65$$

$$\frac{R_{t90 \text{ jours}}}{R_{t360 \text{ jours}}} = 0,70 ;$$

$$\frac{E_{t90 \text{ jours}}}{E_{t360 \text{ jours}}} = 0,75$$

I.6.4.5 Critère d'aptitude des liants au traitement

L'essai d'aptitude au traitement, décrit dans la norme française [NF P94-100], Consiste a la détermination du gonflement volumique (Gv) et de la résistance a la traction (Rtb) du sol traite de liants hydrauliques qui doit être mesuré après 7jours de délais de conservation a une température 20°C et à plus sur des échantillons immerges dans une eau thermostate. Dans le cas douteux, la technique de traitement proposée peut être justifiée à l'aide d'autres caractéristiques du chantier. Dans le cas inadapté, la solution choisie de traitement ne peut être appliquée. Le tableau indique les valeurs seuils retenues pour le choix des matériaux en structure routière en suivant ce critère.

Tableau I.7 : Critère d'aptitude au traitement pour la classification des matériaux traités aux liants hydrauliques [Norme NF P94-100]

| Type de traitement | Aptitude du matériau au traitement | Paramètre considéré | | |
|---|------------------------------------|-----------------------------|---|------------------------------------|
| | | Gonflement volumique Gv (%) | | Résistance à la traction Rtb (MPa) |
| Traitement au liant hydraulique éventuellement associé à la chaux | Adapté | $Gv \leq 5$ | Ou | $Rtb \geq 0,2$ |
| | Douteux | $5 \leq Gv \leq 10$ | Ou | $0,1 \leq Rtb < 0,2$ |
| | Inadapté | $Gv \geq 10$ | Ou | $Rtb \leq 0,1$ |
| Traitement à la chaux seule | Adapté | $Gv \leq 5$ | Paramètre non considéré du fait de la lenteur de la prise pouzzolanique | |
| | Douteux | $5 \leq Gv \leq 10$ | | |
| | Inadapté | $Gv \geq 10$ | | |

Le tableau I.8 résume les différents essais que nous venons de présenter les critères de jugement pour l'utilisation d'un matériau traité en couche de structure routière.

Tableau 1.8 : Récapitulatif des critères de jugement pour l'utilisation d'un matériau traité en couche de chaussée

| Propriété considérée | Grandeur caractéristique | Exigence ou critère de jugement |
|---|--|---|
| Aptitude au traitement Gonflement | Gonflement volumique Gv d'éprouvettes immergées pendant 7 jours dans de l'eau à 40°C | Gv ≤ %5 : adapté 5 ≤ Gv % ≤ 10 : douteux Gv ≤ 10 % : inadapté |
| Aptitude au traitement : Performance mécanique | Résistance en traction brésilienne Rtb d'éprouvettes immergées pendant 7 jours dans de l'eau à 40°C | Rtb ≥ 0,2 MPa : adapté 0,2 MPa ≥ Rtb ≥ 0,1 MPa : douteux Rtb ≤ 0,1 MPa : inadapté |
| Portance et durabilité | Poinçonnement immédiat (IPI) et après 4j d'immersion (ICBR) sur une éprouvette compactée dans un moule CBR | ICBR / IP ≥ 1 |
| Gonflement de la couche traitée | Mesure du gonflement vertical lors de l'immersion pendant 4 jours de l'essai CBR | Comparatif entre les différents liants |
| Cinétique de prise | Evolution de la résistance en compression Rc jusqu'à 90 jours de maturation | Comparatif entre les différents liants |
| Age autorisant la circulation sur la couche traitée | Résistance en compression Rc | La couche de forme peut être circulée dès que Rc ≥ 1 Mpa |
| Performances Mécaniques | Résistance en traction Rt (estimée à partir de la résistance en traction brésilienne Rtb) et module élastique E à 28 et 90 jours | Le couple (Rt, E) conduit au minimum à un matériau de classe mécanique 5 |

I.7 Généralité sur le mode de traitement des sédiments de dragage par les liants hydraulique

Le traitement consiste à mélanger les matériaux avec des liants minéraux afin d'améliorer leurs caractéristiques et leur donner une résistance compatible avec les exigences recherchées. Dans le cadre de ce travail, grâce aux études précédentes, les sédiments contiennent une proportion importante de particules fines et une teneur en matière organique moyenne. Les additifs choisis sont le ciment et la chaux et un correcteur granulométrique; leurs réactions seront étudiées par la suite.

I.7.1 Traitement a la chaux

Depuis fort longtemps, la chaux a été employée pour stabiliser les routes et chemins en milieu agricole et les voies forestières et autres chemins diversSon utilisation perdure encore aujourd'hui pour modifier les caractéristiques physiques du sol, elle sert à diminuer le pourcentage d'eau contenu dans un sol humide et à flocculer les argiles du sol provoquant ainsi une réaction physico-chimique qui permet le passage d'une structure plastique à une composition stable grumeleuse. Elle sert aussi à modifier les caractéristiques du sol, ainsi elle agit pour solubiliser la silice et l'alumine contenues dans l'argile et former un silicate et aluminat de calcium. Le liant ainsi composé agglomère les composants du sol et augmente la dureté.

I.7.1.1 Différents types de chaux

La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux :

- * chaux aérienne provenant d'un calcaire pur.
- * chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium.
- * chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux.

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes Elles se présentent sous deux formes:

❖ Chaux vive

Constituée principalement d'oxyde de calcium CaO, généralement à plus de 90%. La calcination du calcaire (carbonate de calcium) entraîne la formation de chaux vive (oxyde de calcium) et de gaz carbonique (dioxyde carbonique).

Calcaire \longrightarrow chaux vive + gaz carbonique

$\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

Réaction endothermique nécessitant 425 kilocalories par kilogramme de calcaire. Cette réaction s'effectue à une température voisine de 900°C et s'accompagne d'une perte de poids d'environ 45% correspondant à la perte en gaz carbonique.

❖ Chaux éteinte

Contient essentiellement de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Elle est obtenue par extinction de la chaux vive selon la réaction d'hydratation suivante :

Chaux vive + eau \longrightarrow chaux éteinte + 15.5 Kcal.

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 15.5 \text{ Kcal} .$

I.7.1.2 Caractéristiques chimiques et physiques

I.7.1.2.1 Composition chimique

1. Teneur en CaO

La teneur en CaO est évidemment la principale caractéristique d'une chaux mais ce CaO peut être **libre**, c'est-à-dire sous forme d'oxyde CaO ou d'hydroxyde $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ou **combiné** sous forme :

- De carbonate, soit parce que le calcaire d'origine n'a pas été complètement dissocié et qu'il reste des **incuits**; soit parce qu'il y a eu **recarbonation** de la chaux au contact de l'air. Le CaO ainsi combiné peut être considéré comme inerte pour la plupart des emplois routiers, on apprécie son importance grâce à la teneur en CO_2 de la chaux.
- De silicates et d'aluminates, comme nous l'avons vu ci-dessus.
- Eventuellement, mais plus rarement, d'autres sels (Sulfates, Phosphates, par exemple).

2. Teneur en MgO

La teneur en MgO est également importante à connaître puisque la Magnésie a en général une action analogue à la chaux. Le MgO, comme le CaO, peut être libre ou combiné. Les principales indications données par l'analyse chimique d'une chaux seront donc les teneurs en:

* CaO total et CaO libre.

* MgO

* CO_2

* SiO_2 , Al_2O_3 et FeO_3 .

Il n'est pas nécessaire de connaître toutes ces valeurs, les teneurs en CaO et MgO sont souvent suffisantes.

3. Réactivité

Cette propriété est essentiellement prise en compte dans les applications où la chaux est utilisée pour flocculer les argiles ou coaguler les impuretés (phénomène de floculation). La réactivité définit la rapidité d'action d'une chaux, dans une réaction donnée, elle dépend essentiellement de :

- de la porosité de la chaux (qui diminue lorsque la température de cuisson augmente) ;
- de sa finesse et du mode de cuisson.

Dans le cas de chaux vive, la réactivité dépend de la température de calcination et de la composition du calcaire en cause. Pour la chaux éteinte, la réactivité est liée aux conditions d'extinction. Elle peut se déterminer directement en mesurant dans des conditions bien définies la vitesse de réaction d'un échantillon en présence d'eau (hydratation) ou d'un acide (neutralisation). La surface spécifique, et même la finesse de mouture, peuvent dans certains cas en donner une idée.

I.7.1.2.2 Caractéristiques physiques

a. Finesse

C'est une caractéristique importante dans la mesure où elle intervient sur les conditions de transport, de stockage ou de mélange. Elle peut également intervenir sur la vitesse de réaction de la chaux, mais il faut se rappeler, dans le cas de la chaux vive, que la présence d'eau peut modifier profondément la finesse initiale puisque l'extinction entraîne une pulvérisation très fine (à l'inverse du ciment qui se prend en grumeaux et perd de son efficacité s'il est humidifié prématurément).

b. Surface spécifique

La surface spécifique donne une indication sur l'importance des surfaces de contact entre la chaux et le produit avec lequel elle est mise en réaction par conséquent sur la vitesse avec laquelle elle agira. La connaissance de la finesse ou surface spécifique est un élément fondamental pour maîtriser la réactivité de la chaux, plus les grains sont fins, plus la surface de contact est étendue et plus les réactions de floculation sont rapides.

c. Masse volumique et Densité

Ces deux notions aident à déterminer la masse de liant contenue dans un volume donné.

- la masse volumique est exprimée généralement en kilogramme par mètre cube;
- la densité correspond au rapport entre la masse d'un volume de matière donnée et la masse d'un même volume d'eau.

La masse volumique varie beaucoup suivant la nature de la chaux, sa granulométrie, son degré de saturation.

d. Solubilité

La solubilité de la chaux est très faible et diminue lorsque la température augmente. Elle est de l'ordre de 1.2 g / L à 20 °C et de 0.67 g / L à 80 °C.

I.7.1.3 Spécification de la chaux à usage routier

Les spécifications relatives à la chaux que l'on peut trouver dans les diverses recommandations et directives officielles publiées par le SETRA et le L.C.P.C, peuvent se résumer dans le tableau ci-dessous (**Norme française NF P 98-101**):

Tableau I.9 : Spécification de la chaux à usage routier (NF P 98-101).

| Chaux vive | Chaux éteinte |
|--|--|
| Critères granulométriques | |
| Classe granulométriques 0-2mm Passant au tamis de 200µm >80% Passant au tamis de 80µm >50% | Passant au tamis de 80µm > 90% |
| Critères chimiques et réactivité | |
| Teneur en eau libre >80% Teneur en MgO < 8% Test de réactivité à l'eau : Température finale >60C° obtenue en moins de 25mn | Teneur en eau libre >50% Teneur en MgO < 6% |
| | Teneur en eau libre <2% |

I.7.1.4 Action de la chaux

Le traitement à la chaux vive ou hydratée (chaux éteinte) s'effectue dans le cas des sols fins très humides. Théoriquement, l'incorporation de chaux dans les sols provoque les réactions suivantes :

a. Modifications de l'état hydrique

Au contact de l'eau, la chaux vive s'hydrate pour donner des chaux éteintes selon la réaction :



Cette réaction est permet d'abaisser significativement la teneur en eau des sols, l'abaissement total de la teneur en eau est approximativement de 1% par pour cent de chaux vive introduite [GTS 2000].

b. Modification des propriétés géotechniques

La chaux vive ajoutée dans le sol a une réaction avec l'eau naturelle contenue dans le sol. Cette réaction d'échange cationique influence les limites d'Atterberg, (Leroueil et Le Bihan, 1996) [18]. **La Figure I.13** présente une augmentation de la limite de plasticité : W_p et une diminution de la teneur en eau dans le sol traité à la chaux. Le changement d'indice de plasticité I_p est observé. La chaux peut donc modifier des propriétés géotechniques.

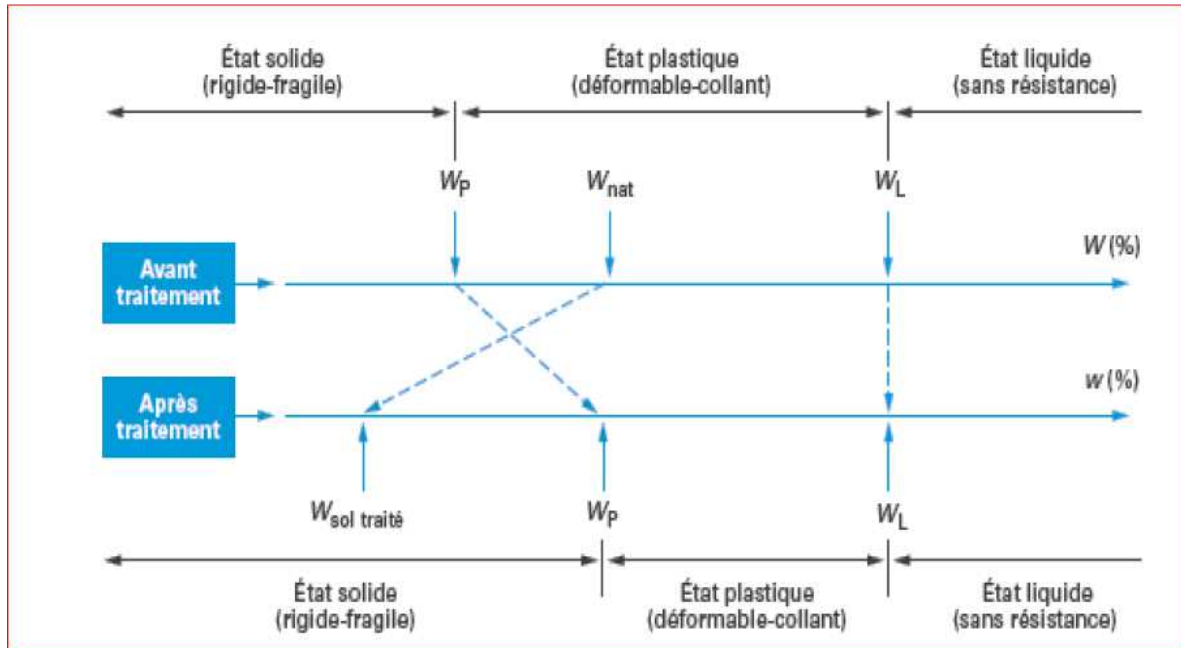


Figure I.13 Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide relative à l'introduction de chaux vive, d'après le **GTS (2000)**

Comme, la chaux peut modifier la structure et les propriétés d'un sol fin. Cai et al., (2006) ont travaillé sur deux mélanges : des sols argileux secs (Figure I.14-A) et des sols argileux secs et de la chaux (Figure I.14-B). Il ont observé que les pores plus petits sur la Figure 2.14B c'est-à-dire que la chaux contribue à rendre la structure du sol plus dense. Les petits pores sont favorables à la stabilisation des sols (Cai et al., 2006)[18]

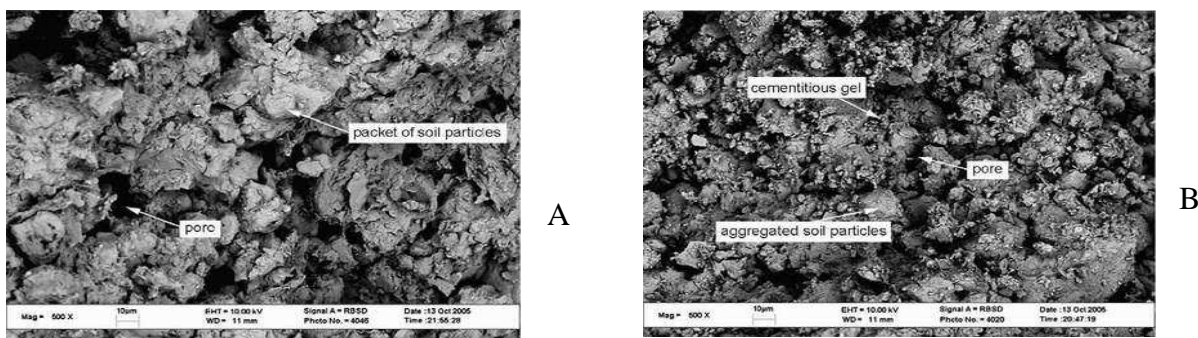


Figure I.14 : Observation MEB d'échantillons d'un sol de type argileux de Nanjing (Chine) : (A) sols non traités (B) 8% de chaux ajoutés (grossissement 500 fois), (Cai et al., 2006) [18]

Une modification de l'allure de la courbe de compactage : la courbe Proctor du matériau traité s'inscrit en dessous de celle du matériau naturel, elle est plus aplatie. L'optimum de densité sèche a lieu pour une teneur en eau supérieure tandis que la densité sèche correspondante à cet optimum diminue (**Figure I.15**). Cela veut dire que pour une même énergie de compactage, le sol traité a besoin d'une quantité d'eau optimum supérieure pour donner une densité sèche maximale inférieure à celle du sol naturel.

c. Modification des propriétés mécaniques

Suite à l'hydratation de la chaux, les réactions entre les produits hydrates, la silice et l'alumine en solution forment deux nouveaux produits de réaction pouzzolanique. Ces produits sont appelés des C-S-H ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$: silicates de calcium hydrates), des C-AH ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$: aluminates de calcium hydrates) et des C-A-S-H (aluminosilicates de calcium hydrates). La réaction de la chaux sur les argiles permet donc la consommation des argiles et la formation de nouveaux minéraux aux propriétés liantes. Tout ceci a pour conséquences :

- ✓ Un accroissement de la cohésion, de la dureté, de la résistance au poinçonnement (Figure 2.5),
- ✓ Une augmentation du module de déformation et des résistances mécaniques,
- ✓ Une meilleure résistance au gel,
- ✓ Une diminution des variations volumiques (retrait, gonflement) et une augmentation de sensibilité à l'immersion sous l'eau.

La minéralogie du sol traité a une influence sur la puissance de la réaction pouzzolanique. Les études précédentes ont montré qu'un traitement à la chaux est mieux adapté aux sols argileux alors que les sols sableux sont traités aux liants hydrauliques seuls GTS (**LCPC-SETRA, 2000**). La quantité en chaux nécessaire, de même que les caractéristiques mécaniques du matériau dépendent de la nature des argiles. Les meilleures caractéristiques mécaniques sont obtenues avec la kaolinite, puis l'illite et enfin les smectites. La réaction pouzzolanique a une cinétique lente : il faut plusieurs mois de cure à 20°C pour atteindre les caractéristiques mécaniques définitives. Cette cinétique dépend également de la température de cure. Pour les chantiers, il est signalé qu'au dessous de 5°C la cinétique de la réaction pouzzolanique est très ralentie **GTS (LCPC-SETRA, 2000)**, mais la réaction reprend dès que la température augmente.

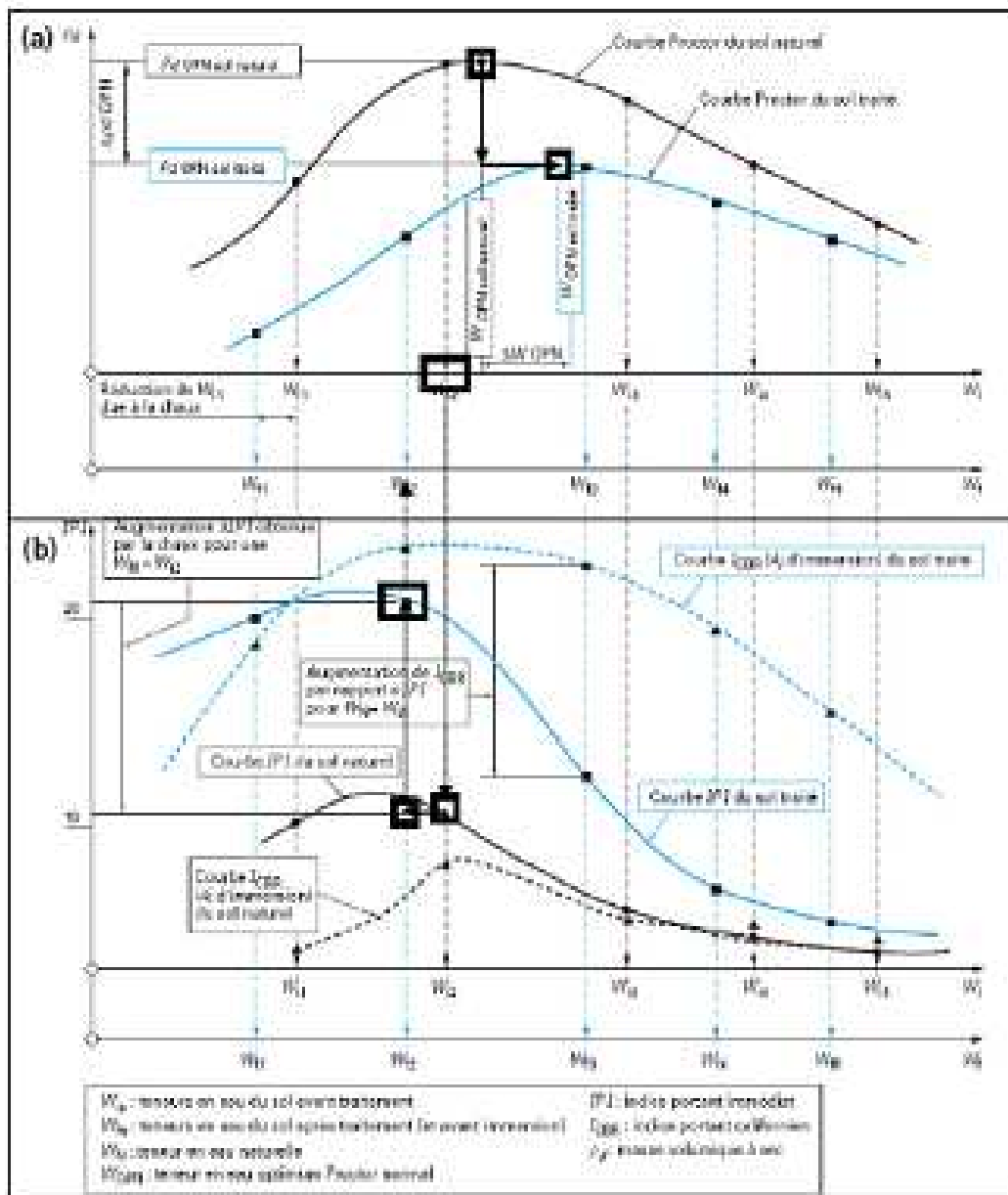


Figure I.15 : Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol traité de chaux vive (GTS (LCPC-SETRA, 2000))

I.7.2 Traitement au ciment

Le ciment est un liant très utilisé dans le domaine de la construction et routier. C'est un liant hydraulique.

Les deux Tableaux I.10 et I.11 présentent la classification des ciments en fonction de leur résistance normale et différentes résistances à la compression par rapport de la classe de ciment.

Tableau I.10 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition dans la norme NF P 15-301, (1994)

| | Cim. Portland | Ciment Portland composé | | Ciment de haut fourneau | | | Ciment pozzolanique | | Ciment au laitier et aux cendres | |
|------------------------------|---------------|-------------------------|--------------|-------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| | CPA-CEM I | CPJ-CEM II/A | CPJ-CEM II/B | CHF-CEM III/A | CHF-CEM III/B | CLK-CEM III/C | CPZ-CEM IV/A | CPZ-CEM IV/B | CLC-CEM V/A | CLC-CEM V/B |
| Clinker (K) | /95% | /80% ≤94% | /65% ≤79% | /35% ≤64% | /20% ≤34% | /5% ≤19% | /65% ≤90% | /45% ≤64% | /40% ≤64% | /20% ≤39% |
| Laitier (S) | * | 6%≤ | 21%≤ | /36% ≤65% | /66% ≤80% | /81% ≤95% | * | * | /18% ≤30% | /31% ≤50% |
| Pouzzolanes (Z) | * | total | total | * | * | * | 10% ≤ total ≤35% (fumée ≤10%) | 36% ≤ total ≤55% (fumée ≤10%) | 18% ≤ total ≤30% | 31% ≤ total ≤50% |
| Cendre siliceuses (V) | * | ≤20% | ≤35% | * | * | * | | | | |
| Fumée de silice (D) | * | (fumée | (fumée | * | * | * | | | | |
| Cendres calciques (W) | * | de | de | * | * | * | | | | |
| Schistes (T) | * | silice | silice | * | * | * | * | * | * | * |
| Calcaires (L) | * | | | ≤10%) | ≤10%) | * | * | * | * | * |
| Fillers (F) | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |

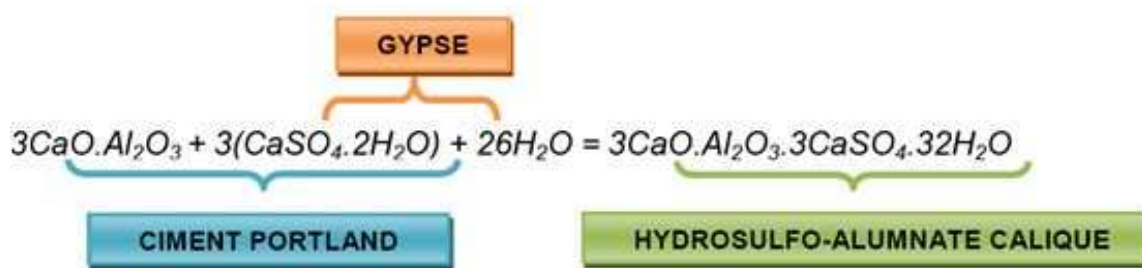
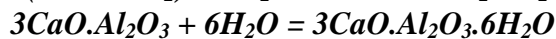
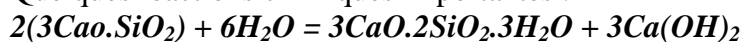
Tableau I.11 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe

| Classe | Résistance à la compression (MPa) EN 196-1 | | | | Retrait à 28 jours | Début de prise | Stabilité |
|---------------|--|---------|------------|-------|--------------------|----------------|----------------|
| | au jeune âge | | à 28 jours | | | | |
| | 2 jours | 7 jours | mini. | maxi. | P 15-433 (µm/m) | EN 196-3 (min) | EN 196-3 (min) |
| 32,5 | | (17,5) | /32,5 (30) | ≤52,5 | ≤800 | /90 | ≤10 |
| 32,5 R | /13,5 (12) | / | /32,5 (30) | ≤52,5 | ≤1 000 | /90 | ≤10 |
| 42,5 | /12,5 (10) | | /42,5 (40) | ≤62,5 | ≤1 000 | /60 | ≤10 |
| 42,5 R | /20 (18) | | /42,5 (40) | ≤62,5 | ≤1 000 | /60 | ≤10 |
| 52,5 | /20 (18) | | /52,5 (50) | | | /60 | ≤10 |
| 52,5 R | /30 (28) | | /52,5 (50) | | | /60 | ≤10 |

I.7.2.1 Action du ciment

L'action immédiate du ciment est limitée. Tel que Le mécanisme du ciment ajouté avec l'eau dans le sédiment ou le sol fin est décrit par la suite. Quand la poudre de ciment Portland est en contact avec l'eau, l'aluminate tricalcique (C3A) réagit en premier, se dissout et se recristallise. Vient ensuite la réaction d'hydrolyse, de l'alite-Silicate tricalcique (C3S) qui forme autour des grains une pellicule de gel et met en même temps des ions Ca^{2+} en solution. L'hydrolyse et la recristallisation de (C3A) sont rapides. Cette activité est si grande qu'il faut la retarder car elle conduirait à des prises trop rapides et rendrait le liant inutilisable sur le chantier.

Quelques réactions chimiques importantes :



Plusieurs études effectuées montrent que les métaux lourds retardent l'hydratation du ciment Portland. On prend par exemple :

- ✚ **Zhibo (ZHIBO 2008) et Colin (COLIN. 2003)**, ont traité des sédiments fins avec du ciment et de la chaux. Les résultats montrent que les performances mécaniques évoluent proportionnellement avec augmentation du dosage du ciment.
- ✚ **Bahar et al. (2004)**, ont traité un sol de la région de Tizi-Ouzou (Est d'Alger) avec du ciment. Ils ont constaté qu'avec l'augmentation du ciment, la résistance en compression simple des échantillons augmente. Ils ont lié ce phénomène au remplissage des pores par les produits cimentaires qui lient les particules du sol. Ils ont également conclu que la teneur en ciment a un effet sur la perméabilité des échantillons.

I.7.3 Correcteur granulométrique (sable)

L'objectif principal d'apport d'un correcteur granulométrie est pour améliorer le squelette granulaire afin de réduire les vides. Les sédiments traités présentant en une porosité très importante. Pour réduire cette porosité, il est possible d'envisager d'ajouter un correcteur granulométrique aux sédiments qui joue un rôle de diluant par modification les paramètres de nature (diminution de l'argilosité et de la teneur en matière organiques) et il modifie également la mise en oeuvre du matériau (Zhibo 2008) [6].

I.8 Facteurs perturbateurs dans les traitements

Comme précédemment dit, les sédiments de dragage contiennent divers éléments tels que les matières organiques, les métaux lourds et les substances inorganiques (les phosphates, les nitrates et les chlorures). Ces éléments empêchent que le procédé de S/S avec les liants puisse pleinement se développer ou atteindre les résistances attendues. Quelques facteurs perturbateurs sont présentés par la suite.

I.8.1 Influence des matières organiques sur le sol

Les fractions organiques interagissent avec les composés minéraux du sol et plus particulièrement la fraction argileuse. Ainsi, il y a formation d'un complexe argilo-organique de différents degrés de stabilité [Stevenson, 1994]. Les substances organiques peuvent être retenues par les minéraux argileux de deux façons [Stevenson, 1994] :

- par échange cationique ou anionique en surface par des liens hydrogènes ou par des forces de Van Der Waals.
- par pénétration dans les espaces inter-couches des argiles.

L'interaction des matières organiques avec les fractions minérales modifie les caractéristiques géotechniques du sol comme la plasticité et la consolidation [Keller, G.H., 1982]. La formation des complexes argilo-organiques augmente l'indice des vides et par conséquent la compressibilité [Rashid et Brown, 1975]. Une étude réalisée par Tremblay et al., 2002, sur un sédiment de dragage dont l'étude de la teneur en matière organique a été régulée par oxydation avec de l'eau oxygénée (H₂O₂), montre que le sédiment contenant 8% de matière organique représente une compressibilité plus élevée que les sédiments qui en contiennent 0% et 3%. Ces résultats s'accordent avec ceux de [Rashid et Brown, 1975] qui ont noté une l'augmentation de la compressibilité d'un facteur de 10 quand la teneur en matière organique augmente de 0 à 4 %.

Les matières organiques présentent des masses volumiques faibles par rapport aux matières minérales, l'augmentation de leur quantité conduit à la réduction de la densité des sédiments causant l'augmentation de la teneur en eau optimale de compactage [Hussein, A I., et al. 1999] (Figure I.16). Zentar, R., et al., 2009 a montré aussi que la quantité de matière organique influence les paramètres tels que la limite de liquidité, de plasticité et de la résistance au cisaillement des sédiments.

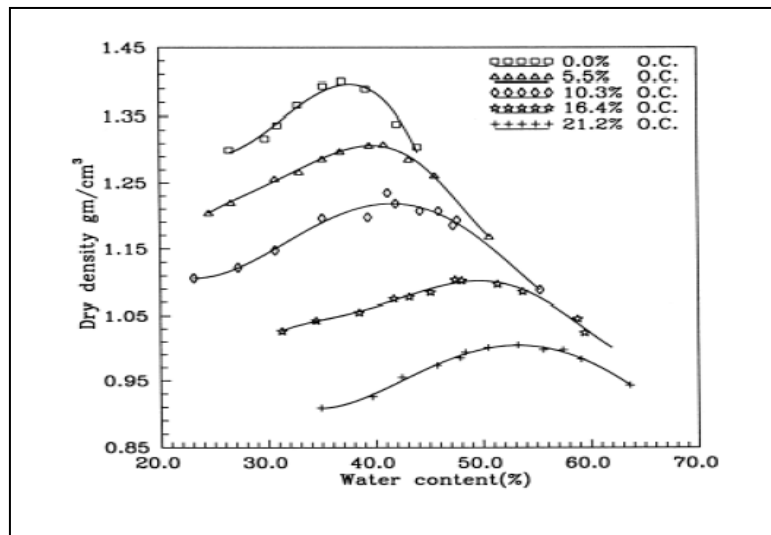


Figure I.16: Courbe de compactage du sol en fonction de la quantité de matière organique [Hussein, Al., et al. 1999]

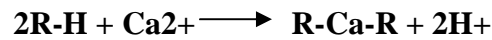
I.8.2 Influence des matières organiques sur le traitement

Sur les ciments, les matières organiques peuvent retarder le développement des réactions de cimentation parce qu'elles consomment une quantité plus ou moins importante de produit de traitement pour neutraliser l'acidité du milieu [GTS. 2000].

Lors du traitement des sols à la chaux, les matières organiques peuvent perturber l'action initiale de la chaux sur les argiles (floculation/agglomération) et inhiber la réaction pouzzolanique. En effet, les matières organiques sous forme d'acides humiques réagissent avec la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour former des produits insolubles qui précipitent sur les particules d'argile [21].

Les mécanismes de perturbation des substances organiques sur l'hydratation du ciment sont mal connus. Cependant deux hypothèses peuvent être avancées :

- Formation de complexes entre l'ion calcium et les groupes fonctionnels hydroxyle, carboxyle, amine, benzénique. Cette formation libère des protons susceptibles d'acidifier le milieu en neutralisant l'action basique des liants selon une réaction du type :



- Formation d'une barrière physique modifiant la croissance et/ou la morphologie des cristaux. Ce mécanisme s'explique par les très fortes propriétés tensioactives et complexantes de ces polymères associés à leur très grande surface spécifique, empêchant le déroulement normal de l'hydratation.

La chaux est souvent un stabilisateur moins efficace que le ciment pour les boues. Ceci est probablement dû à l'effet des acides humiques comme exposé ci-dessus et à l'inhibition du mécanisme pouzzolanique de la chaux. En effet, grâce aux réactions pouzzolaniques, la chaux réagit avec les particules argileuses pour former des particules agglomérées (floculation des argiles). Dans la boue, les matières organiques occupent un volume important, le stabilisateur n'est donc pas facile à mettre en contact avec les particules argileuses présentes. Il en résulte une inhibition de la réaction pouzzolanique. Par contre, pendant l'hydratation du ciment, les particules d'argile ne jouent aucun rôle.

I.8.2.1 Exemple de l'effet des matières organiques sur les performances mécaniques

Sun. L et al, 2006 [22] ont étudiés l'évolution des résistances mécaniques en fonction de la teneur en matières organiques (MO) dans le cadre du traitement des sédiments de dragage du port de Cherbourg par solidification à l'aide de ciments et additifs (sable). Les essais ont été effectués sur des éprouvettes confectionnées avec différentes teneurs en matières organiques (9,8% ; 13% et 15%) (Voir figure I.17).

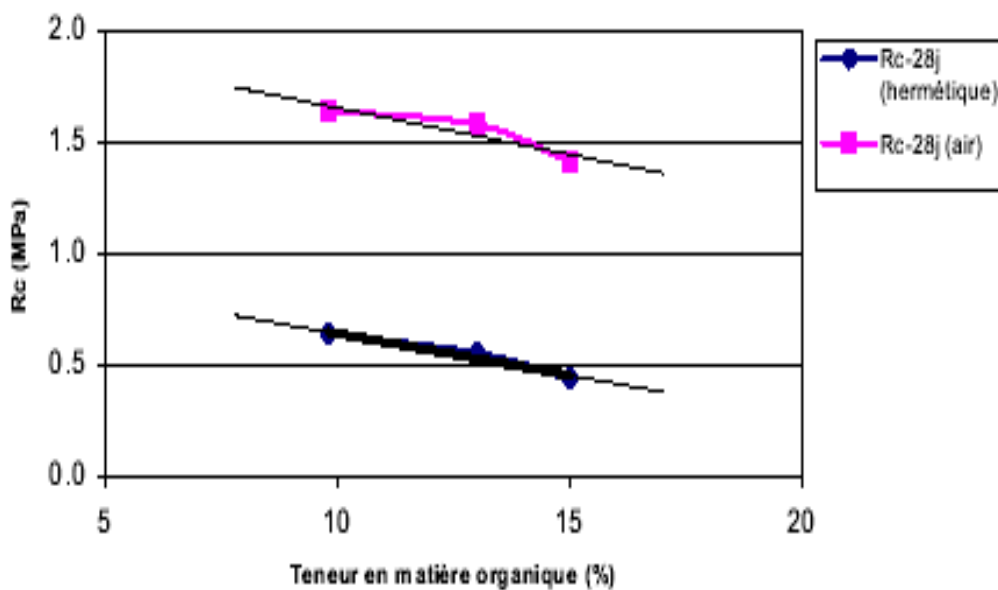
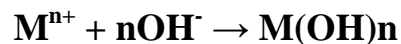


Figure I.17 : Relation entre les résistances Rc à 28 jours et les matières organiques d'un sédiment traité de Cherbourg.

Il constate qu'il ya une diminution des résistances lorsque la teneur en MO augmente quelque soit le mode de conservation des éprouvettes retenues ($R_c 9,8\% > R_c 13\% > R_c 15\%$).

I.8.3 Influence des métaux lourds

Le pH joue un rôle important dans l'interaction chimique entre les hydrates du ciment et les métaux lourds. Dans la solution basique, les cations métalliques se combinent avec les anions hydroxydes (OH^-) pour donner naissance a des hydroxydes métalliques peu ou pas solubles, selon la réaction suivante :



Boutouil (1998) a indique que les métaux lourds sont immobilises soit par la précipitation, soit par l'absorption et ou bien par la complexation. Apres la combinaison avec les produits hydrates, les cations métalliques ont certaines influences sur la formation d'hydrates liants. Le tableau I.12 présente les effets de certains métaux lourds sur les liants :

Tableau 1.12 : Effets de certains métaux lourds sur les phases hydratées du ciment [Imyim. 2000][21]

| Métaux | Effets sur les liants |
|---------|--|
| Plomb | Retard de la prise pendant l'hydratation du ciment. Formation d'ions complexes (exemple : $[\text{Pb}_6\text{O}(\text{OH})_6]^{4+}$) qui peuvent s'adsorber à la surface des silicates et/ou précipiter sous forme de sulfates. |
| Zinc | ZnO arrête grandement l'hydratation du ciment. Zn^{2+} retarde la formation de la Portlandite pendant le premier jour de l'hydratation. $\text{Zn}(\text{OH})_2$ et $\text{Zn}(\text{OH})_3$ empêchent l'adsorption sur la surface électronégative du C-S-H à PH élevé. |
| Chrome | Provocation de l'accélération de la prise du ciment. Incorporation dans la matrice C-S-H : CrO_2 se substitue à SiO_2 . Cr^{3+} se substitue à Ca^{2+} et Si^{4+} |
| Cadmium | Cd peut se déposer à la surface des grains du ciment sous forme $\text{CaCd}(\text{OH})_4$. |
| Arsenic | Possibilité de former un complexe calcium-arsénite (Ca-AsO_3) et d'augmenter la prise du ciment. L'arséniate peut se substituer partiellement au sulfate de l'ettringite. |

I.8.4 Substances inorganiques

Les substances inorganiques, Comme les métaux lourds et la matière organique, ils vont aussi influencer l'hydratation du ciment à différents niveaux.

➤ **Composés sulfatiques**

Les éléments sulfatiques sont présents dans les sédiments sous forme de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de sulfures (FeS_2) ou de composés ioniques SO_4^{2-} . Les sulfates peuvent provoquer des dégradations du matériau traité par des liants hydrauliques. Ces dégradations sont de 3 ordres :

- des gonflements importants,
- le développement d'une fissuration importante,
- une diminution des résistances mécaniques.

En début de prise, les sulfates ont un rôle généralement bénéfique de régulateur de prise, mais si la teneur de ces éléments devient trop importante, des désordres peuvent apparaître suite à la formation d'ettringite secondaire [GTS. 2000].

➤ **Composés azotés**

Ils se présentent sous la forme d'ions ammonium et nitrate. La perturbation attribuable à l'azote peut résulter d'interactions physico-chimiques entre les liants et les composés azotés. Ces interactions peuvent entraîner les retards de prise et/ou le gonflement /fissuration.

➤ **Phosphates**

Les phosphates peuvent perturber le traitement des sols. Ils peuvent développer de nouveaux minéraux, tels que l'apatite et les phosphates tricalciques par interaction entre les phosphates et les liants.

➤ **Chlorures**

La présence de chlorures a une action d'accélérateur de prise et de durcissement. ils peuvent se combiner avec C3A dans le ciment pour former des chloro- aluminates causant des gonflements [GTS. 2000]. Donc, on limitera la teneur de C3A dans le ciment pour les travaux en milieux riches en chlorures.

I.9 Travaux de recherche

En Algérie, comme à l'étranger, et depuis plus de dix ans, les gestionnaires se sont orientés vers les filières de valorisation des sédiments.

La consommation importante et l'exploitation des matériaux de nature très variée dans le monde et particulièrement en France, dans le domaine routier, nous orientons vers le traitement des sédiments aux liants hydrauliques. Les applications en technique routière

restent pour le moment dans le cadre de faible trafic. Nous citons dans ce qui suit quelques exemples de recherches.

- (Dermatas, 2003 ; Bennert et al, 2001 ; Boutouil, 1998) [23] montre que les sédiments des ports de New York et New Jersey qui ont traité aux liants hydrauliques essentiellement (la chaux et/ ou le ciment) présentent une possibilité d'utilisation comme matériau de remblaiement qui permet d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques et géotechniques. Ils ont constatés que ces améliorations se traduisent par une augmentation de la résistance à la compression et aux cisaillements, ainsi une augmentation des indices portants immédiats ou indices CBR et provoquent aussi une réduction de la plasticité par floculation.
- Boubaker Rekik, Mohamed Boutouil, 2006 [24] ont effectués une campagne des essais de compactage et de compressibilité sur des sédiments fins de dragage afin d'étudier la possibilité de leur valorisation dans la réalisation des remblais.

Ils ont tracés les courbes Proctor du sédiment avant et après traitement, ces essais ont été effectués selon la norme NF P 98-231-1 en Proctor normal avec mesure de la portance. Les résultats sont représentés sur la figure I.18

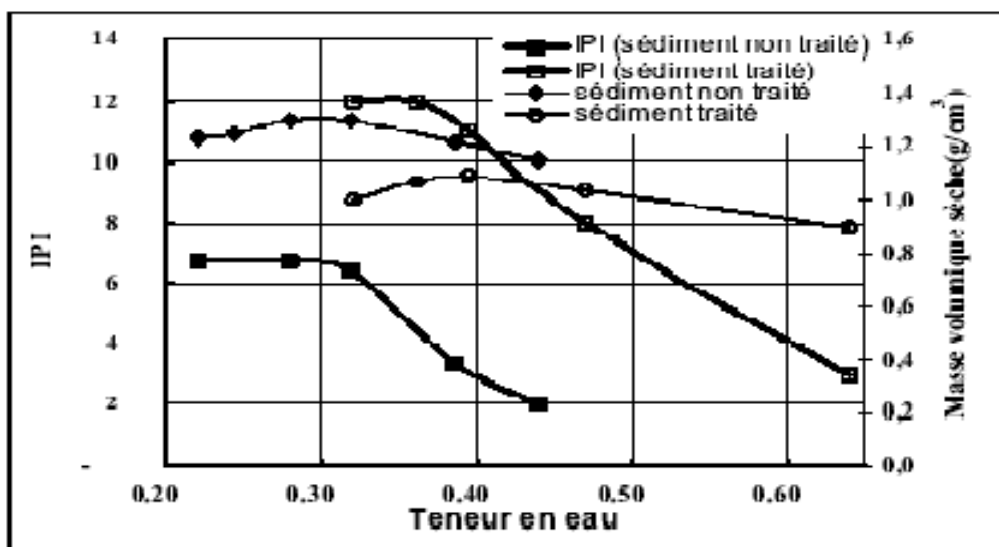


Figure I.18 : Courbe Proctor du sédiment avant et après traitement.

On constate d'après les courbes Proctor présentées sur la Figure I.18 que le sédiment non traité présente une masse volumique sèche maximale de 1,30 g/cm³ et une teneur en eau optimale située à environ 30%. Après traitement, on note un déplacement de l'optimum Proctor vers une masse volumique sèche maximale plus faible (1,11 g/cm³) et une teneur en eau optimale de l'ordre de 38%.

On remarque aussi sur la même figure que les valeurs de l'indice portant immédiat obtenues démontrent que la valorisation des sédiments de dragage dans la réalisation des travaux type remblais est possible, notamment en France avec les sols de classe A3 (voir figure I.), qui nécessitent des indices portants immédiats supérieurs à 3 (GTS, 2000) [20]. De façon générale, la résistance mécanique peut être améliorée par ajout d'un correcteur granulométrique comme des sédiments plus grossiers par exemple (Boubaker. R et Boutouil. M, 2006) [24].

- **Bacot. J et Kham Khoep. A, 2002 [26]** ; ont travaillé sur la stabilisation des sédiments fins de type vase qui sont dragués dans les milieux estuariens et littoraux. Ces sédiments ont été traités avec un ajout de 6 % de chaux, 6 % de ciment et un mélange chaux-ciment (3 % + 3 %). Ils constatent que les résistances mécaniques ultimes du matériau traité à la chaux après maturation des éprouvettes à 60 °C sont augmentées d'un facteur 4,4 et le traitement au ciment donne après 28 jours de maturation des résistances maximales voisines de 0,8 MPa soit 5,9 fois les résistances du matériau non traité. Il est conseillé d'utiliser un traitement à la chaux ou mixte chaux-ciment pour améliorer l'ouvrabilité du matériau et assurer la durabilité des ouvrages. Les résultats obtenus permettent d'envisager l'emploi des vases traitées dans les chaussées légères et les remblais, les résultats des résistances à la compression simple et en traction sont reportés dans le tableau I.13.

Tableau I.13 : Variations des résistances mécaniques en fonction de la nature du traitement et de la maturation des éprouvettes [26].

| Traitement | Jours | Rc en MPa | F.am | RTB en MPa | F.am | RTB/Rc |
|------------------------------------|------------|---------------|------|---------------|------|--------|
| Sol non traité | - | 0,141 ± 0,004 | | 0,008± 0,001 | | 0.060 |
| 6 % de chaux | 0 | 0,394 ± 0,003 | 2,8 | 0,017 ± 0,001 | 2 | 0.043 |
| | 28 à 20° C | 0,521 ± 0,002 | 3,7 | 0.039 ± 0,003 | 4.7 | 0.075 |
| | 7 à 60° C | 0,623 ± 0,015 | 4,4 | 0.055 ± 0,001 | 6.6 | 0.089 |
| 3 % de chaux + 3 % de ciment | 0 | 0,301 ± 0,007 | 2 | 0.011 ± 0,001 | 1,3 | 0.036 |
| | 28 à 20° C | 0,565 ± 0,008 | 3,9 | 0.052 ± 0,004 | 6,2 | 0.092 |
| | 7 à 60° C | 0,792 ± 0,009 | 5,6 | 0.057 ± 0,002 | 6.8 | 0.072 |
| 6 % de ciment | 0 | 0,226 ± 0,015 | 1,6 | 0,008 ± 0,001 | - | 0.035 |
| | 28 à 20° C | 0,835 ± 0,003 | 5,9 | 0,067± 0,007 | 8 | 0.081 |
| | 7 à 60° C | 0,511 ± 0,017 | 3,6 | 0.033 ± 0,001 | 4 | 0.065 |

Rc : Résistance à la compression

RTB : Résistance à la traction brésilienne.

F. am : Facteur d'amplification.

- Pera. J et Taibi. H, 1985 (in Guezouli. A, 1999) [27] ont travaillé sur la stabilisation des sols fins (argiles et loss) par des liants hydrauliques, chaux et ciment. Les traitements au ciment, à des teneurs égales ou supérieures à 5% donnent les meilleures performances mécaniques.
- Andras. B [28] a testé l'évolution de la résistance à la compression simple en fonction du temps de conservation pour les limons traités à la chaux.

La figure I.19 présente des exemples de courbes caractéristiques obtenues sur un limon traité à la chaux.

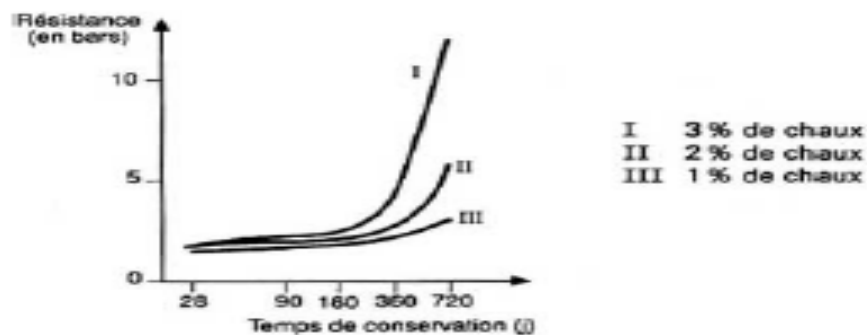


Figure I.19: Evolution de la résistance à la compression simple en fonction du temps de conservation pour les limons traités à la chaux. [28]

- (Colin .D, 2003 ; Sun. L, 2005), [22], se sont intéressés à la comparaison de l'incidence d'ajout de sable dans le sédiment traité et conservé en moule hermétique. La figure I.20 montre la variation de la résistance à la compression pour un sédiment de Seine, traité avec 1% de chaux, 7% de ciment avec ou sans 30% de quartzite (ajout de correcteur).

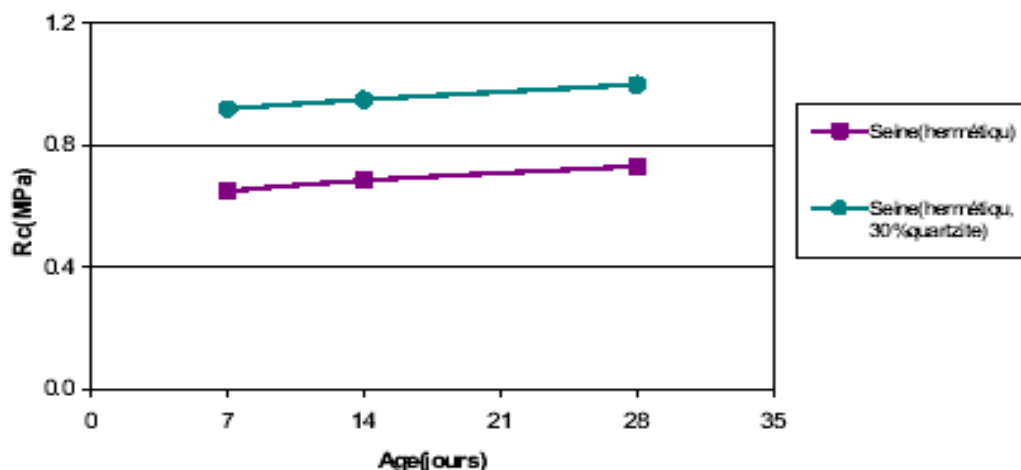


Figure I.20 : Sédiments de Seine traités avec ajout ou non de sable fin [22].

On remarque que l'ajout de correcteur de sable fin augmente la valeur de la résistance à la compression.

- **Sherwood. P ,1962 [in cuisinier. O et al, 2008] [29]** note que dans un sol contenant des particules argileuses, avec une faible concentration en sulfates (0.2%) peut entraîner une baisse de la résistance aux environs de 50%.

Plusieurs thèses ont été réalisées dans cette perspective, notamment dans les laboratoires de recherche. Le tableau (I.14) de la page suivante récapitule les principaux travaux de thèses.

Tableau I.14 : Travaux de recherche sur les sédiments de dragage

| AUTEUR | BOUTOUIL (1998) | COLIN (2003) | DUBOIS (2006) | AGOSTINI (2006) |
|-------------------------|---|--|--|--|
| Titre de la thèse | Traitement des vases de dragage par solidification/stabilisation à base de ciment et additifs | Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière. | Etude du comportement physico-chimique et caractérisation environnementale des sédiments marins-valorisation en technique routière | Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins |
| Type de sédiments | Marins | Fluviaux | Marins | Marins |
| Site | Port du Havre | La Seine | Port Autonome de Dunkerque + Port départemental des Gravelines | Port Autonome de Dunkerque |
| Domaine de valorisation | Techniques routières | Techniques routières | Techniques routières | Mortiers - Parpaings |
| Type de liant | Ciment | Ciment | Ciment + chaux | Chimique [phosphatation] + thermique [calcination] |
| Protocole de traitement | Sédiments bruts | Déshydratation et traitement | Déshydratation et traitement | Déshydratation et traitement |

| AUTEUR | SEMCHA (2006) | REKIK (2008) | BRAKNI (2008) | SCORDIA (2008) |
|-------------------------|--|---|---|---|
| Titre de la thèse | Valorisation des sédiments de dragage Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug. [Algérie] | Propriétés géotechniques des sédiments de dragage traités au ciment | Première approche vers une valorisation de granulats artificiels à base de sédiments de dragage portuaire application en génie côtier | Caractérisation et valorisation des sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers |
| Type de sédiments | Fluviaux | Marins | Marins | Fluviaux |
| Site | Barrage de Fergoug [Algérie] | Port de Ouistreham | Port Autonome de Dunkerque | |
| Domaine de valorisation | Porterie – brique | Techniques routières | granulats pour digue de protection du littorale | Techniques routières |
| Type de liant | Ciment | Ciment | Ciment | Ciment, chaux vive et LHR |
| Protocole de traitement | déshydratation et traitement | déshydratation et traitement | déshydratation et traitement | déshydratation et traitement [phosphatation et calcination] |

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté de la gestion, du traitement et de la réutilisation des sédiments dans plusieurs domaines, particulièrement dans les travaux routiers.

On doit noter que, quel que soient les voies de valorisation, le traitement des sédiments est obligatoire et doit satisfaire aux exigences environnementales, économiques et techniques.

En général, la stabilisation des sédiments à l'aide d'ajouts minéraux est bien connue. Les ajouts les plus couramment utilisés sont le ciment et la chaux. Les sédiments présentent de faibles propriétés mécaniques, mais l'ajout de ciment et de chaux peut améliorer les performances mécaniques pour une application dans les travaux, grâce à la réaction pouzzolanique et la réaction d'hydratation. Néanmoins les métaux lourds et les matières organiques empêchent les réactions entre les ajouts et les particules des sédiments et aussi affecter la croissance de la résistance.

Dans un contexte de développement durable, la valorisation des sédiments reste pour l'instant à explorer au stade de la recherche, que ce soit dans la dépollution des sédiments ou dans la gestion des quantités des matières.

Les travaux de cette thèse se déroulent dans une démarche de gestion globale des sédiments, en améliorant leurs comportements pour les valoriser dans le domaine routier en utilisant des techniques permettant un équilibre entre efficacité et coût.

Chapitre II

Problématique de l'envasement des barrages en Algerie

II. 1 Introduction

L'analyse sur l'étude des phénomènes de l'envasement s'appuie sur les articles publiés dans la littérature scientifique et les rapports techniques mis à notre disposition.

Ce chapitre fera le point sur l'ampleur de l'envasement en Algérie et le monde, et à montrer les causes et les conséquences de la problématique.

L'envasement des retenues Algériennes qui constitue sans doute la conséquence la plus grave de l'érosion hydrique, et un défi à surmonter pour l'Algérie. Le potentiel hydraulique perd annuellement environ 30 millions de mètres cubes, ce qui est énorme. Comme le cas de la vase du barrage de Fergoug (Willaya de MASCARA) qui présente un taux d'envasement estimé à 0,3 millions de Mètres cubes de vase annuellement. Les effets néfastes de ce phénomène sont nombreux, allant de la réduction considérable de la capacité d'emmagasinement et de stockage du barrage, jusqu'à la dégradation nette de la qualité de l'eau du barrage. Il existe plusieurs moyens de lutte contre ce phénomène, les chasses, le dragage ou le soutirage des courants de densité, ou bien la surélévation ou plus encore l'utilisation nouvelle des barrières végétales. Toutes ces méthodes restent partielles s'il n'y a pas une vision globale du phénomène et qui nécessite le concours de toutes les compétences scientifiques en la matière.

II.2 Phénomène de l'envasement des barrages

Les quantités importantes de sédiments qui se trouvent à l'intérieur des retenues de barrages posent un grand problème d'exploitation aux gestionnaires. Ces sédiments stockés dans la nature causent des dommages à l'environnement, voir Photos (II.1) et (II.2).



Photos II.1 : Envasement au niveau de la vidange du fond du barrage Fergoug



Photos II.2 : Envasement à l'amont du barrage (oued El Hamam) à environ 500m

II.2.1 L'érosion dans les bassins versants

L'envasement des retenues de barrages et des estuaires est lié directement aux phénomènes de l'érosion. Les processus de l'érosion ont des définitions diverses suivant les auteurs (voir figure II.1), Nous avons retenu la définition qui combine l'arrachement (creusement de la surface du sol, dégradation et altération des roches), le transport et le dépôt de matériaux.

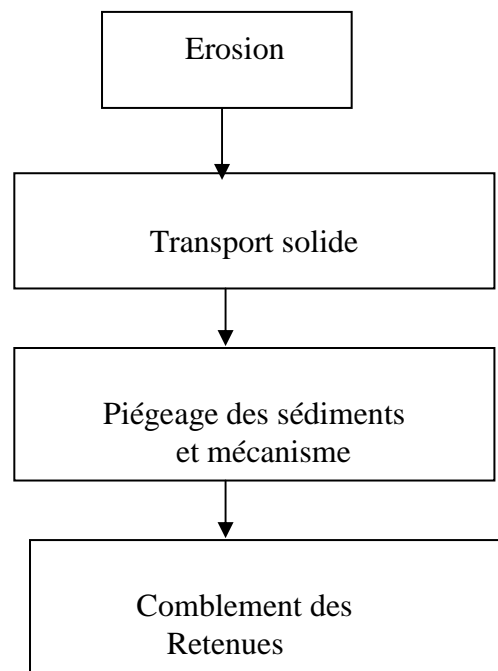


Figure II.1: Processus de la sédimentation

II.2.2 Mécanisme de l'envasement

Au moment de l'arrivée de la crue au niveau des eaux calmes du réservoir, les matériaux grossiers se déposent dans la zone de remous en formant un « delta » en queue de la retenue. Les particules fines sont piégées dans la retenue et commencent à se déposer, se tasser et à se consolider en diminuant ainsi progressivement leur capacité de stockage en eau. Lorsque la concentration des sédiments est très élevée, les particules fines plongent au fond de la retenue et s'y écoulent sous forme d'un courant de densité (voir figure II.2). La configuration géométrique des retenues sous forme de canal (voir figure II.3) pour la plupart des barrages de l'Afrique du nord favorise les courants de densité à se propager jusqu'au pied du barrage. En l'absence d'ouverture des vannes, les sédiments drainés par les courants de densité, se déposent et se tassent puis se compactent selon leur nature, et les conditions physico-chimiques du milieu. Cette consolidation peut gêner, plus tard, l'évacuation des sédiments accumulés dans la cuvette lorsque les manœuvres des vannes seront opérées très en retard (Remini. B et al, 2005) [41].

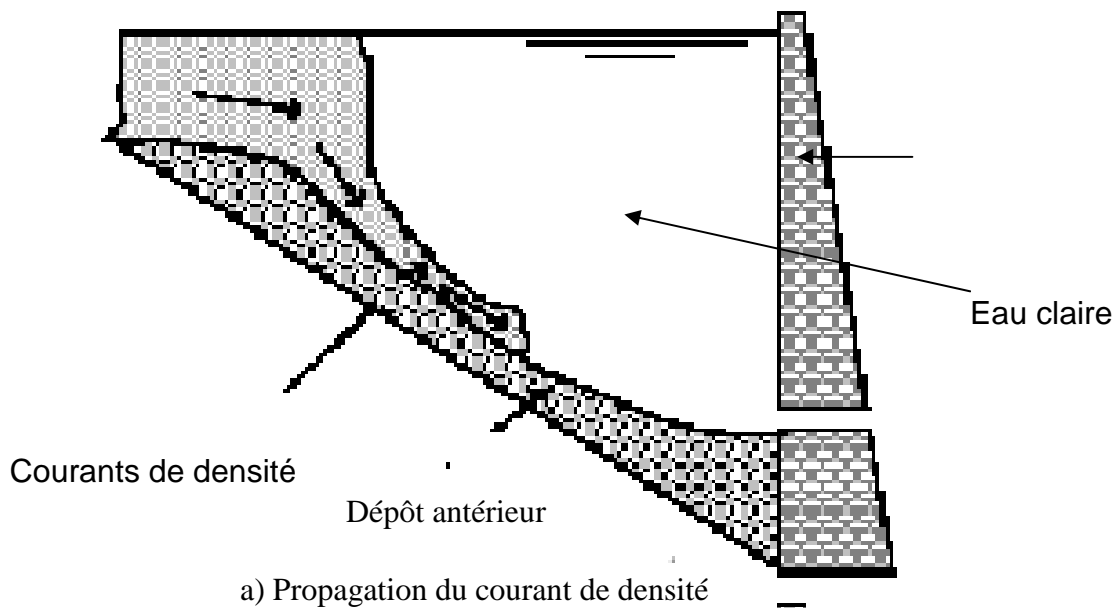


Figure II.2: Propagation d'un courant de densité (Remini. B et al, 2005) [41]

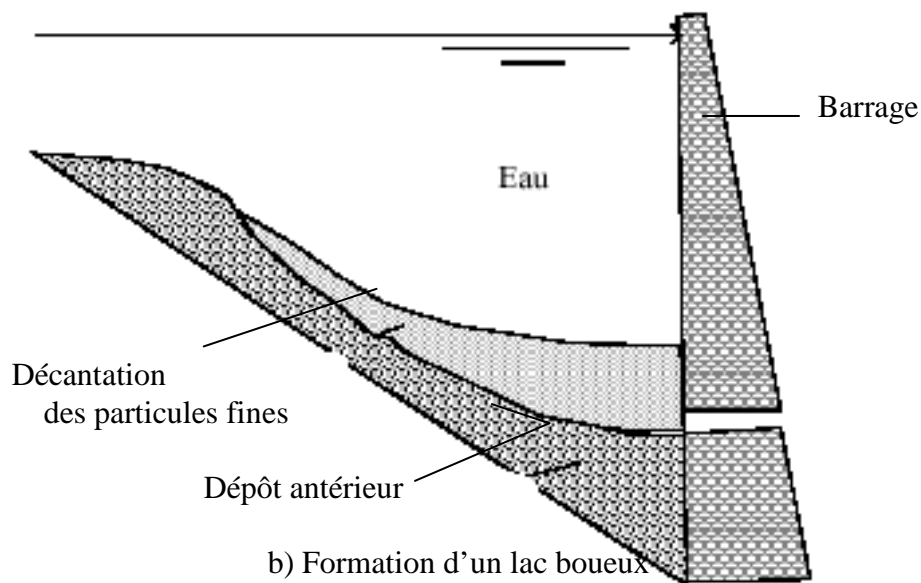


Figure II.3: Quelques exemples des retenues de type « canal »

II.2.3 L'envasement des retenues

II.2.3.1 Envasement des retenues dans le monde

Les retenues de barrages constituent une aire privilégiée pour le dépôt des matériaux solides érodés et, de ce fait, de nombreux réservoirs se sont comblés et d'autres sont entrain de l'être

à une vitesse inquiétante. Les dépôts qui en résultent dans les retenues de barrages diminuent leur capacité par des phénomènes d'envasement.

Plusieurs auteurs ont montré les conséquences et les prévisions dramatiques de la sédimentation dans les barrages, qui sont fonction du site, de l'importance et du mode d'exploitation de l'ouvrage, parmi eux : Korso. K, 1986 [46], Mekerta. A, 1986 [14], et Taleb. A, 1987 [45] qui donne une idée sur l'envasement de quelques retenues dans le monde (Voir tableau II.1).

Tableau II.1 : Taux d'envasement de quelques retenues dans le monde
(Taleb. A, 1987) [45].

| Pays | Barrage | % annuel de perte de capacité | Capacité initiale en hm ³ |
|----------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Algérie | Ksob | 3.5 | 11.6 |
| | Cheurfa | 2.0 | 14.4 |
| | Foum el gherza | 1.7 | 47.0 |
| | Ghrib | 1.1 | |
| Autriche | Bachental | 3.0 | 0.7 |
| | Burg | 2.5 | 0.24 |
| Chine | Heisonglin | 6.5 | 8.6 |
| Espagne | Dona Al Dosa | 6.5 | 23.0 |
| | Pero Marin | 5.9 | 19.0 |
| | Las Torcas | 1.9 | 8.9 |
| France | Beauvoir | 3.0 | 11.0 |
| | Escale(Durance) | 4.2 | 15.7 |
| Grece | Lauros | 4.3 | 1.0 |
| Inde | Iungabhadra | 1.4 | 3750 |
| | Nizamsagar | 1.4 | 1050 |
| | Panchet Hill | 0.7 | 1580 |
| Maroc | Neckor | 6.3 | 43.0 |
| | Lalla Takerkouste | 2.0 | 77.0 |
| | Mohamed V | 2.0 | 725.0 |
| | Ibn Battouta | 1.0 | 43.6 |
| U.S.A | Laguna (Colorado Arisona) | 10.0 | 25.0 |
| | Imperial (Colorado Arisona) | 11.2 | 104.0 |
| | Austin (Colorado Texas) | 7.35 | 39.4 |

II.2.3.2- Envasement des retenues Algériens

Selon Remini (2002), l'Algérie figure parmi les contrées les plus dangereusement menacées par l'érosion et l'envasement des retenues.

L'Algérie perd annuellement un volume de stockage de l'eau de 32 millions de m³ sur un volume de 5,2 milliards de m³ des 114 barrages en exploitation (Labiou. Z et al ,2004) [34], (Remini.B et Hallouche. W, 2004) [40]. Nos barrages se transforment de plus en plus en réceptacles de vase que d'eau (voir figure II.4, II.5 et figure II.6).

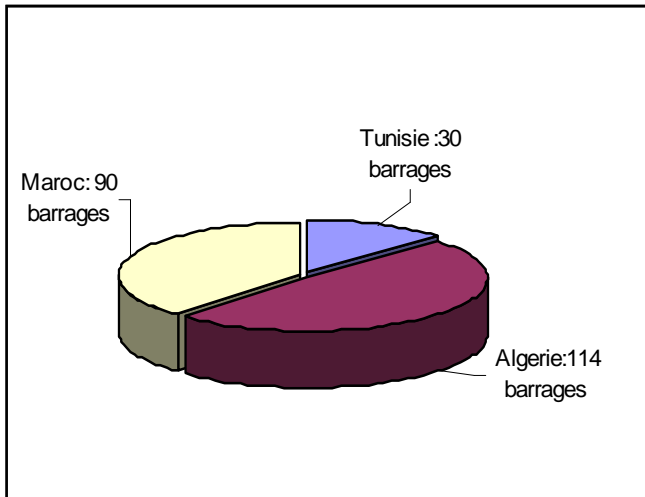


Figure II.4: Nombre de barrages en Afrique du nord

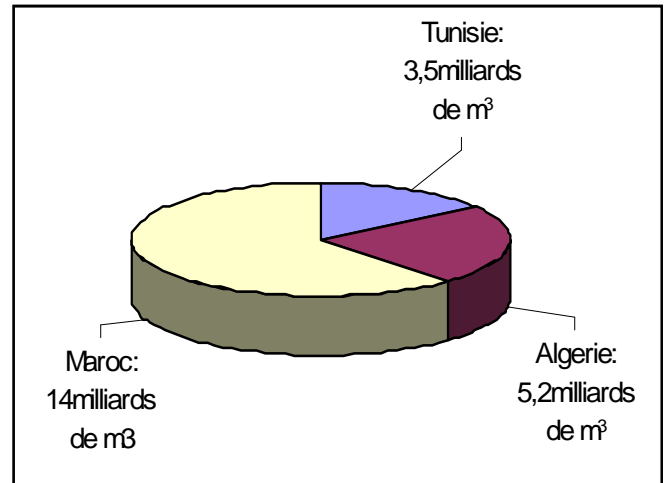


Figure II.5: Capacité de stockage en Afrique du nord

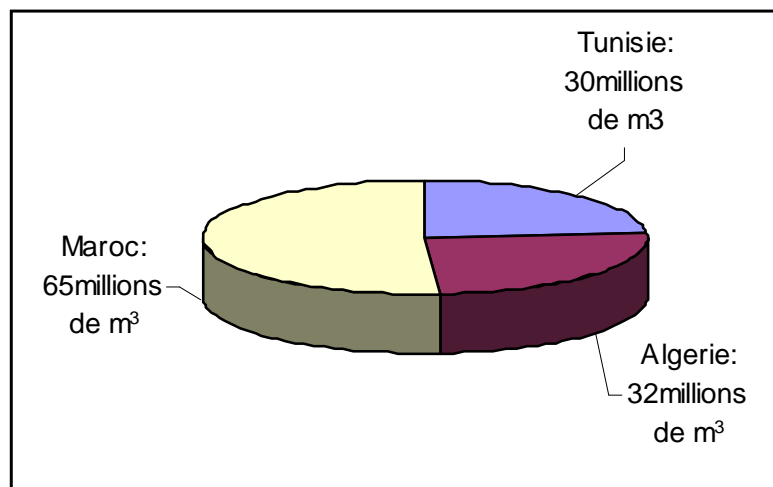


Figure II.6: Envasement annuel en Afrique du nord.

D'après Demmak. A, 1982 [47], la durée de vie d'un barrage réservoir est la période durant laquelle sa capacité est supérieure à 50% de la capacité initiale, sachant que sur plusieurs barrages étudiés, le taux d'envasement est compris entre 43 et 84%.

Le tableau ci dessous montre l'état de l'envasement de certains barrages Algériens mis en exploitation et donnent une projection de l'an 2010 (Agence Nationale des Barrages Algériens, 1990) [39].

Tableau II.2 : L'envasement de quelques barrages [Agence Nationales des Barrages Algériens, 1990] [39].

| Nombre de barrage en exploitation | Capacité initiale hm ³ | Volume envasé 1990 en hm ³ | Volume envasé 2010 en hm ³ |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 37 | 3886.5 | 430 (11%) | 934 (24%) |

On peut noter que le volume envasé des 37 barrages passe de 11% en 1990 à 24% en 2010. Ces chiffres montrent les conséquences dramatiques de la sédimentation dans les retenues de barrages.

II.2.3.3 Influences économiques

Marzouki. T, 1992 [48], montre dans le tableau II.3 l'importance économique de l'envasement des grands barrages marocains et les conséquences économiques de pertes de capacité dans les années à venir.

Tableau II.3 : Conséquences économiques futures de l'envasement (Marzouki. T, 1992) [48]

| Pertes | Pertes horizon 2000 | Pertes horizon 2030 |
|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Energie hydroélectrique | 60 GWH | 300 GWH |
| Eau potable | 40 millions m ³ | > 200 millions m ³ |
| irrigation | > 50.000 ha | > 100.000 ha |

On note que la perte d'eau due à la sédimentation des retenues de barrages à un impact économiques considérable.

II.2.3.4 Moyens de lutte contre l'envasement en Algérie

Il existe plusieurs moyens de lutte contre ce phénomène, les chasses, le dragage ou le soutirage des courants de densité ou bien la surélévation ou plus encore l'utilisation nouvelle des barrières végétales. L'opération la plus classique de curage des barrages et en même temps la plus coûteuse concerne le dévasement (l'enlèvement des boues de fond par des moyens mécaniques). Depuis les années 2000, plus de 20 millions de m³ de vase ont été extraits de nos barrages [A.N.B, 1990] [39]. Le dévasement s'accompagne toujours d'une

perte d'eau inévitable. Un premier essai au monde avec une perte d'eau presque nulle a eu lieu au barrage Foum El Ghourza dans la wilaya de Biskra. La technique consiste tout simplement en un aménagement adéquat. Une succession de bassins de décantation sont creusés plus en amont du barrage à dévaser. Les boues extraites sont déposées dans ces bassins et après décantation, les eaux sont acheminées gravitairement vers leur lieu d'origine. Une autre technique pour lutter contre l'envasement est le soutirage. Son application est conseillée à certains sites qui favorisent l'apparition de courants de densité. Ces courants de densité sont très concentrés en sédiments, qui nécessitent l'ouverture des vannes de fond et de dégager le maximum de sédiments avec une perte d'eau minimum.

(Boutin. R, 2000) [1] ; définit les dragages comme étant « des terrassements effectués sous l'eau avec des engins flottants au moyens de procédés mécaniques ou par aspiration. » Toutes ces méthodes de lutte contre l'envasement nécessitent l'application de toutes les compétences scientifiques en la matière.

II.2.4 Quantité des matériaux dragués et immergés en Europe

La problématique de l'envasement des ports européens a nécessité la publication de rapport annuel [OSPAR, 2003] [4] faisant état du bilan des quantités de matériaux dragués (voir figure II.7) accompagné de leur qualité (teneur en métaux lourds).

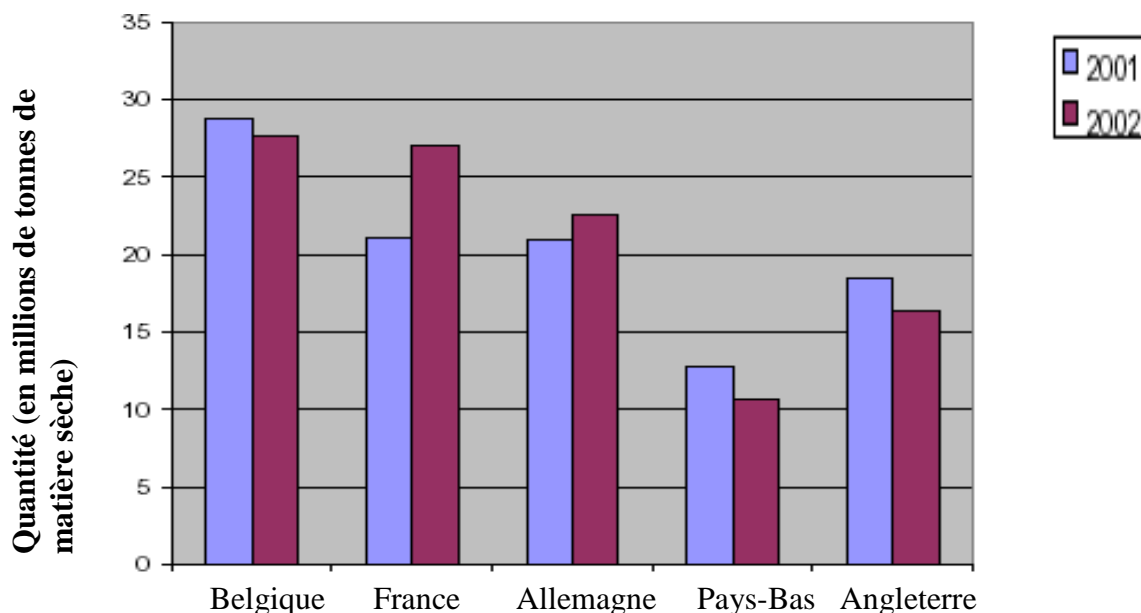


Figure II.7 : Quantité de matériaux dragués et immergés dans quelques pays européens de l'Atlantique Nord-Est en 2001 et 2002 (source OSPAR commission, 2003) [4].

II.3 Conclusion

L'envasement des barrages est un phénomène naturel très complexe qu'il faut étudier. Les barrages sont alimentés par les cours d'eau qui charrient en général des sédiments qui se déposent dans la retenue, et qui provoquent une diminution dans la capacité du barrage. Ce phénomène entraîne une perte de potentiel d'eau allant jusqu'à supprimer dans certains cas les fonctions du barrage. L'Algérie se trouve à la tête des pays les plus touchés par l'envasement des barrages. La connaissance des propriétés et la composition de ces vases est une donnée essentielle pour définir le domaine d'application et les conditions de son utilisation, afin de compenser le coût de dévasement et débarrasser l'environnement de ces matières. Ces vases sont constituées essentiellement d'argile, de limon, de sable fin et de composés organiques.

Chapitre III

identification et caractérisation des sédiments du barrage de Fergoug

III.1 Introduction

Ce chapitre de l'étude expérimentale est consacré à la caractérisation qualitative et quantitative des sédiments du barrage de Fergoug. Cette identification est une opération indispensable pour l'orientation du choix de la méthodologie et des outils à mettre en œuvre pour leur éventuel traitement et par suite la détermination de leur destination finale (réutilisation ou dépôt...etc.). On divise ce chapitre en trois parties.

- ✚ Une présentation de l'origine des sédiments étudiés ;
- ✚ Une identification des caractéristiques physico-chimiques, mécanique et minéralogiques de ce sédiment ;
- ✚ Une Classification du sédiment de Fergoug selon le guide technique GTR (LCPC-SETRA, 2000).

III.2 Présentation du barrage de Fergoug

III.2.1 Historique du barrage de Fergoug

Le barrage Fergoug est une illustration concrète des aires privilégiées de dépôt des matières solides érodées. Le barrage de Fergoug situé à 20 km en amont de Mohamadia sur la route de Mascara dans l'ouest de l'Algérie (**Figure III.1**), a été construit dès l'installation des 1^{ers} colons dans l'Oranie. Dans son état actuel, c'est un barrage en terre de capacité initiale en 1963, de 18 millions de m³. Sa capacité à chuter a 17 millions de m³ en 4 ans, et de 1970 à 1987 le taux d'envasement a été de 0,75 m³ par an.

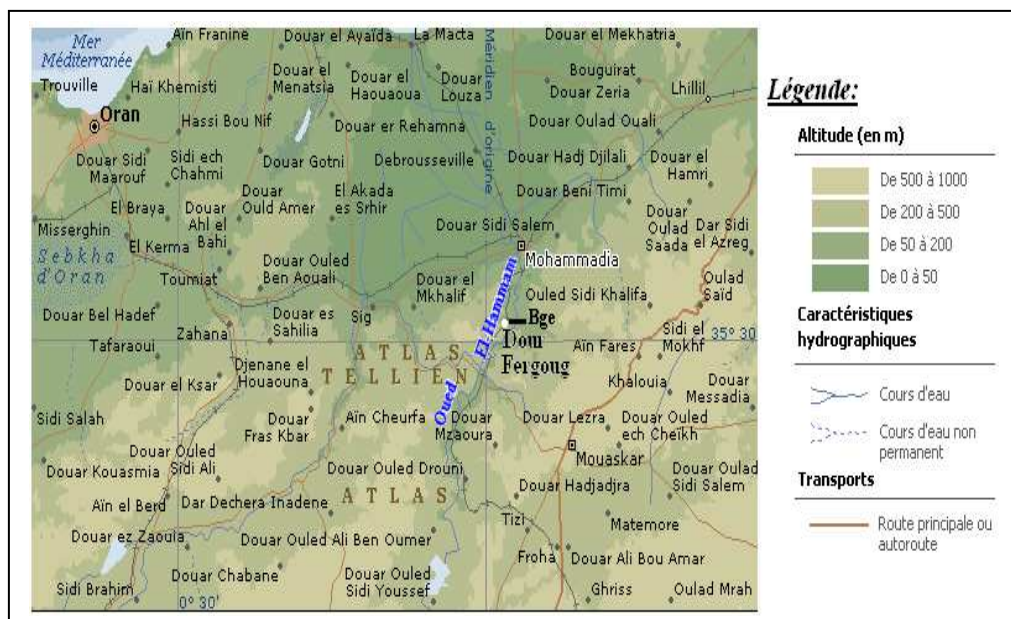


Figure III.1 : Carte de localisation du sous-bassin-versant de l'oued Fergoug

Le barrage de Fergoug doit sa dénomination à la localité « Douar Fergoug » dans la Wilaya de Mascara.

Les caractéristiques géographiques la localité du Fergoug est les suivantes :

Tableau III.1 : Caractéristiques géographiques du barrage de Fergoug
(Semcha. A , 2005) [13].

| | | |
|--|------------------------|-------------------------|
| Latitude : 35.5231 | Longitude : 0.0414 | Altitude (pieds) : 2420 |
| Lat. (DMS) : 35°31'23 N | Long. (DMS) : 0°2'29 E | Altitude (mètres): 730 |
| Time zone (est) : UTC + 1 | | |
| Population approximative sur un rayon de 7 km autour de ce point : 14292 habitants | | |

Le barrage du Fergoug assure la régularisation des Oued Fergoug, El Hammam et Gharzout (**Figure III.2**). Il assurait l'alimentation en eau potable des villes d'Oran, d'Arzew et Mohammadia, ainsi que l'alimentation en eau industrielle de la ville d'Arzew et l'irrigation de la plaine de Habra (20 000ha). Actuellement, le barrage n'alimente que la commune de Béthioua du faite que son volume utile de stockage est devenu très réduit par l'accumulation des sédiments.

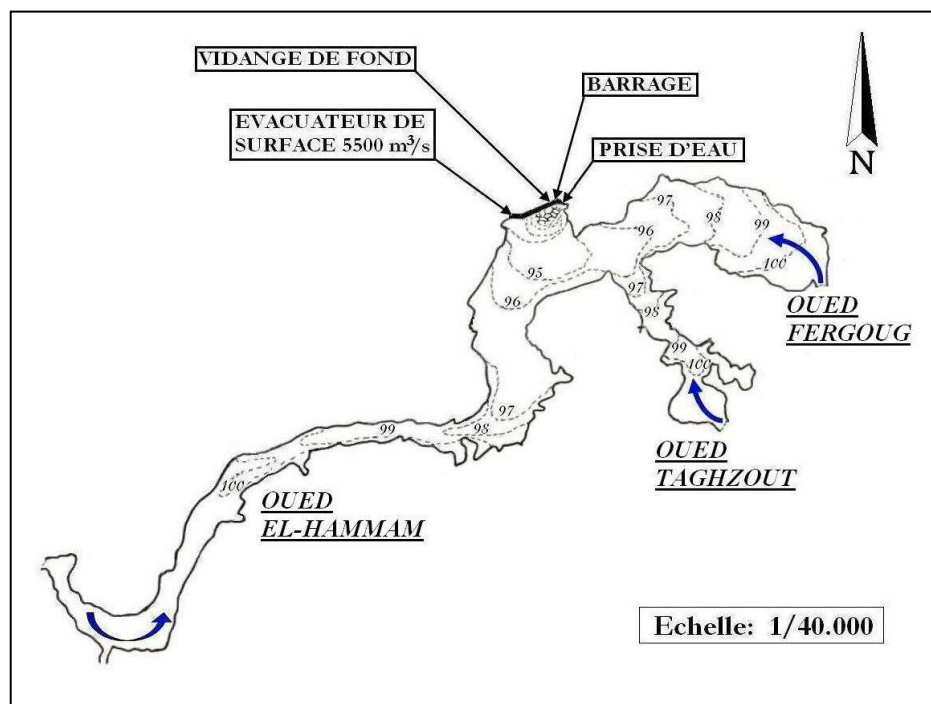


Figure III .2 : Le barrage du Fergoug, ses ouvrages annexes et ses affluents.

Lors de notre visite de la retenue de Fergoug en mars 2007, d'après les gestionnaires du barrage le taux d'envasement est estimé à 98 % par rapport aux relevés bathymétriques réalisés. Les photos III.1, III.2 montrent l'importance de l'envasement.



Photos III.1 : Envasement au pied du barrage



Photos III.2 : Envasement à l'amont du barrage à environ 100

III.2.2- Localisation du sous bassin versant de l'oued Fergoug

Le sous bassin versant de l'oued Fergoug, couvre une superficie de 122 km² (Figure III.1), il fait partie du grand bassin versant de l'Oranie – Chott Chergui. La complexité de la région concernée est caractérisée par prédominance des charriages, marque la région par un relief disséqué et vigoureux dans le détail. Au sein de cette structure tourmentée, des familles lithologiques peu résistantes ou franchement tendres prédominent. La quasi-totalité des terrains est marquée par des séries marneuses datant du Crétacé ou du Néogène.

La lithologie du sous bassin versant de l'oued Fergoug fait apparaître une grande diversité des formations superficielles avec prédominance des sols argileux issus des formations marneuses (Figure III.3) (Bouchetata. A et Bouchetata. T, 2006) [49].

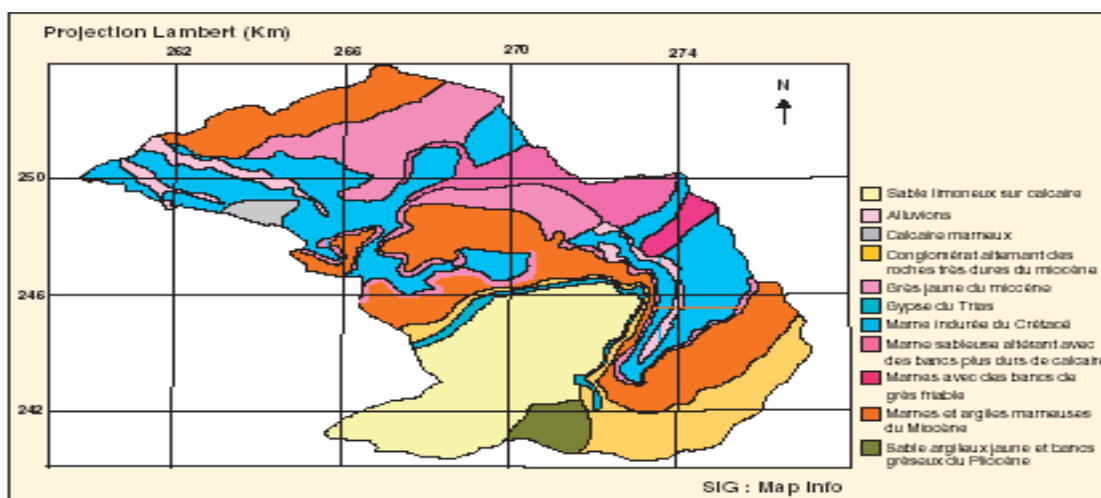


Figure III.3 : Carte lithologique du sous bassin versant de l'oued Fergoug (Bouchetata. A et Bouchetata. T, 2006) [49].

III.2.3 - Entraînement des sédiments en aval

De 1986 à 1989 un volume de 10 millions de m³ de vase a été dragué par drague suceuse. Ce volume a été pompé puis transporté à l'aide de conduite forcée jusqu'à une aire de stockage – rejet située en aval de la retenue. La plaine de l'Habra en aval du barrage, a été modifiée par l'entraînement et l'accumulation de ces vases.

Depuis sa construction, le barrage de Perrégaux a transformé la région de la grande plaine de l'Habra. De vastes régions défrichées ont été transformées en terres agricoles très fertiles améliorées par la maîtrise de l'irrigation. Mais d'autre part, les différentes ruptures de la digue ont entraîné l'accumulation des boues et leurs dépôts successifs ont été la cause de la formation de zones marécageuses.

Depuis la reconstruction du barrage et sa nouvelle mise en eau en 1970, le barrage résiste mieux aux apports liquides des crues. Malheureusement les particules solides se retrouvent piégées dans la cuvette et accélèrent ainsi l'envasement.

Suite aux dragages, les matériaux déposés sans protection adaptée sont resoumis à l'érosion depuis leurs aires de stockage et leur entraînement vers la plaine de l'Habra continue encore de façon spectaculaire. Les photos III.3 et III.4, montrent l'ampleur du phénomène d'érosion – entraînement des vases.



Photos III.3: Rejet de la vase draguée.



Photos III.4: Entraînement de la vase déposée en aval du barrage

III.2.4 Les conséquences environnementales.

La situation écologique est qualifiée de catastrophique. Nous énumérons ci-après les principaux désordres apparus:

- Dépôts et consolidation des vases dans le lit du cours d'eau.
- Le relèvement des lits a provoqué l'inondation des berges aux moindres pluies.
- La consolidation des particules solides a abouti à l'obturation des zones d'infiltration qui alimentent les nappes souterraines d'où l'assèchement des sols sous-jacents.
- Transformation des terres agricoles en marécages.
- Disparition des vergers (principalement les agrumes et les oliveraies) sur toute la région de Perrégaux.

III.3 - Présentation des échantillons

Le prélèvement des échantillons effectué en mars 2013 a été réalisé manuellement à l'aide d'une pelle à une dizaine de mètres de la rive droite du barrage, voir photos III.5, et III.6 et la figure III.2.



Photo III.5: Prélèvement de La vase



Photo III.6 : La vase dans des bac

III.4 - Etude d'identification géotechnique

Nous nous intéressons à l'identification de notre vase dans des applications en génie civil notamment on technique routière.

La géotechnique routière s'appuie sur un certain nombre d'essais communs avec la mécanique des sols et sur certains essais spécifiques qui permettent d'évaluer le comportement et les conditions de mise en œuvre des sols de la plate-forme support de chaussée.

Identifier un sol, c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques ou chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées par des essais

simples et rapides, appelés « essais d'identification ». L'identification géotechnique telle qu'elle est pratiquée actuellement dans les laboratoires routiers algériens s'effectue selon des modes opératoires établies par la norme française.

Notre travail expérimental consiste à effectuer une campagne d'essais pour déterminer un bon nombre de paramètres et d'indices permettant l'identification de la vase prélevé sur le site du barrage de Fergoug.

➤ Concernant l'identification de la vase de la retenue, on distingue les analyses et les essais suivants :

- la teneur en eau naturelle $W(\%)$;
- analyse granulométrique (par tamisage et sedimentométrie) ;
- poids spécifiques des grains ;
- les limites d'Atterberg ;
- essai au bleu de méthylène ;
- Teneur en matières organiques (MO%) ;
- Teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) ;
- analyse chimique et minéralogique ;
- Détermination du PH ;
- Caractérisation de portance et de compactage du sédiment

III.4.1. Teneur en eau naturelle $W(\%)$

La teneur en eau représente un paramètre important, car elle définit l'état hydrique du matériau et intervient directement lors de la valorisation en matériaux routiers. Les sédiments étudiés sont des matériaux de couleur grise. La phase organique présente une sensibilité à la température ; pour cela, les sédiments ont été séchés en étuve à 40°C , selon la norme **NF P 94-050**.

La teneur en eau est définie en (%) comme le rapport de la masse humide sur la masse sèche.

$$W(\%) = \frac{\text{masse eau}}{\text{masse sèche}} \times 100 \quad [\text{Eq III.1}]$$

Les résultats obtenus du prélèvement sont reportés dans le **Tableau III.2** A titre de comparaison Nous avons comparé les teneurs en eau mesurées dans cette étude avec celles obtenues par semcha ., 2009 et Mekarta, 2011 sur le même site étudié.

Tableau III.2 : La teneur en eau naturelles des deux sédiments dragués du barrage Fergoug

| Matériau | La teneur en eau naturelles (%) | La teneur en eau naturelles (%) / Mekarta en | La teneur en eau naturelles (%) / Semcha en |
|--------------------------------|---------------------------------|--|---|
| sédiment du barrage de Fergoug | 65,36 | 90 | 82,25 |

Les résultats montrent que les teneurs sont très élevées, mais restent variables et dépendent des conditions climatiques (hiver, été), des méthodes de prélèvement, de la nature du matériau et du site de prélèvement.

III.4. 2. Analyse granulométrique

Le sédiment est une matrice relativement hétérogène constituée d'eau, de matériaux inorganiques et de composés anthropiques [Bonnet, 2000] [9]. Généralement le sédiment est décrit par sa composition minéralogique et sa structure. Dans le secteur des travaux routiers, pour une classification des matériaux selon le « Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme » [GTR. 1992], la distribution granulométrique constitue le premier paramètre d'entrée dans les tables de classification.

L'analyse granulométrique de cette étude s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

- le tamisage par voie humide pour des particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme (NF P94-056, 1992). Cette méthode consiste à fractionner un matériau granulaire au moyen d'une série de tamis de taille décroissante (Figure III.4). Les dimensions des mailles sont choisies en fonction du but de l'essai et de la nature des échantillons. La vase ont été passés par des tamis de $80\mu\text{m}$,.....5mm. Après avoir versé les sédiments dragués sur le tamis supérieur, on doit agiter les tamis manuellement ou mécaniquement ou bien mélanger les matériaux en les trempant avec de l'eau comme dans notre cas. Après tamisage, les refus sont récupérés et séchés jusqu'à atteindre leur masse sèche. La fraction inférieure à $80\mu\text{m}$ est alors analysée grâce au sédimentométrie par densimètre (NF P94-057, 1992).



Figure III.4 : Tamis à mailles carrées

- la sédimentométrie par densimètre (*NF P94-057, 1992*), est une analyse qui complète celle faite par tamisage, elle est réalisée pour des particules ayant un diamètre $< 80\mu\text{m}$, Le principe de cette essai est fondé sur la loi de stockes (*Equation III.2*). Cette loi exprime la relation qui existe entre la vitesse de décantation et le diamètre d'une particule sphérique, elle s'écrit sous la forme :

$$v = \frac{2 r^2 g \Delta (\rho)}{9\mu} \quad [\text{Eq III.2}]$$

v : vitesse de décantation de la particule (m/s)

r : rayon de la sphère (m)

g : accélération (m/s^2)

$\Delta (\rho) = d_p - d_f$: différence de la masse volumique entre la particule et le fluide (Kg /m^3)

μ : viscosité du fluide (Pa.s)

L'analyse par sedimentométrie du sédiment du barrage de Fergoug, (Photos III.7) nous a conduits aux résultats présentés dans la figure III.5



Photos III.7: Détermination de la distribution granulométrique par l'essai de sedimentometrie

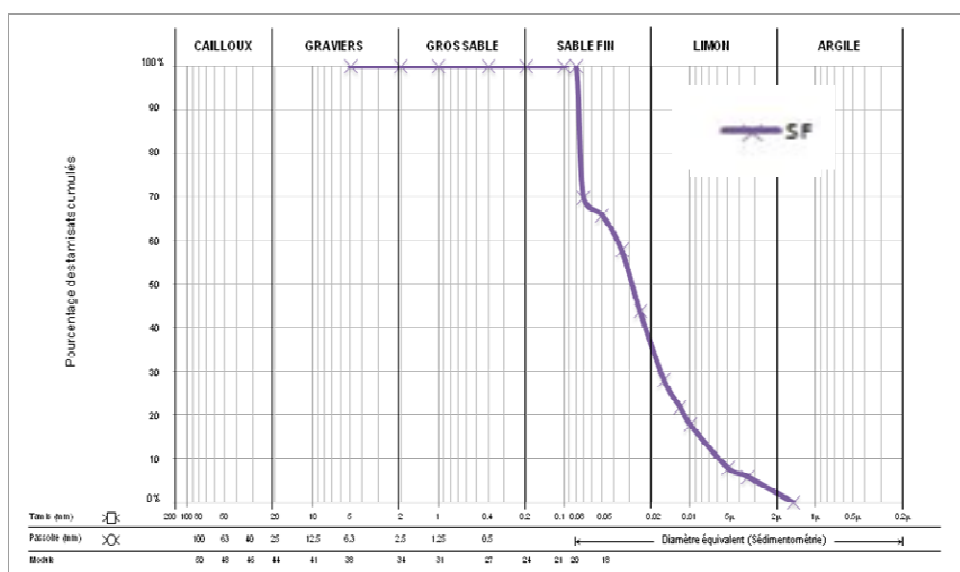


Figure III.5: Courbe granulométrique de la vase brut

Afin de décrire le degré d'étalement et l'uniformité de la granulométrie, plusieurs indices sont employés : C_U (Equation III.3), C_C (Equation III.4). Ces coefficients C_U et C_C sont immédiatement calculés à partir de la courbe granulométrique (Tableau III.3).

Si $C_U < 2$, la granulométrie est uniforme (ou serrée).

Si $C_U > 2$, la granulométrie est étalée (ou variée).

Si C_C est compris entre 1 et 3, la granulométrie est bien graduée.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad [EqIII.3]$$

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad [Eq III.4]$$

Avec : D_y : dimension du tamis correspondant à %S de passants.

C_U : coefficient d'uniformité

C_C : coefficient de courbure

D'ailleurs, on peut améliorer les distributions granulométriques en améliorant les indices C_U et C_C . Pour avoir une granulométrie bien graduée et étalée, le coefficient de courbure (C_C) doit être compris entre 1 et 3 ($1 < C_C < 3$), et le coefficient d'uniformité (C_U) doit être supérieure à 6 ($C_U > 6$).

Tableau III.3 : Caractéristiques granulométriques des sédiments du barrage de Fergoug

| Paramètres | Granulométrie par sedimontométrie + tamisage |
|---|---|
| Grains < 2 μ m (argile) (%) | 2 |
| 2 μ m < Grains < 63 μ m (limon) (%) | 33 |
| >63 μ m (sable fin) (%) | 65 |
| D10 | 0,006 |
| D30 | 0,017 |
| D60 | 0,039 |
| Cu | 6,54 |
| Cc | 1,3 |

L'analyse de la courbe granulométrique de sédiment étudié nous montre une distribution des particules caractérisant d'un sol à granulométries fine. Ces sédiments sont composés majoritairement de limon (2 μ m < grains < 63 μ m) de pourcentage de 33 % avec des pourcentages d'argile de 2%. Une présence de particules sableuses supérieures à 63 μ m assez ponctuelles est obtenue (% de sables 65%). Le calcul des coefficients d'uniformité, ($C_U = d_{60}/d_{10} = 6,54 > 2$) et de courbure, ($C_C = d_{30}^2 / (d_{10} d_{60}) = 1,3 > 1$) ces résultats montrent que ce sédiment présente une granulométrie étalée et bien graduée.

Donc, on peut juger suivant cette portion granulométrique présentée dans le tableau III.3 qu'on est en présence d'un sol à prédominance sableux- limoneuse.

III.4. 3. Mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre (γ_s) (NF P 94-054)

La masse volumique absolue des sédiments, (ρ_s), est la masse par unité de volume des sédiments qui constituent le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Il ne faut pas confondre la masse volumique absolue, (ρ_s), avec la masse volumique, (ρ), qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

Principe

L'échantillon, séché et pesé, est transféré dans un pycnomètre calibré et taré. Il permet de mesurer des volumes avec une grande précision. Dans cette méthode, nous cherchons la formule de la masse volumique. On l'obtient à partir des mesures et de la formule suivante :

$$M_3 = M_1 + M_2 - \left(\frac{M_2}{\rho_s}\right)\rho_e \quad [Eq III.5]$$

Il s'agit alors de transformer la formule pour obtenir:

$$\rho_s = \frac{M_2 \rho_e}{M_1 + M_2 - M_3} \quad [Eq III.6]$$

Avec :

M1 : la masse du pycnomètre rempli d'eau distillée jusqu'au niveau du trait repère [g],

M2 : la masse d'un échantillon de sédiment sec (environ 50g) [g],

M3 : la masse d'ensemble eau-pycnomètre-échantillon [g],

ρ_e : la masse volumique de l'eau [g/cm³],

ρ_s : la masse volumique d'un échantillon [g/cm³].

Résultats

La masse volumique des particules solides des sédiments obtenue dans notre cas correspond à la moyenne des mesures effectuées sur cinq échantillons de sédiments a donné la valeur suivante de $\rho_s = 2.68 \text{ g/cm}^3$.

III.4. 4. Limites d'Atterberg

Les sols argileux ont toujours posé de nombreux problèmes dans le domaine de la géotechnique. Cela est dû aux propriétés particulières des argiles qui ont la faculté d'échanger des ions avec le milieu environnant, de s'humidifier ou de se dessécher, entraînant selon les cas une perte de résistance, un gonflement ou un retrait important. Les conséquences engendrées par ces phénomènes peuvent se traduire par des fissures importantes, une perte de portance du sol ou encore des glissements de terrain [Lautrin, 1989] [8]. Ce comportement dépend également du type d'argile rencontrée. Par exemple de montmorillonite dans un sol est beaucoup plus préjudiciable que celle de kaolinite. Par conséquent, en technique routière, la quantité et la nature des argiles contenues dans un sol sont des paramètres qui interviennent en premier lieu dans le type d'application pouvant être envisagée et dans le choix d'un traitement au liant ou à la chaux à apporter. Dans une moindre mesure, les conditions de

réalisation du mélange dépendent également de ce facteur. Avant toute opération de construction routière, il est donc indispensable d'évaluer l'argilosité des matériaux utilisés.

La mesure des limites d'Aterberg a été réalisée selon la norme Française Sol.

L'essai s'effectue en deux phases:

- limite de liquidité notée W_L (NF P 94-052-1): mesurée à la coupelle de Casagrande (Figure III.6), représentant la teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide (le sol est humide et déformable) et un état plastique ;



Figure III.6 : Coupelle de Casagrande

- limite de plasticité notée W_P (Norme NF P 94-051): mesurée à la méthode au rouleau (Figure III.7), représentant la teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide.



Figure III.7 : Rouleau de sol fin

La plage de teneur en eau contenue entre ces deux limites donne un paramètre géotechnique caractéristique, **l'indice de plasticité**, qui est utilisé de manière très généralisée dans les classifications de sol, et en particulier dans le GTR (GTR, 2000) (Figure III. 8).

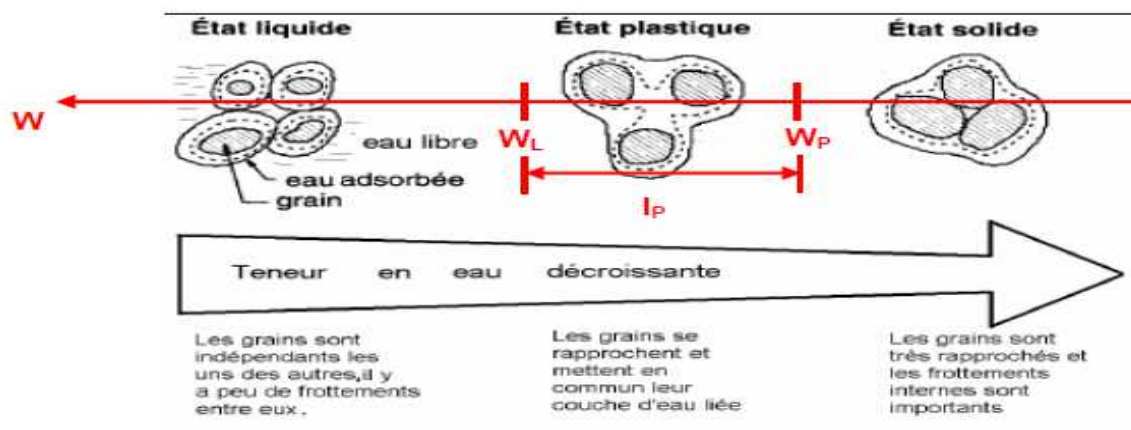


Figure III. 8 : Définition des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité

a. limite de liquidité (WL)

La limite de liquidité est déterminée à l'aide de la méthode de Casagrande (*Norme NF P 94 051*). L'essai consiste à déterminer la relation entre la teneur en eau et le nombre de chocs imposés à une coupelle contenant le matériau. Un échantillon de sédiment est mis en place à la spatule, de façon bien homogène. L'épaisseur au centre est de 15 à 20, le pourtour étant sensiblement horizontal. A l'aide de l'outil à rainurer, il faut creuser une rainure dans la pâte contenue dans la coupelle puis tourner la manivelle afin de provoquer le choc de celle-ci sur le bloc de bois dur. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1 cm de longueur en 25 chocs. L'échantillon doit être à une teneur en eau légèrement supérieure à la limite de liquidité, afin de pouvoir commencer l'essai avec une fermeture du sillon en 15 coups environ. La limite de liquidité est déterminée à partir de la représentation graphique de la teneur en eau w , mesurée à chaque essai, en fonction du logarithme du nombre de coups correspondant. La limite de liquidité est la teneur en eau lue sur le graphique pour $N=25$ coups.

Les résultats montrent que la valeur de la teneur en eau correspondant à 25 chocs de la coupelle est d'environ **58,16%**.

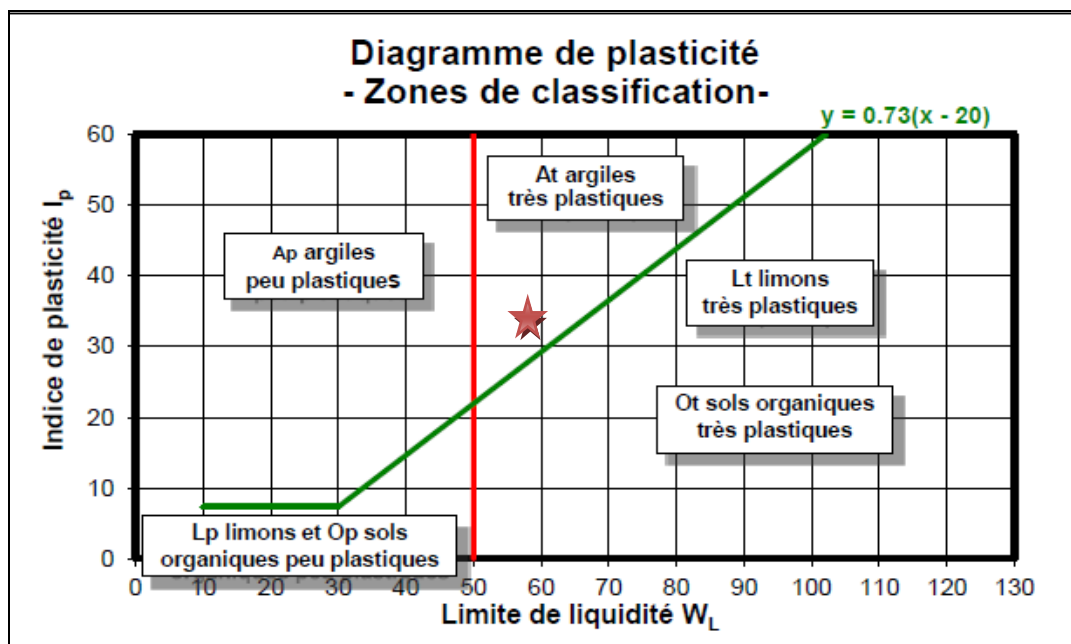
b. Limite de plasticité (Wp)

La limite de plasticité WP est inférieure à WL. Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise lorsque son diamètre atteint 3mm. Cette teneur en eau doit être déterminée immédiatement après le test selon la procédure décrite lors de la détermination de WL. Le cylindre terminé doit avoir de 10 à 15 cm de longueur. Pour déterminer la limite de plasticité, on fait une boulette de matériau grosse comme une noisette

(environ 12 mm de diamètre) et ensuite on fait un cylindre en la roulant sur la plaque plane, par un mouvement alternatif d'environ un aller et retour par seconde. La limite de plasticité (WP) a été déterminée en utilisant le processus décrit ci-dessus. Elle est de **24,93 %** pour les sédiments utilisés dans notre étude. L'indice de plasticité est l'écart entre la limite de plasticité et la limite de liquidité ($IP = WL - WP$). Le tableau ci-dessous présente les limites d'Atterberg des sédiments. Par définition, l'activité est le rapport de l'indice de plasticité au pourcentage la fraction argileuse ($Activité = IP/ J$).

Tableau III.4: Limites d'Atterberg des sédiments du barrage de Fergoug

| Matériau | limite de liquidité WL(%) | limite de plasticité WL(%) | indice de plasticité Ip(%) | la limite de retrait Wr(%) |
|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| sédiment du barrage de Fergoug | 58,16 | 24,93 | 33,23 | 10 |



★ sédiments du barrage de Fergoug

Figure III.9 : Diagramme de plasticité de Casagrande pour les sédiments du barrage de Fergoug [6]

Les résultats obtenus donnent des limites de liquidité élevées ($WL > 50\%$). Par utilisation des résultats obtenus à la coupelle de Casagrande, on pourra classer le sédiment de Fergoug à l'aide du diagramme de plasticité de Casagrande (Figure III.9) dans la catégorie des sols **argileux très plastiques (At)**.

III.4. 5. Essai au bleu de méthylène (VBS)

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier l'activité argileuse. Dans cette étude, l'essai est réalisé suivant la norme NF P 94 068. Il consiste à déterminer la quantité du bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire de la surface des particules d'un matériau en suspension dans l'eau. Ce paramètre intervient dans la classification GTR (GTR, 2000), pour caractériser les sols fins et pour distinguer les différentes familles de sols.

Les relations entre la teneur en matière organique et la valeur au bleu sont complexes car la surface spécifique du sol et sa capacité d'échange en cations sont conditionnés par son degré d'humification.

La capacité d'adsorption du matériau est déterminée à l'aide du test de la tache. Ce dernier consiste à former avec une goutte de la suspension sur du papier filtre normalisé, une tache qui est le dépôt de sol coloré en bleu, entouré d'une zone humide en générale incolore (Figure III.10).

L'excès du bleu se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole d'un bleu clair. Le test est alors positif.

$$\text{La valeur du bleu } V_B = \frac{\text{Quantité du bleu adsorbée (cm}^3\text{)}}{\text{Poids sec de la prise}} \quad [\text{Eq III.7}]$$

Cette quantité est en fait directement liée à la surface spécifique totale des particules du sol (S_{st}), sous la formule qui a été mise en évidence par Gaillabaud et cinot (1982) (in Gueddouda. M, 2005) [23].

$$S_{st} = 21 V_B (0/2 \mu\text{m}) \quad [\text{Eq III.8}]$$

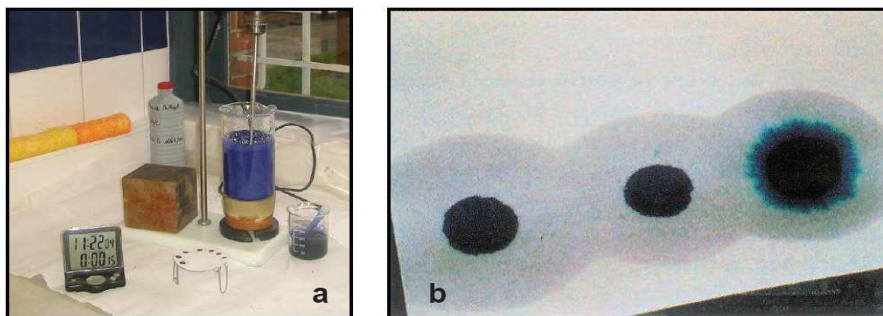


Figure III.10 : a) Mise en œuvre de l'essai au bleu de méthylène ; b) Test de la tache

Les résultats obtenus à partir de l'essai du bleu sont résumés dans le tableau III.5

Tableau III.5 Paramètres tirés de l'essai au bleu.

| Paramètres | Valeurs |
|---------------------------------------|---------|
| Valeur de bleu V_B (%) | 5,4 |
| Surface spécifique totale (m^2/g) | 115,5 |

❖ Classification de la vase selon les paramètres de l'essai :

Tableau III.6: Classification des sols d'après Philipponat.

| La valeur de bleu | Type de sol |
|-------------------|------------------------|
| $V_B < 0.2$ | Sols sableux |
| $0.2 < V_B < 2.5$ | Sols limoneux |
| $2.5 < V_B < 6$ | Sols limoneux argileux |
| $6 < V_B < 8$ | Sols argileux |
| $V_B > 8$ | Sols très argileux |

D'après la classification de Holtz et Gibbs (in Habib. P, 1997) [36] notre sol peut être classées suivant leur surface spécifique selon le tableau III.7:

Tableau III.7: Classification d'après Holtz et Gibbs.

| Argiles | Surface spécifique (m^2 / g) |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Montmorillonite $Ca^{++} Na^{++}$ | 300 à 800 |
| Illite | 40 à 60 |
| Kaolinite | 5 à 20 |
| Elément non argileux | 1 à 3 |

❖ Commentaire

- D'après la classification de Philipponat [50] la valeur du bleu de notre vase est inférieure à 6, appartient aux sols limoneux argileux.
- D'après la classification de Holtz et Gibbs [50], basée sur la surface spécifique totale, la vase présente un mélange entre les minéraux Illite et Montmorillonite calcique.

III.4. 6. Teneur en matières organiques (MO%)

La présence des matières organique influence sur les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau. Il est donc un point essentiel pour l'identification du matériau. La mesure de cette teneur en MO peut s'effectuer selon deux procédés:

a. La méthode Chimique : L'essai consiste a déterminer, par un procède chimique, la teneur en carbonate d'un échantillon de sédiment brut du barrage Fergoug . elle consiste a prendre une prise de l'échantillon préparé et mélangée a une solution oxydante de caractéristique et de

quantité connues, une fois l'oxydation réalisée, il est procédé au dosage de la quantité de produit a réagir avec le carbone dans l'échantillon. La teneur en MO c'est le quotient de la masse de matière organique contenue dans un échantillon de sol par la masse des particules solides selon la norme (NFP 94-055 AFNOR 1993).

b. La méthode Par calcination C_{MOC} : elle consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon préalablement sèche, après calcination dans un four à une température comprise entre 450°C et 500 °C. la teneur en MO est par définition le rapport de la masse de matières organiques contenues dans un échantillon détruites par calcination sur la masse sèche des particules solides avant la calcination de la fraction du matériau passant au tamis de 2 mm. (NFP 94-047 AFNOR 1998).

Le tableau III.8 montre les valeurs obtenues de la teneur en matière organique de sédiment étudié.

Tableau III.8: Estimation du pourcentage de la matière organique

| Température | 50°C | 450°C |
|---|--------|--------|
| Poid de la tare (g) | 85,88 | 85,88 |
| Poids total sec (g) | 125,84 | 122,97 |
| Poids de la matière organique (g) | 2,87g | |
| Pourcentage de la Matière organique (%) | 7,17 % | |

III.4.6.1. Classification géotechnique des sols organiques

En France, on peut citer deux classifications qui répondent à ce besoin et intéressent le domaine routier :

- la classification LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussée), qui date de 1965 et est tirée de la classification américaine USCS.
- la classification du GTR (guide technique du terrassement) qui est affiliée à la première mais qui concerne le domaine particulier des terrassements.

Les Figure III.11 et III.12 illustrent la position des seuils de teneur en matière organique dans ces deux classifications.

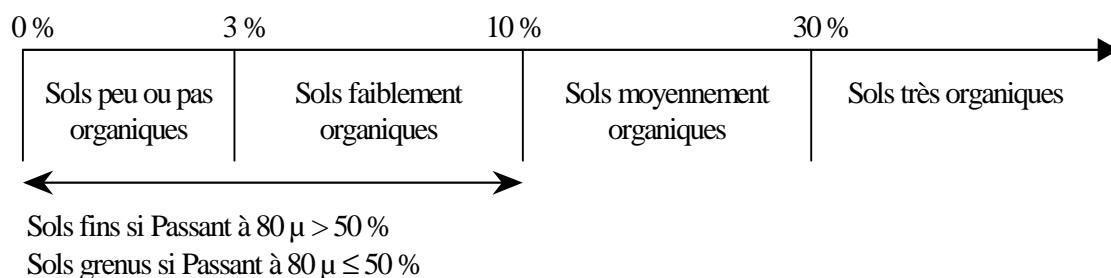


Figure III. 11 : Seuils de teneur en matière organique dans la classification LPC

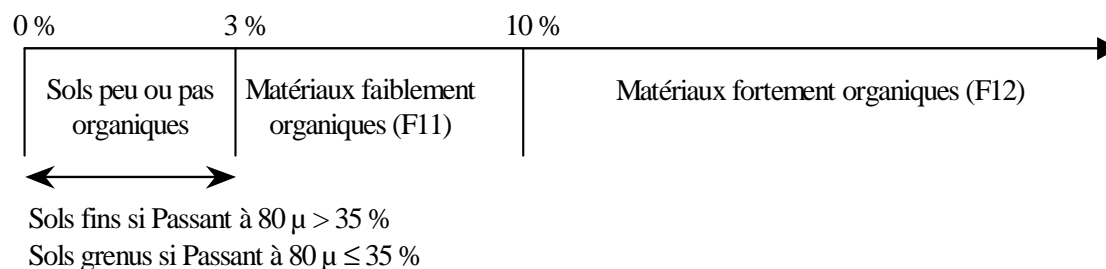


Figure III. 12: Seuils de teneur en matière organique dans la classification GTR [25]

❖ Commentaire

D'après les deux classifications LPC et GTR, notre vase appartient au groupe de sol faiblement organique (% de la matière organique de 7,17%) < 10%). En comparaison avec d'autres études sur le même site, teneur en matières organiques des sédiments sont presque similaires par rapport aux sédiments prélevés en 2006 qui présentent une teneur 8,6 % [Semcha. A] et 8,3 % en 2004[Mekerta. B]

III.4. 7. Teneur en carbonate de calcium CaCO_3

Afin de déterminer la teneur en carbonate de calcium, on utilise le calcimètre Dietrich-Fruhling (**Photo III.8**). L'essai consiste à une attaque d'une prise d'essai sur le sédiment de Fergoug (fraction granulométrique < 0,2 mm) par l'acide chlorhydrique (HCl) concentré.

La teneur en carbonate (W_{CaCO_3}) de calcium d'un échantillon de sol est le rapport entre du volume de gaz carbonique (CO_2) dégagé par 0,5g d'échantillon au volume de gaz carbonique (CO_2) dégagé après attaque dans les mêmes conditions d'une prise d'essai de carbonate de calcium pur.

$$W_{\text{CaCO}_3} (\%) = \frac{\text{Volume de gaz carbonique (CO}_2\text{) dégagé par 0,5g d'échantillon}}{\text{Volume de gaz carbonique (CO}_2\text{) dégagé par 0,5g d'échantillon}}$$

La réaction qui se produit est de forme



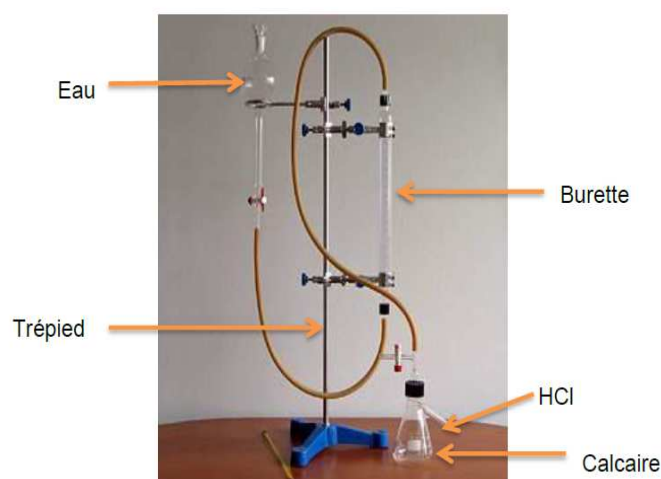


Photo III.8 Appareil de calcimétrie

D'après cet essai la teneur de carbonate de calcium est de l'ordre de **21,08%** indiquant qu'on est en présence d'une argile marneuse ($10\% < \%CaCO_3 < 30\%$) (Tableau III.9).

Tableau III. 9 : Classification du sol en fonction de la Teneur en $CaCO_3$ [51]

| Pourcentage de $CaCO_3$ | Dénomination |
|-------------------------|----------------------------------|
| 0 à 10 | Argile ou limon |
| 10 à 30 | Argile marneuse ou limon marneux |
| 30 à 70 | Marne |
| 70 à 90 | Calcaire marneux |
| 90 à 100 | Calcaire |

III.4. 8. Caractérisation chimique et minéralogique du sédiment

Une bonne connaissance des minéraux présents dans ces sédiments est indispensable pour mieux connaître le matériau et anticiper l'influence de certains minéraux qui risque d'engendrer des problèmes dans le processus de la valorisation.

III.4. 8.1. Analyse chimique

L'analyse chimique de la vase du Fergoug a été effectuée par Laboratoire L.NHC de Sidi Bel Abbes en septembre 2013. Les résultats des analyses sont regroupés dans le Tableau III.10

Tableau III.10 : Analyse chimique de la vase de barrage Fergoug (L.N.H.C du Sidi Bel Abbes en septembre 2013).

| Caractéristiques | Symboles | Unités | Teneurs |
|------------------------|--------------------------------|--------|---------|
| Silice | SiO ₂ | % | 62,68 |
| Chaux | CaO | % | 12,51 |
| Magnésie | MgO | % | 0,37 |
| Alumine | Al ₂ O ₃ | % | 7,39 |
| Oxyde de Fer | Fe ₂ O ₃ | % | 0,71 |
| Sulfates | SO ₃ | % | 0,17 |
| Chlorures | CL | % | Nul |
| Perte au feu | P.F ² | % | 16,39 |
| Total | | % | 100,22 |
| Carbonates | CaCO ₃ | % | 22,73 |
| L'anhydride Carbonique | CO ₂ | % | 10 |
| Eau de combinaison | H ₂ O | % | 6,39 |

❖ Commentaire

Sur la base des résultats du tableau III.10, les principaux constituants minéralogiques de la vase sont: La silice, suivie des carbonates ; ensuite la chaux et enfin de l'alumine. La silice et l'alumine sont des minéraux qui constituent la structure des argiles. La classification du tableau III.3, ainsi que la présence de la teneur en carbonate de calcium, nous indique que la vase appartient au groupe des argiles marneuses. Par ailleurs, on remarque que la perte au feu est assez importante, ce qui prouve l'existence des matières organiques dans la vase.

III.4. 8.2. Diffraction des rayons 'X'

Les vases du barrage Fergoug qui ont été utilisées pour cette étude ont déjà fait l'objet d'une caractérisation approfondie ((Semcha. A, 2005) [13]. Nous n'en donnerons ici que les principaux caractères.

L'essai au diffractomètre aux rayons X a permis de déterminer les différentes proportions de minéraux constituant l'échantillon. L'essai est effectué par l'institut de géologie générale et appliquée de l'Université de Munich, au profit de l'E.N.R.B, ont mis en évidence des constituants principaux (plus de 25 %), secondaires (10-25 %) et accessoires (moins de 10 %).

Des analyses minéralogiques complémentaires ont donné globalement les compositions suivantes en supposant que toute l'alumine est sous forme de Kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). (Voir figure III.13)

Fergoug : 15 % de Kaolinite (dont 33 % de silice contenue dans la Kaolinite)

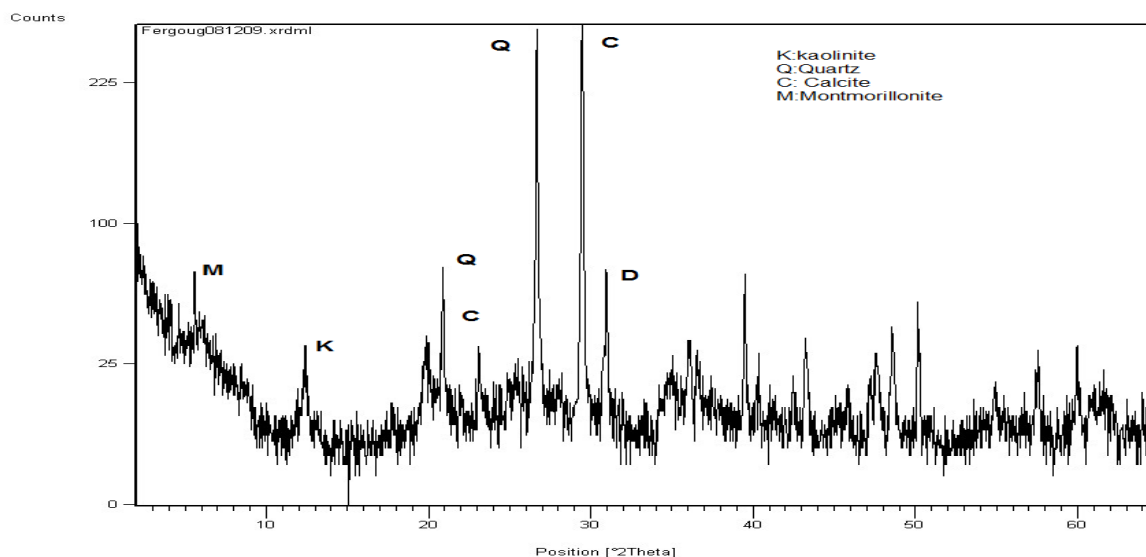


Figure III.13 : Courbe DRX de la vase de Fergoug .

❖ Commentaire

Les résultats des analyses aux diffractions des rayons X faites sur la vase de Fergoug, nous donnent une idée sur les principaux minéraux cristallins par l'existence des raies caractérisant le Quartz (SiO_2) avec des pics importants, suivis des carbonates (calcite (CaCO_3) et (dolomite), et une petite quantité d'Alumine (Al_2O_3) représentée sous forme de Kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (voir figure III.13). Ces résultats devront être confirmés par d'autres analyses quantitatives plus détaillées.

III.4. 8.3. Observation MEB

L'analyse par microscopie électronique à balayage de la vase du barrage de Fergoug permet d'avoir un aperçu des grains avec leur composition (Figure III.14). Sur le cliché, nous avons pu détecter la silice et l'alumine présentés dans la vase étudiées.

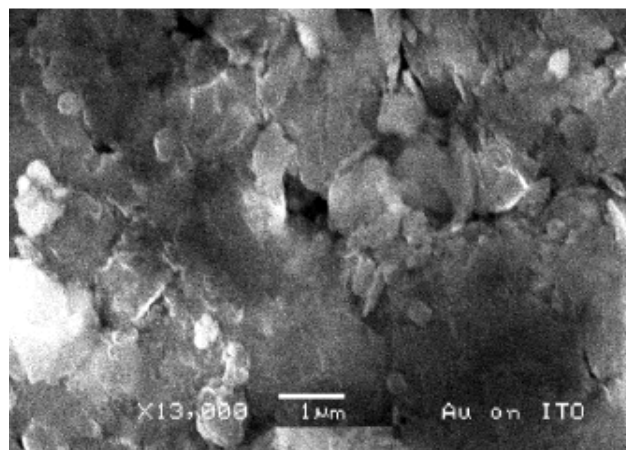


Figure III.14 : Micrographie MEB de la vase du barrage de Fergoug .

III.4. 8.4. Analyse thermogravimétrie (ATG)

Elle permet d'identifier les principaux minéraux par leur perte de poids, autrement dit, le départ de l'eau, formée à partir de la deshydroxylation des OH liés aux différents cations, et du CO₂ suite à la décomposition des carbonates. Les analyses ont été réalisées à l'aide d'une balance thermogravimétrique (TGA-50 Shimadzu) au laboratoire de chimie inorganique de l'université de Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Un échantillon finement broyé est porté de la température ambiante à 900°C à une vitesse relativement lente (5°C/minute), afin de suivre, et d'optimiser les phénomènes de pertes de poids.

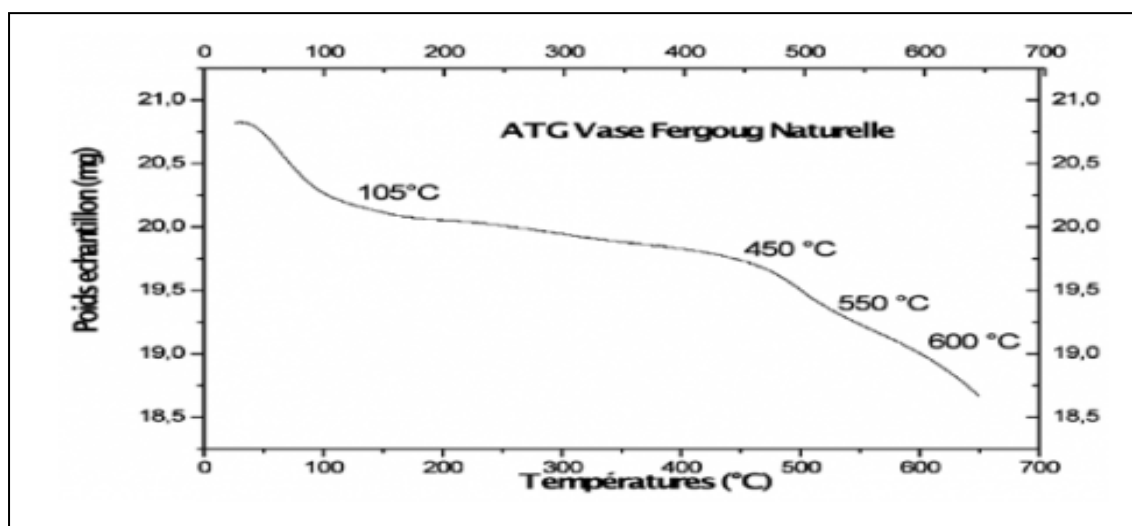


Figure III. 15 : Courbe ATD de la vase de Fergoug

❖ Commentaire

D'après la courbe de l'analyse thermogravimétrique (ATG) effectuée sur la vase naturelle (Figure III.15), on note une perte de poids quasi linéaire jusqu'à 105°C

correspondant au départ de l'eau libre, une variation très faible (un amortissement) entre 105°C jusqu'à 450°C, une perte considérable entre 450°C et 550°C correspondant à l'élimination de l'eau de constitution de la Kaolinite et une perte plus importante au-delà de 600°C marque l'existence du carbonates.

III.4. 9. Détermination du pH

Le pH est une donnée essentielle dans notre étude car la mobilité des éléments chimiques peuvent être dépendante du pH du milieu La mesure du pH est réalisée par LTPO, décrite par la norme **NF X 31-103**. Le principe de la méthode est la mise en équilibre ionique d'une certaine masse de solide avec un volume donné d'eau déminéralisée. La norme consiste à peser 10g de sédiment et d'ajouter 25 ml d'eau distillée dans un bécher. Ensuite, la solution est agitée pendant 60min par un agitateur magnétique dans une pièce dont la température ambiante est $20\text{C}^{\circ} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La suspension obtenue est laissée au repos pendant 2h et le pH est mesuré avec un pH-mètre Photo III.9. On obtient un pH de **8,41** ce qui indique que la vase du barrage de Fergoug. Présente un caractère nettement basique



Photo III.9 : Mesure de l'acidité de sédiment de drague par un appareil de pH-mètre -LTPO-

III.4. 10. Caractérisation de portance et de compactage du sédiment étudié

Dans cette partie, nous étudions l'évolution de la densité sèche et l'Indice Portant Immédiat (IPI) en fonction de la teneur en eau. L'emploi des sédiments dans les couches de route doit satisfaire des conditions minimales de portance [GTS, 2000]. Dans cette partie, les travaux réalisés ont concerné le sédiment du barrage de Fergoug.

III.4. 10. 1. Essai Proctor Normale

Il existe deux types d'énergie de compactage et donc deux types d'essai Proctor : l'essai Proctor Normal et Modifié. En construction de remblai en grande masse, on se réfère plutôt à l'essai Proctor Normal ; en couches de chaussée, on se réfère à l'essai Proctor Modifié qui est réalisé avec une énergie de compactage supérieure. C'est donc l'essai Proctor Normal qui sera utilisé sur notre vase, il est réalisé suivant la norme **NF P 94-093**.

III.4. 10. 1. a. Principe

Des essais Proctor Normale ont été effectués sur le sédiment de Fergoug afin de mesurer sa teneur en eau w (%) et sa densité sèche γ_d (g/cm³). La courbe $\gamma_d = f(w)$ présente un maximum qui correspond à la teneur en eau et la densité optimale de compactage (w_{OPN} et $\gamma_{d_{OPN}}$) [Venuat, 1980] .

III.4. 10. 1. b. Protocole opératoire

Pour cet essai, ont été pratiqués sur un moule CBR, placé sur une embase et muni d'une hausse (Figure III. 16). Un disque d'espacement est disposé au fond du moule. Les différentes pièces étant assemblées, le matériau, préalablement malaxé avec une certaine quantité d'eau, est introduit dans le moule en 3 fois. Entre chaque ajout, on procède à un compactage de la couche avec une dame en respectant un protocole suivant : 56 coups par couche, appliqués par séries de 7 comme indiqué figure **17-a**. A la fin de l'essai, la hausse est retirée et on arase la surface du moule. Connaissant sa masse et son volume (dimensions normalisées : $\varnothing = 152$ mm; $H = 126,6$ mm), on peut déterminer la masse volumique humide ρ_h du matériau compacté. La teneur en eau, obtenue par étuvage à 105°C, permet ensuite de calculer sa masse volumique sèche γ_d . En faisant varier les teneurs en eau, on trace la courbe $\gamma_d = f(w)$ et on détermine son maximum.



Figure III. 16: Matériel de l'essai Proctor Normale

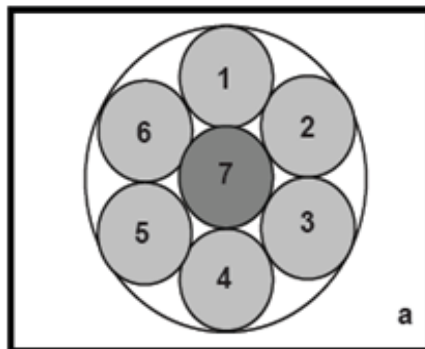


Figure III.17 : a) Protocole de compactage

b) Aspect du moule à la fin de l'essai

III.4. 10.2. Détermination de l'IPI

III. 4. 10.2. a. Principe

En association avec l'essai Proctor Normale, des mesures de poinçonnement sur les éprouvettes compactées sont réalisées afin d'estimer l'indice de portance immédiat (IPI) [Norme NF P 94 078]. Ce paramètre permet d'évaluer l'aptitude d'un matériau à supporter directement sur sa surface la circulation des engins de chantier. Par convention, l'IPI est la plus grande des 2 valeurs suivantes :

Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en kN) ×100

13,35

Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN) ×100

20

III. 4. 10.2. b. Protocole opératoire

L'essai de poinçonnement est effectué immédiatement après l'essai Proctor. Pour préparer l'échantillon, on retourne le moule CBR, on retire le disque d'espacement (ce qui permet

d'obtenir une surface plane) et on remplace l'ensemble sur l'embase. Nous avons utilisé une presse de la société Wykeham Farrance d'une capacité de 50 kN. Le poinçon est monté sur un anneau dynamométrique de 50 kN, préalablement étalonné. La précision de la mesure de la force est de 21 N. Un comparateur au 100e de millimètre disposé entre le piston et le moule permet de connaître la valeur de l'enfoncement (photo III.10). Une fois l'échantillon correctement centré sur le plateau de la presse, le poinçon est mis en contact avec le matériau afin de régler le comparateur à zéro. Ensuite, le plateau de la presse est actionné à la vitesse constante de 1,27 mm/min et on relève les forces qui correspondent aux valeurs d'enfoncement de 2,5 mm et 5 mm. En traçant sur le même graphe la courbe $IPI = f(w)$, il est possible de déterminer la portance du matériau à l'optimum Proctor.



Photo III.10 : la presse pour mesurer l'IPI

Nous présentons ce dessous les paramètres de compactage et de portance du sédiment brut sur la figure III. 18 et les résultats des analyses sont regroupés dans le Tableau III.11

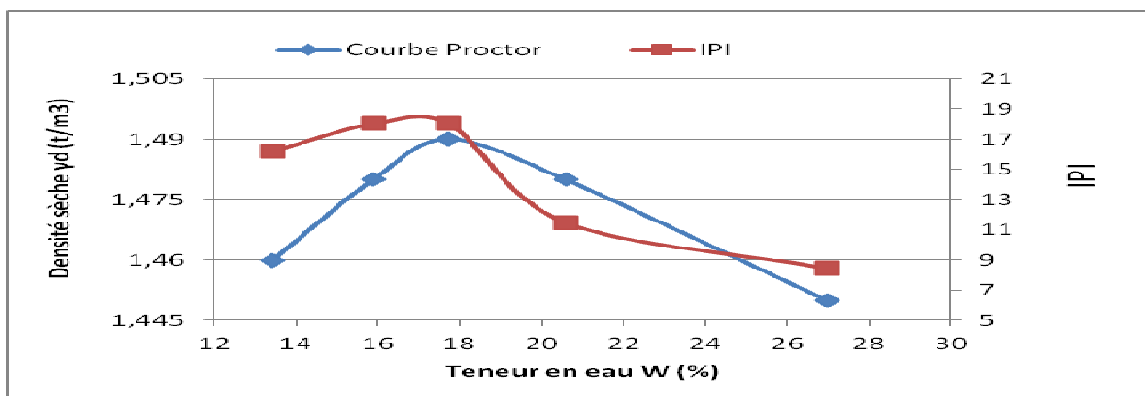


Figure III.18 : Evolution de la masse volumique sèche et de l'IPI en fonction de la teneur en eau du sédiment du barrage de Fergoug)

Tableau III.11 : Résultats de l'essai Proctor – IPI sur les sédiments bruts

| Matériau | W _{opN} (%) | γ _d (g/cm ³) | IPI à W _{opN} (%) |
|--------------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| sédiment du barrage de Fergoug | 17,73 | 1,49 | 18,04 |

La figure III.19 montre que pour les sédiments étudiés, la teneur en eau optimale correspondant au maximum poids volumique sec est de l'ordre de 17,73% avec poids volumique sec correspondant de l'ordre de 14,9 KN/m³. La valeur de l'indice de portance immédiat obtenue est de l'ordre 18,04% Ces résultats a mis en évidence la difficulté de circulation des engins sur le chantier et qu'un mauvais compactage de ces matériaux est à craindre

III.5. Classification du sédiment Fergoug selon le GTR (LCPC-SETRA, 2000)

Les caractéristiques physiques mesurées dans cette étude ont été choisies en fonction du secteur de valorisation envisagé. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le Tableau III.12

Tableau III.12 : Récapitulatif des résultats des caractéristiques des sédiments du barrage de Fergoug

| Matériau | sédiment du barrage de Fergoug |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| MO (%) à 450°C | 7,17 |
| ρ _s (t/m ³) | 2,68 |
| VBS | 5,40 |
| WP (%) | 24,93 |
| WL (%) | 58,16 |
| WR (%) | 10 |
| IP (%) | 33,23 |
| Grains < 2μm | 2 |
| 2μm <Grains <63μm | 33 |
| Grains >63 μm | 65 |
| WOPN(%) | 17,73 |
| ρ _d OPN(t/m ³) | 1,49 |
| IPI W _{opN} | 18,04 |
| Minéraux principaux | <i>quartz, calcite, illite</i> |

Selon le Guide français pour une classification des matériaux routiers [GTR. 1992], avec une proportion en matière organique supérieure à 3 % et inférieure à 10 %, les sédiments étudiés

appartiennent à la classe F regroupant les sols organiques, et plus particulièrement à la sous classe F11.

Du point de vue granulométrique, les sédiments prélevés du barrage de Fergoug se classent comme des sols fins, assimilés à la classe A définie par des matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 50 mm et dont la proportion de fine (passant à 80 μm) est supérieure à 35 %. La sous-classe est déterminée en fonction de l'activité argileuse (VBS) et du caractère plastique (IP). Ainsi, il est possible de classer les sédiments étudiés en sous classe A3F11 (Figure III.19).

D'après la suggestion du GTR, ces matériaux présentent une sensibilité à l'eau et une plasticité élevée. Ils sont normalement inutilisables en technique routière.

Pour une meilleure utilisation en technique routière, une amélioration des propriétés est nécessaire afin de répondre aux exigences du comportement demandé.

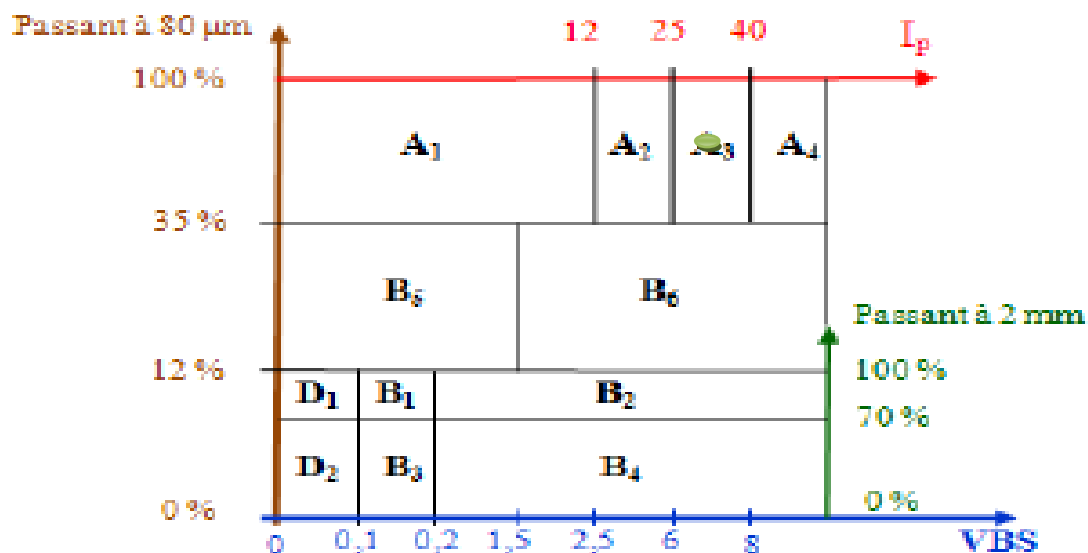


Figure III.19: Classification du sédiment du barrage de Fergoug selon la classification du GTR (LCPC-SETRA, 2000)

III.6. Conclusion

La vase utilisée dans notre étude est une vase naturelle. Elle vient plus précisément du barrage de Fergoug situé dans la wilaya de Mascara ouest d'Algérie.

L'étape de caractérisation est une étape indispensable pour connaître les propriétés des sédiments, aussi bien d'un point de vue physique, chimique ou minéralogique. Ce n'est qu'à

partir de cette connaissance qu'on pourra envisager une voie de valorisation, en prenant en compte la réactivité potentielle des sédiments lorsqu'ils seront introduits dans un matériau de construction.

Les analyses physiques effectuées sur des échantillons prélevés du fond du barrage ont donné les résultats suivants : l'analyse granulométrique montre que le produit cru présente une granulométrie étalée 100 % passant à moins de 200 μm . Les essais physiques ont donné les valeurs suivantes : le poids volumique des grains solides ($\gamma_S = 26,80 \text{ kN/m}^3$), la limite de liquidité ($w_L = 58,16 \%$), la limite de plasticité ($w_P = 24,93 \%$), la limite de retrait ($w_R = 10 \%$) et l'indice de plasticité ($IP = 33,23\%$). L'essai triaxial du type non drainé non consolidé a donné la valeur de la cohésion ($C_u = 1.7 \text{ bar}$) et de l'angle de frottement interne ($\phi_u = 27^\circ$). Ces analyses ont été réalisées au laboratoire de géotechnique de l'université de sciences et technologie d'Oran « Algérie ».

Les différents essais de caractérisations physico-chimiques et minéralogiques permettent de classer le sédiment brut selon le GTR 2000 et NF P11-300. Du point de vue granulométrique, les échantillons de sédiment brut se classent en rubrique de sols fins, note classe A avec une proportion en matière organique inférieure à 10%, La sous-classe peut être déterminée en fonction de l'activité argileuse (VBS) et du caractère plastique, toutefois les paramètres obtenus entrant en jeu sont contradictoires. Effectivement, la valeur au bleu nous oriente le sédiment vers classe A2, les limites d'Atterberg nous permettent d'identifier le sédiment brut comme la sous classe A3, Le GTR a indiqué que dès que la valeur de l'IP est entre 12 et 40, il constitue le critère d'identification le mieux adapté. Donc, il est possible de classer notre sédiment brut en sous classe A3. Avec la densification et la portance de sédiment de notre site (γ_{dmax} , W_{opm} , IP_{opm}) cette classification obtenue, n'est pas favorable pour une utilisation comme un matériau constitution des couches de chaussées d'après le GTR 2000 et NF P11-300.

Chapitre IV

Valorisation des sédiments

du barrage de Fergoug en couche de forme

IV.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, L'analyse des caractéristiques géotechniques des sédiments étudiés présentent une teneur en eau initiale importante, une faible portance, une quantité non négligeable de fractions fines et un taux de matières organiques.

Pour une valorisation en technique routière, il est nécessaire de réduire leur teneur en eau, d'améliorer leurs performances au regard de la portance et de la résistance mécanique et de diminuer leur sensibilité à l'eau et leur compressibilité.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la méthodologie de l'étude expérimentale adoptée avant de développer et d'interpréter les résultats des différents essais pour répondre aux critères d'utilisation des sédiments étudiés en technique routière.

IV.2 Méthodologie de traitement des Sédiments du barrage de Fergoug en technique routière

La granulométrie et la teneur en matières organiques représentent les facteurs clés du choix de la valorisation des sédiments de dragage en technique routière. Après traitement, il est nécessaire d'obtenir un matériau qui remplit les conditions suivantes :

- ✓ Répondre aux normes de classification et de dimensionnement en vigueur GTR (LCPC-SETRA, 2000) ;
- ✓ Maintenir ses propriétés mécaniques et structurales dans le temps pour satisfaire les normes de durabilité ;
- ✓ Maîtriser les coûts de traitement et de la mise en œuvre in situ pour obtenir un matériau économiquement compétitif.

La méthodologie de traitement est constituée de deux étapes :

- ✓ Correction de la courbe granulométrique du sédiment naturel par ajout d'une fraction granulaire.
- ✓ Amélioration des caractéristiques mécaniques par traitement aux liants, en particulier la chaux et le ciment

Le choix des dosages respectifs de ces différents composants va aussi permettre de diminuer la teneur en eau par les phénomènes d'hydratation et d'apport de matières sèches (Abriak, 2007 ; Sfar Felfoul et al, 2003). Ainsi, 5 formulations ont été sélectionnées afin de comparer leurs performances respectives et de déterminer quels étaient les plus adaptés au traitement

des sédiments. Le schéma de la figure IV.1 résume la méthodologie mise en place et le déroulement global de cette étude.

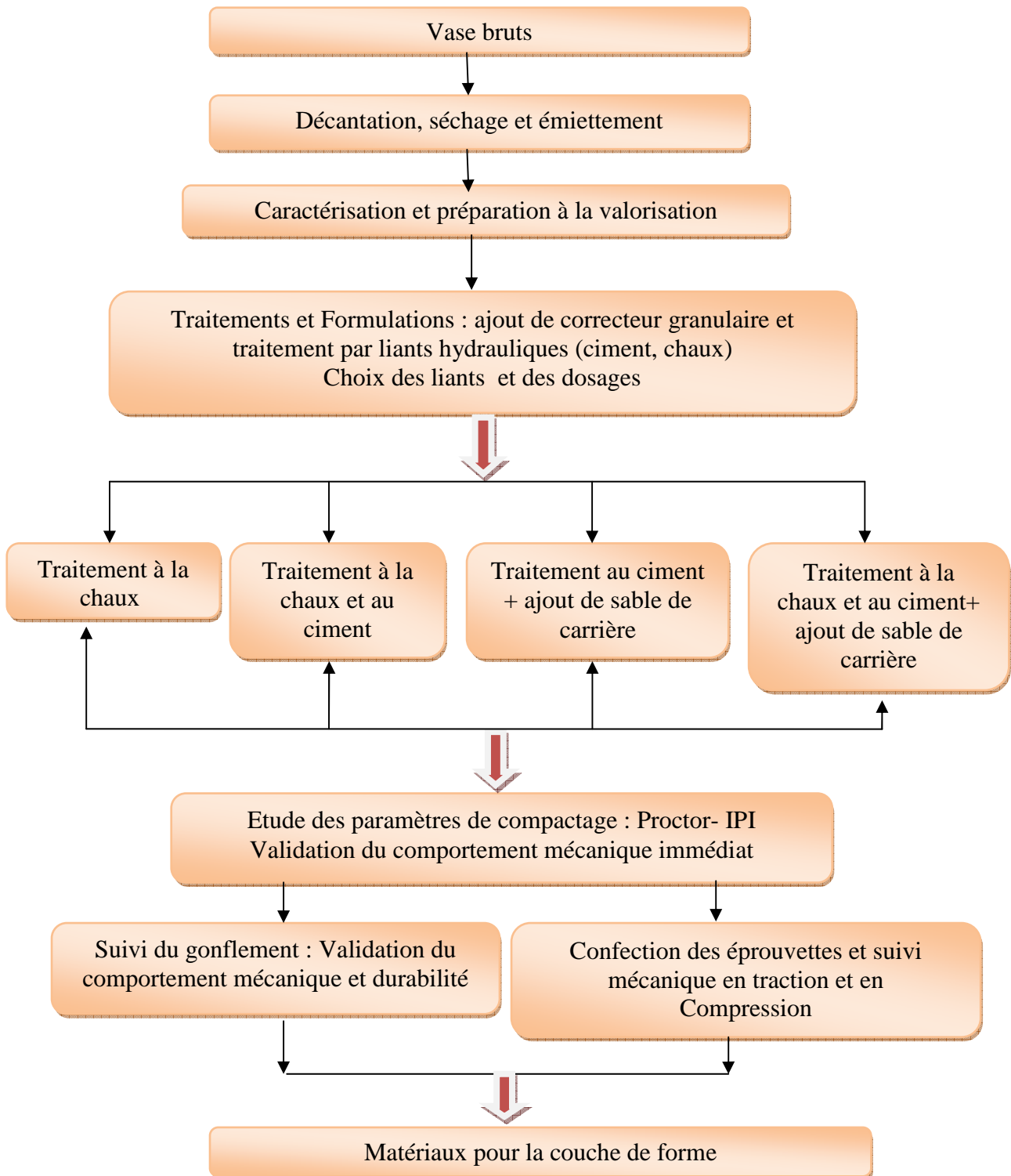


Figure IV.1 : Démarche de valorisation suivie des sédiments du barrage de Fergoug en couche de forme

IV.3 Préparation de la vase du barrage de Fergoug

La phase de caractérisation des sédiments bruts a montré que Dans un premier temps, on permet une décantation naturelle en bac pendant 6 à 7 semaines.

Dans une deuxième étape, pour accélérer le processus d'évaporation, une fois le processus de décantation terminé, les sédiments sont séchés dans une étuve à 105°C. Cette température a été retenue afin d'éviter toute modification des caractéristiques physico-chimiques, de s'assurer de ne pas dégrader les matières organiques dans les sédiments mais aussi de rester dans des conditions qui peuvent être comparables aux conditions sur site. Dès que le séchage est terminé, les sédiments sont émiettés et placés dans des sacs plastiques hermétiques. Le matériau est ainsi prêt pour l'utilisation. La Figure IV.2 représente les différents états du sédiment lors de la préparation.



Figure IV.2: Etat des sédiments avant le traitement

IV.3.1. Constitution du squelette de la formulation

Les sédiments étudiés appartiennent à la classe des matériaux sableux-limoneux à forte teneur en matière organique. Ce type de matériau est difficile à utiliser dans la construction des routes en raison de leur sensibilité à l'eau et de leur compressibilité. En outre, une étude Proctor-IPI réalisée sur les sédiments bruts a révélé un faible Indice Portant Immédiat.

Pour augmenter la performance mécanique des sédiments, une addition de correcteurs granulaires suivie par un traitement aux liants hydrauliques et/ou aériens (ciment et/ou chaux) est utilisée. Ainsi, les ajouts granulaires choisis sont :

IV.3.1. 1. Sables de carrière, Correcteurs granulaires

L'apport de sables dans les mélanges de sédiments et fines de carrière a un double objectif (i) moduler la courbe granulométrique afin d'assurer un meilleur squelette granulaire (rôle de correcteur) ; (ii) fournir des grains siliceux comme support à la réaction des produits chimiques réactifs utilisés.

Devant la finesse des grains des sédiments et fines de carrière, on apporte des sables pour en modifier la granularité et améliorer les propriétés mécaniques. On a utilisé un sable de la carrière de Hasnaoui (0/3) mm situé à la région de Sidi Bel Abbes. Ce sable comportant 3 % d'éléments inférieurs à 80µm et 47 % de sable grossier. Il s'agit d'un sable propre bien gradue Sb (SW) selon la classification LPC-USCS (Magnan, 1998). Avec sa granulométrie étalée et favorisera son utilisation en technique routière (Tableau *IV.1*). .

Tableau IV.1 : Les analyses physiques du sable de carrière

| | Teneur en eau (%) | Diamètre max (%) | Teneur en fines (%) | Equivalent de sable (%) | Bleu de méthylène | Module finesse |
|---|--------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Sable de carrière d'ajout (0/4) mm | 1 | 4 | 5,6 | 67 | 1,27 | 3,7 |

IV.3.1. 2. Ciment

Le ciment choisi dans le cadre de cette étude est un ciment portlands composé (CPJ-CEM II/A) 42.5 provient de la cimenterie de Zahana , ce ciment contient une grande quantité de la pouzzolane , Ce ciment est obtenu par broyage simultané d'un minimum de 95 % de clinker Portland et d'une faible quantité de sulfate de calcium. Il est utilisé pour ses propriétés de résistance aux eaux agressives et sa bonne tenue au gel. Grâce à sa faible teneur en alumine et

donc en aluminat tricalcique, ce ciment possède une haute résistance aux sulfates. Ses caractéristiques chimiques sont présentées dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Analyse chimiques du ciment CPJ 42,5 (L.T.P.O)

| | |
|---------------------|--------|
| Insolubles % | 2,16 |
| SIO2 % | 22,76 |
| CAO % | 63,43 |
| MGO % | 0,21 |
| FE2O3 % | 3,57 |
| AL2O3 % | 5,96 |
| SO3 % | 1,91 |
| P.F % | 2,37 |
| Totale | 102,37 |
| CAO LIBRE % | 0,27 |
| C3S % | 33,50 |
| C2S % | 38,60 |
| C3A % | 9,75 |
| C4AF% | 10,85 |

• **Evolution du pH des mélanges sédiment – ciment**

Dans les sédiments stabilisés par le ciment, la silice hydratée et l’alumine réagissent avec les ions calcium libérés lors de l’hydratation du ciment pour former des produits de liaison. Cette activité pouzzolanique peut se produire sur longues périodes de temps.

Les évolutions du pH des mélanges sédiment- ciment sont présentées sur la Figure IV.3. Il est de noter que la valeur du pH se stabilise pour un dosage en ciment à 7%. On choisit donc dans cette étude un pourcentage de ciment à 7%.

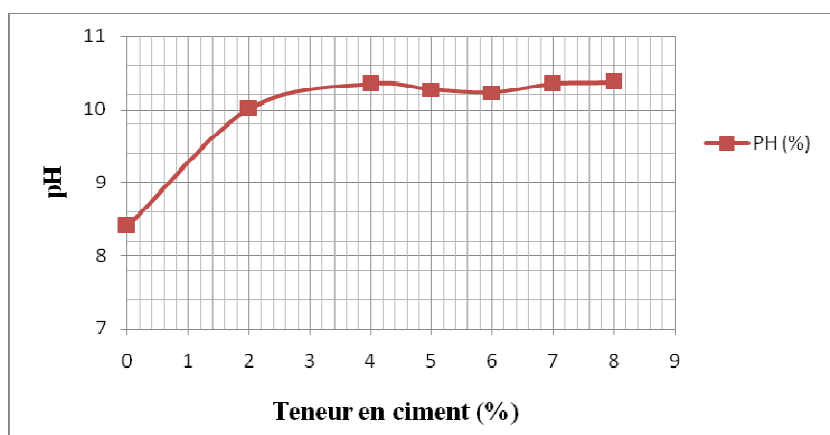


Figure IV.3 : Evolution du pH en fonction du dosage de ciment

IV.3.1. 3. Chaux

La chaux utilisée dans notre étude est de la chaux vive 0/2mm.

- **Evolution du pH des mélanges sédiment – chaux**

Le pH des mélanges vase- chaux a été mesuré avec un pH – mètre. Cette procédure a été développée pour déterminer les besoins en chaux et donne une indication de la quantité de chaux nécessaire pour satisfaire les différentes réactions qui ont lieu.

Les évolutions du pH sont représentées sur la Figure IV. 4. Pour les mélanges sédiments _ chaux. On peut observer que la valeur du pH tout d’abord augmente en fonction de la teneur en chaux et se stabilise pour un dosage en chaux à 4%. On choisit donc dans cette étude un pourcentage de chaux à 4%.

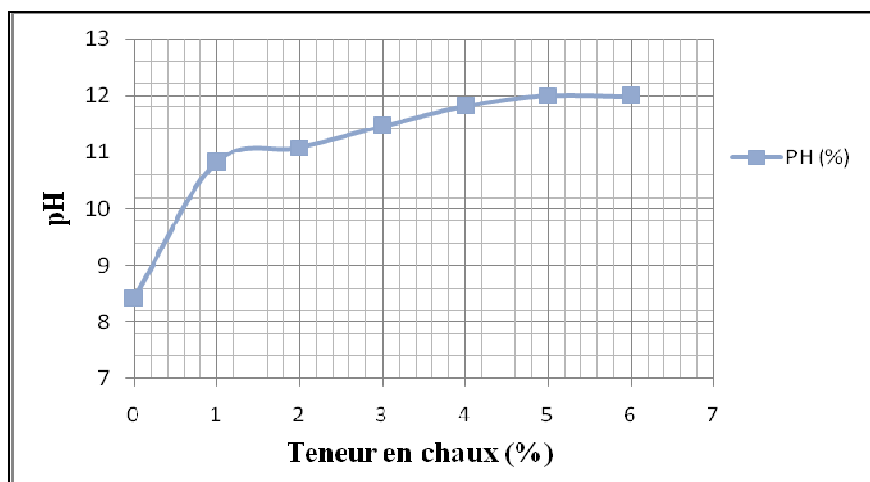


Figure IV.4 : Evolution du pH en fonction du dosage de chaux

IV.3.2. Les formulations retenues

En vue d’étudier l’apport de chaque constituant sur le comportement mécanique du sédiment de Fergoug, quatre types de formulations (Figure IV.5) ont été prises des combinaisons d’essais (Tableau IV.3)

Tableau IV.3 : Formulation des mélanges étudiés

| | Sédiments [%] | Sable de carrière (0/4mm) [%] | Chaux (0/2mm) [%] | Ciment 42,5CPJ CEMII/A [%] |
|------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------|----------------------------|
| Sédiment de Fergoug SF | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Formulation 1 F1 | 96 | 0 | 4 | 0 |
| Formulation 2 F2 | 91 | 0 | 2 | 7 |
| Formulation 3 F3 | 61 | 30 | 2 | 7 |
| Formulation 4 F4 | 63 | 30 | 0 | 7 |

IV.3.3. Influence de la matière organique sur les formulations étudiées

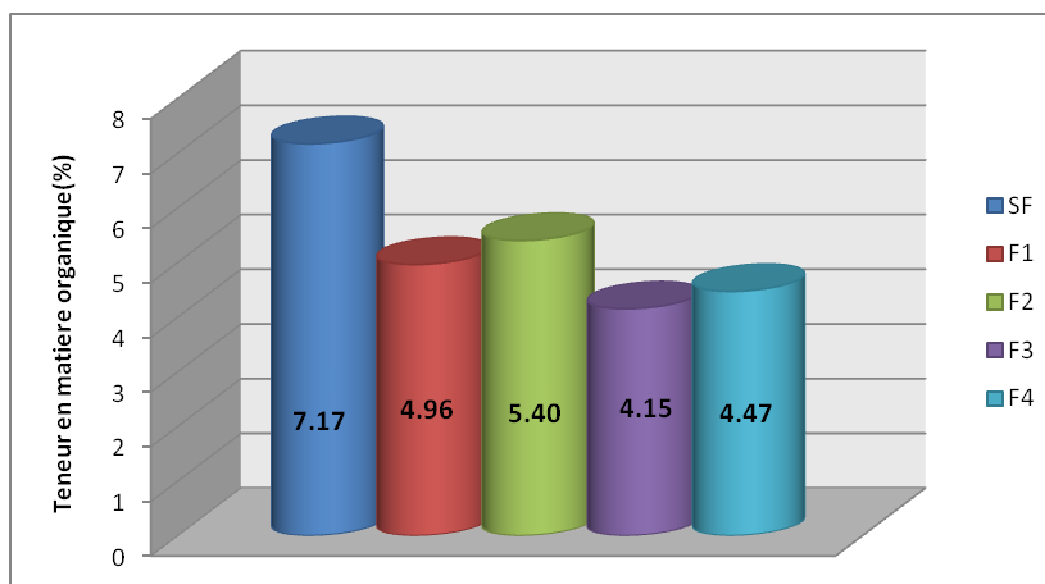


Figure IV.5 : Influence de la matière organique sur les mélanges étudiés

la teneur en matière organique qui, en plus d'être un critère de classement dans le GTR (SETRA-LCPC, 1992), est également un élément qui affecte de façon importante les traitements à base de liants hydrauliques en faisant diminuer les résistances mécaniques (LEVACHER et al., 2006) et qui les rend donc inefficaces à un certain taux.

La figure IV.5 présente l'ensemble des résultats obtenus pour les différents traitements testés.

On constate, que teneur en matière organique des sédiments brut est de 7,17%. Par conséquent, Après le traitement, on constate que les formulations étudiées a des valeurs de la comprises entre 5% et 4%, ce qui indique qu'il ya une diminution de la matière organique.

Selon le Guide français de classification des matériaux routiers, avec une proportion en matière organique supérieure à 3 % et inférieure à 10% nos mélanges étudiés appartient à la classe F regroupant les sols organiques, et plus particulièrement à la sous-classe **F11**.

IV.3.4. Influence des paramètres physico-chimiques des formulations d'étude

Les essais d'identification effectués sur ces quatre (04) formulations sont représentés sur les figures IV.6 et IV.7. Les tableaux IV.4 et IV.5 regroupent les valeurs des caractéristiques physico-chimiques et géotechniques correspondant à chaque formulation.

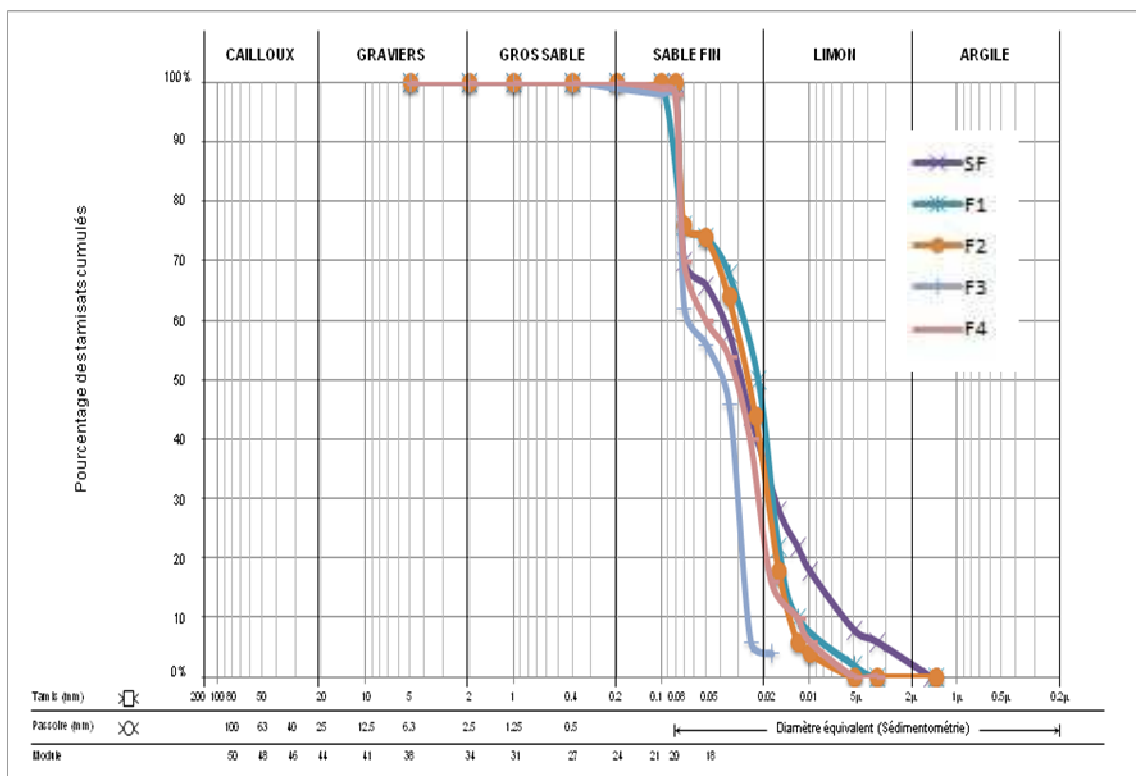


Figure IV.6 Distribution des courbes granulométriques des composants de formulations étudiées

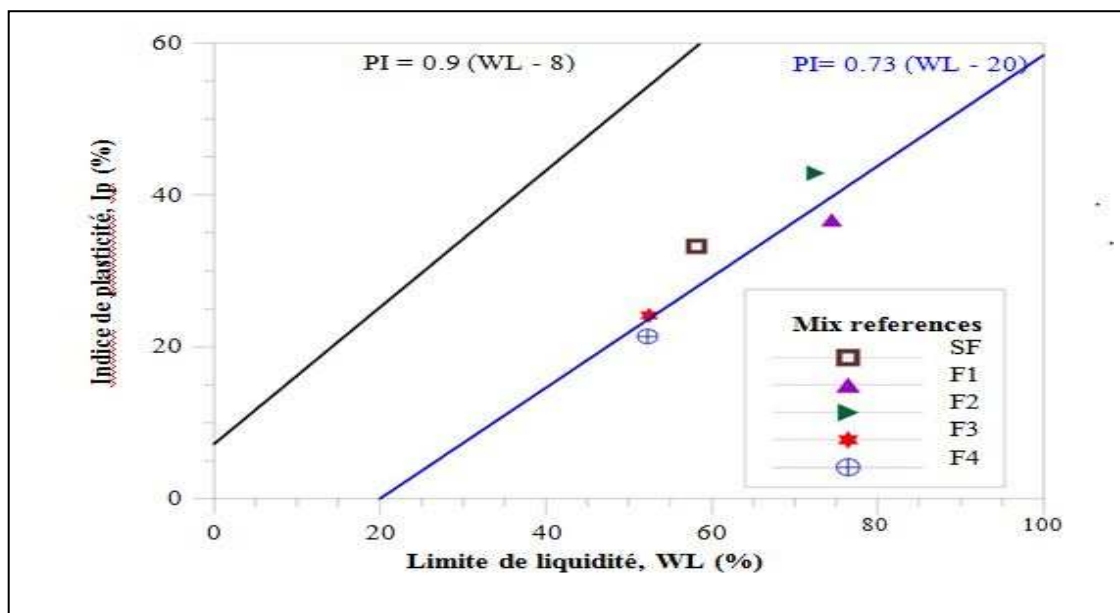


Figure IV.7 Combinaison des résultats (WL, I_p) des formulations étudiées Placées dans le diagramme de plasticité de Casa grande

La mesure des limites d'Atterberg du sédiment traité pour les formulations étudiées représentées sur la figure IV.7 ainsi que le tableau IV.5 nous a permis de constater :

- ✓ Que les sédiments traités pour les formulations étudiées disposés sur l'abaque de Casa grande sont alignés sur une même droite. Cette droite correspond à un comportement très plastique et ils sont situés entre des argiles et des limons par rapport des résultats de plasticité. Ils sont essentiellement chargés en matières organiques. Ceci peut influencer les résultats de plasticité.
- ✓ Les formulations F3 et F4 ont beaucoup baissé la teneur en eau à la compacité maximale grâce à l'ajout du sable de carrière, ce qui donne un matériau compact et plus sec, un avantage pour les matériaux routier.

Tableau IV.4 : Pourcentages des éléments granulaires et coefficients de courbure et D'uniformité des composants dans les formulations étudiées.

| Formulations | % > 63 μ m | | % < 63 μ m | | Cu | Cc |
|---------------------------------------|----------------|-----------|----------------|------------|------|-------|
| | Gravier [%] | Sable [%] | Limon [%] | Argile [%] | | |
| Sédiment brut | -- | 65 | 33 | 2 | 6,54 | 1,30 |
| 96% SF +4% Chaux | -- | 60 | 40 | 0 | 2,31 | 0,94 |
| 91% SF +2% Chaux +7% Ciment | -- | 65 | 35 | 0 | 2,36 | 0,86 |
| 61% SF +2% Chaux +7% Ciment+30% Sable | -- | 95 | 5 | 0 | 2,36 | 69,23 |
| 63% SF +7% Ciment+30% Sable | -- | 75 | 25 | 0 | 3,93 | 0,65 |

Tableau IV.5 Caractéristiques physico-chimiques des formulations de mélanges Etudiées

| Formulations | Sédiment brut | 96% SF +4% Chaux | 91% SF +2% Chaux +7% Ciment | 61% SF +2% Chaux +7% Ciment+30% Sable | 63% SF +7% Ciment+30% Sable |
|---------------------------------|---------------|------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| γ_s [kN/m ³] | 2,68 | / | / | / | / |
| M.O [%] | 7,17 | 4,96 | 5,4 | 4,15 | 4,47 |
| WL [%] | 58,16 | 74,47 | 72,52 | 52,46 | 52,25 |
| Wp [%] | 24,93 | 37,74 | 29,65 | 28,32 | 30,88 |
| Ip [%] | 33,23 | 36,73 | 42,87 | 24,14 | 21,37 |
| VBS | 5,4 | 3,66 | 3,33 | 3 | 3 |

IV.3.5. Détermination de la densification et la portance des formulations étudiées

Une campagne d'essais Proctor – portance a été effectuée sur les formulations de mélanges étudiés à base de sédiments du barrage de Fergoug. Les courbes de compactage sont reportées sur la Figure IV.8. Pour les courbes relatives à l'Indice Portant Immédiat, elles sont reportées sur la Figures IV.9. Pour les caractéristiques à l'optimum Proctor, elles sont reportées dans le Tableaux IV.6.

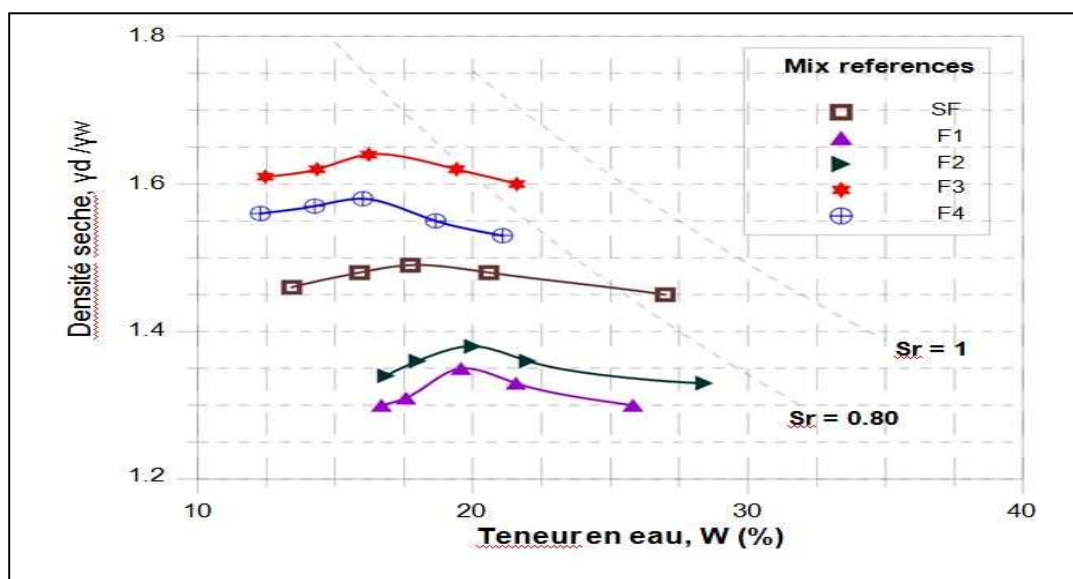


Figure IV.8 : Evolution de la densité sèche en fonction de la teneur en eau pour les formulations étudiées.

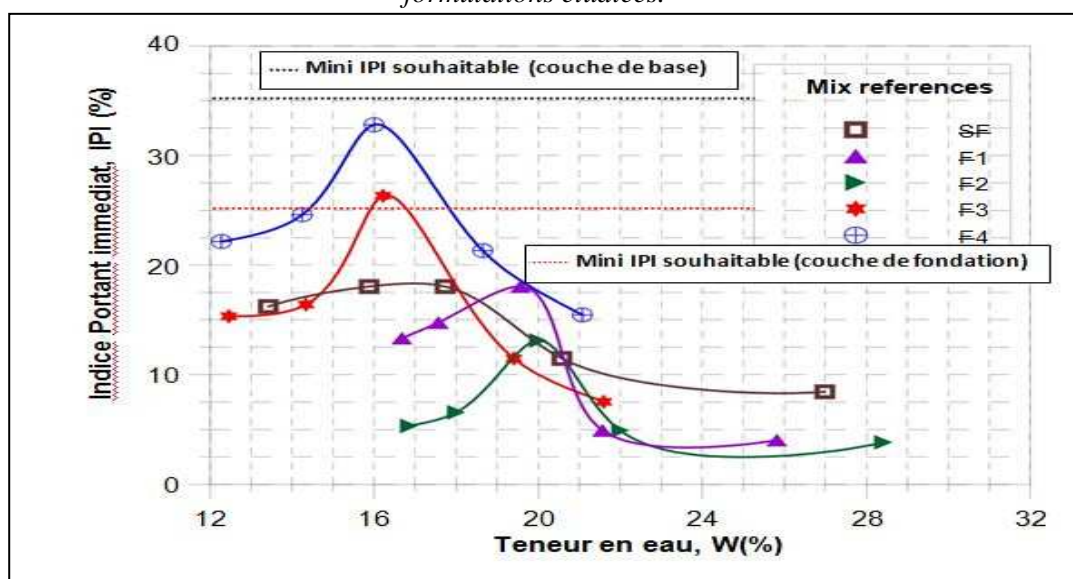


Figure IV.9 : Evolution de l'indice portant immédiat en fonction de la teneur en eau pour les formulations étudiées.

Tableau IV.6 : Synthèse de l'essai Proctor-IPI pour les formulations étudiées

| Formulations | Sédiment brut | 96% SF +4% Chaux | 91% SF +2% Chaux +7% Ciment | 61% SF +2% Chaux +7% Ciment +30% Sable | 63% SF +7% Ciment +30% Sable |
|---|---------------|------------------|-----------------------------|--|------------------------------|
| $W_{OPN}(\%)$ | 17,73 | 19,57 | 20 | 16,22 | 16 |
| γ_d à W_{OPN} (g/cm ³) | 1,49 | 1,35 | 1,38 | 1,64 | 1,58 |
| IPI à W_{OPN} | 18,04 | 18,04 | 13,12 | 26,33 | 32,80 |

L'analyse des résultats d'essais obtenus a permis de montrer que Le traitement à la chaux et au liant hydraulique combiné au sable de carrière cas de formulation F3 et F4 a permis de diminuer la teneur en eau ; cette diminution est lié à la consommation par les ajouts (chaux et liant hydraulique).l'utilisation d'un correcteur granulométrique telle que sable de carrière. Celui-ci a tout d'abord un rôle de diluant en diminuant l'argilosité et la teneur en matières organiques (voir figure IV-6). Il modifie également la mise en œuvre du matériau qui se traduit par une diminution de la teneur en eau et une augmentation de la masse volumique à l'OPN. Ceci, va jouer un rôle important dans l'amélioration de la durabilité de la couche de forme de la chaussée. En comparaison avec les résultats de l'essai Proctor sur sédiment brut on constate une réduction au niveau de la teneur en eau optimale. Le traitement réalisé a été bénéfique en termes de portance pour les mélanges F3 et F4, l'IPI obtenu après traitement était conforme à une utilisation en couche de forme. L'ajout de chaux seule (formulation F2) on observe que la réactivité de la chaux augmente la valeur de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité de l'optimum Proctor, cette action de la chaux sur la floculation des argiles contenues dans le sédiment provoque cette tendance. Quand l'hydratation de la chaux se produit, la température augmente avec l'intensité de la réaction (voir figure IV-9). Notons que, plus la réactivité de la chaux est importante, plus elle absorbe de l'eau.

IV.3.6. Portance des formulations en immersion

IV.3.6. 1. Propriété de gonflement

Les matériaux étudiés doivent vérifier leurs aptitudes à résister aux conditions défavorables du milieu, notamment les effets de l'eau. Dans cette étude, l'aptitude du matériau, à résister à un cycle de mouillage, a été évaluée par l'essai de mesure d'indice CBR après immersion. Cet essai permet de mesurer, pendant la phase d'immersion, le gonflement vertical du matériau compacté (G_{ver}).

IV.3.6. 2. Principe

Il consiste a réaliser un compactage Proctor Normale de mesurer l'indice CBR immédiat puis après 4 jours d'immersion, l'indice CBR immersion. Le protocole de mesure est le même que pour l'indice IPI mais au lieu d'être effectuée juste après le compactage du matériau, l'échantillon, toujours dans son moule, est totalement immergé dans de l'eau a 20°C pendant 4 jours. Sur sa partie supérieure, on dispose une charge annulaire de 4,6 kg afin de simuler les contraintes apportées par les couches supérieures de la chaussée .Pendant cette période d'immersion, des mesures de gonflement sont réalisées grâce a un comparateur opérant entre la surcharge et la paroi du moule, par l'intermédiaire d'un disque de gonflement (Photo IV.1)



C. Indice IPI



B. Indice CBR immédiat



C. Indice CBR immersion

Photo IV.1 : Description de l'essai CBR pour mesurer les indices de portances (IPI – ICBRimmédiat et ICBRimmersion)

Pour chacune formulations étudiées. On a effectuée un essai de portance immédiate ainsi qu'un CBR après immersion.

IV.3.6. 3 : Mesure du gonflement vertical

Le comparateur est réglé à 0 au début de l'essai, puis la valeur du déplacement vertical ΔH (mm) est relevé régulièrement (précision : 10^{-2} mm) jusqu'au terme des 4 jours d'immersion. G_{ver} correspond au rapport du déplacement vertical avec la hauteur initiale de l'échantillon ($H = 126,6$ mm), exprimé en %, soit :

$$G_{\text{ver}} = \frac{\Delta H}{H} \times 100$$

Nous avons reporté les valeurs finales obtenues pour chaque formulation dans le tableau IV.7.

Tableau IV.7 : Gonflement final en fonction des formulations étudiées

| Formulations | vase brut | 96% SF +4% Chaux | 91% SF +2% Chaux +7% Ciment | 61% SF +2% Chaux +7% Ciment+30% Sable | 63% SF +7% Ciment+30% Sable |
|----------------------------------|-----------|------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| G_{ver} (%) final | 0,146 | 0,150 | 0,138 | 0,152 | 0,046 |

La première constatation que l'on peut faire est que pour quel que soit le traitement, les valeurs obtenues sont faibles (de l'ordre du pour cent).

IV.3.6. 4. IPI et ICBR

Pour chacune des formulations étudiées, on a effectuée un essai de portance immédiate ainsi qu'un CBR après immersion.

Le rapport ICBR/IPI a été déterminé, qui permet d'évaluer la durabilité du traitement ainsi que le comportement de la couche en cas d'immersion aux jeunes âges. Ce paramètre est essentiel à vérifier car lorsqu'un sol fin est saturé en eau, il peut perdre totalement sa cohésion, notamment si le liant n'a pas débuté sa prise. La durabilité et la portance en cas d'immersion sont jugées satisfaisantes si le rapport ICBR/IPI est supérieur à 1.

Les résultats concernant les mesures de l'IPI et de l'ICBR pour chacun des formulations ont été rassemblés dans la figure IV.10 et le tableau IV.8. Nous avons également calculé le rapport ICBR/IPI.

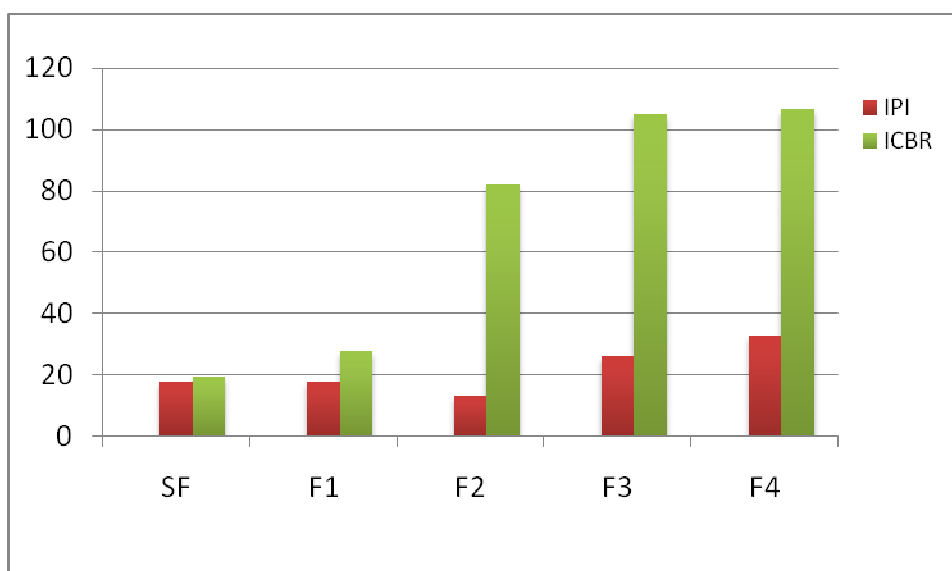


Figure IV.10 : IPI et ICBR en fonction des formulations étudiées

Tableau IV.8 : IPI et ICBR en fonction des formulations étudiées

| Formulations | vase brut | 96% SF + 4% Chaux | 91% SF + 2% Chaux +7% Ciment | 61% SF +2% Chaux +7% Ciment+30% Sable | 63% SF +7% Ciment+30% Sable |
|--------------------------------------|-----------|----------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| IPI | 18,04 | 18,04 | 13,12 | 26,33 | 32,80 |
| ICBR 4jour immerssion | 19,61 | 27,88 | 82 | 104,96 | 106,59 |
| ICBR 4jour immerssion/IPI | 1,09 | 1,54 | 6,25 | 3,99 | 3,25 |

Concernant l'ICBR, on peut observer que les formulations F2, F3 et F4 permettent d'obtenir les meilleures portances après immersion (82, 104,96 et 106,59), puis viennent le traitement à la chaux F1 avec une valeur de 27,88

Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les formulations F2, F3 et F4 contiennent à la fois de la chaux et du clinker, ce dernier permettant d'améliorer plus rapidement et significativement la cohésion des sédiments qu'un traitement à la chaux seule.

Enfin, nous avons mis en évidence que la portance était nettement améliorée après 4 jours d'immersion. , les rapports ICBR/IPI sont tous nettement supérieurs à 1, ce qui est un critère de pérennité des traitements envisagés [GTS, 2000].

IV.3.7. Aptitude au traitement et résistance à la compression

Dans ce paragraphe, nous allons développer le travail expérimental lié à l'exécution des essais décrits précédemment. Pour chacun d'entre eux, nous décrirons le matériel et le protocole utilisé puis nous exposerons et interpréterons nos résultats.

Mais avant cela, nous allons présenter les paramètres de mise en œuvre des éprouvettes et faire quelques remarques concernant leur confection.

IV.3.7.1. Confection des éprouvettes

En raison de la finesse du matériau à étudier ($D_{max} < 6,3$ mm) et en suivant la norme (**NF P 98-114-3**) relative à l'étude des matériaux traités aux liants hydrauliques, deux types d'éprouvettes cylindriques sont utilisées pour réaliser ces essais :

- L'essai de la résistance à la compression avec des éprouvettes cylindriques « **5 x 10** » ($\varnothing = 5$ cm ; $h = 10$ cm), qui sont fabriquées avec une teneur en eau Proctor w_{OPN} et 98,5 % de masse volumique sèche Proctor ρ_{dOPN} .

confectionnées par un compactage statique suivant la norme (NF P98-230-2) ;

- L'essai de traction fendage (essai brésilien) R_{tb} , R_t avec des éprouvettes cylindriques « 5 x 5 » ($\varnothing = 5$ cm ; $h = 5$ cm). Elles sont confectionnées avec une teneur en eau optimale W_{OPN} et 96 % de la masse volumique sèche Proctor ρ_{dOPN} et confectionnées par un compactage statique suivant la norme (NF P 94-230-1)

Le moule utilisé est celui conçu pour la confection d'éprouvettes cylindriques 5 x 5 et 5 x 10 dans les études en laboratoire des matériaux routiers (Photo IV.2), le dispositif de l'essai se compose :

- 1) d'un cylindre de 5 cm de diamètre et de 12 cm de hauteur,
- 2) d'une rehausse de même dimension permettant de déverser le matériau non compacté,
- 3) d'un piston en acier de 3kg pour compacter les matériaux,
- 4) d'un chapeau permettant de fermer le moule cylindrique,
- 5) de deux coquilles en acier calées sur le chapeau pour assurer la dimension de l'éprouvette après compactage,
- 6) d'une presse de 6 tonnes permettant d'appliquer la charge de compactage.

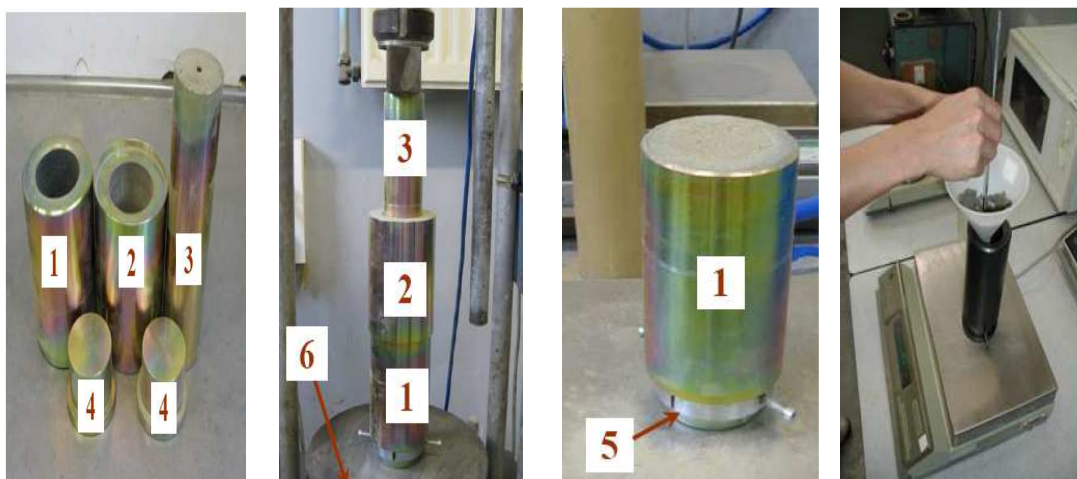


Photo IV.2: Illustration de la confection des éprouvettes

Pour le démoulage des éprouvettes, on utilise un contre piston ainsi qu'une rehausse de démoulage (Photo IV.2).

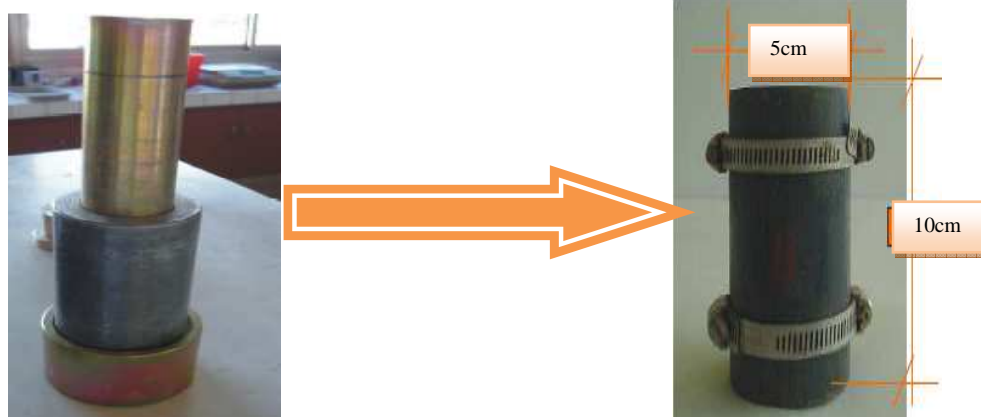


Photo IV.3: Eprouvette en cours de démoulage

Les paramètres de mise en œuvre des mélanges et des éprouvettes sont regroupés dans le Tableau IV.9

Tableau IV.9 : Paramètres de mise en œuvre en fonction du type d'éprouvette

| Type de moule | Volume (cm ³) | ρ_d (g/cm ³) | w (%) |
|---------------|---------------------------|-------------------------------|-------|
| 5 x 10 | 196,25 | 0,985 x ρ_d OPN | WOPN |
| 5 x 5 | 98,125 | 0,96 x ρ_d OPN | WOPN |
| CBR | 2297,3 | ρ_d OPN | WOPN |

Répartition des éprouvettes et quantité de mélange préparé en fonction des essais

Pour chaque liant, nous avons confectionné 30 éprouvettes, dont la répartition en fonction des essais est précisée tableau IV.10. Au total, ce sont donc $5 \times 30 = 150$ éprouvettes qui ont été fabriquées pour l'ensemble de ce travail expérimental.

Tableau IV.10 : Répartition des éprouvettes en fonction des essais et quantité de mélange préparé (pour un formulation)

| Essai réalisé | Rc | Rci | Rt et E |
|----------------------|---|--------|--|
| Type d'éprouvette | 5 x 10 | 5 x 10 | 5 x 5 |
| Nombre d'éprouvettes | 3 par âge (1, 7, 28, 60 et 90 jours) soit 15 au total | 3 | 3 par âge (28 et 90 jours) soit 6 au total |

IV.3.7. 2. Essai de rupture en compression simple

Les essais de résistance à la compression simple (RC) sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de 5 cm de diamètre et de 10 cm de longueur (d'élanement 2), fabriquées avec une teneur en eau Proctor w_{OPN} et 98,5 % de masse volumique sèche Proctor ρ_{dOPN} , confectionnées à et compactées statiquement à l'aide d'une presse statique suivant la norme (NF P98-230-2) (Figure IV.11). La détermination de cette résistance a pour but d'étudier l'effet des liants utilisés sur les paramètres de résistance mécanique des sédiments traités. Ceci nous permettra de caractériser le comportement du sol traité à court et long terme qui permettra de savoir par la suite l'âge autorisant la circulation des engins sur la couche traitée et de vérifier la résistance de la couche à l'immersion au jeune âge ainsi que la résistance au gel.

Nous avons donc mesuré les résistances à la compression simple des éprouvettes concernant le sédiment brut sans traitement et les formulations proposées après, 1, 7, 28, 60 et 90 jours de maturation.



Figure IV.11: Illustration des éprouvettes pour écrasement.

A. Evolution de la résistance mécanique au cours du temps

Les résultats obtenus après écrasement en compression simple sur des éprouvettes compactées à des caractéristiques optimales de l'essai Proctor normale sont résumés sur le tableau IV.11 et représenté sur la figure IV.12.

Tableau IV.11 : Resistances en compression simple des sédiments avec et sans Traitement

| Melanges (%) | 1 Jour | 7 Jours | 28 Jours | 60 Jours | 90 Jours |
|---------------------------------------|--------|---------|----------|----------|----------|
| vase brut | 0.895 | 0.91 | 1.34 | 0.745 | 0.67 |
| 96% SF +4% Chaux | 0.45 | 0.23 | 0.46 | 0.560 | 0.925 |
| 91% SF +2% Chaux +7% Ciment | 0.888 | 0.95 | 1.43 | 0.975 | 0.88 |
| 61% SF +2% Chaux +7% Ciment+30% Sable | 2.085 | 1.82 | 2.645 | 2.15 | 1.89 |
| 63% SF +7% Ciment+30% Sable | 1.785 | 0.50 | 1.545 | 1.34 | 1.16 |

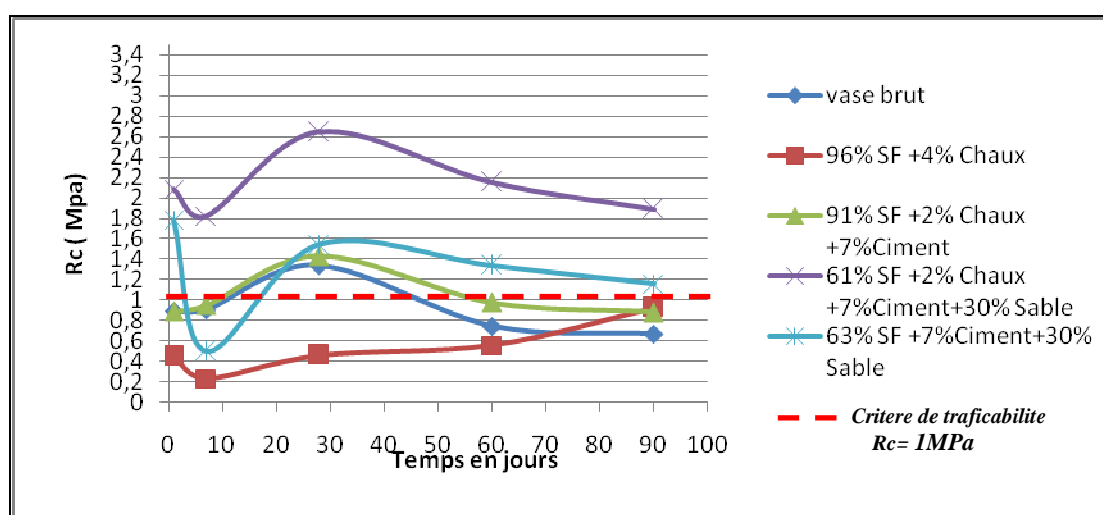


Figure IV.12: L'évolution des résistances mécaniques en compression simple des formulations étudiées en fonction du temps

B. Interprétation

- ✓ L'ajout de la chaux va également accroître les caractéristiques mécaniques, mais sur une période plus longue en comparaison du ciment grâce aux réactions pouzzolaniques. Il semble que la chaux ait un effet bénéfique malgré le faible dosage utilisé dans notre étude (4%).
- ✓ On constate que les résistances augmentent jusqu'à 28 jours dans la plupart des cas. Au-delà de cette date, les mélanges marquent une légère diminution, excepté les

sédiments traités à la chaux comme nous avons vu que ses performances semblent pouvoir encore augmenter après 90 jours. Le seuil de 1 MPa résistance seuil autorisant la circulation sur la couche traitée est dépassé pour toutes les formulations excepté les sédiments traités à la chaux mais à 60 jours les trois formulations (sédiment brut, sédiments + 4%chaux ainsi que la formulation sédiments + 2%chaux +7% ciment) ne dépassent pas cette valeur. L'explication peut être rapprochée de la présence de M.O. En effet, les substances humiques interfèrent fortement dans les processus d'hydratation des liants. Ces interférences font considérablement chuter les résistances des matériaux traités à court et à moyen termes [TREMBLAY et al., 2002].

IV.3.8. Age autorisant la circulation sur la couche de forme

Le critère permettant de déterminer cette caractéristique est lié aux performances mécaniques en compression du matériau traité. On considère qu'une couche de forme est circulaire dès lors que sa résistance en compression R_c est supérieure à 1 MPa.

D'après la figure IV.12, cette valeur est atteinte dès 1 jour pour les formulations étudiées F3 et F4. Le développement initial de la prise est rapide ce qui est particulièrement intéressant dans le scénario de valorisation des sédiments en couche de forme car cela permet de minimiser le délai de mise en œuvre des couches supérieures.

IV.3.9. Résistance à l'immersion aux jeunes âges

Ce paramètre est évalué en calculant le rapport de la résistance en compression d'éprouvettes conservées 28 jours à l'air puis 32 jours immergées dans l'eau (R_{ci}) à celle obtenue sur des éprouvettes conservées 60 jours en condition de cure normale (R_{c60}). Pour la phase d'immersion des éprouvettes, nous les avons placées dans un bac en acier inoxydable, lui-même disposé dans une pièce climatisée maintenue à 20°C (Figure IV.13).

Les résultats sont présentés tableau IV.12 et figure IV.14.



Figure IV.13 : Immersion des éprouvettes destinées à la détermination de Rci

Tableau IV.12: Rci / Rc60 en fonction des formulations étudiées

| Formulations | vase brut | 96% SF + 4% Chaux | 91% SF + 2% Chaux +7% Ciment | 61% SF +2% Chaux +7% Ciment+30% Sable | 63% SF +7% Ciment+30% Sable |
|-------------------|-----------|----------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| Rc60 (MPa) | 0.745 | 0.560 | 0.975 | 2.15 | 1.34 |
| Rci (MPa) | 0.71 | 0.73 | 1 | 2.16 | 1.20 |
| Rci / Rc60 | 2.56 | 1.30 | 1.02 | 1 | 0.89 |

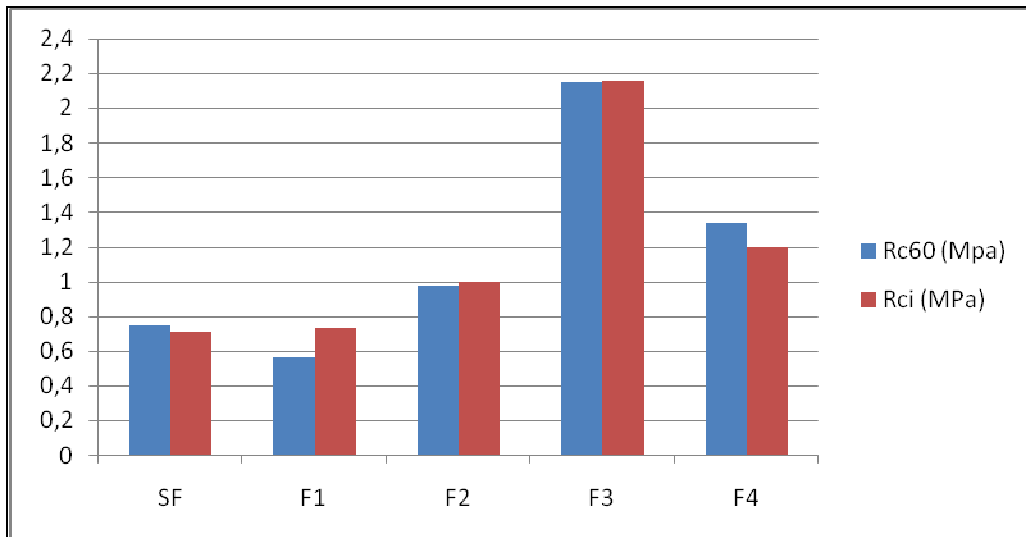


Figure IV.14 : Rc60 et Rci en fonction des formulations étudiées

Si on compare les valeurs du rapport R_{ci}/R_{c60} pour les formulations étudiées, on peut considérer que quelque soit le traitement utilisée, le rapport est supérieur à 0,8, valeur minimale préconisée par le GTS. Les sédiments du barrage de Fergoug traités ne présentent donc pas de perte de résistance significative en cas d'immersion au jeune âge.

IV.3.10. Résistance au gel

D'après le GTS, la résistance au gel est définie par rapport à une valeur minimale de résistance en traction brésilienne. L'objectif est de déterminer l'âge à partir duquel on a $R_{tb} \geq 0,25$ MPa. Pour trouver une condition équivalente sur R_c , il a été nécessaire dans un premier temps de calculer pour les formulations étudiées le rapport de conversion entre la résistance en compression et celle en traction, noté $K_{c/t}$. Le paramètre à évaluer est alors l'âge à partir duquel $R_c K_{c/t} \times 0,25$.

A. Détermination des rapports de conversion

Nous avons déterminé le rapport de R_c/R_{tb} à 28 et 90 jours de maturation. $K_{c/t}$ est la moyenne des 2 valeurs obtenues (Tableau IV.13).

Tableau IV.13 : Détermination des facteurs de conversion entre les résistances en compression (R_c) et en traction brésilienne (R_{tb})

| Formulations | vase brut | 96% SF + 4% Chaux | 91% SF + 2% Chaux +7%Ciment | 61% SF +2% Chaux +7%Ciment+30% Sable | 63% SF +7%Ciment+30% Sable |
|---------------------------|-----------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------------|
| Rc/Rtb à 28 jours | 17.63 | 6.57 | 8.94 | 5.76 | 5.92 |
| Rc/Rtb à 90 jours) | 5.58 | 6.64 | 4.89 | 3.71 | 3.87 |
| Kc/t | 11.61 | 6.61 | 6.91 | 4.73 | 4.89 |

B. Résultats et interprétation

A partir des données du tableau IV.12 et l'évolution de la résistance en compression (Tableau IV.13), on peut évaluer le nombre de jours nécessaires à respecter avant la date d'apparition probable du gel pour mettre en œuvre la couche de forme en fonction des différents traitements (Tableau IV.14).

Tableau IV.14: Age à partir duquel $R_c K_{c/t} \times 0,25$ en fonction des formulations étudiées

| Formulations | vase brut | 96% SF +4% Chaux | 91% SF + 2% Chaux +7% Ciment | 61% SF +2% Chaux +7% Ciment+30% Sable | 63% SF +7% Ciment+30% Sable |
|---|-----------|---------------------|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| Valeur minimale de R_c ($K_{c/t} \times 0,25$ en MPa) | 2.90 | 1.65 | 1.73 | 1.18 | 1.22 |
| Temps (jours) | ND | ND | ND | 7 | 28 |

IV.3.11. Campagnes d'essais en compression diamétrale

L'objectif de cet essai est de déterminer les performances mécaniques en traction de la couche traitée (résistance en traction R_t et module élastique E) à 28 jours et 90 jours de maturation.

Le couple (R_t , E) est évalué au moyen de l'essai en traction brésilien décrit dans la norme **NF P98-232-3**, sur des éprouvettes cylindriques d'élancement 1, confectionnées à w_{OPN} et $0,96 \times p d_{OPN}$. Dans notre cas, nous avons utilisé des moules ayant les dimensions suivantes :

5 cm ; h = 5 cm. Le protocole de fabrication par compression statique selon la norme **NF P98-230-2**, Le principe de l'essai consiste à effectuer une compression diamétrale en appliquant une charge linéique sur 2 génératrices diamétralement opposées de l'éprouvette (Figure IV.15).

La résistance en traction brésilienne (R_{tb} en MPa) est déterminée à partir de la force appliquée par la presse au moment de la rupture de l'échantillon (Fr en Newton), en utilisant la formule suivante :

$$R_t = 0,8 \times R_{tb} \quad \text{Eq.IV.1}$$

$$R_{tb} = 2 \times 10^{-2} \times \frac{Fr}{\pi \phi H} \quad \text{Eq. IV.2}$$

Avec:

R_t : résistance a la traction estimée de R_{tb} (MPa),

R_{tb} : résistance en compression diamétrale (MPa),

Fr : force appliquée sur l'éprouvette au moment de la rupture (N),

H : Hauteur de l'éprouvette (cm), ϕ : Diamètre de l'éprouvette (cm).

A partir de la résistance en traction directe et du module d'Young d'un matériau traité, on peut déterminer sa classe mécanique. Elle correspond au numéro de la zone (1 à 5) où se situe le matériau dans l'abaque de classement du GTS.

La zone 5 est le minimum requis pour l'utilisation d'un matériau traité en couche de forme mais les professionnels considèrent généralement qu'il faut se situer au moins en Zone 3 pour que cela représente un intérêt technico-économique.



Figure IV.15: Illustration de l'essai de compression diamétrale

A. Résultats et interprétation

Les résultats des essais (R_t , E) sur les formulations de mélanges étudiés à 28j et 90j sont rassemblés dans le tableau IV.15. R_t est évalué en multipliant R_{tb} par 0,8.

Tableau IV.15 : Paramètres mécaniques en traction des formulations de mélanges étudiés à 28j et 90j de maturation

| Age des éprouvettes | Paramètre mécanique | vase brut | 96% SF +4% Chaux | 91% SF +2% Chaux +7% Ciment | 61% SF +2% Chaux +7% Ciment +30% Sable | 63% SF +7% Ciment +30% Sable |
|---------------------|---------------------|-----------|------------------|-----------------------------|--|------------------------------|
| 28 jours | R_{tb} (MPa) | 0.076 | 0.070 | 0.16 | 0.46 | 0.26 |
| | R_t (MPa) | 0.061 | 0.060 | 0.13 | 0.37 | 0.21 |
| | E (MPa) | 170 | 400 | 1000 | 3077 | 2430 |
| 90 jours | R_{tb} (MPa) | 0.12 | 0.14 | 0.18 | 0.51 | 0.30 |
| | R_t (MPa) | 0.10 | 0.11 | 0.14 | 0.41 | 0.24 |
| | E (MPa) | 190 | 1000 | 1900 | 3225 | 2726 |

Les résultats du tableau IV.15 sont ensuite reportés sur l'abaque de classification [norme NF P 98 114 3] pour vérifier la possibilité d'utilisation en couche de forme des mélanges proposés. Il est important de rappeler que les valeurs de référence pour la classification des matériaux sont définies après 360 jours de cure (Figure IV.16). Selon la norme française NF P 98 114 2, quand la période d'étude ne permet pas d'effectuer la mesure à 360 jours, on peut déterminer le module d'élasticité et la résistance en traction à 28 jours ou 90 jours en fonction du type de liants utilisés. Les résultats obtenus sont ensuite estimés à 360 jours en utilisant des coefficients empiriques donnés dans les équations suivantes :

$$R_{t28}/R_{t360} = 0.60 \quad \text{Eq. IV.3}$$

$$E_{28}/E_{360} = 0.65 \quad \text{Eq. IV.4}$$

La classification des formulations à base de sédiments sont présentés sur la Figure IV.16 pour les résultats estimés à 360 jours.

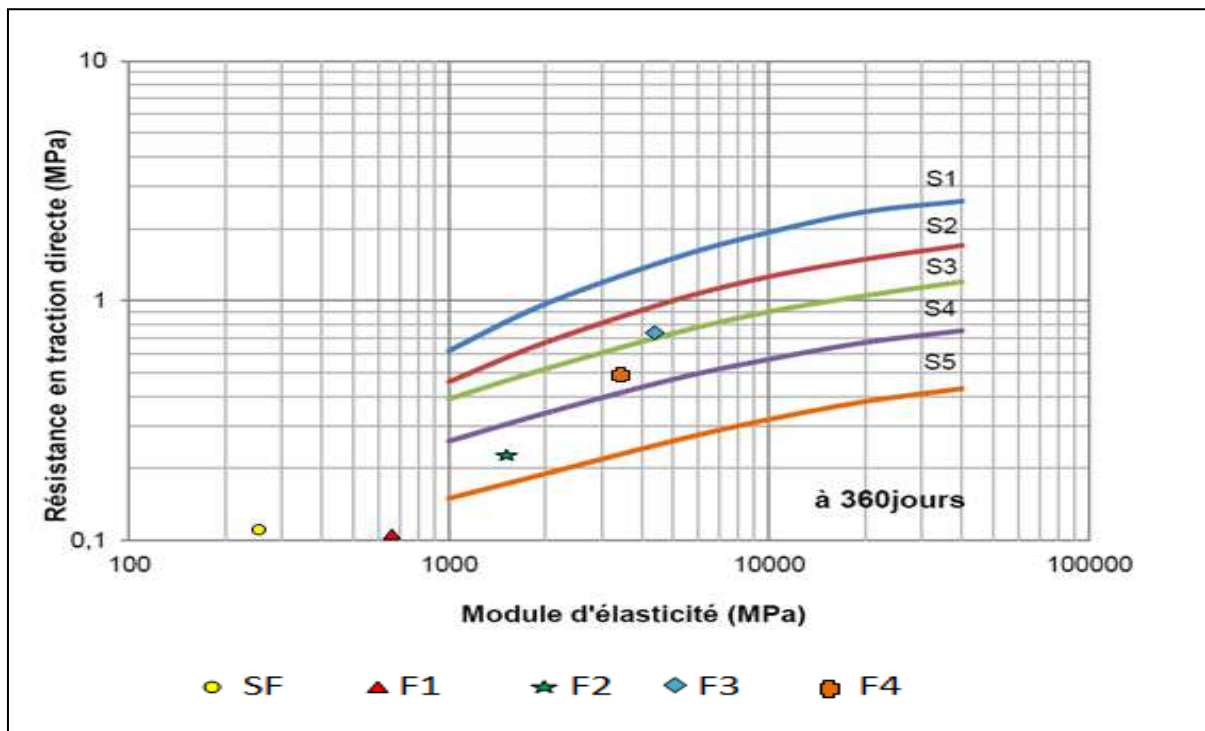


Figure IV.16 : Positionnement de formulations étudiées à 360 jours dans l'abaque de classement du GTS 2000

À partir des résultats obtenus R_t et E , On peut observer qu'à 28 jours et 90 jours, aucun des traitements utilisés ne permet d'atteindre ce niveau de performance. En revanche, à 360 jours, la formulation F3 (**61% SF +2% Chaux +7%Ciment+30% Sable**) se situe en Zone 3(**S₃**) qui est une bonne classe pour une valorisation en couche de forme. Par contre la formulation F4 (**63% SF +7%Ciment+30% Sable**) est en limite haute de la Zone 4 et F2 (**91% SF +2% Chaux +7%Ciment**) se situe en Zone5. Toutefois, rappelons qu'il est possible d'utiliser un traitement se positionnant en Zone 4 ou 5 mais l'épaisseur de la couche et donc le coût de sa mise en œuvre est alors plus élevé.

IV.4 Conclusion

La méthodologie générale de valorisation décrite dans cette partie a pour but d'améliorer les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du sédiment dragué du barrage Fergoug .La démarche de valorisation s'appuie sur des choix de formulations simples, peu coûteuses facilitant leurs mises en œuvre in situ.

L'étude du comportement mécanique des formulations proposées à base de sédiment du barrage de Fergoug présente une deuxième étape importante après la phase de caractérisation et avant toute utilisation en technique routière. Dans ce chapitre, les résultats obtenus ont montré que les formulations F3 et F4 présentent des performances mécaniques satisfaisantes au regard des critères requis pour une utilisation en couche de forme, telle que l'ajout d'un matériau granulaire a montré une amélioration de la densité sèche et une réduction de la teneur en eau optimales, Ainsi que la plasticité diminuait fortement, de même que leurs influence agit en grande partie sur la portance du matériau qui se trouve nettement améliorée ($IPI > 25$) pour une utilisation comme couche de forme. En revanche les formulations F1 et F2 ont donné des performances nettement inférieures (Zone 5).

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Les travaux de recherche entrepris dans cette thèse s'inscrivent dans une problématique de gestion des sédiments, en particulier les sédiments du barrage de Fergoug qui représentent un problème économique et environnemental majeur.

Dans le contexte d'une gestion écologique basée sur le développement durable, la valorisation en technique routière des sédiments est aujourd'hui un des enjeux intéressants car elle permet à la fois d'éviter la mobilité des contaminants potentiellement toxiques après l'immersion ou la mise en dépôt et permet de contribuer à préserver les ressources en granulats naturels.

La méthodologie générale de valorisation décrite dans cette étude a pour objectif L'utilisation des sédiments de dragage qui ont été prélevé du barrage de Fergoug situe au nord-ouest Algérien dans une formulation de matériau routier, en particulier dans une couche de forme. S'agissant d'un matériau nouveau, il a été nécessaire de commencer par une caractérisation approfondie des propriétés physico-chimiques et géotechniques des sédiments.

A cet effet, nous avons mené une série d'analyses physiques, chimiques et mécaniques sur des échantillons de sédiments prélevés de la retenue du barrage de Fergoug (wilaya de Mascara) au niveau des laboratoires L.N.H.C et de Génie-Civil à l'université Djillali Liabes à Sidi Bel Abbes. Nous montrons dans cette étude l'influence d'ajout de matériau granulaire et de liants hydrauliques en tant que correcteur à la fois granulométrique et mécanique permettant d'améliorer ces paramètres d'état géotechniques, ces caractéristiques optimales de densification et de portance du matériau ainsi que leurs classes de résistances mécaniques.

L'objectif de ce travail de thèse était d'évaluer la faisabilité et les conditions d'utilisation des sédiments traités dans les matériaux routiers, en particulier 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 A3 F11 (limons très plastiques faiblement organiques), qui comporte une majorité de particules minérales inférieures à 63 μm et une teneur en matières organiques entre (3% à 10%) ainsi que la valeur de bleu méthylène (VBS= 5,40). Les valeurs de l'indice portant

Conclusions générales et perspectives

immédiat obtenues à la teneur en eau optimale pour le sédiment du barrage de Fergoug montrent qu'une difficulté de circulation des engins sur le chantier et qu'un mauvais compactage de ces matériaux est à craindre.

Sa valorisation a nécessité donc des traitements à la chaux ou aux liants hydrauliques et l'utilisation de matériaux correcteurs de granulométrie comme le sable semble indispensable. Ces traitements ont l'intérêt de diminuer le taux global de matières organiques et d'étaler la distribution granulométrique. Ce qui peut améliorer la compacité et les performances mécaniques du matériau. Pour cela, la démarche, s'appuie sur des choix de formulations simples, peu coûteuses et facilitant leurs mise en œuvre in situ.

Dans le but de trouver une meilleure formulation pour l'utilisation des sédiments dragués du barrage Fergoug en couche de forme, on a mélangé le sédiment dragué avec des matériaux granulaires (chaux, ciment et sable de carrière) dans différentes proportions ce qui nous a donné quatre formulations F1, F2, F3, F4.

La formulation (F1) : Pour cette formulation, l'ajout de 4% de chaux sur le sédiment brut de Fergoug a conduit à une augmentation des caractéristiques mécaniques, mais sur une période plus longue en comparaison du ciment grâce aux réactions pouzzolaniques. Comme nous avons vu que ses performances semblent pouvoir encore augmenter après 90 jours, c'est-à-dire peut atteindre la valeur seuil de 1 MPa fixé par le GTS.

La formulation (F2) : Un traitement mixte à base de mixte à base de 2% de chaux vive et 7% de ciment CPJ 42,5 a permis de montrer que les résistances développées ne sont pas satisfaisantes pour une utilisation des sédiments en couche de forme.

Les formulations F3 et F4, L'ajout de correcteur granulométrique en complément avec le liant hydraulique a montré une amélioration de la densité sèche et une réduction de la teneur en eau optimales, ce qui donne un matériau compact et plus sec, un avantage pour les matériaux routier. Au regard du critère de traficabilité, les résistances mécaniques des mélanges des compositions F3 et F4 satisfont la valeur seuil de 1 MPa dès le premier jour, comme nous avons vu que les résistances obtenues pour la formulation F3 sont meilleures que celles obtenues avec la formulation F4.

Le critère de résistance minimale ($R_c = 1 \text{ MPa}$) fixé par le GTS (LCPC-SETRA, 2000) pour autoriser la circulation sur la couche traitée est bien atteint avant 7 jours de durée de cure.

Conclusions générales et perspectives

Du point de vu de portance leur influence se trouve nettement améliorée ($25 < IPI$) pour une utilisation comme couche de forme.

En conclusion, on peut admettre que les résultats obtenus sont encourageants pour envisager des valorisations matières des sédiments du barrage de Fergoug dans des applications géotechniques telles que des couches de forme pour les formulations F3 et F4.

Au terme de ce travail, les perspectives qui se dégagent peuvent être regroupées selon les axes suivants :

- La perméabilité est une des qualités les plus importantes à prendre en considération pour les matériaux utilisés en couche d'assise de forme. En ce qui concerne les sédiments, il est intéressant d'étudier leurs changements de perméabilité produits à cause de l'ajout des liants et des correcteurs granulométriques comme le ciment, la chaux et le sable de carrière. Après l'ajout de ces liants, une série de réactions chimiques se dérouleront dans ces matériaux formulés, et cela change certainement la microstructure et les modes interactions entre des particules.
- La poursuite de notre travail est d'étudier des formulations issues de sédiments de dragage sur les critères mécaniques et environnementaux. La continuité dans cet axe de recherche constitue des horizons nécessitant plus de moyens (un banc qui permet d'avoir plus de mesures et les outils de mesure adéquats), ainsi que l'outil numérique qui peut fournir des résultats appréciables. Un dimensionnement de l'ensemble « couche de forme-structure de chaussée », utilisant une méthode de calcul (modèle « Alizé », par exemple) peut être envisagé. Les caractéristiques mécaniques E et R peuvent être introduits dans le modèle de calcul, afin de retenir celles conduisant à une optimisation technique et économique de la chaussée.

Référence bibliographique

Référence bibliographique

[1] **Boutin. R, 2000** «Dragage et rejets en mer. Les produits de type vase », Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN 2-85978-336-9, Paris, 307p.

[2] **Diagana. B. H, 1997** « Solidification de la vase de Seine par ajout de limon ». D.E.A. PAE3S (Protection. Aménagement et Exploitation du Sol et du Sous-Sol). Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy.

[3] **Dongxing Wang, 2011** « solidification et valorisation de sédiments du port de dunkerque en travaux routiers » Thèse de doctorat de l'Université de Lille1.

[4] **LIFE, 2002:** « Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués », Projet européen LIFE réalisé par In Vivo, l'Agence de l'eau Artois Picardie, le Pôle de Compétence des sites et sols pollués. Source : Agence de l'eau Artois Picardie – <http://www.eau-artois-picardie.fr>

[5] **IDRA Environnement SA. CG33 / EPIC Arcachon/ SIBA. (juin 2006).** « Rapport final du schéma directeur du traitement des vases portuaires (SDTVP) du bassin d'Arcachon».174p.

[6] **Ernesto SILITONGA, 2010** « Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/ stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice » Thèse de doctorat de de l'Université de CAEN.

[7] **Dubois. V, 2006** « Etude du comportement physico-mecanique et caractérisation environnementale des sédiments marins- valorisation en technique routière ». Thèse de doctorat de l'université d'Artois.(publications des Mines de Douai).

[8] **Scordia P-Y (2008),** Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollues et traites dans les matériaux routiers. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille.

[9] **Raouf ACHOUR, 2013** « Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage ». Thèse de doctorat , Département Génie civil et environnemental de Mines Douai et laboratoire GRAI au département de génie civil de l'université de Sherbrooke(UdeS)

[10] **Les conférences professionnelles. Mardi 13 décembre 2005.** « Les sédiments pollués. » sont consultés par les sites suivants :

- **Site des agences de l'eau :** <http://www.Eaufrance.tm.fr>

- **Site de l'agence de l'eau Artois Picardie :** <http://www.eau-artois-picardie.fr>

[11] **Bourabah M.A, 2012** « Comportement Mécanique des sols fins application a la valorisation des sédiments de barrages en technique routière ». Thèse de doctorat, Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen

[12] **Agoustini. F, 2006** « Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins ».Thèse de doctorat délivré de l'université de sciences et techniques de Lille.

- [13] **Semcha. A, 2005** « Etude des propriétés géomécaniques des sédiments d'envasement de barrage et leur valorisation ».Thèse de doctorat (université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf).
- [14] **Mekerta. B, Semcha. A, Bendaoud. M, Troalen. J.P, 9- 11février2007** « Caractérisation et répartition spatiale des propriétés géotechniques des Sédiments d'envasement de la retenue du barrage du Fergoug ». Colloque sols et matériaux à problèmes – Tunisie.
- [15] **Boutouil. M, 1998** « Traitement des vases de dragage par stabilisation/solidification à base de ciment et additifs ». Thèse de doctorat, Université du Havre, 245p.
- [16] **Levacher. D, Colin. D, Carina Perroni. A, Duan. Z et Sun. L, 12-14 septembre 2006** « Recyclage et valorisation de sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers ». IXèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Brest.
- [18] **Yingjie LIANG, 2012** « Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres » Thèse de doctorat de l'Université de CAEN.
- [19] **COLIN D. (2003)**, Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière. Ph.D Thesis, Université de Caen, 180 p.
- [20] **GTS (2000)**, Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques-Guide technique, LCPC-SETRA, 240p
- [21] **Tran N.T. (2009)**, Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Thèse, Ecole des Mines de Douai, 187p
- [22] **Levacher. D, Colin. D, Carina Perroni. A, Duan. Z et Sun. L, 12-14 septembre 2006** « Recyclage et valorisation de sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers ». IXèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Brest.
- [23] **Boutouil. M¹, Levacher. D², 2000** « Traitement et valorisation des vases de dragages par solidification/stabilisation: état de l'art ».VI^{èmes} Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Caen, France, 17-19 Mai 2000.
1-Docteur, Université du Havre, Laboratoire de Mécanique
2-Professeur des Universités, Université de Caen, Centre de Géomorphologie, M2C
UPRES A 6143 CNRS
- [24] **Boubaker. R, Boutouil. M, 2006** « Etude de la compressibilité et de microstructure d'un sédiment de dragage traité au liant hydraulique ». IXèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, 12-14 septembre 2006, Brest
- [25] **GTR (1992)**, Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule I, principes généraux, 100 p.
- [26] **Bacot. J, Kham Khoeup. A** « Essais de stabilisation de vases estuariennes à l'aide de liants hydrauliques en vue d'une utilisation en construction routière ». INSA de Rennes, LGCGM – Equipe Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement, INSA de Rennes, Département GCU
- [27] **Guezouli . A, 1999** « Valorisation des cendres de boues de station d'épuration des eaux. Perspectives d'applications en technique routière ». Thèse de doctorat de l'université Claude Bernard – Lyon 1. Ecole Doctorale MEGA.

Référence bibliographique

- [28] **Andras. B, routes II.** « Les structures des chaussées, la construction et l'entretien des routes ». Professeur à l'université des sciences et de la technologie d'Oran (U.S.T.O)
- [29] **Cuisinier. O, deneele. D, masrouri. F, 18-20juin2008** « Effets des composés chimiques sur le traitement des sols à la chaux et/ou au liant hydraulique ». Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur JNGG08-Nante.
- [30] **Mekerta. B, 1995** « Etude des propriétés géomécaniques des sédiments d'envasement de la retenue du barrage de Génissiat ». Thèse de doctorat de l'INPL, Ecole National Supérieure de Géologie Nancy.
- [31] **Manuel de laboratoire de génie civil**, mode opératoire.
- [32] **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.
- [33] **Remini. W, Remini. B, Juin 2003** « la sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord ». Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 02, pp. 45-54
- [34] **Labiod¹. Z, Remini². B, Belaredj³. M, Juin 2004** « Traitement de la vase du barrage de Bouhanifia en vue de sa valorisation ». (Maître assistant, université de Sidi Bel Abbes, Algérie, 2 Professeur, université de Blida, Algérie, 3 Maître de conférences, centre universitaire de Mascara). Larhyss/Journal n° 03, pp.7-12.
- [35] **Guedouda. M. K, 2005** « Stabilisation des argiles gonflantes par ajout du sable de dune : cas région de laghouat ». Thèse de magister. Université des sciences et de technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [36] **Cours post- graduation en géotechnique - enset (Oran).** « Description, identification et classification des sols (Juin 2006).
- [37] **Miraoui, M., 2010:** « Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil », Thèse Doctorat, Mines de Douai, 210pp.
- [38] **Serbah Boumediene, 2010 ;** « Etude et valorisation des sédiments de dragage du barrage bakhadda » Mémoire de Magister en Génie civil, Laboratoire « Eau et Ouvrages dans Leur Environnement », Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen
- [39] Agence Nationale des barrages (1990) revue Algérie.
- [40] **Remini. B et Hallouche. W, 2004** « La problématique de l'envasement des barrages en Algérie ». Université de Blida, laboratoire : Eau - Roche -Plante, Centre universitaire Khemis Miliana
- [41] **Remini. B, Hallouche. W, Juin 2005** « prévision de l'envasement dans les barrages du Maghreb ». Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 04, pp.69-80
Chercheurs au laboratoire de recherches en hydraulique souterraine et de surface
(Département de Génie Rural, Université de Blida Algérie)
- [42] **Abriak. N. E, 2003** « Etude d'une grave routière à base de sable de dragage ». 2nd International Symposium on Contaminated Sédiments.
- [43] **Abdo J. (2009) Guide :** T50. Voiries et aménagements urbains en béton (Tome 1) Conception et dimensionnement, CIM Béton (Centre d'information sur le ciment et ses applications), 118p.

[44] [GEODE 2000] Arrêté du 14 juin 2000 (J.O du 10 Août 2000) relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire.

[45] **Taleb. A, 1987** « conception d'un barrage en vue de réduire l'envasement de la retenue ». Thèse de doctorat Université de Liège.

[46] **Korso. K, 1986** « Contribution à l'analyse du processus de sédimentation dans le barrage retenue du Fergoug ». Dissertation de Post-Graduation, Université des Sciences et de Technologie d'Oran.

[47] **Demmak.A (1982)** « Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides. Thèse de docteur- ingénieur Université de Pierre et Marie Curie Paris XI.

[48] **Marzouki. T, 1992** « Diagnostic de l'envasement des grands barrages marocains ». Revue marocaine du Génie Civil, n°38.pp.46-53.

[49] **Bouchetata. A, Bouchetata. T, 2006** « Propositions d'aménagement du sous-bassin-versant de l'oued Fergoug (Algérie) fragilisé par des épisodes de sécheresse et soumis à l'érosion hydrique ». Article scientifique, institut ogonomique méditerranéen de Montpellier (Iamm).

[50] **Habib. P, 1997** « Application de la mécanique des sols et des roches ». Génie géotechnique, Ellipses, AUPEL/UREF, Paris, 222p.

❖ Normes

- **NF P 11-300, septembre 1992** : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- **NFP 94-068, Novembre 1993**. Sols: reconnaissance et essai - Mesure de la quantité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache
- **NF P 94-050, septembre 1995**. Sols: reconnaissance et essai - Détermination de la teneur en eau pondérale des sols. Méthode par étuvage
- **NF P 94-054, octobre 1991**. Sols: reconnaissance et essai - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols. Méthode du pycnomètre à eau.
- **NF P 94-056, mars 1996**. Sols: reconnaissance et essai - Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage.
- **NF P 94-057, mai 1992**. Sols: reconnaissance et essai - Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation.
- **NF P 94-093, Décembre 1993**. Sols: reconnaissance et essai - Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol : essai Proctor normal, essai Proctor modifié.
- **NF P 94-071-1, août 1992**. Sols: reconnaissance et essai - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte: cisaillement direct.

Référence bibliographique

- **NF P 94-051, mars 1993.** Sols : reconnaissance et essai – Détermination des limites d'Atterberg – limite de liquidité à la coupelle- limite de plasticité au rouleau.
- **XP P 94-047, décembre 1998 :** méthode par calcination, elle consiste à brûler la matière organique de la fraction 0/2 mm d'un échantillon de sol.
- **NF P94-100, Aout 1999.** Sols : reconnaissances et essais – Matériaux traités à la chaux et/ou au liant hydraulique – Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement.
- **NF P 98-230-2. Août 1993.** Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités. Fabrication des éprouvettes de sable ou de sols fins par compression statique
- **NF P 98-232-3. Octobre 1993.** Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques. Essai de compression diamétrale sur sables et sols fins.
- **NF P 98-232-1. Novembre 1991.** Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques. Essai de compression simple sur graves.
- **NF P 98-114-2 (Novembre 1994).** Assises de chaussées. Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques. Partie 2 : Sables traités aux liants hydrauliques.
- **NF P 98-114-3 (Avril 2001).** Assises de chaussées. Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques. Partie 3 : Sols traités aux liants hydrauliques éventuellement associées à la chaux.
- **NF P 98 115.** Janvier 1992. Exécution des corps de chaussées – Constituants – Composition des mélanges et formulation – Exécution et contrôle.
- **NF P 98-113.** Novembre 1994. Assises de chaussée. Sables traités aux liants hydrauliques et pouzzolaniques. Définition – Composition – Classification.