

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي-تيسة

Université Larbi Tébessi– Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Genie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Par : BELAADA Kamel

MOSBAH Aissam

Sujet

CARACTERISATION DU SÉDIMENT DE DRAGAGE DU BARRAGE D'OULDJET MELLEGUE

Présenté et soutenu publiquement, le 23 / 06 / 2021 , devant le jury composé de :

LAOUAR Mohamed Salah

Professeur

Rapporteur

HOUAM Abdelkader

Professeur

Président

BOUCHOUCHA Abdallah

MAA

Examineur

Promotion : 2020/2021

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail

A ma chère maman, qui avec son amour et sa patience m'a donné le meilleur d'elle. A mon père, qui dans sa sagesse a su me soutenir et m'orienter vers la fin de mes études. À mes frères Abdul Hamid, Mourad, Rafik et Zakaria, et à mes sœurs, Layla et Malika.

A ma chère épouse et mes chers enfants, Al-Mu'tasim Billah, Rustom Yacoub et ma belle fille, Rodayna

À mes amis fidèles et à tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé à terminer mes études.

AISSAM

Remerciement

Un grand remerciement d'abord à ALLAH le Tout Puissant de nous avoir donné la force, la santé et la volonté d'accomplir ce travail et d'avoir éclairé nos chemins.

A l'issue de ce modeste travail ; Nous tenons à remercier tous ceux qui ont collaboré à sa réalisation et son suivi de près ou de loin. Nous désirons en premier lieu adresser nos remerciements les plus sincères à nos encadreur de ce projet, le professeur LAOUAR Mohamed Salah pour son confiance et sa patience et d'avoir accepté notre encadrement, ainsi pour ces conseils et encouragements les plus pertinents et enrichissants.

Un remerciement aux responsables de l'unité de recherche des matériaux émergents de l'université de Setif 2 pour l'accueil chaleureux et les moyens mis à notre disposition pour la réalisation des essais à avoir : Granulolazer, ATG, FRX, DRX, PH et SP.

Nous tenons à remercier aussi les ingénieurs du laboratoire du génie civil de l'université LARBI Tebessi Achi Souad et Smaali Bouziane pour leur accueil et leurs aide.

Et aussi l'ingénieur de laboratoire de la science de la terre de l'université LARBI Tebessi pour les essais réalisés à son niveau.

Un remerciement aux cadres et responsables du barrage Oueldjet Mélégué pour leur collaboration et mise à nos disposition toutes les documentations nécessaires.

Nous n'oublierons pas de remercier toute l'équipe du laboratoire CONSTRIM à Tebessa, et laboratoire COSIDER du barrage Oued Jedra à Souk-Ahras qui nous ont aidés pour la réalisation de plusieurs essais et analyses.

Enfin, Nous adressons toutes nos respects et enthousiasme à nos familles, nos amis, nos collègues de travail, pour leur confiance, encouragement, et leurs conseils, Merci à tous.

Kamel et Aissam

Liste des symboles

| | |
|---------------|--|
| V | Vitesse de l'écoulement sur le lit du cours d'eau. |
| W | Vitesse de chute des particules. |
| MS33 | Mortiers à 33% de remplacement du sable par le sédiment traité. |
| MS66 | Mortiers à 66% de remplacement du sable par le sédiment traité. |
| MS100 | Mortiers à 100% de remplacement du sable par le sédiment traité. |
| CU | Essais triaxial consolidés-non drainés. |
| UU | Essais triaxial non consolidés-non drainés. |
| CD | Essais triaxial consolidés-drainés. |
| VBS | Essais de bleu de méthylène. |
| IP | Indice de plasticité. |
| L_p | Limite de plasticité. |
| L_L | Limite de liquidité. |
| G_s | Densité des grains solide. |
| W_{opt} | La teneur en eau optimum. |
| φ | Angle de frottement interne |
| C | Cohésion. |
| ρ_s | Masse volumique des particules solides. |
| ρ_w | Masse volumique de l'eau prise égale à 1g/cm^3 . |
| ρ_{dmax} | Masse volumiques sèche maximale. |
| ρ_h | Masse volumique humide. |
| σ_3 | Contrainte principale mineure. |
| σ_1 | Contrainte principale majeure. |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 4.1-Appports mensuels..... | 41 |
| Tableau 4.2-Résultats de crues adoptées à Ouenza et Ouldjet-Mellegue..... | 42 |
| Tableau 4.3-Résultats du transport solide adopté à Nebeur et Ouldjet-Mellegue | 42 |
| Tableau 4.4-Résultats de la salinité adoptée à Ouldjet-Mellegue | 42 |
| Tableau 4.5-Evaporation sur plan d'eau libre..... | 46 |
| Tableau 4.6-apports mensuels à Ouldjet – Mellègue | 47 |
| Tableau 4.7-Transports solides à Ouenza et Ouldjet Mellegue..... | 47 |
| Tableau 4.8-El Aouinet – Salinité (g/l) – Période 1973 à 1995..... | 48 |
| Tableau 4.9-Ouldjet Mellegue – Calcul du tonnage en sel et de la salinité moyenne | 49 |
| Tableau 4.10-Résultats de l'analyse physico-chimique du 25/05/2005. | 49 |
| Tableau 5.1-Programme des essais de caractérisation. | 55 |
| Tableau 5.2-Granulométries du sol par tamisage | 56 |
| Tableau 5.3-Récapitulation des diamètres effectifs des sols..... | 58 |
| Tableau 5.4-Classes de la granulométrie de sols | 59 |
| Tableau 5.5-Composition chimique par spectrométrie de fluorescence à rayon X..... | 61 |
| Tableau 5.6-Résultats de l'essai de la limite de plasticité..... | 65 |
| Tableau 5.7-Résultats de l'essai de la limite de liquidité | 67 |
| Tableau 5.8-Détermination de la limite de plasticité WP..... | 69 |
| Tableau 5.9-Classement des sols selon l'indice de plasticités..... | 70 |
| Tableau 5.10-Classement des sols selon l'abaque de Casagrande. | 73 |
| Tableau 5.11-Structure du sol en fonction de l'indice de consistance I_c | 74 |
| Tableau 5.12-Classement des sols selon Indice consistance | 74 |
| Tableau 5.13-la classification de l'active des sols. | 75 |
| Tableau 5.14-Normes et méthodes utilisées pour la caractérisation des matériaux étudiés. | 75 |
| Tableau 5.15- Résultats de l'essai bleu méthylène. | 78 |
| Tableau 5.16-Classification de sol par valeur de bleu de méthylène | 78 |
| Tableau 5.17-Classement des sols selon Valeur de VBS. | 79 |
| Tableau 5.18-Surface spécifique des minéraux argileux les plus courants. | 80 |
| Tableau 5.19-Classement des sols selon classification de Mitchell (1993)..... | 80 |
| Tableau 5.20-Poids spécifiques du sol..... | 81 |
| Tableau 5.21-Classification selon la teneur en carbonate de calcium. | 83 |
| Tableau 5.22-Classification des sols selon MO..... | 84 |
| Tableau 5.23-Conditions des essais Proctor normal et modifié..... | 86 |
| Tableau 5.24-Résultats essai Proctor normal et modifié Sol 1..... | 88 |
| Tableau 5.25-Résultats essai Proctor normal et modifié Sol 2..... | 88 |
| Tableau 5.26-Résultats essai Proctor normal et modifié Sol 3..... | 89 |
| Tableau 5.27-Résultats essai Proctor normal et modifié Sol 4..... | 90 |
| Tableau 5.28-Résultats essai Proctor normal et modifié Sol 5..... | 90 |
| Tableau 5.29-Les résultats du pourcentage de manipulation. | 93 |
| Tableau 5.30-Résultats des l'essai CBR | 94 |
| Tableau 5.31-Classification selon l'indice de CBR. | 95 |
| Tableau 5.32-Résultats de l'essai CBR après immersion. | 96 |
| Tableau 5.33-Classification du sol étudié. | 98 |
| Tableau 5.34-Caractéristiques géotechniques du Sol 5 du barrage Ouldjet Mellegue. | 99 |
| Tableau 6.1-Granulométries par tamisage du sable. | 108 |
| Tableau 6.3-La composition chimique de la chaux. | 110 |
| Tableau 6.4 -Caractéristiques physiques de la chaux.. | 111 |
| Tableau 6.5-Caractéristiques chimiques. | 111 |
| Tableau 6.6-Formulation étudiés. | 112 |
| Tableau 6.7-Répartition des éprouvettes en fonction des essais et formulation | 114 |
| Tableau 6.8-Poids des éprouvettes (essais de compression) | 115 |

| | |
|---|------------|
| <i>Tableau 6.9-Vitesse ultrasoniques longitudinales (essai compression).....</i> | <i>116</i> |
| <i>Tableau 6.10- Module de Young des éprouvettes (essai de compression).....</i> | <i>118</i> |
| <i>Tableau 6.11-Poids des éprouvettes (essais de fendage).....</i> | <i>119</i> |
| <i>Tableau 6.12-Vitesse ultrasoniques longitudinales- fendage-.....</i> | <i>120</i> |
| <i>Tableau 6.13--Module de Young -essai de fendage.....</i> | <i>121</i> |
| <i>Tableau 6.14-Résistances en compression simple des sédiments</i> | <i>123</i> |
| <i>Tableau 6.15-Facteurs de conversion entre (Rc) et (Rtb).....</i> | <i>125</i> |
| <i>Tableau 6.16-Age à partir duquel $Rc Kc/t \times 0,25$ en fonction des formulations étudiées.....</i> | <i>126</i> |
| <i>Tableau 6.17-Résistances en Fendage des sédiments.....</i> | <i>128</i> |
| <i>Tableau 6.18-Résultats des essais (Rt, E) sur les formulations à 14 et 28 jours.</i> | <i>129</i> |
| <i>Tableau 6.19-Résultats des essais (Rt, E).à 28 et 360 jours</i> | <i>130</i> |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| <i>Figure 2.1-Sédiment d'une retenue après une chasseresse.</i> | 4 |
| <i>Figure 2.2-Processus de sédimentation</i> | 6 |
| <i>Figure 2.3-Diagramme de Hjulstrom (Boulvain, 2017).</i> | 7 |
| <i>Figure 2.4-Modes de transport solide en hydraulique fluviale (Sedib A., 2004).</i> | 10 |
| <i>Figure 2.5-Problèmes posés par la sédimentation.</i> | 11 |
| <i>Figure 2.6-Dragage hydraulique.</i> | 16 |
| <i>Figure 2.7-Pompe hydraulique.</i> | 16 |
| Figure 2.8-Drague suceuse refouleuse, Palm Jebel Ali Island-Dubai (De Nul, 2015). | 17 |
| <i>Figure 2.9-Drague à godets (LAROUSSE, 2017).</i> | 17 |
| Figure 2.10-Drilage mécanique. | 18 |
| <i>Figure 2.11-Drilage à l'Américaine.</i> | 19 |
| <i>Figure 2.12-Rejet de la vase draguée (Barrage de Fergoug).</i> | 20 |
| <i>Figure 2.13-Entraînement de la vase en aval (Plaine de la Mactaa).</i> | 21 |
| <i>Figure 2.14-Moyens de lutte contre l'envasement.</i> | 22 |
| <i>Figure 2.15-Méthode de surélévation des barrages.</i> | 23 |
| Figure 3.1-Une couche d'argile dans un bassin de lagunage. | 30 |
| <i>Figure 4.1-Plan de situation du barrage.</i> | 33 |
| <i>Figure 4.2-Carte générale du projet du barrage.</i> | 35 |
| <i>Figure 4.3-Aménagement -Vue en plan générale.</i> | 37 |
| <i>Figure 4.4- Dérivation provisoire du barrage</i> | 38 |
| <i>Figure 4.5- Pluies annuelles à Tébessa.</i> | 44 |
| <i>Figure 4.6-Répartition mensuelle des pluies maximales journalières.</i> | 45 |
| <i>Figure 4.7-Pluies maximum journalières, répartition entre postes.</i> | 45 |
| <i>Figure 4.8-Mesure de salinité à El Aouinet.</i> | 48 |
| <i>Figure 5.1 -Carte des barrages en Algérie.</i> | 54 |
| <i>Figure 5.2-Carte détermine les Zones de prélèvement.</i> | 54 |
| <i>Figure 5.3-Les différentes proportions du sol d'étude</i> | 56 |
| <i>Figure 5.4-Laboratoire Granulométrie laser.</i> | 57 |
| <i>Figure 5.5-Courbes granulométriques du sol.</i> | 58 |
| <i>Figure 5.6-Matériels utilisés pour ATG.</i> | 62 |
| Figure 5.7 Analyse Thermo-Gravimétrique (ATG). | 63 |
| <i>Figure 5.8-Etats de sol et limites d'Atterberg.</i> | 64 |
| <i>Figure 5.9-L'appareil de Casagrande</i> | 65 |
| <i>Figure 5.10-Détermination de la limite de plasticité WP.</i> | 69 |
| <i>Figure 5.11-Nature du sol selon Ip.</i> | 69 |
| Figure 5.13- Classification du sol 1 sur l'abaque de Casagrande. | 70 |
| Figure 5.14-Classification du sol 2 sur l'abaque de Casagrande. | 71 |
| Figure 5.15-Classification du Sol 3 sur l'abaque de Casagrande. | 71 |
| <i>Figure 5.16-Classification du Sol 4 sur l'abaque de Casagrande</i> | 72 |
| <i>Figure 5.17-Classification du Sol 5 sur l'abaque de Casagrande.</i> | 72 |
| <i>Figure 5.18-Diagramme de classification des sols selon Williams et Donaldson (1980).</i> | 73 |
| <i>Figure 5.19-Tache référence d'essai bleu de méthylène.</i> | 76 |
| <i>Figure 5.20-Les étapes de l'essai bleu méthylène</i> | 77 |
| <i>Figure 5.21-Nature du sol selon VBS.</i> | 79 |
| <i>Figure 5.22-Manipulation d'essai densités spécifiques.</i> | 80 |
| <i>Figure 5.23-Manipulation de l'essai de calcimétrie.</i> | 82 |
| Figure 5.24-Mesure de l'acidité de sédiment de drague par un appareil de pH-mètre. | 85 |
| <i>Figure 5.25-Etapes de l'essai Proctor</i> | 87 |
| <i>Figure 5.26-Diagramme des essais Proctor normal el modifié Sol 1.</i> | 88 |
| <i>Figure 5.27-Diagramme des essais Proctor normal el modifié Sol 2.</i> | 89 |

| | |
|--|-----|
| Figure 5.28-Diagramme des essais Proctor normal et modifié Sol 13..... | 89 |
| Figure 5.29-Diagramme des essais Proctor normal et modifié Sol 4..... | 90 |
| Figure 5.30-Diagramme des essais Proctor normal et modifié Sol 5..... | 91 |
| Figure 5.31-Réalisation de l'essai CBR. | 93 |
| Figure 5.32-Variation des déplacements en fonction l'effort. CBR immédiat | 94 |
| Figure 5.33 -Manipulation d'essai CBR..... | 96 |
| Figure 5.34-Variation des déplacements en fonction l'effort CBR après immersion. | 97 |
| Figure 5.35-La différence entre les deux essais. | 98 |
| Figure 5.36-Classification du sédiment Sol 5 du barrage Ouldjet Mellegue selon la classification du GTR (LCPC-SETRA, 2000). | 100 |
| Figure 5.37-Classement du sol 5 selon G.T.R.92. | 101 |
| Figure 6.1-Démarche de la valorisation du sédiment en couche de forme | 106 |
| Figure 6.2-Etat des sédiments avant le traitement | 107 |
| Figure 6.3 -Courbe granulométrique de sable de dunes. | 109 |
| Figure 6.5 -Illustration de la confection des éprouvettes. | 113 |
| Figure 6.6-Matériel de l'essai Proctor Normale. | 113 |
| Figure 6.7- a) Protocole de compactage b) Aspect du moule à la fin de l'essai | 114 |
| Figure 6.8-Vitesse ultrasoniques longitudinales (essai compression). | 117 |
| Figure 6.9-Diminution de la vitesse ultrasonique en fonction du temps..... | 117 |
| Figure 6.10-variation du module de Young en fonction du temps | 119 |
| Figure 6.11-La vitesse ultrasonique en fonction du temps (essais de fendage)..... | 120 |
| Figure 6.12-Module de Young en fonction du temps | 121 |
| Figure 6.13- lustration des éprouvettes pour écrasement. | 122 |
| Figure 6.14-la résistance de compression en fonction du temps. | 123 |
| Figure 6.15 La résistance seuil autorisant la circulation sur la couche (1 MPa). | 124 |
| Figure 6.16-Illustration de l'essai de compression diamétrale. | 127 |
| Figure 6.17-La résistance en fonction du temps (essais brésilien) | 128 |
| Figure 6.18-Positionnement de formulations étudiées à 360 jours dans l'abaque de classement du GTS 2000..... | 131 |

Résumé

L'Algérie perd annuellement une capacité estimée à 32 millions de m³ sur un volume total de 5,2 milliards de m³ des 114 barrages en exploitation par le dépôt des sédiments dans les retenues.

Le barrage d'Ouldjet Mellegue situé au nord-est de l'Algérie n'est pas à l'abri de l'envasement, ce phénomène va se provoqué à cause de l'érosion très active surtout dans les zones semi aride. Pour cela il vient le jour de procéder au dragage pour essayer de rétablir des volumes de la retenue perdue par l'envasement.

Cette étude s'inscrit dans la recherche d'une méthodologie de gestion de sédiments dragués. L'objectif est de proposer des formulations économiquement compétitives et faciles à mettre en œuvre 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 d'Oueldjet Mellegue situé à Tébessa

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). D'où les résultats obtenus vérifient bien ces normes d'un matériau utilisé en domaine routier.

Mots clés : envasement, sédiments de dragage, valorisation, traitement, portance, liants hydrauliques.

Abstract

Algeria annually loses an estimated capacity of 32 million m³ out of a total volume of 5.2 Million m³ of the 114 dams in operation, by the deposition of sediments in reservoirs. The Ouldjet Mellegue dam located in the north-est of Algeria is not immune to siltation; this phenomenon will be caused by very active erosion, especially in semi-arid areas. To do this, the day has come to carry out dredging to try to restore the volumes of the reservoir lost by the siltation.

This study is part of the search for a methodology for the management of dredged sediments. The objective is to offer formulations that are economically competitive and easy to implement in situ that allow recovery of these materials in road geotechnics.

To this end, we carried out a series of physical, chemical and mechanical analyzes on sediment samples taken from the reservoir of the Oueldjet Mellegue dam located in Tebessa.

We show in this study the influence of adding granular material and hydraulic binders as both a granulometric and mechanical corrector allowing to improve these geotechnical state parameters, these optimal densification and bearing characteristics as well as their mechanical resistance classes.

Different formulations were then analyzed for recovery in road engineering in accordance with the recommendations of the GTR and GTS technical guides (LCPC-SETRA, 2000). Hence the results obtained verify these standards of a material used in the road sector.

Key words: siltation, dredged sediments, recovery, treatment, bearing capacity, hydraulic binders.

ملخص

تخسر الجزائر سنويا 32 مليون متر مكعب من إجمالي حجم 5.2 مليار متر مكعب من أصل 114 سدا قيد الاستغلال. عن طريق ترسب الرواسب في الخزانات، سد واد ملاق الواقع في الشمال الشرقي للجزائر ليس محصنا من الترسبات الطينية، فهذه الظاهرة ستحدث بسبب الانجراف النشط جدا، خاصة في المناطق شبه القاحلة. حان اليوم للقيام بذلك إجراء التجريف في محاولة لاستعادة أحجام الخزان التي فقدها الطمي.

هذه الدراسة جزء من البحث عن منهجية لإدارة الرواسب المجروفة. الهدف هو تقديم تركيبات تنافسية اقتصاديا وسهلة التنفيذ في الموقع تسمح باستعادة هذه المواد في الجيوتقنية للطرق.

ولهذه الغاية، أجرينا سلسلة من التحليلات الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية على عينات الرواسب المأخوذة من خزان سد واد ملاق الواقع في تبسة.

في هذه الدراسة، أظهرنا تأثير إضافة المواد الحبيبية والمجندات الهيدروليكية كمصحح محبب وميكانيكي مما يجعل من الممكن تحسين معلمات الحالة الجيوتقنية هذه، هذه الخصائص المثلى للتكثيف والحمل بالإضافة إلى فئات المقاومة الميكانيكية.

ثم تم تحليل التركيبات المختلفة للاستعادة في هندسة الطرق وفقاً لتوصيات الأدلة الفنية لـ GTS وGTR (LCPC-SETRA, 2000). ومن هنا جاءت النتائج التي تم الحصول عليها للتحقق من هذه المعايير للمواد المستخدمة في قطاع الطرق.

كلمات مفتاحية:

ترسيب الطمي، الرواسب المجروفة، الاستعادة، المعالجة، قدرة التحمل، الروابط الهيدروليكية،

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Chapitre 1 | 1 |
| 1. Introduction Générale | 1 |
| Chapitre 2 | 4 |
| 2. Les sédiments de barrage | 4 |
| 2.1 Introduction | 4 |
| 2.2 Les sédiments | 4 |
| 2.3 Les Argiles | 5 |
| 2.4 La vase | 5 |
| 2.5 Le bassin versant | 5 |
| 2.6 Le processus de sédimentation | 5 |
| 2.6.1 L'Érosion..... | 6 |
| 2.6.1.1 Les types d'érosion..... | 7 |
| 2.6.2 Le transport solide | 8 |
| 2.6.2.1 Le transport solide par charriage | 9 |
| 2.6.2.2 Le Transport solide en suspension | 9 |
| 2.6.3 Problèmes posés par la sédimentation | 10 |
| 2.6.3.1 Réduction de la capacité | 11 |
| 2.6.3.2 Sécurité de l'ouvrage | 11 |
| 2.6.3.3 Blocage des vannes | 12 |
| 2.6.3.4 Dégradation de la qualité de l'eau (Accélération de l'eutrophisation) | 12 |
| 2.6.3.5 Sédimentation dans les canaux d'irrigation | 13 |
| 2.7 Techniques de dévasement | 13 |
| 2.7.1 Soutirage | 14 |
| 2.7.2 Dragage | 14 |
| 2.7.2.1 Types de dragage | 15 |
| 2.7.2.2 Différents moyens de dragage | 19 |
| 2.7.2.3 L'Impact sur l'environnement | 20 |
| 2.8 Les moyens de lutte contre l'envasement | 21 |
| 2.9 Moyens de lutte contre l'envasement utilisé en Algérie | 22 |
| 2.10 Conclusion | 23 |
| Chapitre 3 : | 25 |
| 3. Valorisation de la vase | 25 |
| 3.1 Introduction | 25 |
| 3.2 Utilisation comme fertilisant des terres agricoles | 25 |
| 3.3 Les amendements minéraux | 26 |
| 3.3.1 Les amendements calco-magnésiens..... | 26 |
| 3.3.1.1 Amendements à base d'argile..... | 26 |
| 3.3.1.2 Amendements à base de sable | 26 |
| 3.4 Fabrication du béton et mortier | 27 |
| 3.5 Fabrication des liants (ciments) | 27 |
| 3.6 Fabrication de brique | 28 |

| | | |
|--------------------------------------|--|-----------|
| 3.7 | Construction des routes et chaussées | 29 |
| 3.8 | Couche étanche pour un bassin de lagunage | 29 |
| 3.9 | Conclusion | 30 |
| Chapitre 4 : | | 32 |
| 4. | Présentation du barrage Ouldjet Mellegue..... | 32 |
| 4.1 | Localisation et accès | 32 |
| 4.2 | Présentation des ouvrages..... | 33 |
| 4.2.1 | Barrage en BCR et digues de col..... | 33 |
| 4.2.2 | Dérivation provisoire..... | 35 |
| 4.2.3 | Ouvrage de prise d'eau | 36 |
| 4.2.4 | Evacuateur de crues | 36 |
| 4.3 | Rapport hydrologique..... | 40 |
| 4.3.1 | Objet du rapport..... | 40 |
| 4.3.2 | Données et méthodes | 41 |
| 4.3.3 | Principaux résultats | 41 |
| 4.3.3.1 | Climat | 41 |
| 4.3.3.2 | Apports..... | 41 |
| 4.3.3.3 | Crues : | 42 |
| 4.3.3.4 | Transport solide | 42 |
| 4.3.3.5 | Salinité..... | 42 |
| 4.4 | Présentation du bassin versant et climat | 43 |
| 4.4.1 | Présentation du bassin versant | 43 |
| 4.4.2 | Pluies annuelles et mensuelles..... | 44 |
| 4.4.3 | Pluies maximum journalières | 44 |
| 4.4.4 | Evaporation sur plan d'eau..... | 45 |
| 4.5 | Apports..... | 46 |
| 4.5.1 | Apports liquides à Ouenza..... | 46 |
| 4.5.2 | Apports liquides à Ouldjet Mellegue | 46 |
| 4.6 | Transports solides | 47 |
| 4.6.1 | Salinité :..... | 48 |
| 4.6.2 | Analyses des eaux de l'oued Mellègue..... | 49 |
| 4.7 | Conclusions..... | 50 |
| Chapitre 5 : | | 53 |
| 5. | Caractérisation du sédiment du barrage Ouedjet Mellegue | 53 |
| 5.1 | Introduction..... | 53 |
| 5.2 | Matériau d'étude | 53 |
| 5.3 | Programme essais de caractérisation | 55 |
| Méthodes par diffraction laser | | 55 |
| 5.4 | Granulométries du sol | 55 |
| 5.4.1 | Granulométries du sol par tamisage | 55 |
| 5.4.2 | Granulométries du sol par laser (Granulométrie Laser)..... | 57 |
| 5.4.3 | Coefficient d'uniformité Cu | 59 |
| 5.4.4 | Coefficient de Courbure Cc | 59 |
| 5.5 | Spectrométrie de fluorescence des rayons (RFX) | 60 |
| 5.6 | Analyse Thermogravimétrique (ATG) | 61 |

| | | |
|--|---|------------|
| 5.6.1 | Mode opératoire (ATG) | 62 |
| 5.6.2 | Les conclusions de l'ATG | 62 |
| 5.6.3 | Caractéristiques techniques de l'ATG | 63 |
| 5.7 | Essais de consistance des sols | 64 |
| 5.7.1 | Limite de liquidité W_L | 64 |
| 5.7.2 | Limite de plasticité W_p | 67 |
| 5.7.3 | Indices de plasticité | 69 |
| 5.7.4 | L'indice de liquidité (I_L) | 74 |
| 5.7.5 | Indice consistance | 74 |
| 5.7.6 | L'activité du sol | 74 |
| 5.8 | Essai au bleu de méthylène..... | 75 |
| 5.8.1 | Principe de l'essai | 75 |
| 5.8.2 | Mode opératoire | 76 |
| 5.8.3 | Calculs et expression des résultats : | 77 |
| 5.8.4 | Surface spécifique | 79 |
| 5.9 | Densités spécifiques des grains solides..... | 80 |
| 5.10 | Essai de carbonate de calcium $CaCO_3$ | 81 |
| 5.11 | Teneur en matières organiques (MO%)..... | 83 |
| 5.11.1 | La méthode Chimique | 83 |
| Résultat :Tous les sols sont très pauvre en matière organique. | | 84 |
| 5.12 | Détermination du PH | 84 |
| 5.13 | Essais Proctor..... | 85 |
| 5.13.1 | Résultats des essais Proctor | 86 |
| 5.13.2 | -L'essai CBR | 91 |
| 5.13.2.1 | Principe de l'essai..... | 91 |
| 5.13.2.2 | L'essai CBR immédiat (IPI)..... | 91 |
| 5.13.2.3 | L'essai CBR après immersion | 92 |
| 5.13.3 | Mode Opératoire de l'essai CBR immédiat (IPI) | 92 |
| 5.13.4 | Mode Opératoire de l'essai CBR après immersion..... | 94 |
| 5.13.5 | Calcul des valeurs de CBR..... | 97 |
| 5.13.6 | -Résultats obtenues et la classification de sol étudié | 98 |
| 5.14 | Classification du Sédiment du barrage Ouldjet Mellegue selon le GTR | 98 |
| | (LCPC-SETRA, 2000) | 98 |
| 5.15 | -Conclusion | 101 |
| Chapitre 6 : | | 104 |
| 6. | -Valorisation du sédiment du barrage Ouldjet Mellegue..... | 104 |
| 6.1 | Introduction..... | 104 |
| 6.2 | Méthodologie de traitement des Sédiments du barrage d'Ouldjet Mellegue en technique routière | 104 |
| 6.3 | Préparation de la vase du barrage de Ouldjet Mellegue..... | 107 |
| 6.4 | Constitution du squelette de la formulation..... | 108 |
| 6.4.1 | Sables de dunes comme correcteurs granulaires..... | 108 |
| 6.4.2 | -Granulométries du sable..... | 108 |
| 6.4.3 | Le Ciment | 109 |
| 6.4.4 | La chaux..... | 110 |
| 6.4.4.1 | -Utilisation de la chaux..... | 111 |
| 6.5 | Les formulations proposées | 111 |

| | | |
|--|--|------------|
| 6.6 | Aptitude au traitement et résistance à la compression | 112 |
| 6.7 | Confection des éprouvettes | 112 |
| 6.8 | Répartition des éprouvettes et quantité de mélange préparé en fonction des essais | 114 |
| 6.9 | Essai de compression..... | 115 |
| 6.9.1 | Poids des éprouvettes..... | 115 |
| 6.9.2 | Mesure du module d'Young d'un matériau poreux par ultrasons | 115 |
| 6.9.2.1 | Mesure des vitesses longitudinales | 115 |
| 6.9.2.2 | Mesure des vitesses transversales..... | 116 |
| 6.9.3 | -Essai ultrasonique longitudinale | 116 |
| 6.9.3.1 | Le but de l'essai..... | 117 |
| 6.9.4 | Module de Young | 118 |
| 6.10 | -Essai de fendage | 119 |
| 6.10.1 | -Poids des éprouvettes..... | 119 |
| 6.10.2 | Essai ultrasonique longitudinale | 120 |
| 6.10.3 | Module de Young | 121 |
| 6.11 | -Essai de rupture en compression simple | 121 |
| 6.11.1 | -Évolution de la résistance mécanique au cours du temps | 122 |
| 6.11.2 | -Interprétation..... | 123 |
| 6.11.3 | -Age autorisant la circulation sur la couche de forme..... | 125 |
| 6.11.4 | -Détermination des rapports de conversion | 125 |
| 6.11.4.1 | Résultats et interprétation..... | 125 |
| 6.11.5 | - Les essais en compression diamétrale | 126 |
| 6.11.5.1 | Résultats et interprétation..... | 128 |
| 6.12 | -Résultats et interprétation | 131 |
| 5.1.1 | Conclusion | 131 |
| CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES | | 134 |
| 7. | REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 137 |
| 8. | Normes..... | 142 |

INTRODUCTION
GENERALE

Chapitre 1

1. Introduction Générale

L'envasement dans les barrages est l'un des principaux problèmes que rencontrent de nombreux barrages dans le monde. Selon le rapport publié par le Comité International des Grands Barrages (CIGB), plus de 50.000 grands barrages existent dans le monde avec une capacité très importante de stockage, exploités à des fins diverses comme l'approvisionnement en eau, la production d'énergie hydroélectrique et le contrôle des inondations.

En Algérie l'envasement des barrages devient de plus en plus inquiétant et fréquent. Plus de 32.106 m³ de vase se déposent chaque année au fond des retenues. Le barrage d'Ouldjet Mellegue est un nouveau barrage mais il n'échappe pas à ce problème avec le temps,

Ce travail permet d'étudier le comportement mécanique du sédiment de dragage du barrage d'Ouldjet Mellegue qui est situé sur l'Oued de Mellegue, commune de Dreaa Daira de Taoura à Douze kilomètre au sud de la ville d'Ouenza, permettant de constituer sur l'Oued de Ouldjet Mellegue une retenue d'une capacité totale de 156.4 millions m³. Sa réalisation a débuté en Octobre 2011 et sa mise en eau le 1er Septembre 2017. Après sa mise en eau, le barrage d'Ouldjet Mellegue à de capacité de 144 Hm³, soit un taux de 90 %.

Le dragage du barrage d'Ouldjet Mellegue n'est pas une opération prioritaire actuellement la récupérer du volume perdu avec le temps reste une opération primordiale. Et on doit penser sérieusement au dragage du barrage, ainsi on doit aussi penser aux problèmes d'environnement qui seront apparus. A cet effet l'étude des sédiments récupérés contribue dans la résolution de ces problèmes, d'un côté minimiser le cout élevé de l'opération de dragage et de l'autre côté régler les problèmes liés à l'environnement.

L'objectif de cette étude est le traitement des sédiments de dragage en vue de les utiliser comme constituant dans les couches d'assise de structures routières

Cette étude se divise en cinq chapitres.

Le deuxième chapitre présente la problématique du sédiment du barrage et l'envasement des barrages et la difficulté posée par les sédiments rejetés lors des opérations de dragage.

Le troisième chapitre expose la valorisation des sédiments de barrages et leur utilisation dans les différents domaines.

Le quatrième chapitre s'intéresse à la zone d'étude, on y trouve les caractéristiques hydrologiques, climatologiques et géologiques du bassin versant du barrage Ouldjet Mellegue.

Le cinquième chapitre est une description de la méthodologie d'utilisation des sédiments comme des matériaux routiers. La présentation des essais de caractérisation des sédiments du barrage d'Ouldjet Mellegue .

Le sixième chapitre résume les essais effectués et les traitements proposés pour améliorer ces sédiments. La démarche de valorisation envisagée, s'appuie sur des choix de préparation et de formulation simples.

Et finalement, ce travail est clôturé par une conclusion générale contenant l'essentiel des résultats trouvés ainsi que les perspectives pour les futures recherches, une rubrique de références bibliographiques.

CHAPITRE 2 :
LES SEDIMENTS DE BARRAGE

Chapitre 2

2. Les sédiments de barrage

2.1 Introduction

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

2.2 Les sédiments

D'un point de vue descriptif sommaire, les sédiments rencontrés sont essentiellement constitués de particules fines de la taille des argiles ; on peut rencontrer localement des passages beaucoup plus grossiers, allant jusqu'à des graves sableuses ou plus couramment des passages sableux. (Figure 2-1)



Figure 2.1-Sédiment d'une retenue après une chasseresse.

2.3 Les Argiles

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

2.4 La vase

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

2.5 Le bassin versant

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

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

2.6 Le processus de sédimentation

La sédimentation des barrages est due directement aux forts taux d'érosion des bassins Versants, dont les particules solides sont drainées directement par les cours d'eau être provoqueront à l'entrée des tenues des de densité. La figure 2.2 illustre le processus de sédimentation.

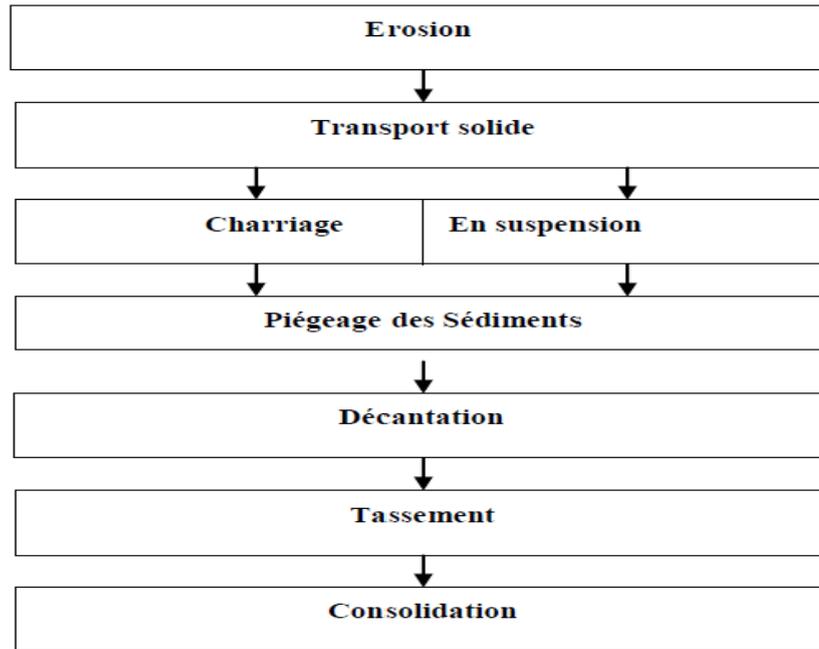


Figure 2.2-Processus de sédimentation

2.6.1 L'Érosion

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

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

-Les caractéristiques physiques d'un bassin qui influent sur l'érosion et le transport solide sont: Le relief, la nature géologique, le sol, la végétation, l'occupation des terres, la morphologie du réseau de drainage (Figure 2-3).

-Les caractéristiques hydrologiques comprennent les facteurs climatiques tels que : la précipitation et la température ; le volume et l'intensité des précipitations jouent un rôle important dans le processus d'érosion par suite de leurs effets dans la dynamique de détachement des particules par l'écoulement.

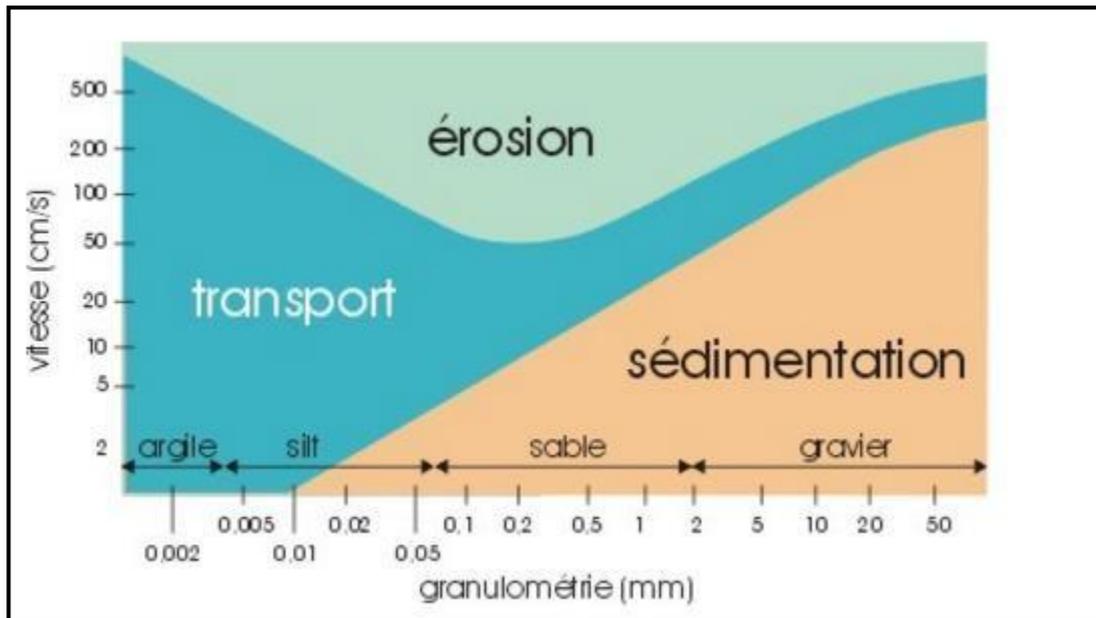


Figure 2.3-Diagramme de Hjulstrom (Boulvain, 2017).

2.6.1.1 Les types d'érosion

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

2.6.1.1.1 L'Erosion en nappe

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

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

2.6.1.1.2 L'Erosion linière

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

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

2.6.1.1.3 -L'Erosion en griffes et rigoles

Elle se produit lorsque l'écoulement d'eau se concentre et choisit son passage,

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

2.6.1.1.4 –L'Erosion par ravinement

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

2.6.2 Le transport solide

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

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

Les matériaux alluvionnaires constituant le lit des cours d'eau proviennent de l'élaboration des éléments de surface, en général des matériaux meubles du bassin versant, si l'on ne tient compte que de l'érosion en nappe évaluée au maximum à 20 t/ha/an, cette ablation est de l'ordre de 1.3mm/an, (Bouvard M., 1984 et Chebbani R., 1999).L'érosion des berges du lit des cours d'eau affluents, d'après les travaux effectués sur le fleuve de Sénégal, la Garonne et sur des rivières des Etat Unis, ce type d'érosion produit 20 à 30% du tonnage total des sédiments exportés (Bouanani A., 2004), il est évalué à 31 % de la charge total pour la haute Tafna en Algérie (Megnounif A., 2003).

Généralement, deux modes de transport solide sont considérés, le transport

solide par charriage et le transport solide en suspension, Il n'existe pas une délimitation nette entre ces deux modes de transport ; il y a des auteurs qui considèrent un troisième mode caractéristique intermédiaire, la saltation, où les particules se déplacent par des bonds, en alternant le charriage et suspension (Bouanani A, 2004).

2.6.2.1 Le transport solide par charriage

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

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

2.6.2.2 Le Transport solide en suspension

Le transport solide en suspension représente le transport des sédiments fins (argiles limons, sable fins), maintenus en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations; les particules se déplacent au sein de l'écoulement avec une vitesse de même ordre de grandeur que celle du fluide. (Figure 2.4).

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

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

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

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

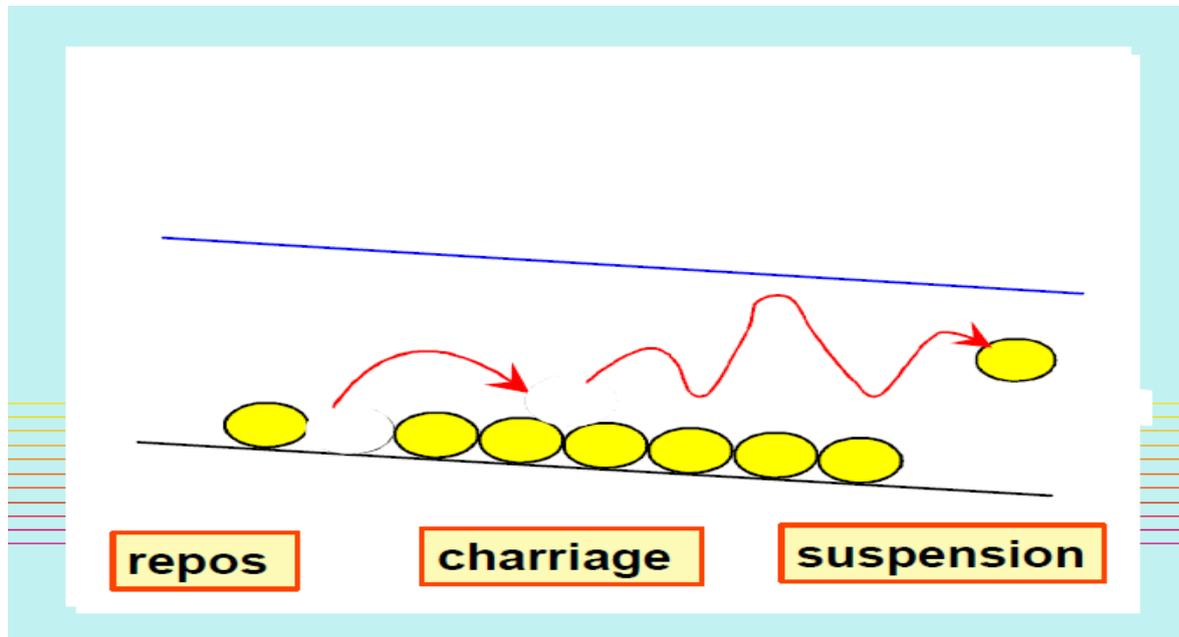


Figure 2.4-Modes de transport solide en hydraulique fluviale (Sedib A., 2004).

2.6.3 Problèmes posés par la sédimentation

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

Elle peut aussi accélérer l'eutrophisation du lac. Les sédiments en suspension dans l'eau distribuée par les canaux, à partir des barrages, se déposent dans ces ouvrages, réduisent leur débitance, et rendent difficile leur exploitation (voir figure 2.5), et elle a même un impact sur la qualité de l'eau.

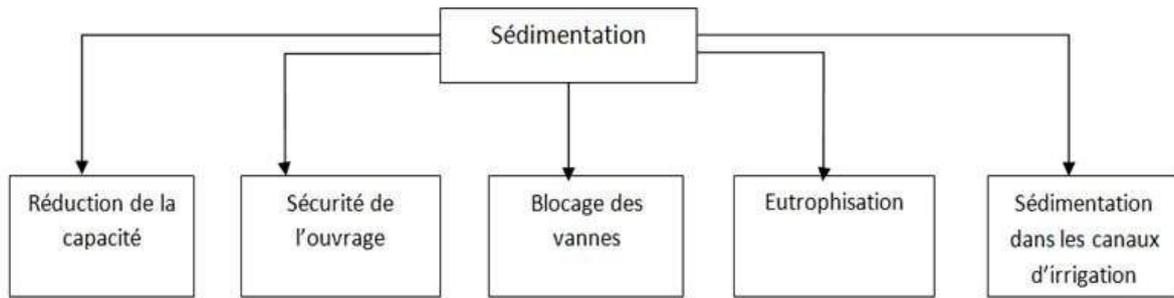


Figure 2.5-Problèmes posés par la sédimentation.

2.6.3.1 Réduction de la capacité

Les dépôts successifs de sédiments dans une retenue de barrage réduisent la capacité utile d'un barrage, et par suite sa durée de vie. Ce phénomène se traduit par une diminution des niveaux de services rendus par le réservoir. L'actualisation de la courbe : hauteur-capacité devient indispensable pour la bonne gestion de l'eau du barrage. Elle demande des mesures du dépôt des sédiments de manière périodique (par exemple tous les deux ans) par la réalisation de levés bathymétriques (Remini B., 2003).

2.6.3.2 Sécurité de l'ouvrage

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

La sédimentation des retenues a un impact sur la sécurité des barrages, par la mise en danger de la stabilité de l'ouvrage du fait de l'augmentation de la force hydrostatique produite par le remplacement accéléré du volume d'eau par la vase. Ceci se traduit par l'accroissement de la masse spécifique qui peut atteindre 1,8 t/m³. Ce cas a été signalé aux barrages de Zardézas, et de K'sob.(Oumrani N., 2009) ont signalé que si le taux de comblement d'une retenue dépasse 50% de la capacité initiale et la vase est en contact de l'ouvrage, dans ce cas, il faut prendre au sérieux la stabilité du barrage. C'est le cas des barrages d'Oued El Fodda, et de Fom El Gherza.

2.6.3.3 Blocage des vannes

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

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

- Barrage d'Oued el Fodda (Chlef): la vanne de fond a été bloquée depuis 1949 et se trouve maintenant sous plus de 40 m de vase.
- Barrage Chambon (France) : la vanne a été obturée en 1955, la solution adoptée a été la construction d'une nouvelle vanne de vidange, achevée en 1962.
- Barrage Foum el Gherza (Biskra): la vanne de fond a été bloquée de 1982 à 1989.

2.6.3.4 Dégradation de la qualité de l'eau (Accélération de l'eutrophisation)

Les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates...) qui proviennent particulièrement des apports en éléments fertilisants aux cultures et qui se déposent dans les réservoirs ; Une fois déposées, les particules solides se tassent, et se consolident suivant leur nature, et les conditions physico-chimiques du milieu. Du fait de l'eutrophisation qui en résulte, la qualité de l'eau se dégrade très sérieusement.

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

2.6.3.5 Sédimentation dans les canaux d'irrigation

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

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

2.7 Techniques de dévasement

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

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

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

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

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

L'utilisation d'un moyen d'enlèvement des matériaux adapté à leur état de

consolidation en place dans la cuvette de la retenue (le dragage).

2.7.1 Soutirage

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

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

2.7.2 Dragage

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

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

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

rivage.

L'opération de dragage peut se décomposer en plusieurs étapes : Etudes préalables et caractérisation des sédiments, choix de la filière de destination, extraction des boues, transport des matériaux de dragage, et traitement, mais selon certains auteurs, la récupération d'une capacité de stockage par dragage est une opération très coûteuse qui n'est pas économique pour les grandes retenues. Depuis les années 2000, plus de 20 millions de m³ de vase ont été extraits de nos barrages.

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

2.7.2.1 Types de dragage

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

2.7.2.1.1 Dragage hydraulique

Cette technique nécessite une drague suceuse rémouleuse et une conduite flottante et terrestre pour l'évacuation du produit dragué (vase et eau) jusqu'à la zone de rejet. Les figures 2.6 ,2.7 et 2.8 montrent cette technique de dragage.

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

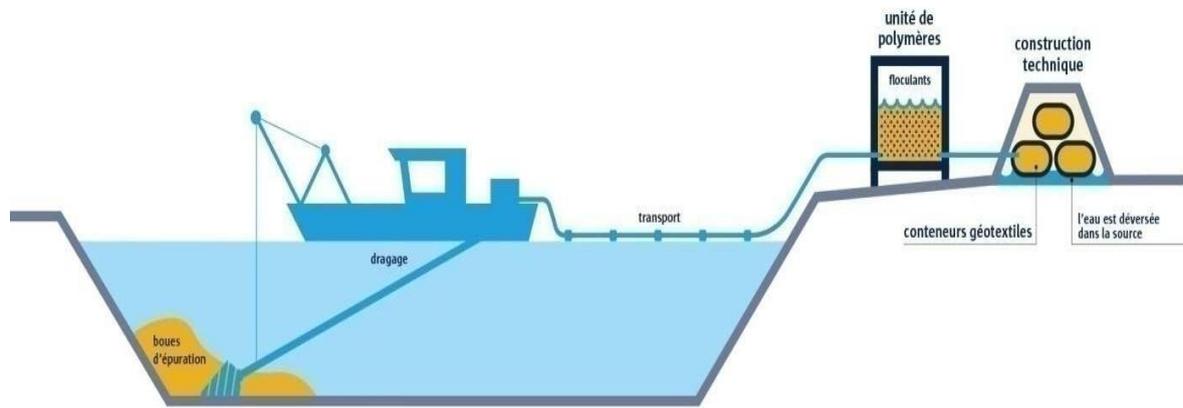


Figure 2.6-Dragage hydraulique.



Figure 2.7-Pompe hydraulique.



Figure 2.8-Drague suceuse refouleuse, Palm Jebel Ali Island-Dubai (De Nul, 2015).

2.7.2.1.2 Dragage mécanique

Il consiste au dragage par des moyens comme le montre la figure 2.9:

- a. Dragage à godets : C'est une technique qui nécessite un tapis roulant pour l'évacuation des produits dragués de la retenue jusqu'à la zone de rejet.

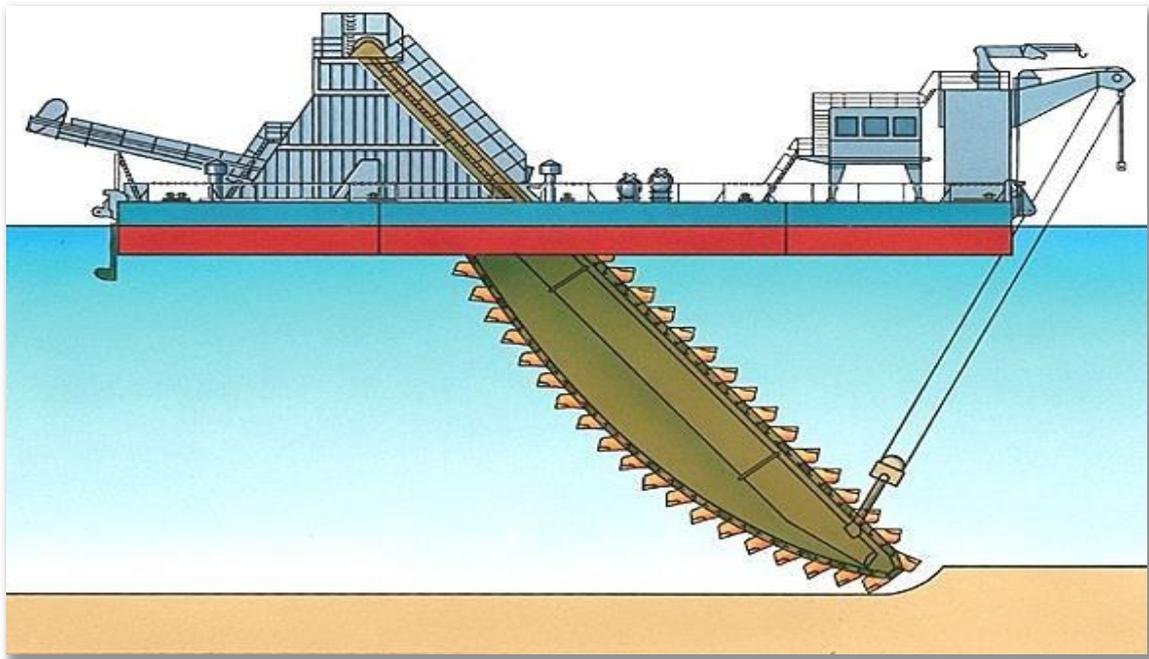


Figure 2.9-Drague à godets (LAROUSSE, 2017).

- b. Benne preneuse : C'est un engin qui sera mis sur un ponton flottant et nécessite des chalands pour évacuer le produit dragué, (figure 2.10)

c. Matériel de terrassement : Il consiste au dragage avec un matériel tel que bulls, pelles hydrauliques, chargeurs hydrauliques et camions pour le transport de vases,

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

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

- L'extraction et le transport des vases de la retenue en utilisant un volume d'eau minimum ;

- la définition et localisation de la zone de rejet susceptible de recevoir les matériaux dragués de la retenue ;

- l'exploitation en continu de la retenue d'eau en même temps que le dévasement.



Figure 2.10-Dragage mécanique.

2.7.2.1.3 Dragage à l'Américaine

C'est une technique particulière qui consiste à provoquer la remise en suspension des sédiments au moyen d'une hélice ou d'air comprimé dans les cours d'eau ou chenaux à fort courant, comme l'illustre la figure 2.11. Les sédiments sont repris dans le flux et se redéposent le plus souvent en aval. Dans certains cas, une conduite de refoulement peut assurer le transfert des sédiments à plusieurs kilomètres du lieu de dragage.

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



Figure 2.11-Dragage à l'Américaine.

2.7.2.2 Différents moyens de dragage

Tapis roulant,

Chalands vidés par des bennes preneuses au niveau des rives,

Chalands vidés directement en amont dans la retenue,

Transport hydraulique par conduites flottantes et terrestres en utilisant un volume minimum d'eau, par engins de terrassement,

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

Veillez à ne pas obstruer l'oued de façon à assurer l'écoulement de l'eau durant les chasses de vidange de fond ou les déversements du barrage ;

Identifier les zones de rejet le long de l'oued ;

Définir les aires de stockage de préférence sur les rives de la retenue pour la récupération des eaux après décantation ;

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

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

Les délais d'exécution ;

Le coût du m³ à dévaser ;

Le matériel non encombrant ;
L'exploitation en continu de la retenue.

2.7.2.3 L'Impact sur l'environnement

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

A l'ouest algérien, la plaine de l'Habra qui s'étend sur une centaine de kilomètres en aval du barrage de Fergoug a subi des dégradations irréversibles suite aux dépôts des sédiments charriés lors des opérations de dragage, transformant de vastes aires fertiles en marais (Semcha, 2006). Les figures 2.12 et 2.13 sont deux exemples de la pollution de l'environnement par les sédiments dragués (Marouf H, 2018).



Figure 2.12-Rejet de la vase draguée (Barrage de Fergoug).



Figure 2.13-Entraînement de la vase en aval (Plaine de la Mactaa).

2.8 Les moyens de lutte contre l'envasement

Les barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine à cinquante années. Il est rare cependant, que l'on puisse admettre à l'issue d'une période aussi courte, l'abandon d'un aménagement hydraulique particulièrement lorsqu'il s'agit de réservoirs destinés à l'adduction en eau potable ou l'irrigation dont les intérêts socio-économiques justifient une garantie de service illimitée. Il est important donc, non seulement de prévoir le rythme de comblement de la retenue de façon aussi précise que possible, de manière à prendre les dispositions économiques et sociales qui s'imposent mais aussi et surtout de sauvegarder au maximum l'existence de la retenue en luttant contre ce phénomène. En Algérie, les moyens de lutte contre l'envasement des retenues peuvent être classés en deux genres : les moyens préventifs et les moyens curatifs.

En résumé, les moyens de lutte contre l'envasement dans les organigrammes selon (Remini B, 2003) sont indiqués dans la figure 2.14.

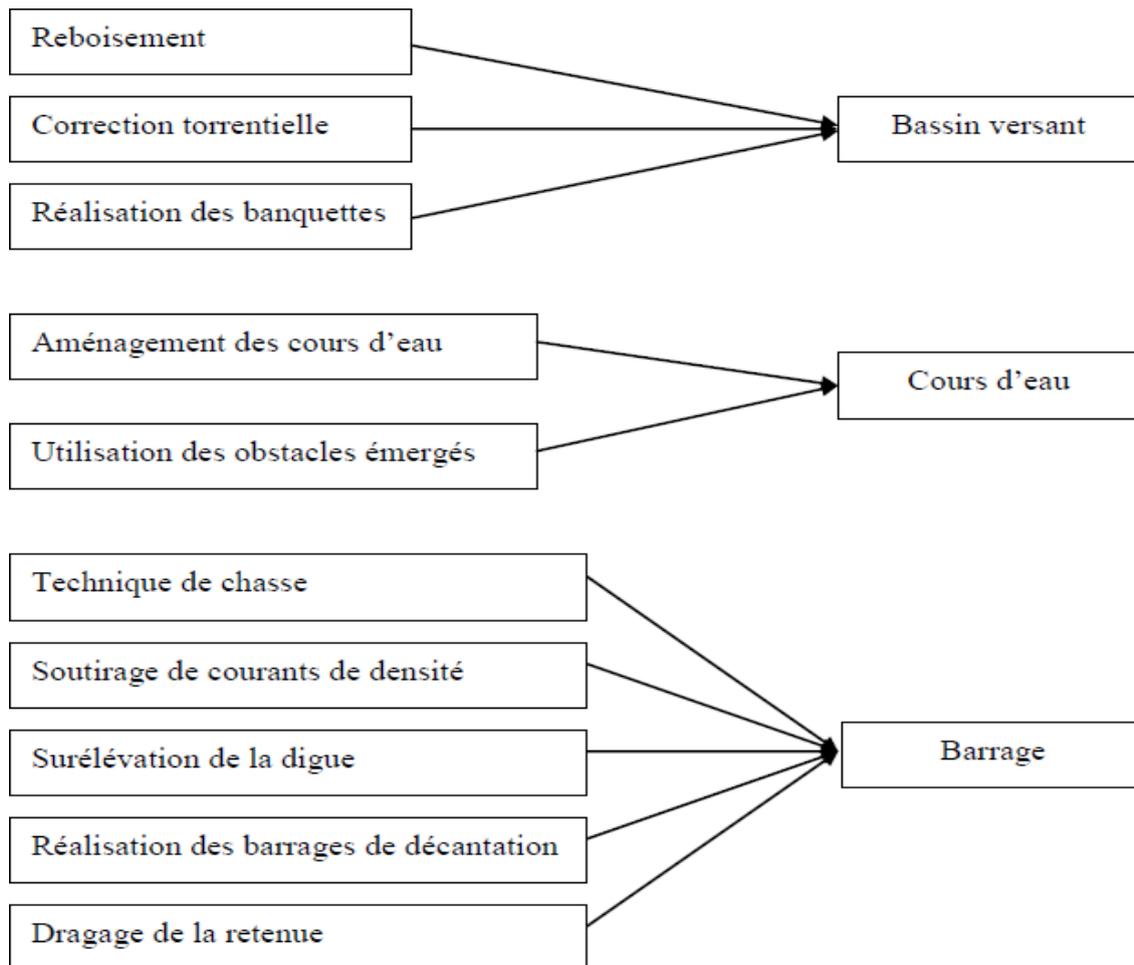


Figure 2.14-Moyens de lutte contre l'envasement.

2.9 Moyens de lutte contre l'envasement utilisé en Algérie

Le reboisement, la restauration des sols la formation des banquettes. La plantation de végétation à longues tiges dans les oueds. Il est à noter que les tamaris qui ont poussé à l'amont des barrages de Bouhanifia, du Fergoug, de Cheurfas constituent de véritables pièges à sédiments.

Dans le cadre de la protection des bassins, un programme spécial a été lancé par les services des forêts. Il s'agirait de traiter une superficie de 1,5 millions d'hectares d'ici l'an 2010.

Réalisation de barrage de décantation Il existe en Algérie, le cas du barrage de Bougezoul qui est exploité partiellement comme bassin de décantation du barrage de Ghrib. Ce barrage a permis de retenir depuis sa création environ 35.106 m de vase. Il réduit l'envasement de Ghrib de près de 24 %.

Cette technique a été réalisée sur cinq barrages : Fergoug, Mefiouch, Bakhada, K'sob, Zardézas. La surélévation des barrages permet d'augmenter la capacité de la retenue et donc de compenser la valeur envasée (figure 2.15).



Figure 2.15-Méthode de surélévation des barrages.

2.10 Conclusion

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

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

CHAPITRE 3 :
VALORISATION DE LA VASE

Chapitre 3 :

3. Valorisation de la vase

3.1 Introduction

Il est vrai que le soutirage et le dragage des barrages reste une solution très encourageante qui permet de prolonger la durée de vie de l'ouvrage, cependant ces pratiques posent un problème d'ordre environnemental concernant l'utilisation d'énormes quantités de vase soutirée par chaque opération de dragage.

Devant de telles quantités de vase rejetées à l'aval du site du barrage, de sérieux problèmes d'environnement sont apparus (Benamara, et al. 2013). Il serait alors plus judicieux de mener une réflexion pour une utilisation rationnelle de la vase qui peut être valorisée dans le domaine des matériaux de construction (Labioud, et al. 2004).

Dans ces travaux de recherche, Selkaoui (2016), a présenté une synthèse de travaux et des propositions relatives à l'emploi de la vase pour une meilleure efficacité de l'opération et une valorisation des matériaux dans les domaines ci-après :

3.2 Utilisation comme fertilisant des terres agricoles

Plusieurs études ont été élaborées dans ce domaine. A titre d'exemple, en 2002, Labioud [26] a mis en évidence une possibilité d'utiliser la vase du barrage de Fergoug et celle de Bouhanifia comme fertilisant des terres agricoles.

Selon Vilain 1987[27], un bon sol cultivé est composé de 96 à 98% de la matière minérale et de 1 à 3% de la matière organique. Cette dernière joue un rôle très important dans l'équilibre du bilan hydrique du sol: diminue l'infiltration rapide de l'eau d'irrigation vers le bas de la zone racinaire, diminue aussi la remonté capillaire des eaux et l'évaporation pendant les périodes du manque d'eau et garde une humidité par sa caractéristique d'emmagasinement de l'eau.

L'ajout de la vase de barrage à un sol avec sa caractéristique argileuse et fine permettra de corriger la granulométrie et la porosité. La vase est caractérisée aussi par une richesse en matière organique (jusqu'à 18%) donc elle peut être utilisée comme fertilisant des terre pauvres (Belhadri M., 1997) [28].

3.3 Les amendements minéraux

3.3.1 Les amendements calco-magnésiens

Ces amendements sont riches en calcaire et en magnésium. Ils ont trois intérêts: augmenter le pH, améliorer la structure du sol (création du complexe argilo- humique grâce au pont calcium ou magnésium) et maintenir un taux de calcium correct.

Chaque année, une quantité importante de calcium disparaît :

Les légumes captent du calcium et ces légumes seront transportés du jardin à la cuisine pour être dégustés! Cette quantité de calcium contenue par les légumes ne revient donc pas dans le sol (on parle d'exportation).

Le lessivage du calcium par l'eau de pluie.

L'action décalcifiante est acidifiante de certains engrais (ammoniacaux NH₄).

On distingue les produits crus et les produits cuits

Les produits crus sont obtenus par broyage. Les roches sont réduites en poudres plus ou moins fines. Par exemple : calcaire broyé, craie, dolomie, lithothamne,

Les produits cuits sont obtenus par calcination (les roches sont brûlées). Par exemple chaux vive, chaux éteinte, cendres de chaux... En général, les produits cuits ont une action plus rapide que les produits crus. De plus, l'efficacité dépend de la finesse de broyage, car les petites particules sont plus facilement dissoutes dans l'eau du sol.

3.3.1.1 Amendements à base d'argile

Utilisés sur les terres sableuses pour améliorer la texture, augmenter la cohésion des particules et la capacité de rétention en eau. Plusieurs produits apportent de l'argile: de l'argile pure (kaolinite, bentonite), les roches d'origine volcanique (basalte volcanique, vermiculite) riches en oligo-éléments (magnésium) et silice, la marne (mélange d'argile et de calcaire), les vases d'eau douce. Il faut 9 à 15kg/m² d'argile pur pour augmenter le taux d'argile du sol de 3 à 5%.

3.3.1.2 Amendements à base de sable

Utilisés sur les terres argileuses afin de les alléger et augmenter leur

perméabilité. On peut utiliser des sables de diverses origines : sable de rivière, sable de carrière, sable coquillé. Utiliser des sables grossiers afin d'éviter de boucher les pores du sol. Il faut 15 à 30kg/m² de sable pour augmenter le taux de sable du sol de 5 à 10%.

3.4 Fabrication du béton et mortier

La production du béton présente l'un des grands consommateurs de matériaux, particulièrement les granulats, qui représentent un élément majeur dans la fabrication du béton.

Les granulats sont habituellement issus des carrières, qui sont de plus en plus surexploitées et finiront surement par s'épuiser. Dans ce contexte, il s'avère utile de pouvoir introduire les sédiments de dragage sous forme de granulats dans la fabrication du béton, afin de couvrir la demande croissante de la filière de fabrication de béton.

A juste titre, (Ben Allal, et al., 2011) ont étudié la valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc) dans les mortiers par substitution du sable. Les résultats de cette étude, suite au test de résistance à la compression ont confirmé qu'une substitution partielle du sable par des sédiments de dragage, des ports de Tanger et de Larache, dans les mortiers est satisfaisante pour un dosage de 20%.

En Algérie, des études ont été faites concernant la valorisation de la vase issue des barrages. (Belas, et al., 2011) , ont étudié la valorisation des vases issues du barrage de Fergoug, dans la composition du béton, en dosages définis substituables au ciment (10 à 15)% et 20 % de vase par rapport au dosage en masse du ciment.

Le béton confectionné sera par la suite testé vis-à-vis du comportement mécanique en compression et du retrait. Les résultats ont été satisfaisants pour ces bétons à base de vase.

3.5 Fabrication des liants (ciments)

La composition chimique des sédiments (principalement de la silice, quartz, calcite,...) rappelle celle de la matière brute utilisée pour la fabrication du clinker. Il faut cependant trouver le moyen de les introduire dans l'industrie cimentaire.

C'est en 2004 que l'étude de la fabrication de clinker en utilisant les sédiments a

été entamée par (Dalton., et al., 2004) cité dans (Drang, 2011). En Algérie, pour la production d'un ciment composé de type CEM II de classe élevée, les cimenteries utilisent une pouzzolane naturelle. En 2006, Semcha examine la possibilité de fabriquer des pouzzolanes artificielles à partir de la réutilisation de la vase prélevée à l'état solide, dans la zone de rejet sur Oued El Hammam (en aval du barrage de Fergoug). La pouzzolane est un liant qui rentre dans la composition des bétons des routes, pistes d'aéroports et dans la technique des barrages en BCR (Mihoubi, 1994)

La fraction argileuse présente dans cette vase doit procéder à un traitement thermique (750°C) pour obtenir la pouzzolane artificielle.

3.6 Fabrication de brique

La vase a aussi été sujet d'étude de valorisation dans la composition des briques. (Ben Allal, et al., 2011) Ont étudié la valorisation des sédiments provenant des ports de Larache et de Tanger, en substitution partielle de l'argile, comme matière première dans la fabrication des briques.

Les briques ont été fabriquées à base d'un mélange constitué de 70% de sédiment et 30 % d'argile. Après séchage à l'air libre, broyage et tamisage à un (01) mm, ils ont été malaxés et moulés puis finalement séchés à une température de 920°C pendant 32 heures.

En Algérie, le sujet a aussi été traité, comme on peut le constater avec (Semcha, 2006) dans son étude de valorisation de la vase pour la fabrication des briques autoclaves.

La vase soustraite à l'état solide, dans la zone de rejet sur Oued El Hammam ainsi que dans la zone de Mactaa, a tout d'abord été stabilisée au ciment (Portland ordinaire CEM I) dans des conditions de température, humidité et de pression particulières. Ensuite, elle a été transformé en brique après broyage, malaxage à sec et humide, moulage et finalement autoclavage pendant : 6, 15 et 24 heures. Les résultats obtenus aux essais de compression, ont donnée des valeurs très satisfaisantes et comparables à celles de la brique silico-calcaire.

D'autres travaux de recherche ont été réalisés dans le même sujet dont on cite (Samara, et al., 2009) ; (Lafhaj, et al., 2007) ; (Hamer et Karius, 2002).

3.7 Construction des routes et chaussées

Vu l'absence de restriction sévère sur les matériaux utilisés dans la conception routière, il est plus facile d'introduire des éléments issus de déchets de dragage dans la conception des ouvrages et infrastructure routières. Plusieurs travaux ont été élaborés dans ce domaine d'application de la vase soustraite des barrages, notamment en Algérie. On cite à titre d'exemple, l'étude de l'usage des sédiments de dragage du barrage de Cheurfas II (Algérie) dans la formation de matériaux routier réalisé par (Bourabah, et al., 2009) .

La formulation retenue est un mélange de 30% de sédiments avec 70% de sable. Pour améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau traité, des ajouts de ciment ou de chaux ou une combinaison de ces deux liants ont été effectués.

Finalement, la composition obtenue peut bien être utilisée en couche de fondation et en couche de base. Dans ce domaine particulièrement, un autre type de sédiments ont été pris comme sujet de plusieurs études de valorisation, ce sont les sédiments marins.(Wang, 2011), a traité dans ces travaux l'option d'utilisation des sédiments marins en couche d'assise de chaussée. Après une identification des caractéristiques des sédiments, le potentiel de leurs utilisations en techniques routières est évalué, ainsi que les moyens d'une éventuelle amélioration de leurs propriétés mécaniques par ajout de ciment, chaux ou cendres volantes.

3.8 Couche étanche pour un bassin de lagunage

Les bassins de décantation d'une station d'épuration par lagunage nécessitent une étanchéité pour éviter l'infiltration des eaux usées vers les eaux souterraines et la pollution de la nappe par la suite. Pendant la réalisation et après l'étape de terrassement et l'évacuation des déblais, ces bassins sont couverts par les rouleaux de géomembrane (Figure 3.1).

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

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

étanches pour protéger les eaux souterraines.

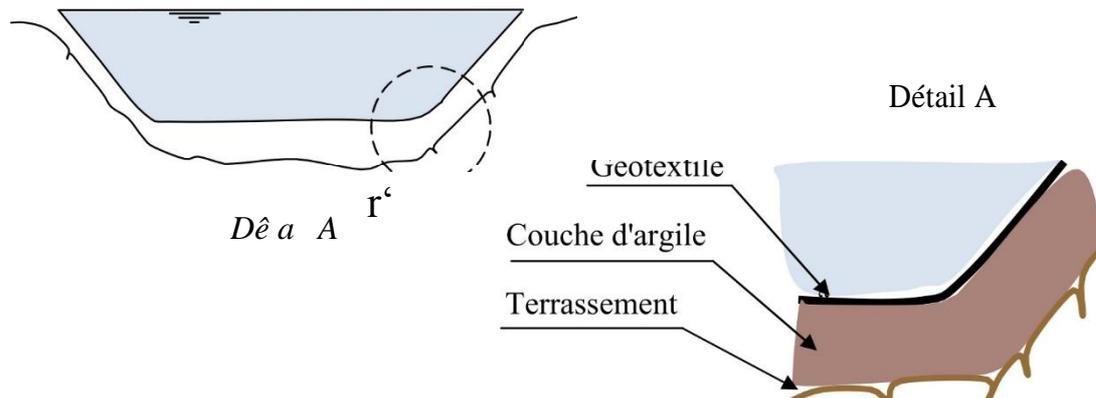


Figure 3.1-Une couche d'argile dans un bassin de lagunage.

3.9 Conclusion

Afin de garantir le bon fonctionnement des barrages hydrauliques, il existe plusieurs démarches à prendre et ceci avant et durant l'envasement de la retenue. Tout d'abord, il est question de prévoir, d'estimer et aussi de quantifier le taux d'envasement prévu durant la période d'amortissement de l'ouvrage dans l'intérêt de prévoir les solutions adéquates afin de lutter et d'atténuer l'ampleur du phénomène.

Néanmoins, ces techniques préventives restent partiellement efficaces de la même sorte que les techniques curatives qui visent uniquement à retarder le processus dans le temps et augmenter la durée de vie de l'ouvrage par l'augmentation de la capacité utile du barrage- réservoir.

Cependant, la mise en place d'un programme d'aménagement de grands travaux avant et durant la mise en eau d'un barrage et la projection des conditions favorables d'un ouvrage de décantation en amont du barrage-réservoir reste une solution prometteuse et opportune pour la fiabilité d'un projet de barrage-réservoir compte tenu des délais d'exploitation du barrage favorable à l'investissement.

CHAPITRE 4 :
PRESENTATION DU BARRAGE
OULDJET MELLEGUE

Chapitre 4 :

4. Présentation du barrage Ouldjet Mellegue

4.1 Localisation et accès

Le site du barrage d'Ouldjet Mellegue est situé à quelques 12 km en amont de la ville d'Ouenza, dans la Wilaya de Tebessa, à moins de 75 km de la ville de Tebessa et à moins de 100 km de la zone côtière méditerranéenne (figure 4.1), dans une région à faible pluviométrie (environ 350 mm par an). Le site de barrage est situé au débouché Ouldjet à travers le Djebel Krorza de l'oued Mellegue. L'accès au site se fait à partir de Tebessa par la route nationale N°16 en direction d'El-Aouinet, puis par la W20 en direction d'Ouenza. A la sortie d'Ouenza, à 5 km en direction du Nord, une ancienne piste goudronnée permet de se rendre sur le site.

Le site du barrage d'Ouldjet Mellegue a pour coordonnées géographiques (système WGS 84) : Latitude 35.976° N, Longitude 8.028° E. Actuellement, l'eau potable des Daïras d'Ouenza et d'El-Aouinet provient d'une adduction d'eau potable sur plus de 100 km depuis le barrage d'Ain-dalia situé dans la Wilaya de Souk-Ahras. Les quotas alloués sont insuffisants et la retenue permettrait d'améliorer l'alimentation en eau potable et d'irriguer les cultures de la région. La capacité utile de la retenue est de 71 millions de mètre cubes et participera à la satisfaction de la demande domestique, industrielle et agricole de la région d'Ouenza.



CARTE DE SITUATION

Echelle 1/800 000

Figure 4.1-Plan de situation du barrage.

4.2 Présentation des ouvrages

4.2.1 Barrage en BCR et diges de col

L'implantation du barrage est pratiquement imposée par la topographie du site, qui présente un rétrécissement de la vallée de l'Oued Mellegue à l'endroit où elle coupe le massif de Krorza. (figure 4.2) A l'amont du site, la vallée est large. Le Djebel Krorza, qui constitue l'appui rive gauche, culmine à la cote 580 NGA, contrainte topographique qui fixe la hauteur du barrage économiquement faisable. L'ouvrage de fermeture principal est constitué d'un barrage en BCR, de 51,50 m de hauteur maximale sur fondation. La crête de l'ouvrage est calée à la cote 581,50 NGA. Le barrage principal en BCR sera fondé au toit du substratum sain et peu fracturé. La

profondeur d'excavation prévue est de l'ordre de 7 à 8 mètres dans les deux rives et de 3 mètres en fond d'Oued. Des injections de consolidation systématiques sous l'emprise du barrage sont prévues jusqu'à 6 m de profondeur et un voile d'injection mono linéaire descendant jusqu'à 40 m de profondeur maximale.

En rive gauche, le barrage se prolonge par une digue de col en BCR, puis par une digue de col principale en remblais. Enfin, à l'extrémité rive gauche, une digue de col secondaire barre la dépression localisée au droit de la route existante.

Ces ouvrages de fermetures créent ainsi un réservoir amont de 155 millions de mètres cubes sous la cote 575,50 NGA de retenue normale (RN).

Le volume global de béton est estimé à environ 200 000 m³ pour le barrage principal, et 40 000 m³ pour la digue de col en BCR.

La digue en remblais rive gauche s'étend sur une longueur de 950 m environ, et présente une hauteur maximale sur fondation de 32 m. La liaison entre les digues en remblais et en BCR est assurée par une zone de transition dans laquelle la géométrie de l'ouvrage en béton a été adoucie à 0.5H/1V afin de permettre un appui correct du noyau argileux.

Le dernier ouvrage de fermeture en rive gauche n'est en fait baigné par la retenue amont qu'en cas de crues, lorsque le plan d'eau du réservoir s'élève au-dessus de la cote de retenue normale. Il est constitué par une digue homogène, de 5 m de hauteur maximale.

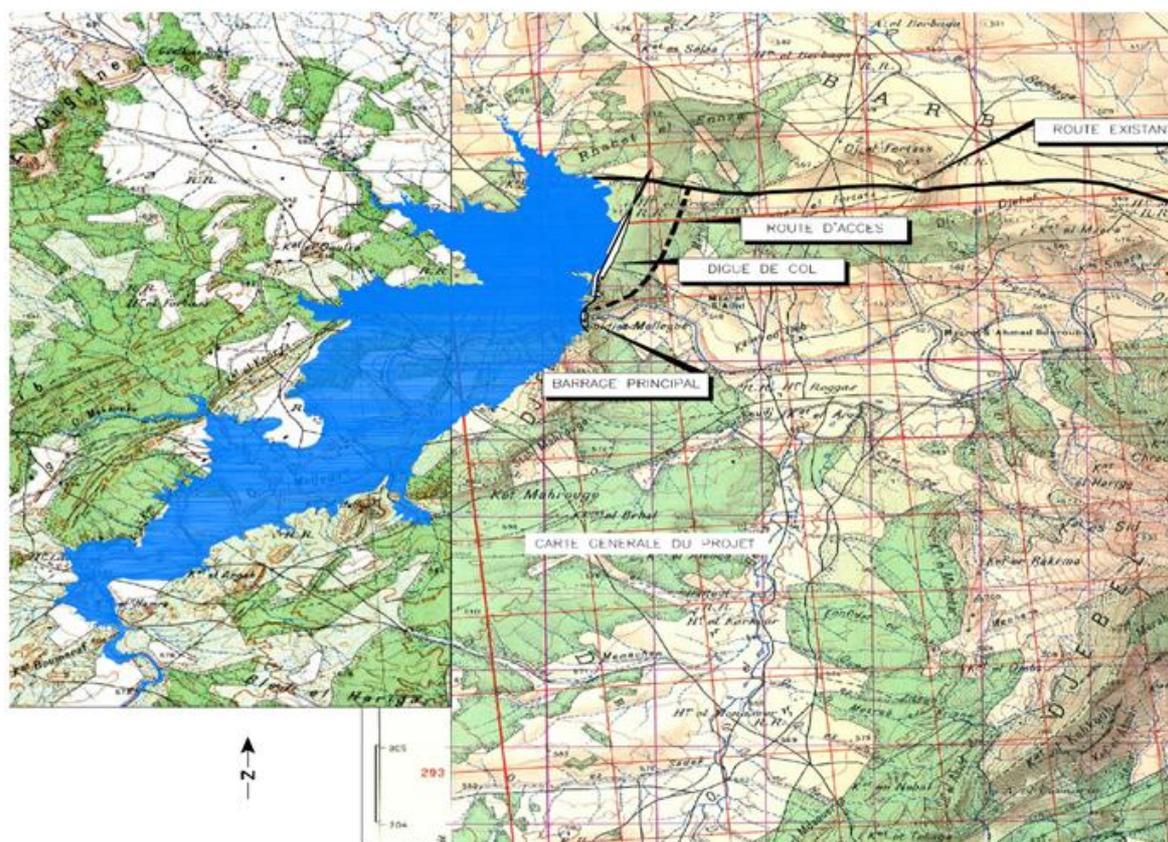


Figure 4.2-Carte générale du projet du barrage.

Le volume global de remblais à mettre en œuvre pour les digues de col s'élève à environ 1,3 millions de m³, dont 210 000 m³ de matériaux argileux pour le noyau étanche.

4.2.2 Dérivation provisoire

Les études hydrauliques ont mis en évidence des débits de pointe significatifs en phase de travaux.

La solution retenue consiste à laisser passer la rivière dans son lit naturel durant la première phase des travaux, durant laquelle trois pertuis de dérivation provisoires sont réalisés au pied de la rive gauche, à l'abri de batardeaux. Dans une seconde étape, les débits de l'oued sont dérivés à travers les pertuis provisoires pour permettre l'exécution des fouilles et la mise en place du BCR dans partie centrale de la vallée

En phase définitive deux pertuis provisoire sont bouchés et le troisième est équipé en vidange de fond. Le débit maximal de la vidange s'élève à 178 m³/s, pour

un plan d'eau amont à la cote de Retenue Normale.

4.2.3 Ouvrage de prise d'eau

L'ouvrage de prise d'eau étagée est constitué de l'amont vers l'aval :

- d'une tour de prise verticale aménagée sur le parement amont du barrage, en rive droite, et équipée de trois prises étagées aux cotes 553, 565 et 571 NGA,
- d'une conduite unique \varnothing 1000 mm traversant le corps du barrage, dont l'axe est situé à la cote 545,50 NGA.

Le débit d'équipement de la prise d'eau est de 1,2 m³/s sous la RN.

4.2.4 Evacuateur de crues

Dans le cas du barrage d'Ouldjet Mellegue, seule une longueur d'environ 100 m est disponible en partie centrale du barrage pour l'implantation de l'évacuateur de crues. Cette limitation résulte directement de la topographie du site et de la géométrie particulière du barrage qui est arqué sur chaque rive

Afin d'optimiser les performances de l'évacuateur, une variante de déversoirs en touches de piano (PK Weir) est retenue. L'ouvrage est implanté sur le corps du barrage principal en BCR. Le coursier en marche d'escalier est directement aménagé sur le parement aval du barrage. Un ouvrage de dissipation constitué par une dalle généralisée en béton armé, de 1,80 m d'épaisseur et 25 m de longueur, est implanté au pied aval de la digue. Il permet d'assurer la restitution correcte des débits dans le lit naturel de l'oued.

Au niveau de la crête du barrage, un pont composé de six travées enjambe le seuil déversant, et permet d'assurer la continuité d'accès sur chaque rive.

La crue de projet, de période de retour 10 000 ans, est évacuée sous la cote 580 m NGA, soit une surélévation du plan d'eau de 4,5 m. Le débit de pointe restitué à l'aval sous cette cote par l'évacuateur est alors de 3 500 m³/s.

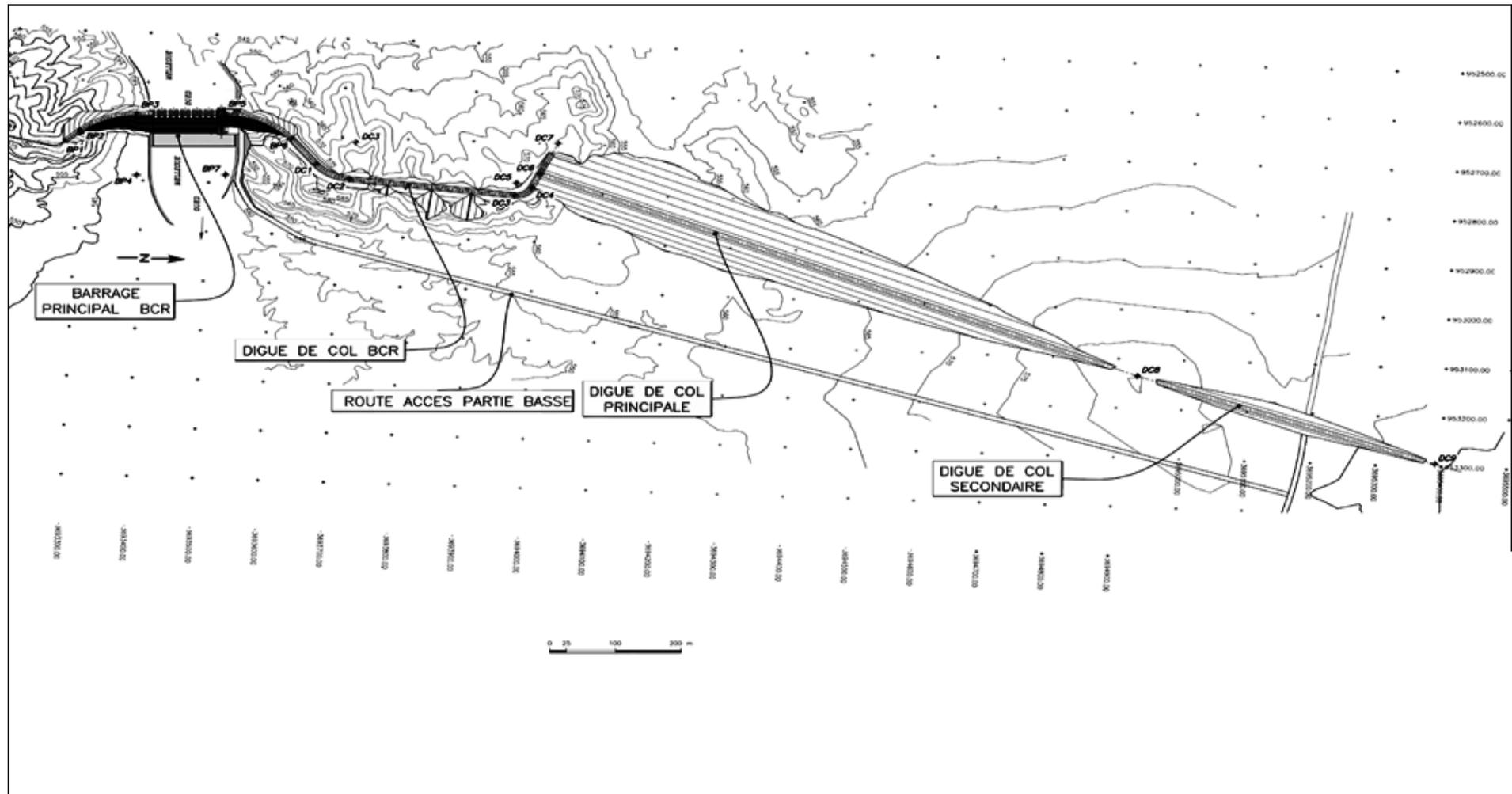


Figure 4.3-Aménagement -Vue en plan générale.

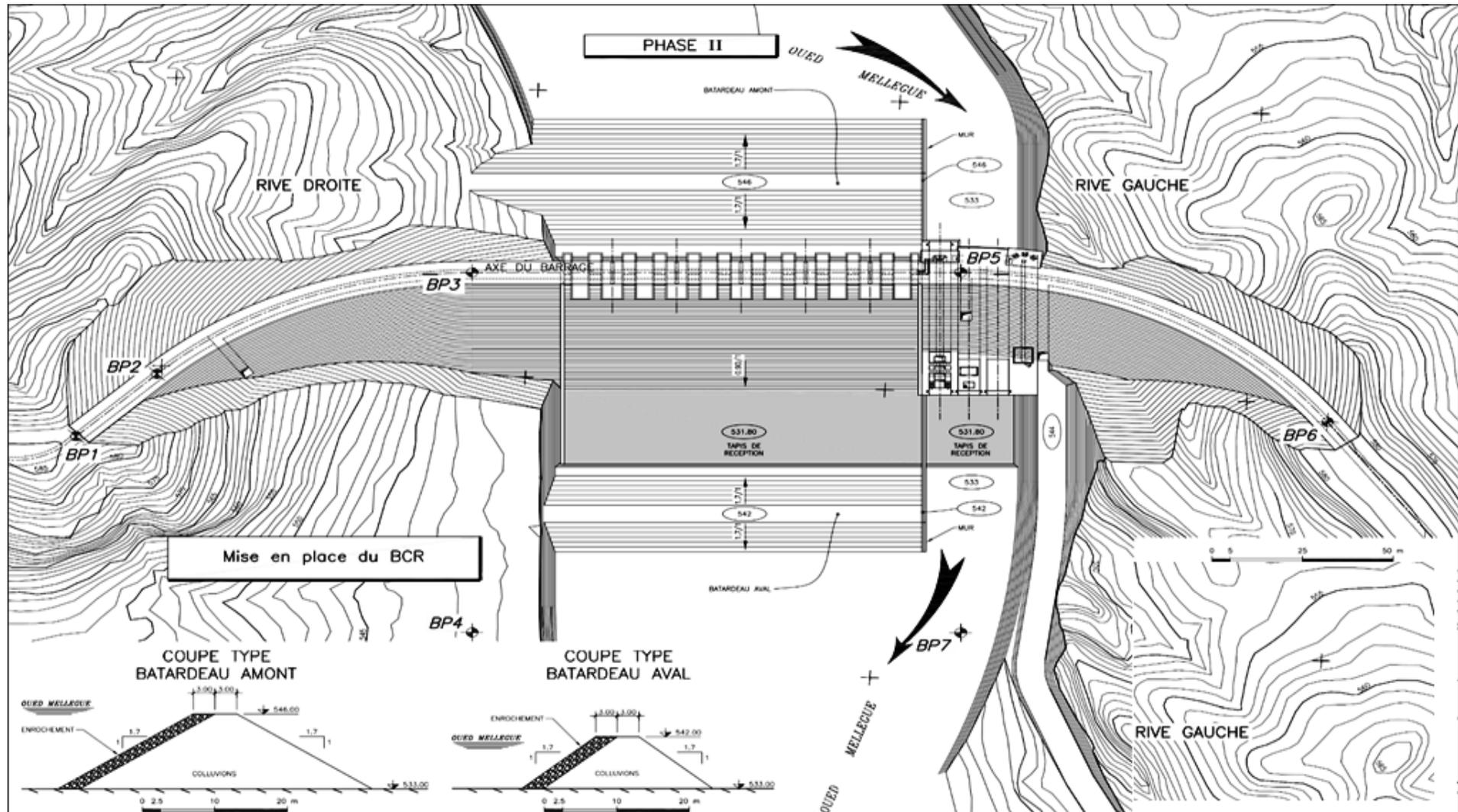


Figure 4.4- Dérivation provisoire du barrage

| Fiche synoptique | |
|---|--|
| Désignation de l'opération | Description |
| A <u>Situation</u> 1. Cours d'eau 2. Ville la plus proche 3. Fonction du barrage 4. Volume régularisé annuellement | Oued Mellegue Ouenza Eau potable, Eau industrielle et Irrigation 38 hm ³ |
| B <u>Caractéristiques hydrologiques</u> 1. Aire du bassin versant naturel 2. Précipitations annuelles moyennes 3. Apport annuel moyen 5. Débit de pointe de la crue de projet 6. Volume de la crue de projet 7. Transport solide annuel moyen 8. Salinité moyenne | 4 350 km ² 324 mm 67 hm ³ 10 690 m ³ /s 153 hm ³ 2,5 hm ³ 2,11 g/l |
| C <u>Caractéristiques principales de la retenue</u> 1. Cote de Retenue Normale 2. Cote des Plus Hautes Eaux 3. Aire de la retenue à la cote de RN 4. Capacité totale de la retenue sous RN | 575,50 NGA 580,10 NGA 14 km ² 155 hm ³ |
| D <u>Caractéristiques principales du barrage principal en BCR</u> 1. Type 2. Terrain de fondation 3. Hauteur maximum sur fondation 4. Longueur en crête 5. Largeur en crête 6. Largeur maximale au niveau du terrain naturel 7. Fruit moyen du parement amont 8. Fruit moyen du parement aval 9. Altitude de la crête du barrage 10. Altitude de la crête du déversoir 11. Volume total du corps du barrage | Barrage poids en BCR Marnes et calcaire 51,50 m 380,5 m 8 m 46,50 m vertical 0,9 H/1V 581,50 NGA 575,50 NGA 191 000 m ³ |
| E <u>Caractéristiques principales de la digue de col en BCR</u> 1. Type 2. Terrain de fondation 3. Hauteur maximum sur fondation 4. Longueur en crête 5. Largeur en crête 6. Largeur maximale au niveau du terrain naturel 7. Fruit moyen du parement amont 8. Fruit moyen du parement aval 9. Altitude de la crête du barrage 10. Volume total du corps de la digue | Barrage poids en BCR Marnes et calcaire 11,50 m 460 m 8 m 46,50 m vertical vertical 581,50 NGA 40 000 m ³ |
| F <u>Caractéristiques principales de la digue de col en remblais</u> 1. Type 2. Terrain de fondation 3. Hauteur maximum sur fondation 4. Longueur en crête | Digue en remblais Marnes et calcaire 25 m 900 m |

| | | |
|----------|---|---|
| 5. | Largeur en crête | 8 m |
| 6. | Largeur maximale au niveau du terrain naturel | 150 m |
| 7. | Fruit moyen du parement amont | 3 H/1V |
| 8. | Fruit moyen du parement aval | 2,2 H/1V |
| 9. | Altitude de la crête du barrage | 582 NGA |
| 11. | Volume total du corps de la digue | 1 354 500 m ³ |
| G | Ouvrages annexes | |
| 1. | Evacuateur de crues | |
| | Type | seuil déversant type PK Weir et coursier à marches d'escalier |
| | Emplacement | en crête de barrage |
| | Longueur du seuil | 97,80 m |
| | Débit maximal évacué | 3 500 m ³ /s |
| 2. | Vidange de fond | |
| | Type | galerie en rive droite |
| | Vannes | <ul style="list-style-type: none"> • 1 vanne de garde sous carter 3,50m x 2,00m manœuvrée depuis la plate-forme aval |
| | Débit maximal | 1 vanne de réglage 3,00mx2,00m manœuvrée depuis la plate-forme aval |
| 3. | Ouvrage de prise | 178 m ³ /s sous RN |
| | Type | 2 prises reliées à une conduite 1 000 mm rive gauche |
| | Emplacement | 3 vannes wagon 0,60m x 1,00m |
| | Vannes | 1,00m |
| | Débit | 1,2 m ³ /s |

4.3 Rapport hydrologique

4.3.1 Objet du rapport

Ce rapport traite de l'hydrologie de l'oued Mellegue au site de barrage d'Ouldjet-Mellegue. Au droit du site, l'oued draine un bassin de 4 350 km². L'oued Mellegue prend sa source dans les Monts des Nementcha, près de Tébessa et de

Meskiana. Il entre en territoire tunisien quelques dizaines de kilomètres à l'aval d'Ouenza. Comme tout rapport d'hydrologie appliquée à un projet de barrage, ce rapport vise à :

- Donner des informations d'ordre général sur le climat.
- Définir une longue série d'apports mensuels. Cette série permet d'analyser le comportement du réservoir compte tenu de sa taille et de la demande en eau.
- Calculer les crues de projets et de chantier. Ces crues aident à dimensionner l'évacuateur et la dérivation provisoire.
- Etablir les apports solides et le taux de sédimentation du futur réservoir. Cette analyse conduit au calcul de la tranche morte du réservoir.

4.3.2 Données et méthodes

Coyne et Bellier a fait usage des données obtenues auprès de l'ANRH. En tant que de besoin, on a consulté et utilisé le fond de données tunisiennes accessible au public. Les méthodes sont les méthodes usuelles de l'hydrologie appliquée aux projets de barrages : corrélations, régressions, analyses de fiabilité, analyses régionales.

4.3.3 Principaux résultats

4.3.3.1 Climat

La carte pluviométrique de l'ANRH permet de conclure à une pluie annuelle de 350 mm sur le bassin versant. Par ailleurs, on dispose de 49 et 91 années d'observations pour les postes d'Ouenza et Tébessa.

4.3.3.2 Apports

L'étude a permis de dresser un tableau d'apports mensuels portant sur 77 ans. L'apport annuel s'établit à 67 millions de m³. La distribution mensuelle et les statistiques de ces apports sont données ci-dessous :

Tableau 4.1-Apports mensuels

| Item | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Annuel |
|------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|--------|
| n | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 | 77 |
| M | 12,64 | 11,90 | 5,21 | 3,70 | 3,44 | 3,48 | 3,92 | 5,06 | 7,23 | 6,09 | 1,36 | 3,24 | 67,27 |
| S | 29,23 | 24,35 | 10,59 | 5,69 | 7,26 | 6,65 | 8,98 | 7,15 | 12,18 | 8,21 | 1,77 | 6,70 | 59,41 |
| Cv | 2,31 | 2,05 | 2,03 | 1,54 | 2,11 | 1,91 | 2,29 | 1,42 | 1,68 | 1,35 | 1,30 | 2,06 | 0,88 |
| Me | 4,48 | 4,05 | 1,05 | 1,13 | 0,98 | 1,08 | 1,52 | 1,82 | 3,40 | 3,58 | 0,76 | 1,30 | 54,18 |
| Max | 224,87 | 187,33 | 74,65 | 26,03 | 48,93 | 34,27 | 73,57 | 34,15 | 82,39 | 45,23 | 8,80 | 53,73 | 357,30 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Min | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 10,91 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|

(Millions de m³)

4.3.3.3 Crues :

Une approche régionale conduit à adopter trois formes de crues. Les résultats obtenus sont les suivants.

Tableau 4.2-Résultats de crues adoptées à Ouenza et Ouldjet-Mellegue

| T (ans) | Ouenza | | Barrage | | | K (Qp) | | | |
|---------|--------|-------|---------|-------|-------|--------|------|------|------|
| | Qj | K(Qj) | Qj | Qp A | Qp B | Qp C | (A) | (B) | (C) |
| 10 | 360 | 2,06 | 350 | 670 | 1 490 | 2 170 | 2,72 | 3,52 | 3,89 |
| 100 | 710 | 2,74 | 690 | 1 320 | 2 930 | 4 270 | 3,40 | 4,19 | 4,57 |
| 1 000 | 1 190 | 3,26 | 1 160 | 2 210 | 4 930 | 7 170 | 3,91 | 4,71 | 5,08 |
| 10 000 | 1 780 | 3,66 | 1 730 | 3 290 | 7 350 | 10 690 | 4,31 | 5,11 | 5,48 |

Qj : pic journalier (m³/s) ; Qp : pic instantané (m³/s) ; K = Coefficient de Francou-Rodier.

4.3.3.4 Transport solide

Coyne et Bellier a obtenu les résultats suivants

Tableau 4-3-Résultats du transport solide adopté à Nebeur et Ouldjet-Mellegue

| Item | Ouldjet Mellegue | Nebeur | Unité | Ouldjet / Nebeur |
|--------------------|------------------|-----------|---------------------------------|------------------|
| Aire | 4 350 | 10 300 | km ² | 0,42 |
| Volume | 2 486 000 | 4 446 429 | m ³ | 0,56 |
| Tonnage | 3 366 000 | 6 000 000 | tonnes | 0,56 |
| Concentration | 50 | 32 | g/l | 1,57 |
| Volume spécifique | 774 | 432 | m ³ /km ² | 1,33 |
| Tonnage spécifique | 571 | 583 | t/km ² | 1,33 |

Nota : y compris 10% de charriage de fond. (Voir CIGB – Bulletin 67)

4.3.3.5 Salinité

Les résultats obtenus sont les suivants

Tableau 4.4-Résultats de la salinité adoptée à Ouldjet-Mellegue

| Item | VI (10 ⁶ m ³) | Vs (kg) | Salinité moyenne (g/l) |
|------|--------------------------------------|---------|------------------------|
| M | 67,3 | 141 252 | 2,11 |
| S | 59,4 | 130 682 | 0,58 |
| Cv | 0,88 | 0,93 | 0,28 |
| Me | 54,2 | 113 820 | 2,05 |
| Max | 357,3 | 809 640 | 4,36 |
| Min | 10,9 | 21 900 | 1,01 |

VI = apport liquide ; Vs = apport salin.

Sur la période 1924 à 2001, la salinité moyenne s'établit à 2,11 g/l. Elle varie,

au niveau annuel, entre 1,01 et 4,36 g/l. Ces résultats sont conformes avec ceux trouvés pour le Mellegue en Tunisie. Ainsi, la monographie de l'ORSTOM cite la gamme 0,6 à 14,2 g/l pour les salinités instantanées à K13. Ces données sont consistantes avec les observations à El Aouinet. L'ORSTOM mentionne que les eaux du Nebeur ont une salinité comprise entre 3 et 5 g/l à l'étiage. Pour les eaux de crues, la monographie déclare que la salinité ne descend guère en dessous de 0,6 g/l. Enfin, dans un article intitulé « la salinité des eaux de surface en Tunisie », monsieur Kallel(2003) écrit que la salinité moyenne à K13 atteint 1,80 g/l en moyenne interannuelle.

4.4 Présentation du bassin versant et climat

4.4.1 Présentation du bassin versant

Au droit du site d'Ouldjet Mellègue, le bassin versant de l'oued Mellègue se compose de trois parties (Cf. Deri,) :

Au Nord, le sous bassin drainé par l'Oued Mellègue. On y trouve notamment l'oued Guetara, affluent important de rive gauche.

Au Sud-ouest, le sous bassin de l'oued Meskiana. Cet oued, en provenance de la région de Khenchela, présente des lacs salés dans sa partie amont.

Au Sud-est, le sous bassin de l'oued Chabro. Cet oued prend sa source dans la région de Tébessa. L'oued Chabro et l'oued Meskiana confluent légèrement en amont d'El Aouinet.

Le sous bassin de l'oued Meskiana est formé de djebels, de piedmonts caillouteux et de terrasses anciennes à faibles pentes. Dans la vallée, les sols bruns ont tendance à la salinisation.

Le sous bassin de l'oued Chabro se compose de djebels, d'un long glacis propice à l'érosion, et d'une terrasse marécageuse et salée. Les sols salés sont généralement mal drainés.

Le climat de la zone d'étude est un climat des Hautes Plaines Telliennes à tendances continentales et semi arides. Le sirocco est assez fréquent en été. La végétation naturelle est éparse. Des périmètres irrigués existent dans les vallées des oueds Meskiana et Chabro..

4.4.2 Pluies annuelles et mensuelles

La carte pluviométrique de l'ANRH de 1992 a servi au calcul de la pluie moyenne sur le bassin versant. (figure 4-5), Son analyse conduit aux valeurs suivantes :

- Pluie moyenne annuelle sur le bassin versant d'Ouenza : 350 mm/an
- Pluie moyenne annuelle sur le bassin versant d'Ouldjet Mellègue : 350 mm/an.

Afin de détailler la notion de pluie annuelle et de pluie mensuelle, Coyne et Bellier a analysé les données de deux postes représentatifs du bassin : Ouenza et Tébessa. L'encart ci-après détaille l'information existante pour ces postes.

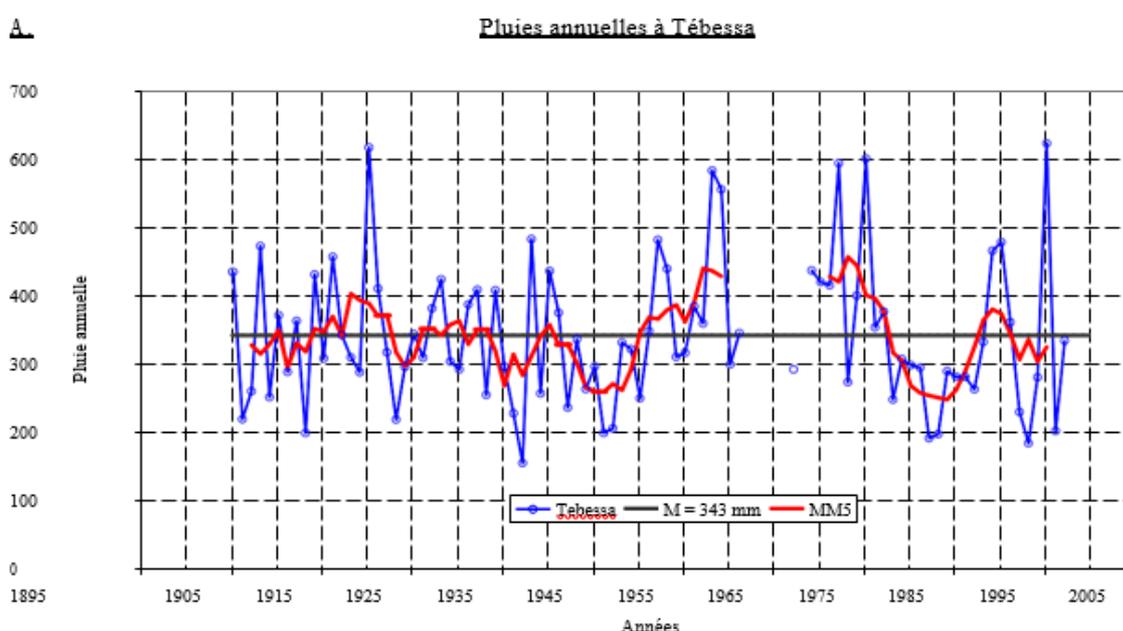


Figure 4.5- Pluies annuelles à Tébessa.

4.4.3 Pluies maximum journalières

Les pluies maximum journalières ont un rôle important dans la formation des crues ainsi que dans l'érosion des sols. Afin de préciser la connaissance de ces pluies, Coyne et Bellier a analysé les données de 7 stations pluviométriques suivant les diagrammes figures 4-6 et 4-7:

- Pour le sous bassin Nord : Ouenza, M'Daourouch, El Aouinet.
- Pour le sous bassin de l'oued Meskiana : La Meskiana et Ain Dalaa.
- Pour le sous bassin de l'oued Chabro : Bou Khadra et Tébessa.

Répartition mensuelle des Pluies maximales journalières - 135 Années-station

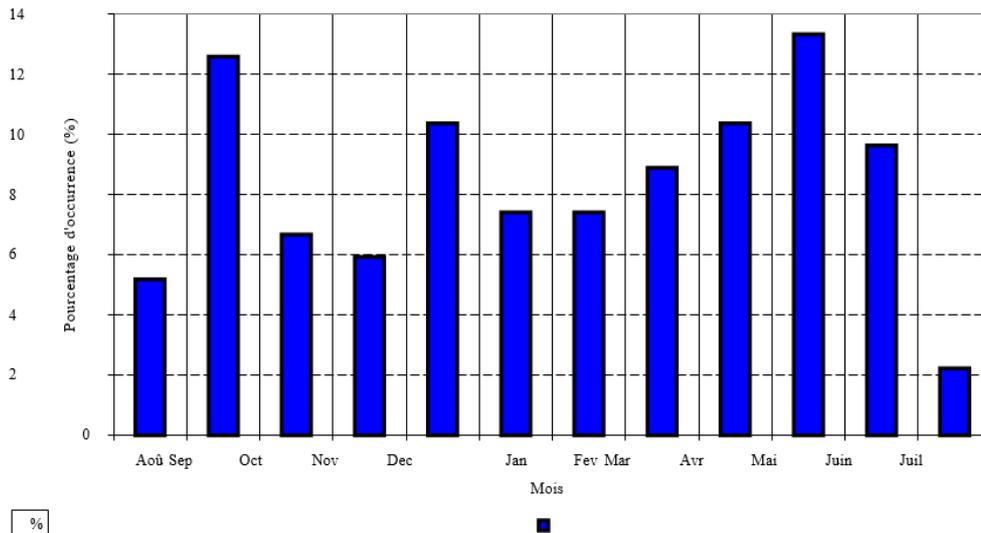


Figure 4.6-Répartition mensuelle des pluies maximales journalières.

Pluies Maximum Journalières - Répartition entre postes - 135 Années-station

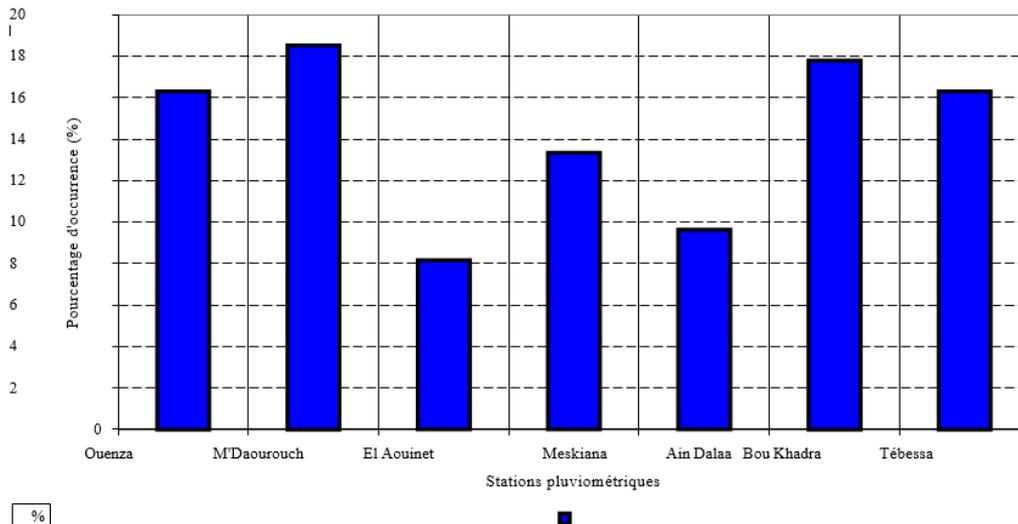


Figure 4.7-Pluies maximum journalières, répartition entre postes.

4.4.4 Evaporation sur plan d'eau

L'encart ci-dessous détaille les valeurs adoptées au cours de l'étude de dimensionnement du réservoir. L'effet de l'altitude et de la continentalité se traduit dans les valeurs de l'évaporation :

En saison froide, l'altitude conduit à des évaporations relativement faibles. En saison chaude, la continentalité conduit à de fortes températures et à de fortes évaporations.

Tableau 4.5-Evaporation sur plan d'eau libre

| Item | Jan | Fev | Mar | Avril | Mai | Juin | Juil. | Août | Sep | Oct | Nov. | Dec. Année |
|--------------------------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|---------------|
| ETP (mm/j) | 1,13 | 1,79 | 2,90 | 4,33 | 5,65 | 7,00 | 7,74 | 6,78 | 5,00 | 2,90 | 1,66 | 0,97 |
| Evaporation sur plan d'eau (mm/j) | 0,90 | 1,43 | 2,32 | 3,46 | 4,52 | 5,60 | 6,19 | 5,42 | 4,00 | 2,32 | 1,33 | 0,78 |
| Nombre de jour | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 |
| Total mensuel / annuel (mm) | 28 | 40 | 72 | 104 | 140 | 168 | 192 | 168 | 120 | 72 | 40 | 24 |

Sources : Ratio 0,8 entre évaporation sur lac et ETP, cf. Réménieras. ETP, cf Evapo-Transpiration Potentielle : Atlasde cartes des températures et évapotranspirations potentielles de l'Algérie du Nord - ANRH - Juin 1997.

4.5 Apports

L'étude des apports vise à obtenir une longue série de débits mensuels au droit du site d'Ouldjet Mellegue. Cette série permet de calculer le volume utile du futur réservoir.

4.5.1 Apports liquides à Ouenza

On donne ci-dessous les débits mensuels observés à la station d'Ouenza. On y dispose d'une série presque complète de 1972 à 2000. L'année 1975 est absente du registre. Il a fallu compléter certains mois manquants en remplaçant la valeur manquante par la médiane des valeurs observées.

Le tableau montre la grande variabilité des apports. Ainsi, au niveau annuel le coefficient de variation Cv (écart-type / moyenne) vaut 0,81. Au niveau mensuel, Cv est toujours supérieur à 1,28.

Les périodes de fort apport sont les deux périodes de septembre à novembre et de mars à juin.

4.5.2 Apports liquides à Ouldjet Mellegue

A Ouenza, l'oued Mellègue draine un bassin de 4 575 km². A Ouldjet – Mellègue, le bassin versant est de 4 350 km². Pour les deux bassins, la pluie annuelle est la même (350 mm/an). On obtient donc les apports mensuels à Ouldjet – Mellègue en écrivant :

Tableau 4.6-apports mensuels à Ouldjet – Mellègue

| Années | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Annuel |
|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|--------|
| Me | 4,48 | 4,05 | 1,05 | 1,13 | 0,98 | 1,08 | 1,52 | 1,82 | 3,40 | 3,58 | 0,76 | 1,30 | 54,18 |
| Max | 224,87 | 187,33 | 74,65 | 26,03 | 48,93 | 34,27 | 73,57 | 34,15 | 82,39 | 45,23 | 8,80 | 53,73 | 357,30 |
| Min | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 10,91 |

4.6 Transports solides

L'étude des apports solides s'impose car elle permet de calculer ensuite le volume mort du futur réservoir. On notera que le bassin versant du Mellègue est moyennement érodable par suite de son climat semi aride. Les oueds côtiers, plus arrosés et d'un relief plus accusé, peuvent avoir des transports solides bien plus importants. Les données de transport solide à la Station de Ouenza ne sont plus disponibles à l'ANRH qui ne dispose plus que des données à la station d'El Aouinet.

Tableau 4.7-Transports solides à Ouenza et Ouldjet Mellegue

| Année | VI (10 ⁶ m ³) Ouenza | Ts (10 ⁶ t) Ouldjet | Vs (10 ⁶ m ³) Ouldjet | VI (10 ⁶ m ³) Ouldjet |
|------------|--|-----------------------------------|---|---|
| M | 70,9 | 67,3 | 3,06 | 2,26 |
| S | 62,6 | 59,4 | 3,00 | 2,22 |
| Cv | 0,88 | 0,88 | 0,98 | 0,98 |
| Me | 57,1 | 54,2 | 2,39 | 1,77 |
| Max | 376,6 | 357,3 | 17,71 | 13,12 |
| Min | 11,5 | 10,9 | 0,28 | 0,20 |

| Item | Ouldjet Mellegue | Nebeur | Unité | Ouldjet / Nebeur |
|---------------------------|---------------------|-----------|---------------------------------|---------------------|
| Aire | 4 350 | 10 300 | km ² | 0,42 |
| Volume | 2 486 000 | 4 446 429 | m ³ | 0,56 |
| Tonnage | 3 366 000 | 6 000 000 | tonnes | 0,56 |
| Concentration | 50 | 32 | g/l | 1,57 |
| Volume spécifique | 774 | 432 | m ³ /km ² | 1,33 |
| Tonnage spécifique | 571 | 583 | t/km ² | 1,33 |

9 Nota : y compris 10% de charriage de fond. (Voir CIGB – Bulletin 67).

4.6.1 Salinité :

La salinité de l'eau est un paramètre important. Certains usages exigent des eaux très peu salées tandis que d'autres usages sont moins sensibles au sel. Les données de salinité à la Station de Ouenza ne sont plus disponibles à l'ANRH qui ne dispose plus que des données à la station d'El Aouinet. Figure 4-8.

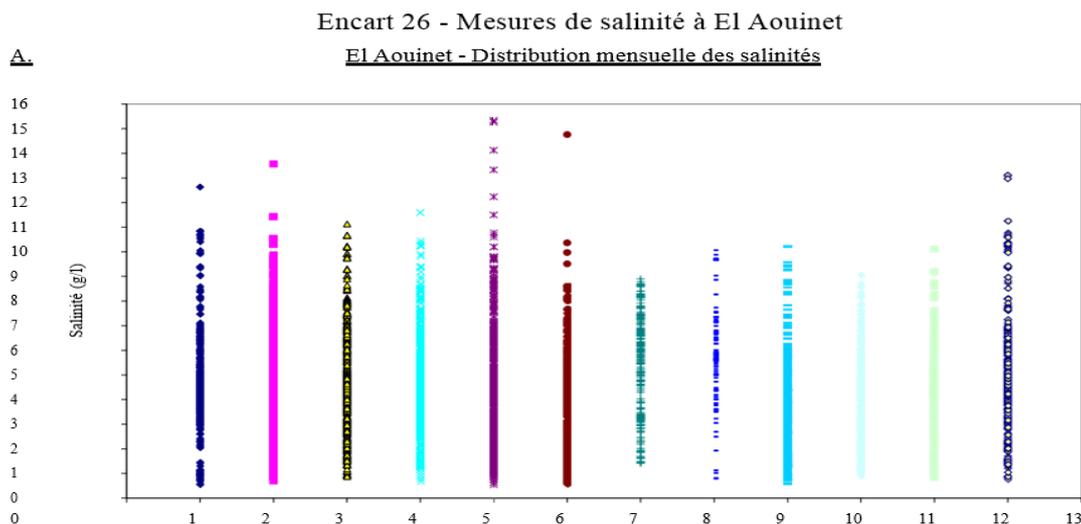


Figure 4.8-Mesure de salinité à El Aouinet.

Tableau 4.8-El Aouinet – Salinité (g/l) – Période 1973 à 1995

| Mois | nb | M | S | Cv = S/M | Me | Max | Min |
|-----------|-------|------|------|----------|------|-------|------|
| Septembre | 529 | 3,77 | 2,39 | 0,63 | 3,41 | 10,22 | 0,57 |
| Octobre | 467 | 4,08 | 1,79 | 0,44 | 3,88 | 9,04 | 0,89 |
| Novembre | 534 | 4,04 | 1,73 | 0,43 | 4,26 | 10,11 | 0,83 |
| Décembre | 550 | 5,09 | 2,34 | 0,46 | 4,60 | 13,10 | 0,74 |
| Janvier | 495 | 4,77 | 2,17 | 0,46 | 4,41 | 12,63 | 0,55 |
| Février | 513 | 5,21 | 2,26 | 0,43 | 5,10 | 13,56 | 0,69 |
| Mars | 599 | 4,81 | 2,11 | 0,44 | 4,53 | 11,11 | 0,87 |
| Avril | 544 | 4,92 | 2,06 | 0,42 | 4,98 | 11,59 | 0,68 |
| Mai | 598 | 4,66 | 2,43 | 0,52 | 4,40 | 15,34 | 0,54 |
| Juin | 415 | 3,70 | 2,19 | 0,59 | 3,65 | 14,76 | 0,56 |
| Juillet | 276 | 5,63 | 1,98 | 0,35 | 6,04 | 8,90 | 1,42 |
| Août | 98 | 5,92 | 2,11 | 0,36 | 5,79 | 10,06 | 0,79 |
| Global | 5 618 | 4,61 | 2,23 | 0,48 | 4,43 | 15,34 | 0,54 |

Tableau 4.9-Ouldjet Mellegue – Calcul du tonnage en sel et de la salinité moyenne

| Année | VI (10 ⁶ m ³) | Vs (kg) | Alea | Vs (kg) | Salinité moyenne (g/l) |
|-------|--------------------------------------|---------|---------|---------|------------------------|
| M | 67,3 | 141 248 | 0 | 141 252 | 2,11 |
| S | 59,4 | 124 736 | 23 845 | 130 682 | 0,58 |
| Cv | 0,88 | 0,88 | 0 | 0,93 | 0,28 |
| Me | 54,2 | 113 800 | -3 174 | 113 820 | 2,05 |
| Max | 357,3 | 750 160 | 75 212 | 809 640 | 4,36 |
| Min | 10,9 | 22 885 | -44 294 | 21 900 | 1,01 |

4.6.2 Analyses des eaux de l'oued Mellègue

Suite à des prélèvements pour analyse. On cite ci-dessous les résultats de l'analyse du 25 Mai 2005. Ces informations amènent les commentaires suivants :

Il s'agit d'une eau assez salée (4,12 g/l). Elle est chlorurée et sulfatée (2,7 g/l) ce qui résulte en partie de la chimie des sols du bassin versant.

Pour les cations, le sodium et le magnésium sont les éléments prédominants.

Tableau 4.10-Résultats de l'analyse physico-chimique du 25/05/2005.

| Elément Analysé | Concentration (mg/l) | Concentration (méq/l) |
|---------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Calcium | 330 | 16,5 |
| Magnésium | 167 | 13,9 |
| Sodium | 800 | 34,8 |
| Potassium | 8 | 0,2 |
| Total "Cations" | 1 305 | 65,4 |
| Chlorures | 1 365 | 38,5 |
| Sulfates | 1 320 | 27,5 |
| Carbonates | 0 | 0 |
| Bicarbonates | 116 | 1,9 |
| Nitrates | 10 | 0,2 |
| Total "Anions" | 2 811 | 68,1 |
| Grand total | 4 116 | |
| Analyses Physiques | Résultat | Unité |
| Conductivité Electrique à 25°C | 6,5 | mmho/cm |
| Résidu Sec | 4 108 | mg/l |
| PH | 7,85 | / |
| NTK | / | / |
| NO2 | 0,618 | mg/l |
| NH4 | 0,02 | mg/l |
| PO4 | 0,3 | mg/l |
| MO | / | / |
| Oxygène dissous | 92,7 | mg/l |
| DBO5 | 5,8 | / |
| DCO | 176 | / |
| Cuivre | 0,076 | mg/l |

4.7 Conclusions

La qualité de la fondation rocheuse qui affleure au droit du site du barrage principal apparaît adaptée aux types d'ouvrage actuellement envisagés, soit un barrage en BCR ou en enrochement à noyau. En particulier, l'appréciation du massif rocheux à l'affleurement et dans les carottes de sondage est cohérente avec les vitesses généralement élevées déterminées par les mesures de sismique réfraction pour les couches relativement superficielles.

Des horizons marneux, moins résistants, sont rencontrés plus en profondeur. Afin de caractériser la résistance et la déformabilité de ces matériaux, des échantillons ont été prélevés et envoyés au laboratoire. Au vu des observations de terrain, les valeurs obtenues de résistance à la compression uniaxiale sont faibles : il semble que la foration et l'extraction des éprouvettes de marnes sont en partie responsables du changement de la condition de l'échantillon, ce qui se traduit par une sous-estimation de la résistance de la roche en place.

L'analyse préalable des structures géologiques et des familles de discontinuités a montré qu'une éventuelle rupture dans la fondation rocheuse du barrage principal solliciterait forcément la matrice intacte de la roche, car il ne semble pas y avoir de discontinuité défavorable. Du fait de la qualité des affleurements et de la présence d'une fracturation régulière, il a été possible de caractériser les familles de discontinuités et d'estimer empiriquement les paramètres physiques et mécaniques à l'échelle du massif rocheux suivant l'approche développée par Hoek & Brown. Les caractéristiques géomécaniques du massif rocheux ainsi déterminées apparaissent compatibles avec les charges qui seront induites par un ouvrage en BCR.

L'étanchéité de la fondation du barrage principal semble assurée par la présence d'intercalation marneuses, peu perméables et par la structure géologique favorable, caractérisée par un pendage régulier des couches vers l'amont. Un voile d'injection descendant jusqu'à 40 m de profondeur est recommandé. Il est aussi proposé de compléter le traitement de la fondation par des injections de consolidation sur 6 m de profondeur à partir du niveau du fond de fouilles ainsi que par un voile de drainage.

La fondation de la digue de col est apte à recevoir l'ouvrage envisagé, soit un remblai homogène d'une hauteur de l'ordre de 25 m. L'étanchéité du substratum

marneux semble assurée par la nature du rocher, peu perméable, et par la structure géologique caractérisée par un pendage modéré vers l'amont.

Les sources potentielles de matériaux de construction ont été évaluées. Les argiles pour le noyau étanche et pour le remblai homogène, ainsi que les granulats pour la confection des filtres se trouvent à proximité immédiate du site. Les granulats pour les filtres nécessiteront un traitement préalable par criblage et concassage. Plusieurs sites de carrières potentielles, dont celui de Koudiat es Snouber, dans les calcaires massifs de l'Aptien se trouvent dans un rayon d'environ 10 km du site.

CHAPITRE 5 :
CARACTERISATION DU SEDIMENT DU
BARRAGE D'OUELDJET MELLEGUE

Chapitre 5 :

5. Caractérisation du sédiment du barrage Oueldjet Mellegue

5.1 Introduction

Dans ce chapitre de l'étude est réservé aux essais expérimentaux pour déterminer Les caractérisations qualitatives et quantitatives des sédiments du barrage d'Ouldjet Mellegue. Ces identifications 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.).

Deux groupes d'essais seront accomplis dans ce chapitre, le premier concerne les essais de caractérisation, nécessaires à l'identification géotechnique du sol testé, Le second relatif aux essais principaux ; réalisés dans l'objectif d'introduire le concept de la non saturation des sols et de déterminer expérimentalement les paramètres relatifs aux sols non saturés. Une synthèse des résultats avec interprétation de chaque essai sera présentée.

5.2 Matériau d'étude

Le matériau utilisé pour cette étude est un sédiment argileux de faible plasticité, il provient du barrage Ouldjet Mellegue, situé sur le territoire de la wilaya de Tébessa dans la région Est (figure 5-1), cette région classée comme semi-aride, caractérisée à la fois par son climat peu pluvieux, parfois très sec et très irrégulier.

Le prélèvement du matériau d'étude se fait sur 05 zones répartie sur toutes la zone de la cuvette du barrage ; autant que le barrage est nouvellement réalisé, cette étude de caractérisation est la première au niveau de ce site, ainsi que le barrage est récemment construit, il ne configure pas sur la carte des barrages.

Les zones de prélèvement du matériau sont mentionnées sur la carte de le figure 5.2.

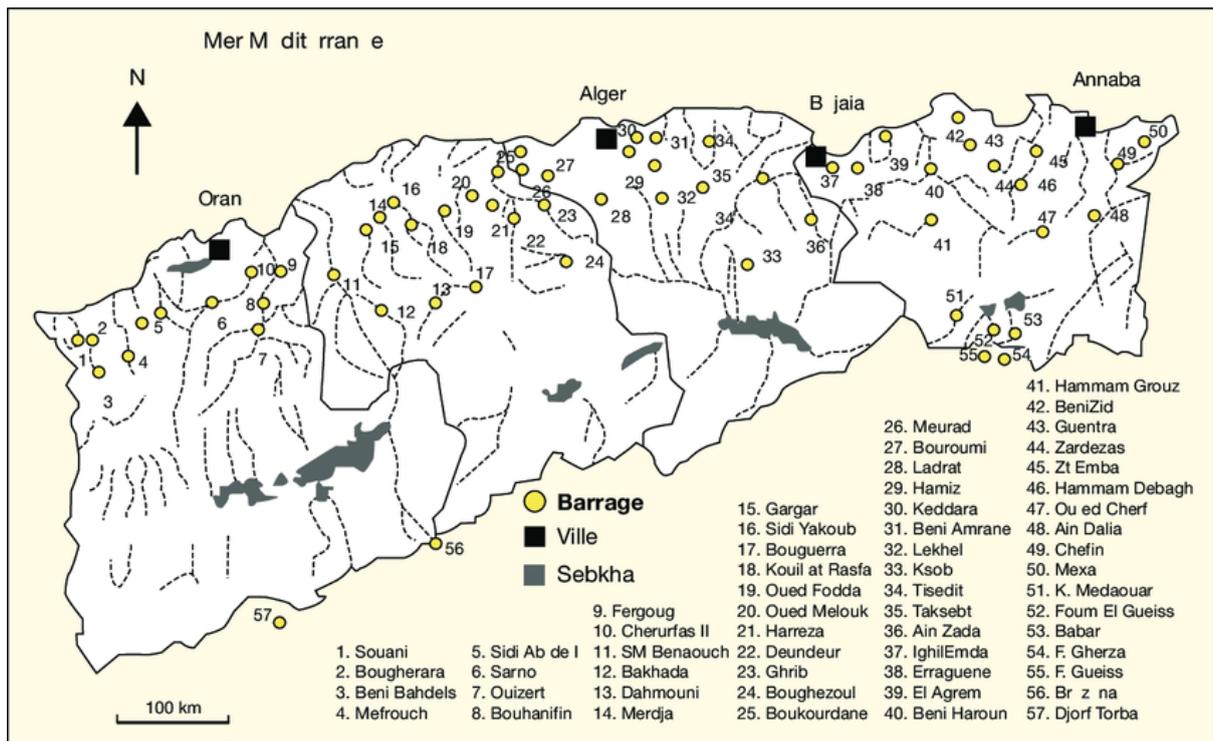


Figure 5.1 -Carte des barrages en Algérie.

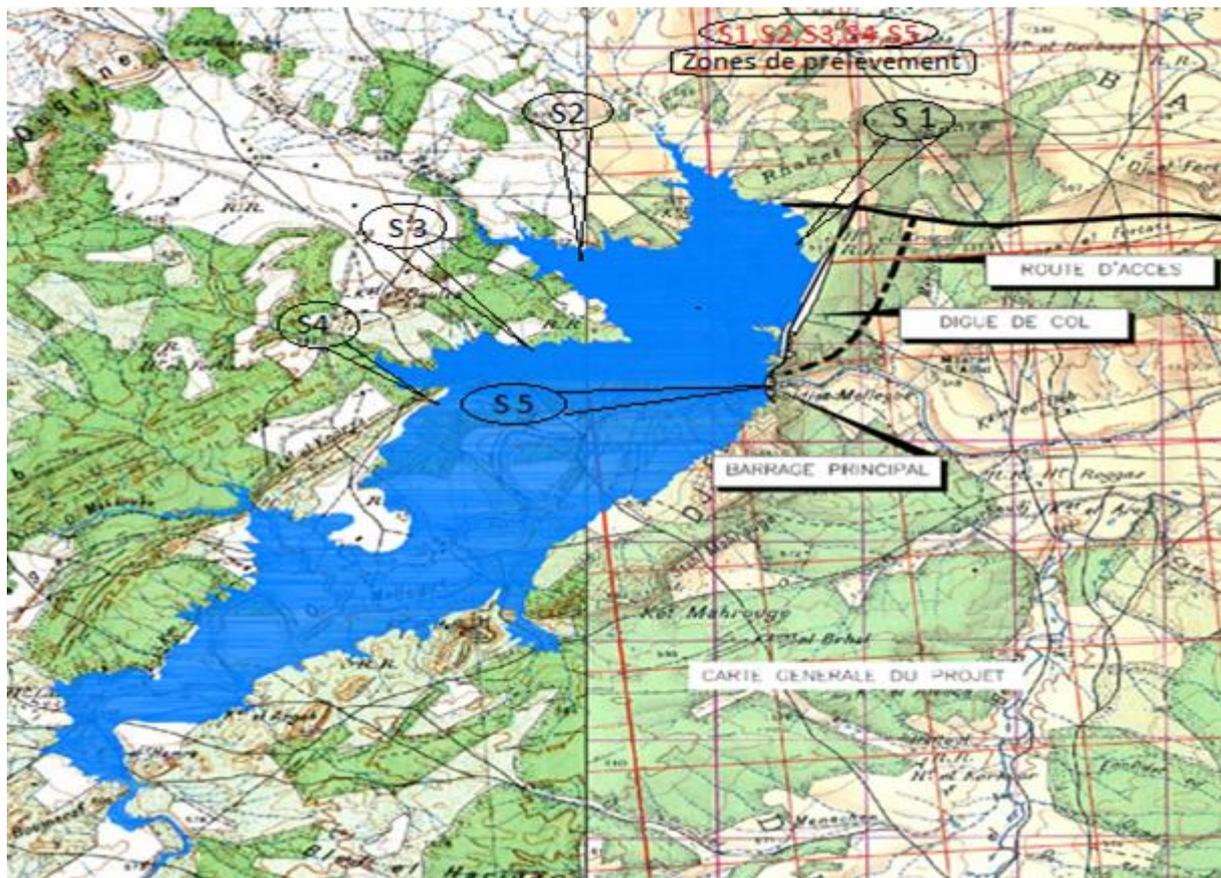


Figure 5.2-Carte détermine les Zones de prélèvement.

5.3 Programme essais de caractérisation

L'étude expérimentale de ce thème de recherche sur le comportement des sols non saturés nécessite l'utilisation de dispositifs bien instrumentés et des modes opératoires fiables. A cet effet, un programme expérimental spécial regroupant divers essais de caractérisation est proposé. Le tableau 5.1 ci-dessous récapitule le programme expérimental.

Tableau 5.1-Programme des essais de caractérisation.

| Numéro de l'essai | Nom de l'essai | Nature de l'essai | Norme utilisée |
|-------------------|---|--------------------------------|----------------|
| 1 | Granulométrie du sol | Tamissage | NF P94-056 |
| | | Méthodes par diffraction laser | ISO 13320:2020 |
| 2 | Essais de consistance | Limite de liquidité | NF P 94-052-1 |
| | | Limite de plasticité | NF P 94-051 |
| | | Indices de plasticité | NF P94-051 |
| | | Indices de liquidité | NF P 94-051 |
| | | Indices de consistance | NF P 94-051 |
| | | Activités du sol | NF P 94-051 |
| 3 | Essai au bleu de méthylène | | NFP 94-068 |
| 4 | Densités spécifiques des grains solides | | NF P94-054 |
| 5 | Essais de calcimètre CaCO_3 | | NF P 94-048 |
| 6 | MO | | NFP 94-055 |
| 7 | PH | | NF X31-103 |
| 8 | FRX | | NF T 01-102 |
| 9 | DRX | | NF P94-410-3 |
| 10 | ATG | | ASTM E2550 |
| 11 | SP | | LC 21-255 |
| 12 | Essais Proctor | Proctor Normal | NF P94-093 |
| | | Proctor Modifiée | |
| 13 | Essais CBR | CBR immédiat | NF P 94 078 |
| | | CBR immersion | |

5.4 Granulométries du sol

5.4.1 Granulométries du sol par tamissage

C'est un essai qui a pour objet la détermination en poids des éléments d'un sol (matériau) suivant leurs dimensions (cailloux, gravier, gros sable, sable fin, limon et argile). Elle se fait par tamissage par voie sèche pour les éléments supérieurs à 80 μm

(NF P94-056) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 μ m (NF P94- 057). Dans la présente étude on a utilisé la procédure du granulo-laser pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 μ m.

La distribution des particules solides en fonction de leurs diamètres équivalents moyens est représentée par la courbe granulométrique en coordonnées semi-logarithmiques. Elle est notamment une des bases de la classification des sols. Les essais sont réalisés sur des échantillons de sol dont la quantité est égale à 1000 grammes. Les résultats du pourcentage du tamisât en fonction des diamètres des tamis sont présentés sur la figure 5.3 et au tableau 5.2.

Tableau 5.2-Granulométries du sol par tamisage

| Diamètres des Tamis (mm) | Tamisât cumulés (%) | | | | |
|--------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| | Sol 1 | Sol 2 | Sol 3 | Sol 4 | Sol 5 |
| 4 | 83,237 | 78,593 | 80,69 | 82,687 | 81,969 |
| 2 | 55,792 | 56,882 | 42,536 | 58,865 | 59,344 |
| 1 | 36,934 | 41,066 | 23,73 | 41,481 | 40,594 |
| 0.50 | 21,893 | 27,721 | 12,784 | 26,348 | 23,761 |
| 0.20 | 9,599 | 14,728 | 5,93 | 22,235 | 8,761 |
| 0.125 | 5,193 | 8,421 | 3,366 | 6,605 | 3,901 |
| 0.080 | 3,539 | 5,598 | 2,601 | 4,423 | 1,759 |
| 0.063 | 1,932 | 3,118 | 1,715 | 2,805 | 0,353 |
| Fond | 0,103 | 0,365 | 0,015 | 0,131 | 0,003 |



Figure 5.3- Les différentes proportions du sol d'étude

5.4.2 Granulométries du sol par laser (Granulométrie Laser)

Deux méthodes sont utilisées pour déterminer la granulométrie (granulométrie par tamisage et la granulométrie par laser) pour la fraction inférieure à 80 μm . Pour la fraction fine, l'analyse granulométrique par laser a été réalisée par voie sèche dans un granulo-laser sous une pression d'air de 2,5 bars (Figure 5.3). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 5.5 et tableau 5.3.



Figure 5.4-Laboratoire Granulométrie laser.

La granulométrie par laser est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage, le principe de l'essai consiste de passer les particules à travers un rayon laser fixe. Chaque particule diffracte la lumière selon un angle qui est fonction de sa taille. La lumière diffractée est recueillie par un détecteur multi-éléments. L'image de diffraction obtenue est transformée en utilisant un modèle optique et une procédure mathématique appropriés (théorie de Mie ou théorie de Fraunhofer). Le résultat, illustré sous forme de courbe semi-logarithmique, est une distribution de particules en volume (diamètre d'une sphère de volume équivalent).

Il est à noter que la technique par granulométrie laser permet de caractériser aussi bien des poudres minérales, qu'organiques ou encore métalliques sollicitées pour des applications pharmaceutiques, cosmétiques, chimiques, céramiques, métallurgiques (fabrication additive), divers types de sols ... et cela en répondant à des

exigences normatives comme l'ISO 13320. Le granulomètre laser, permet de mesurer la distribution granulométrique (volume et nombre) d'un échantillon sous forme de poudre. De par son principe, la méthode s'applique à des particules quasiment sphériques et dont les propriétés optiques (indices de réfraction et d'absorption) sont connues. La mesure de granulométrie ne peut être effectuée que si la poudre considérée est exempte d'agrégats. Par conséquent, le liquide et l'agent dispersant doivent être adaptés à la poudre analysée.

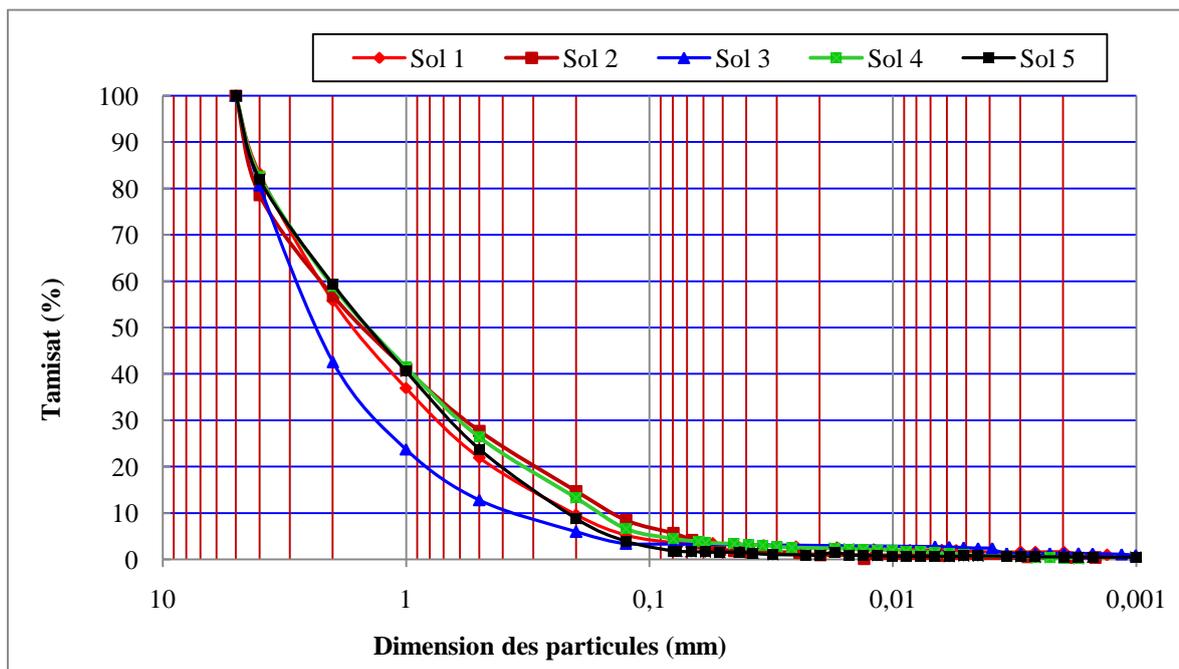


Figure 5.5-Courbes granulométriques du sol.

D10 = diamètre effectif des particules qui correspond à 10% du passant

D30 = diamètre effectif des particules qui correspond à 30% du passant

D50= diamètre effectif des particules qui correspond à 50% du passant

D60 = diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant.

Tableau 5.3-Récapitulation des diamètres effectifs des sols

| Diamètre effectif des particules (mm) | Les sols étudiés | | | | |
|---------------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|
| | SOL 1 | SOL 2 | SOL 3 | SOL 4 | SOL 5 |
| D ₁₀ | 0,2 | 0,16 | 0,4 | 0,17 | 0,23 |
| D ₃₀ | 0,75 | 0,57 | 1,35 | 0,61 | 0,7 |
| D ₅₀ | 1,70 | 1,50 | 2,4 | 1,52 | 1,50 |
| D ₆₀ | 2,33 | 2,33 | 2,80 | 2,15 | 2 |
| D ₉₀ | 4,5 | 4,8 | 4,5 | 4,7 | 4,7 |

5.4.3 Coefficient d'uniformité Cu

Ce coefficient dit de Hazen permet de caractériser de façon quantitative l'étalement de la courbe granulométrie. Ce coefficient est déterminé avec la formule suivant :

Pour le sol 05

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{2}{0.23} = 8.69, \text{ Dans notre cas } C_U = 8.69$$

| | Coefficient d'uniformité dit de Hazen | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Sol 1 | Sol 2 | Sol 3 | Sol 4 | Sol 5 |
| $C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ | 11,65 | 14,56 | 7 | 12,65 | 8.69 |

| Coefficient d'uniformité | classes de granulométrie |
|--------------------------|---------------------------------------|
| $C_u \leq 2$ | granulométrie est uniforme ou serrée. |
| $2 < C_u \leq 5$ | granulométrie serrée. |
| $5 < C_u \leq 20$ | granulométrie semi-étalée. |
| $20 < C_u \leq 200$ | granulométrie étalée. |
| $200 < C_u$ | granulométrie très étalée. |

Tableau 5.4-Classes de la granulométrie de sols

| | Cu | Intervalle Coefficient d'uniformité | classes de granulométrie |
|-------|--------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Sol 1 | 11.65 | $5 < C_u \leq 20$ | granulométrie semi-étalée. |
| Sol 2 | 14.56 | $5 < C_u \leq 20$ | granulométrie semi-étalée |
| Sol 3 | 7 | $5 < C_u \leq 20$ | granulométrie semi-étalée. |
| Sol 4 | 12.65 | $5 < C_u \leq 20$ | granulométrie semi-étalée |
| Sol 5 | 8.69 | $5 < C_u \leq 20$ | granulométrie semi-étalée |

5.4.4 Coefficient de Courbure Cc

Ce coefficient nous permet d'écrire la forme de la courbe granulométrie entre D10 et D60, Sol 5 selon la formule suivante : $C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{0.7^2}{0.23 \times 2} = 4.26.$

| | Coefficient de Courbure | | | | |
|--|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Sol 1 | Sol 2 | Sol 3 | Sol 4 | Sol 5 |
| $C_U = \frac{D_{(30)}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ | 6,55 | 4,73 | 12,75 | 4.70 | 4.26 |

Si $C_c > 5$ et $1 < C_c < 3$ le sol est dit bien gradué (la continuité est bien répartie).

$C_c < 1$ ou $C_c > 3 \rightarrow$ le sol est dit mal gradué (la continuité est mal répartie).

| Sols | Cc | Intervalle Coefficient De courbure | classes de granulométrie |
|-------|--------------|------------------------------------|--------------------------|
| Sol 1 | 6.55 | Cc > 5 | le sol bien gradué |
| Sol 2 | 4.73 | Cc > 3 | le sol mal gradué |
| Sol 3 | 12.75 | Cc > 5 | le sol bien gradué |
| Sol 4 | 4.70 | Cc > 3 | le sol mal gradué |
| Sol 5 | 4.26 | Cc > 3 | le sol mal gradué |

D'après la classification du LPC deux grandes catégories de sols sont distinguées :

Sols fins si : $D_{50} < 0.080$ mm

Sols grenus si : $D_{50} > 0.080$ mm

Dans notre cas :

| | D50 | Intervalle Coefficient De courbure | classes de granulométrie |
|-------|-------------|------------------------------------|--------------------------|
| Sol 1 | 1.7 | $D_{50} > 0.080$ mm | sol grenu |
| Sol 2 | 1.50 | $D_{50} > 0.080$ mm | sol grenu |
| Sol 3 | 2.5 | $D_{50} > 0.080$ mm | sol grenu |
| Sol 4 | 1.52 | $D_{50} > 0.080$ mm | sol grenu |
| Sol 5 | 1.5 | $D_{50} > 0.080$ mm | sol grenu |

| Paramètre | Sol 1 | Sol 2 | Sol 3 | Sol 4 | Sol 5 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| % des fines < 80µm | 3,54 | 5,60 | 3,30 | 4,42 | 1,76 |
| Fraction sableuse > 63 µm | 3,505 | 4,198 | 2,715 | 4,40 | 1,637 |
| Fraction silteuse $2 \mu\text{m} < \varnothing < 60 \mu\text{m}$ | 19,86 | 39,62 | 22,43 | 38,96 | 39,65 |
| Fraction argileuse < 2µm | 1,571 | 0,457 | 1,295 | 0,392 | 0,561 |
| D 10 | 0,2 | 0,16 | 0,4 | 0,17 | 0,23 |
| D 30 | 0,75 | 0,57 | 1,35 | 0,61 | 0,7 |
| D 50 | 1,70 | 1,50 | 2,4 | 1,52 | 1,50 |
| D 60 | 2,33 | 2,33 | 2,80 | 2,15 | 2 |
| D 90 | 4,5 | 4,8 | 4,5 | 4,7 | 4,7 |
| Cu | 11,65 | 14,56 | 7 | 12,65 | 8,69 |
| Cc | 6,55 | 4,73 | 12,75 | 4,70 | 4,26 |

5.5 Spectrométrie de fluorescence des rayons (RFX)

La FRX (Spectrométrie de fluorescence des rayons X ou SFX ou FX, ou en anglais XRF pour X-ray fluorescence) est une méthode d'analyse spectroscopique de la matière, se basant sur le principe de la fluorescence des rayons X. C'est l'une des méthodes les plus couramment utilisés pour la détermination qualitative et quantitative

de la composition élémentaire d'un échantillon sous forme liquide, massif ou poudre. Lorsque l'on bombarde de la matière avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X ; c'est la fluorescence X, ou émission secondaire de rayons X.

Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon, en analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.

Les résultats chimiques, tableau 5.5, ils ont été déterminés par (FRX) spectrométrie de fluorescence à rayons X.

Tableau 5.5-Composition chimique par spectrométrie de fluorescence à rayon X

| Ech | Na ₂ O | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | SO ₃ | K ₂ O | CaO | MnO | Fe ₂ O ₃ | SrO |
|-------|-------------------|--------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|-------|---------|--------------------------------|--------|
| Sol 1 | 0.0454% | 0.243% | 18.8% | 40.3% | 0.170% | 0.262% | 1.27% | 26.9% | 0.044% | 8.96% | 0.116% |
| Sol 2 | 0.218 % | 1.27 % | 13.9% | 29.8% | 0.120% | 15.8% | 0.951% | 30.3% | 0.0439% | 6.21% | 0.457% |
| Sol 3 | 0.277% | 1.46% | 16.8% | 36.5% | 0.145% | 0.548% | 1.24% | 34.2% | 0.0562% | 7.450% | 0.133% |
| Sol 4 | 0.271% | 1.56% | 17.8% | 36.6% | 0.116% | 8.48% | 1.17% | 24.9% | 0.0416% | 7.5% | 0.269% |
| Sol 5 | 0.269% | 1.98% | 18.1% | 40.1% | 0.198% | 0.284% | 1.47% | 28.3% | 0.0654% | 7.83% | 0.138% |

5.6 Analyse Thermogravimétrique (ATG)

En anglais : thermogravimetric analysis (TGA), est une technique d'analyse thermique qui consiste en la mesure de la variation de masse d'un échantillon en fonction du temps, pour une température ou un profil de température donné.

Une telle analyse suppose une bonne précision pour les trois mesures : masse, temps et température. Comme les courbes de variations de masse sont souvent similaires, il faut souvent réaliser des traitements de ces courbes afin de pouvoir les interpréter. La dérivée de ces courbes montre à quels points ces variations sont les plus importantes.

L'ATG est souvent employée dans la recherche et les essais pour déterminer :

- les caractéristiques de matériaux tels que les polymères,
- pour estimer la cinétique d'oxydation en corrosion à haute température,
- pour déterminer les températures de dégradation,
- pour déterminer l'humidité absorbée par le matériau,
- la quantité en composés organiques et inorganiques d'un matériau,

- le point de décomposition d'un explosif et des résidus de solvants.

5.6.1 Mode opératoire (ATG)

L'analyse thermogravimétrique est une technique d'analyse thermique qui consiste à mesurer la masse d'un échantillon lorsque celui-ci est soumis à des variations de température. (figure 5-6) Pour cela, un appareil dispose d'une balance de grande précision. L'échantillon de quelques mg est placé dans un creuset sur la canne de mesure. La canne est placée dans un four dans lequel circule un gaz de balayage (azote, argon, air, oxygène, etc.).

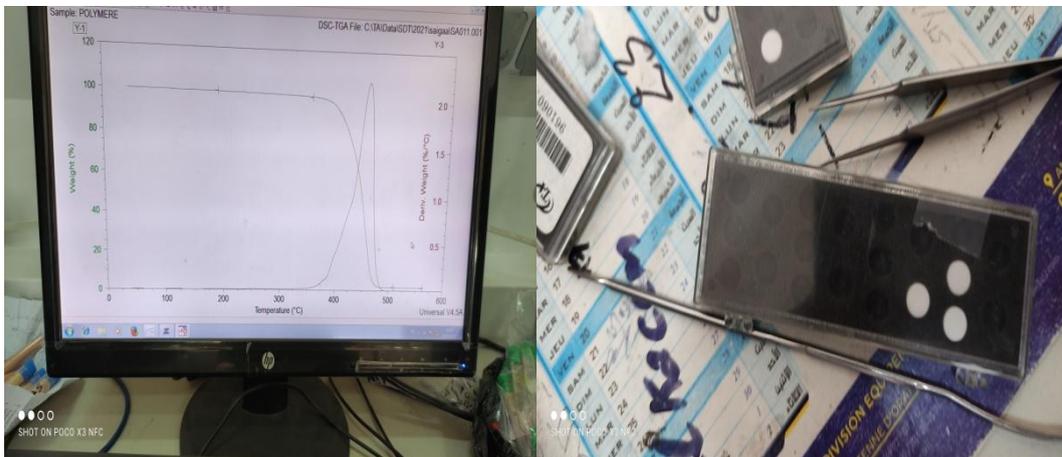


Figure 5.6-Matériels utilisés pour ATG.

5.6.2 Les conclusions de l'ATG

L'ATG permet d'observer les effets de décomposition thermique, d'évaporation, de réduction, de désorption, de sublimation, d'oxydation, d'absorption, etc. L'ATG permet de qualifier la stabilité thermique de composés. Elle permet

également de déterminer les températures auxquelles ont lieu des réactions chimiques. Elle permet aussi de doser certains composés volatils dans un échantillon solide.,le diagramme figure 5-7 montre la perte au feu.

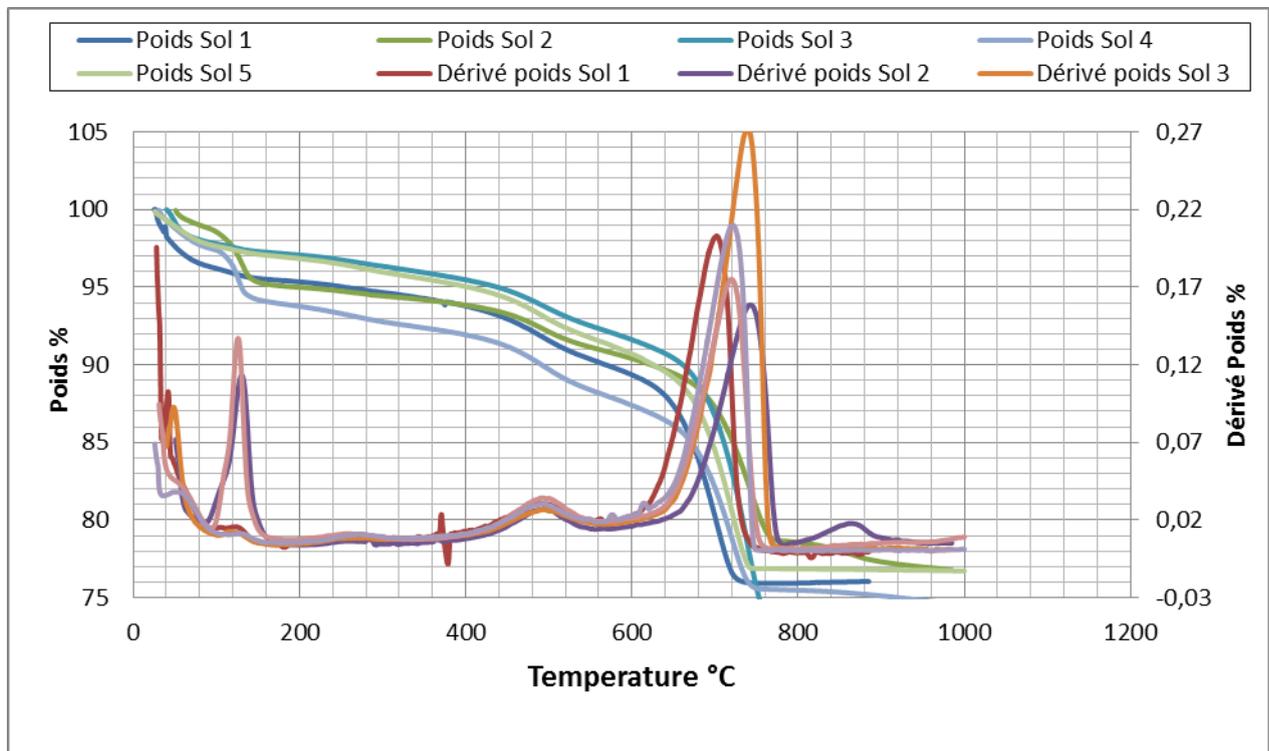


Figure 5.7 Analyse Thermo-Gravimétrique (ATG)

5.6.3 Caractéristiques techniques de l'ATG

Notre ATG est le modèle Q 5000IR de chez TA Instruments dotée d'un passeur d'échantillons

- Gamme de température : de l'ambiante à 1200°C
- Rampe de chauffe : de 0,1 à 500°C/min
- Analyse HiRes : adapte automatiquement la vitesse de chauffe en fonction de la perte de masse (optimisation des courbes et du temps de l'essai)
- Fonction ATG modulée : donne accès à l'énergie d'activation de l'échantillon en fonction du temps, de la température et de la conversion en un seul essai
- Masse d'échantillon : 1 à 5 mg
- Sensibilité : 0,1µg
- Atmosphère contrôlée : gaz inerte (azote) ou oxydant (air)

- Couplage à un Infrarouge : permet l'analyse des gaz émis lors de la décomposition de l'échantillon.

5.7 Essais de consistance des sols

Les essais de consistance consistent à déterminer les états où se trouvent le sol et les limites entre ces états, ces derniers appelés limites d'Atterberg ou de consistance (NF P94-051). En fonction des teneurs en eau, un sol intact ou remanié se présente suivant des consistances variables. Les limites d'Atterberg permettent de prévoir le comportement des sols fins pendant les phases de terrassement et / ou lorsqu'ils sont sollicités mécaniquement. L'objectif des essais de consistance est de déterminer les teneurs en eau situées à la frontière entre l'état solide, l'état plastique et l'état liquide. Ces limites comme ils sont mentionnée sur la figure 5-8 sont :

- limite de Liquidité : WL (frontière entre état plastique et liquide)
- limite de Plasticité : WP (frontière entre état solide et plastique).

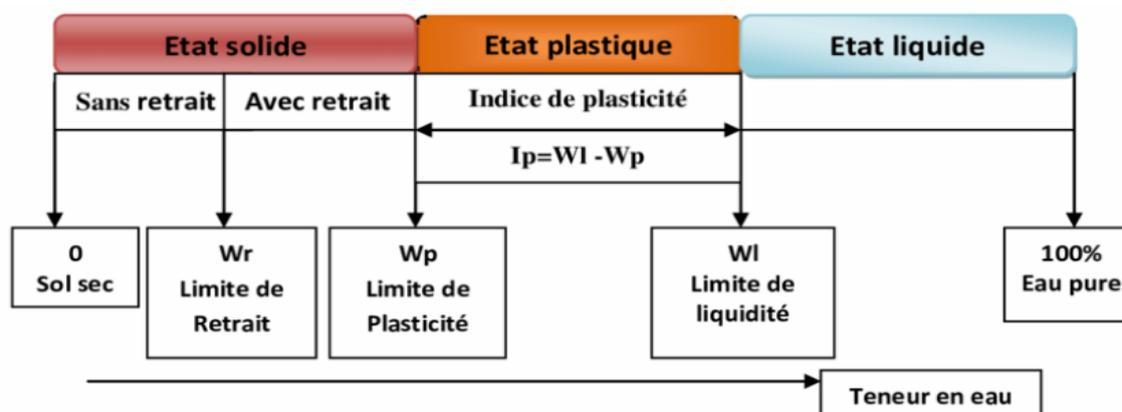


Figure 5.8-Etats de sol et limites d'Atterberg

5.7.1 Limite de liquidité W_L

L'équipement utilisé pour effectuer cet essai comprend :

L'appareil de Casagrande figure 5-9, dans ce cas la limite de liquidité est la teneur en eau correspondant à 25 coups.

Aussi la limite de liquidité peut être calculée en utilisant l'expression suivante :

$$W_L = W (N/25)^{0.121}, \text{ avec}$$

W:la teneur en eau correspond à N coups

N : nombre de coups correspondant à la fermeture des lèvres.

Soit le pénétromètre à cône (NF P 94-052-1), dans ce cas la limite de liquidité est par convention la teneur en eau pondérale du sol pour laquelle le cône s'enfonce de 17 mm dans le sol.

En plus de ces dispositifs, quelques matériels d'usage courant est nécessaire pour la réalisation de l'essai tels que ; Spatules, panneau de verre non absorbant, étuve, balance de précision, boîtes à pétri, tamis à mailles carrées de 400um d'ouverture.

Dans la présente étude la limite de liquidité est déterminée en utilisant l'appareil de Casagrande et l'expression suivante : $WL = W. (N/25)^{0.121}$, le Tableau 5-6, illustre en détail les résultats de l'essai de la limite de liquidité.



Figure 5.9-L'appareil de Casagrande

Tableau 5.6-Résultats de l'essai de la limite de plasticité.

| LIMITE DE LIQUIDITE SOL 1 | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|
| N°essai | 1ER ESSAI | | 2EME ESSAI | | 3EME ESSAI | |
| Nombre de coups | 20 | | 25 | | 27 | |
| N° de la tare | B074 | SN01 | B80 | S130 | B30 | C61 |
| Masse de la tare Mt (g) | 10 | 10 | 10,3 | 10 | 10 | 10,7 |
| Mt+Mh (tare +sol humide) | 29,1 | 24 | 24,37 | 22 | 30,5 | 32,8 |
| Mt+Md (tare +sol sec) | 21,7 | 18,35 | 18,96 | 17,39 | 22,7 | 24,41 |
| Masse d'eau Mw (g) | 7,4 | 5,65 | 5,41 | 4,61 | 7,8 | 8,39 |
| Masse sol sec Md (g) | 11,7 | 8,35 | 8,66 | 7,39 | 12,7 | 13,71 |
| Teneur en eau W (%) | 63,25 | 67,66 | 62,47 | 62,38 | 61,42 | 61,20 |
| W moyenne (%) | 65,46 | | 62,43 | | 61,31 | |
| WL (%) | 63,71 | | 62,43 | | 61,88 | |
| WL Moy (%) | | | 62,67 | | | |

| LIMITE DE LIQUIDITE SOL 2 | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|
| N°essai | 1ER ESSAI | | 2EME ESSAI | | 3EME ESSAI | |
| Nombre de coups | 23 | | 25 | | 27 | |
| N° de la tare | B074 | SN01 | B80 | S130 | B30 | C61 |
| Masse de la tare Mt (g) | 10 | 10 | 16,3 | 10 | 10 | 10,7 |
| Mt+Mh (tare +sol hum) | 28,1 | 24 | 24 | 22 | 28,9 | 32,8 |
| Mt+Md (tare +sol sec) | 21,22 | 18,77 | 21,24 | 17,52 | 22,3 | 24,94 |
| Masse d'eau Mw (g) | 6,88 | 5,23 | 2,76 | 4,48 | 6,6 | 7,86 |
| Masse sol sec Md (g) | 11,22 | 8,77 | 4,94 | 7,52 | 12,3 | 14,24 |
| Teneur en eau W (%) | 61,32 | 59,64 | 55,87 | 59,57 | 53,66 | 55,20 |
| W moyenne (%) | 60,48 | | 57,72 | | 54,43 | |
| WL (%) | 59,87 | | 57,72 | | 54,94 | |
| WL Moy (%) | 57,51 | | | | | |

| LIMITE DE LIQUIDITE SOL 3 | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|
| N°essai | 1ER ESSAI | | 2EME ESSAI | | 3EME ESSAI | |
| Nombre de coups | 23 | | 25 | | 27 | |
| N° de la tare | B074 | SN01 | B80 | S130 | B30 | C61 |
| Masse de la tare Mt (g) | 10 | 10 | 16,3 | 10 | 10 | 10,7 |
| Mt+Mh (tare +sol hum) | 26,98 | 24 | 23,57 | 22 | 27,9 | 32,8 |
| Mt+Md (tare +sol sec) | 21,01 | 19 | 21 | 18,01 | 21,8 | 25,57 |
| Masse d'eau Mw (g) | 5,97 | 5 | 2,57 | 3,99 | 6,1 | 7,23 |
| Masse sol sec Md (g) | 11,01 | 9 | 4,7 | 8,01 | 11,8 | 14,87 |
| Teneur en eau W (%) | 54,22 | 55,56 | 54,68 | 49,81 | 51,69 | 48,62 |
| W moyenne (%) | 54,89 | | 52,25 | | 50,16 | |
| WL (%) | 54,34 | | 52,25 | | 50,63 | |
| WL Moy (%) | 52,40 | | | | | |

| LIMITE DE LIQUIDITE SOL 4 | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|
| N°essai | 1ER ESSAI | | 2EME ESSAI | | 3EME ESSAI | |
| Nombre de coups | 21 | | 25 | | 29 | |
| N° de la tare | B074 | SN01 | B80 | S130 | B30 | C61 |
| Masse de la tare Mt (g) | 10 | 10 | 16,3 | 10 | 10 | 10,7 |
| Mt+Mh (tare +sol hum) | 28,2 | 24 | 24,08 | 22 | 29 | 32,86 |
| Mt+Md (tare +sol sec) | 21,3 | 18,7 | 21,18 | 17,66 | 22,3 | 25,1 |
| Masse d'eau Mw (g) | 6,9 | 5,3 | 2,9 | 4,34 | 6,7 | 7,76 |
| Masse sol sec Md (g) | 11,3 | 8,7 | 4,88 | 7,66 | 12,3 | 14,4 |
| Teneur en eau W (%) | 61,06 | 60,92 | 59,43 | 56,66 | 54,47 | 53,89 |
| W moyenne (%) | 60,99 | | 58,04 | | 54,18 | |
| WL (%) | 59,72 | | 58,04 | | 55,16 | |
| WL Moy (%) | 57,64 | | | | | |

| LIMITE DE LIQUIDITE SOL 5 | | | | | | |
|---------------------------|-----------|--------|------------|--------|------------|--------|
| N°essai | 1ER ESSAI | | 2EME ESSAI | | 3EME ESSAI | |
| Nombre de coups | 22 | | 25 | | 28 | |
| N° de la tare | B074 | SN01 | B80 | S130 | B30 | C61 |
| Masse de la tare Mt (g) | 10 | 10 | 16,3 | 10 | 10 | 10,7 |
| Mt+Mh (tare +sol hum) | 31 | 24 | 24,062 | 22 | 29 | 32,8 |
| Mt+Md (tare +sol sec) | 23,02 | 18,79 | 21,17 | 17,66 | 22,22 | 25,16 |
| Masse d'eau Mw (g) | 7,98 | 5,21 | 2,892 | 4,34 | 6,78 | 7,64 |
| Masse sol sec Md (g) | 13,02 | 8,79 | 4,87 | 7,66 | 12,22 | 14,46 |
| Teneur en eau W (%) | 61,290 | 59,272 | 59,384 | 56,658 | 55,483 | 52,835 |
| W moyenne (%) | 60,281 | | 58,021 | | 54,159 | |
| WL (%) | 59,36 | | 58,02 | | 54,91 | |
| WL Moy (%) | 57,43 | | | | | |

5.7.2 Limite de plasticité W_p

La limite de plasticité (NF P 94-051), est par convention la teneur en eau pondérale du sol pour laquelle un rouleau de sol de 3mm de diamètre et de 100mm de longueur se fissure ou s'émiette.

Tableau 5.7-Résultats de l'essai de la limite de liquidité

| LIMITE DE PLASTICITE SOL 1 | | | | | | |
|----------------------------|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|
| N°essai | 1ER ESSAI | | 2EME ESSAI | | 3EME ESSAI | |
| N° de la tare | B07 | B08 | B172 | B173 | B129 | B130 |
| Masse de la tare Mt (g) | 7 | 8 | 8 | 9 | 7 | 8 |
| Mt+Mh (tare +sol hum) | 12 | 12 | 13 | 13,38 | 13,7 | 14,72 |
| Mt+Md (tare +sol sec) | 10,9 | 11,2 | 11,92 | 12,39 | 12,14 | 13,25 |
| Masse d'eau Mw (g) | 1,1 | 0,8 | 1,08 | 0,99 | 1,56 | 1,47 |
| Masse sol sec Md (g) | 3,9 | 3,2 | 3,92 | 3,39 | 5,14 | 5,25 |
| Teneur en eau W (%) | 28,21 | 25,00 | 27,55 | 29,20 | 30,35 | 28,00 |
| W moyenne (%) | 26,60 | | 28,38 | | 29,18 | |
| WP Moy (%) | 28,05 | | | | | |

| LIMITE DE PLASTICITE SOL 2 | | | | | | |
|----------------------------|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|
| N°essai | 1ER ESSAI | | 2EME ESSAI | | 3EME ESSAI | |
| N° de la tare | B07 | B08 | B172 | B173 | B129 | B130 |
| Masse de la tare Mt (g) | 7,00 | 8,00 | 8,00 | 9,00 | 7,00 | 8,00 |
| Mt+Mh (tare +sol hum) | 12,00 | 12,00 | 13,00 | 13,00 | 13,00 | 13,99 |
| Mt+Md (tare +sol sec) | 10,92 | 11,20 | 11,93 | 12,10 | 11,66 | 12,65 |
| Masse d'eau Mw (g) | 1,08 | 0,80 | 1,07 | 0,90 | 1,34 | 1,34 |
| Masse sol sec Md (g) | 3,92 | 3,20 | 3,93 | 3,10 | 4,66 | 4,65 |
| Teneur en eau W (%) | 27,55 | 25,00 | 27,23 | 29,03 | 28,76 | 28,82 |
| W moyenne (%) | 26,28 | | 28,13 | | 28,79 | |
| WP Moy (%) | 27,73 | | | | | |

| LIMITE DE PLASTICITE SOL 3 | | | | | | |
|----------------------------|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|
| N°essai | 1ER ESSAI | | 2EME ESSAI | | 3EME ESSAI | |
| N° de la tare | B07 | B08 | B172 | B173 | B129 | B130 |
| Masse de la tare Mt (g) | 7 | 8 | 8 | 9 | 7 | 8 |
| Mt+Mh (tare +sol hum) | 12 | 12,01 | 12,667 | 13 | 13 | 14 |
| Mt+Md (tare +sol sec) | 10,9 | 11,14 | 11,73 | 12 | 11,49 | 12,51 |
| Masse d'eau Mw (g) | 1,1 | 0,87 | 0,937 | 1 | 1,51 | 1,49 |
| Masse sol sec Md (g) | 3,9 | 3,14 | 3,73 | 3 | 4,49 | 4,51 |
| Teneur en eau W | 28,21 | 27,71 | 25,12 | 33,33 | 33,63 | 33,04 |
| W moyenne (%) | 27,96 | | 29,23 | | 33,33 | |
| WP Moy (%) | 30,17 | | | | | |

| LIMITE DE PLASTICITE SOL 4 | | | | | | |
|----------------------------|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|
| N°essai | 1ER ESSAI | | 2EME ESSAI | | 3EME ESSAI | |
| N° de la tare | B07 | B08 | B172 | B173 | B129 | B130 |
| Masse de la tare Mt (g) | 7 | 8 | 8 | 9 | 7 | 8 |
| Mt+Mh (tare +sol hum) | 12 | 11,98 | 13 | 13 | 14 | 14 |
| Mt+Md (tare +sol sec) | 10,8 | 11,01 | 11,769 | 12 | 12,27 | 12,48 |
| Masse d'eau Mw (g) | 1,2 | 0,97 | 1,231 | 1 | 1,73 | 1,52 |
| Masse sol sec Md (g) | 3,8 | 3,01 | 3,769 | 3 | 5,27 | 4,48 |
| Teneur en eau W | 31,58 | 32,23 | 32,66 | 33,33 | 32,83 | 33,93 |
| W moyenne (%) | 31,90 | | 33,00 | | 33,38 | |
| WP Moy (%) | 32,76 | | | | | |

| LIMITE DE PLASTICITE SOL 5 | | | | | | |
|----------------------------|-----------|--------|------------|--------|------------|--------|
| N°essai | 1ER ESSAI | | 2EME ESSAI | | 3EME ESSAI | |
| N° de la tare | B07 | B08 | B172 | B173 | B129 | B130 |
| Masse de la tare Mt (g) | 7 | 8 | 8 | 9 | 7 | 8 |
| Mt+Mh (tare +sol hum) | 12 | 12 | 11,5 | 13,59 | 11,26 | 13,7 |
| Mt+Md (tare +sol sec) | 11,26 | 11,37 | 10,91 | 12,77 | 10,39 | 12,59 |
| Masse d'eau Mw (g) | 0,74 | 0,63 | 0,59 | 0,82 | 0,87 | 1,11 |
| Masse sol sec Md (g) | 4,26 | 3,37 | 2,91 | 3,77 | 3,39 | 4,59 |
| Teneur en eau W | 17,371 | 18,694 | 20,275 | 21,751 | 25,664 | 24,183 |
| W moyenne (%) | 18,033 | | 21,013 | | 24,923 | |
| WP Moy (%) | 21,32 | | | | | |



Figure 5.10-Détermination de la limite de plasticité WP.

Tableau 5.8-Détermination de la limite de plasticité WP.

| Ech | WL % | Wp % | Ip % | Ic % | IL % | Wn % |
|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| Sol 1 | 62,67 | 28,04 | 34,63 | 1,31 | 0,31 | 17,43 |
| Sol 2 | 57,51 | 27,73 | 29,78 | 1,38 | 0,38 | 16,4 |
| Sol 3 | 52,4 | 30,17 | 22,23 | 1,53 | 0,53 | 18,37 |
| Sol 4 | 57,64 | 32,76 | 24,88 | 1,49 | 0,49 | 20,64 |
| Sol 5 | 57,43 | 21,32 | 36,11 | 0,66 | 0,34 | 33,5 |

5.7.3 Indices de plasticité

L'indice de plasticité est donné par la relation suivante : $I_p = w_L - w_P$

La valeur de l'indice de plasticité classe le sol en question comme un sol moyennement argileux.



Figure 5.11-Nature du sol selon Ip.

Tableau 5.9-Classement des sols selon l'indice de plasticités.

| Nature du sol | Ip % | Classification selon Ip |
|---------------|-------|-------------------------|
| Sol 1 | 34,63 | Sol argileux. |
| Sol 2 | 29,78 | Sol argileux. |
| Sol 3 | 22,23 | moyennement argileux. |
| Sol 4 | 24,88 | moyennement argileux. |
| Sol 5 | 36,11 | Sol argileux. |

Il est à noter que les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité d'un sol varient non seulement avec l'importance de la fraction argileuse mais également avec la nature des minéraux argileux. D'après la classification proposée par l'abaque de Casagrande, on peut classer les 05 sols suites aux figures 5-13 au 5.17 :

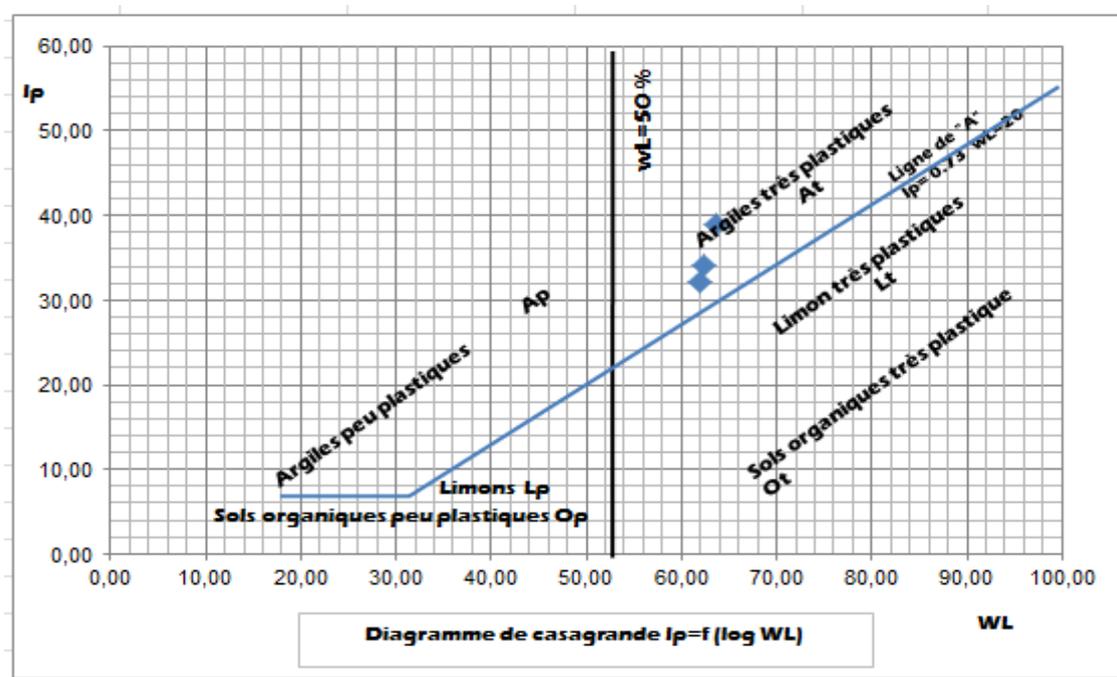


Figure 5.12- Classification du sol 1 sur l'abaque de Casagrande.

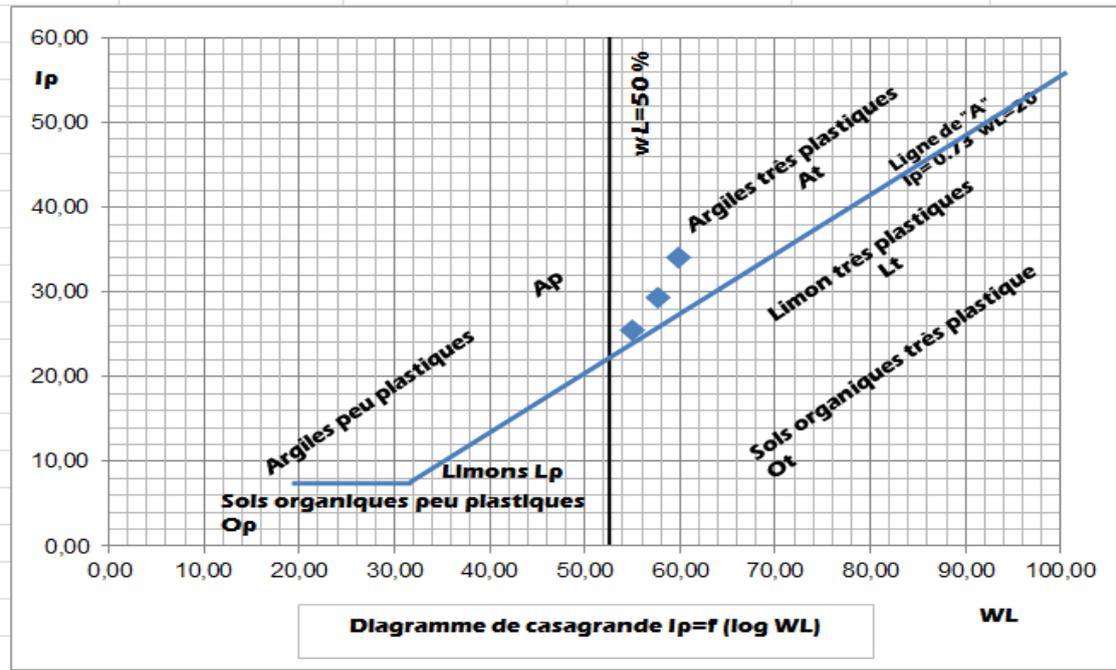


Figure 5.13-Classification du sol 2 sur l'abaque de Casagrande.

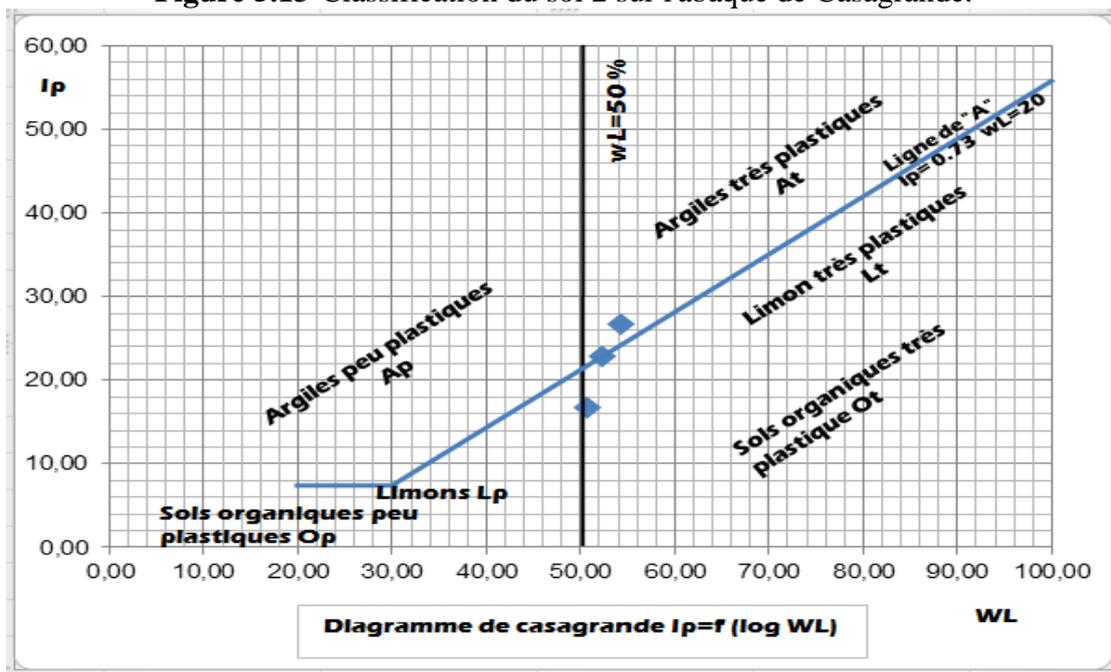


Figure 5.14-Classification du Sol 3 sur l'abaque de Casagrande.

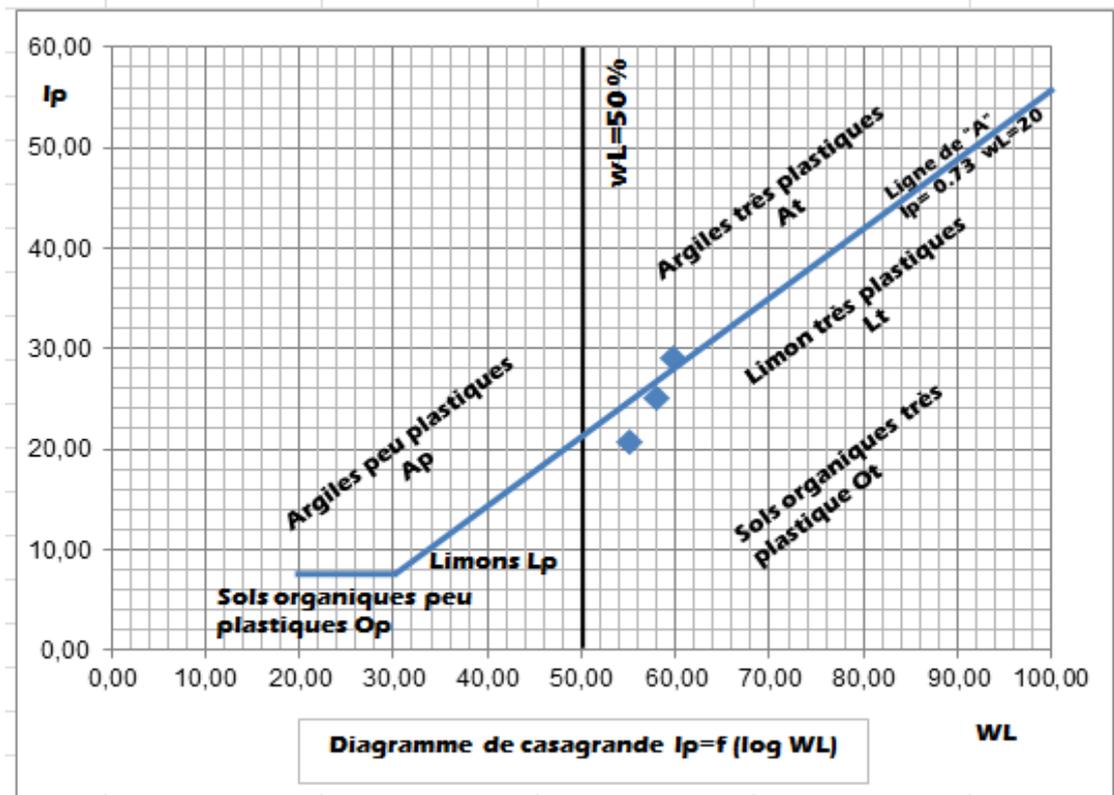


Figure 5.15-Classification du Sol 4 sur l'abaque de Casagrande

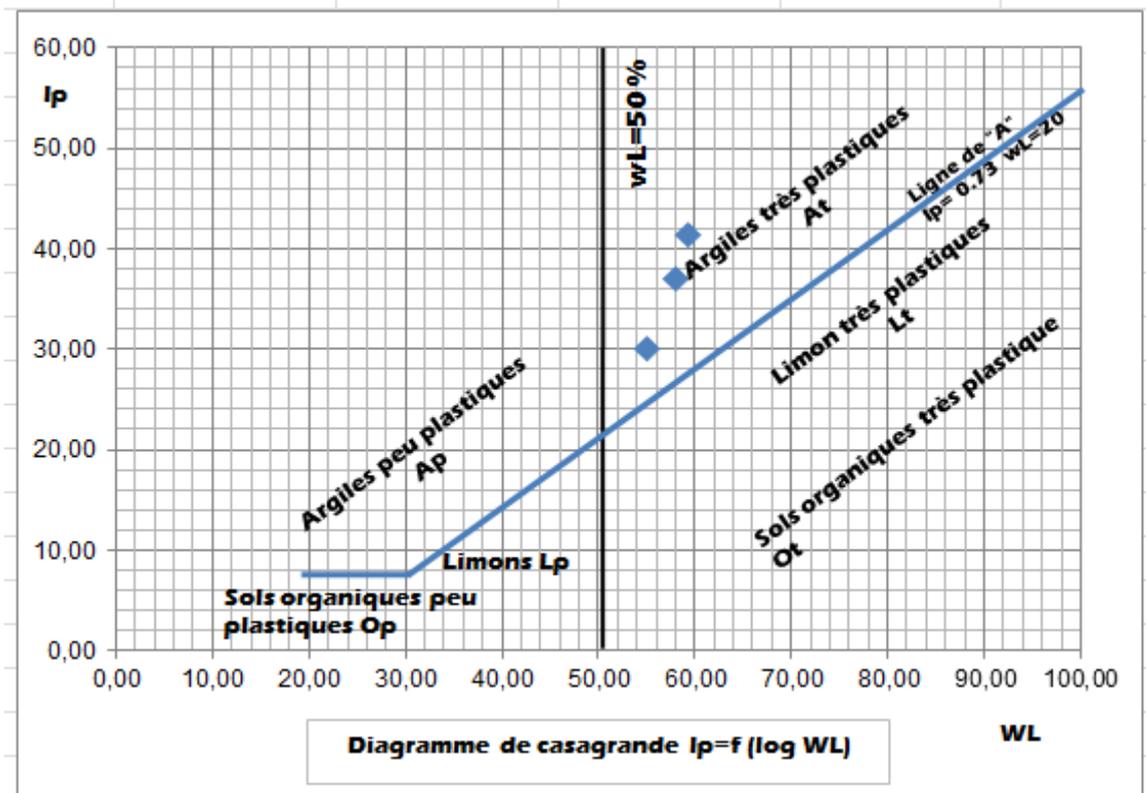


Figure 5.16-Classification du Sol 5 sur l'abaque de Casagrande.

En reportant wL et IP sur l'abaque de Casagrande figure 5-13 au 5.17 , pour classifier le sol, on se trouve les résultats suivantes figure 5-10 :

Tableau 5.10-Classement des sols selon l'abaque de Casagrande.

| Nature du sol | WL % | Ip % | Classement du sol selon WL et Ip |
|---------------|-------|-------|----------------------------------|
| Sol 1 | 62,67 | 34,63 | Argile très plastique |
| Sol 2 | 57,51 | 29,78 | Argile très plastique. |
| Sol 3 | 52,4 | 22,23 | Argile très plastique |
| Sol 4 | 57,64 | 24,88 | Limons très plastique. |
| Sol 5 | 57,43 | 36,11 | Argile très plastique. |

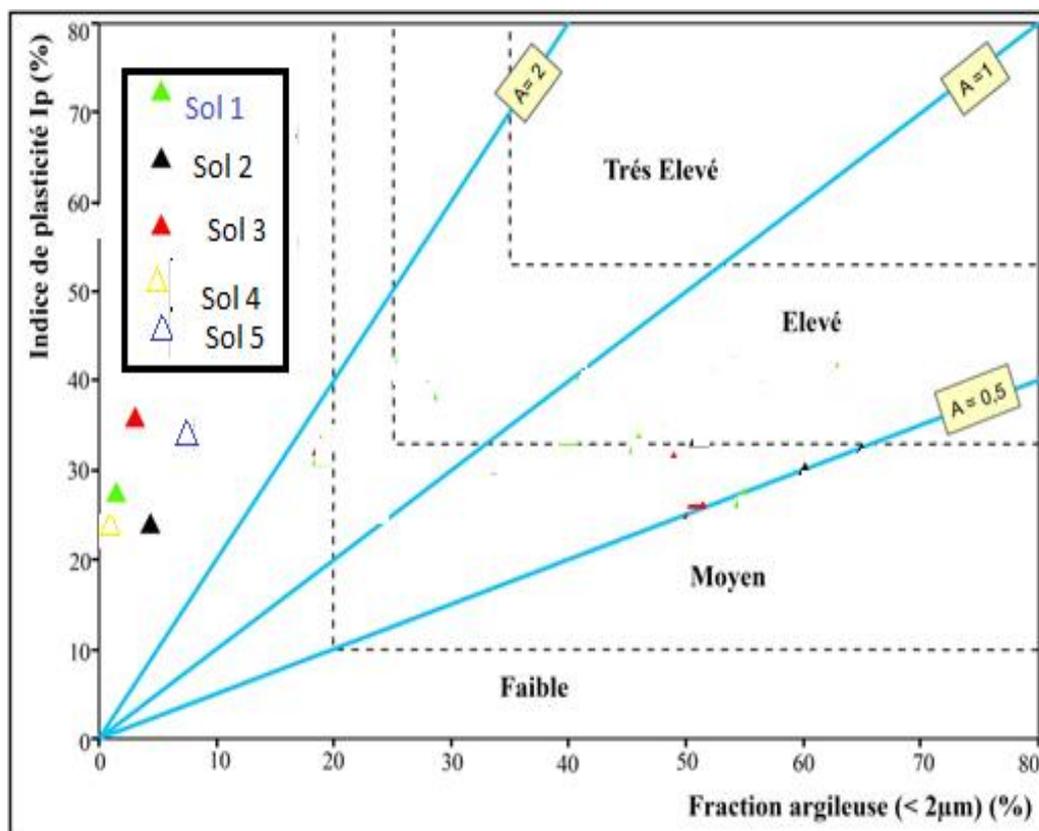


Figure 5.17-Diagramme de classification des sols selon Williams et Donaldson (1980).

Le Building Research Establishment (B.R.E, 1980) (figure 5-18) propose une classification de potentiel de gonflement des sols argileux à partir de deux paramètres : l'indice de plasticité (Ip) et la teneur en particules argileuses (F%). Cette classification ne donne que la globalité des sols étudiés ont d'un gonflement faible.

5.7.4 L'indice de liquidité (I_L)

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

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_l - w_p} = \frac{w - w_p}{I_p}$$

5.7.5 Indice consistance

L'indice de consistance donne une idée de la structure des argiles du sol, tableau 5-11.

Tableau 5.11-Structure du sol en fonction de l'indice de consistance I_c .

| I_c | Consistance |
|--------------------|-----------------------|
| $I_c < 0$ | Liquide |
| $0 < I_c < 0.25$ | Pâteuse ou très molle |
| $0.25 < I_c < 0.5$ | Molle |
| $0.5 < I_c < 0.75$ | Ferme |
| $0.75 < I_c < 1$ | Tés Ferme |
| $I_c > 1$ | Dure |

Classification selon l'indice de consistance .tableau 5-12

$$I_c = \frac{WL - W}{I_p} = (18.47 - 8) / 13.19 = 0.79 \text{ donc c'est une argile très ferme.}$$

Tableau 5.12-Classement des sols selon Indice consistance

| | I_c | Intervalle Indice consistance | Nature du sol selon I_c |
|-------|-------|----------------------------------|---------------------------|
| Sol 1 | 1,31 | $I_c > 1$ | Sol Dure |
| Sol 2 | 1,38 | $I_c > 1$ | Sol Dure |
| Sol 3 | 1,53 | $I_c > 1$ | Sol Dure |
| Sol 4 | 1,49 | $I_c > 1$ | Sol Dure |
| Sol 5 | 0,66 | $0.5 < I_c < 0.75$ | Sol Ferme |

5.7.6 L'activité du sol

Les propriétés de plasticité des argiles dépendent essentiellement de la fraction argileuse (% < 2 μ m). Si la composition minéralogique de l'argile est constante, l'indice de plasticité du sol est proportionnel à la quantité d'argile présente dans le sol. L'activité des argiles A_c , définie par Skempton (1948) comme le rapport de l'indice de

plasticité de l'argile à sa teneur en particules argileuses $AC = IP / (\% < 2 \mu\text{m})$ ce paramètre dépend principalement de la nature minéralogique du sol, pour le sol 5 :

$$A_c = I_p / \% < 2 \mu\text{m} = 36.11/0.561 = 64.36$$

D'après la classification donnée par le tableau 5-13, le sol d'étude est une argile très active.

Tableau 5.13-la classification de l'active des sols.

| Nature | Activité d'argile |
|-----------------|---------------------|
| Argile inactive | $A_c < 0.75$ |
| Argile normale | $0.75 < A_c < 1.25$ |
| Argile active | $A_c > 1.25$ |

Tableau 5.14-Normes et méthodes utilisées pour la caractérisation des matériaux étudiés.

| Propriétés | Norme et méthode |
|----------------------------------|------------------|
| Valeur au bleu de méthylène(VBS) | NF P 94 068 |
| pH | NF X31-103 |
| Conductivité | NF ISO 11265 |
| Matière Organique | XP P94-047 |
| Calcimètre de Bernard | NF P 94-048 |

5.8 Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène est utilisé pour caractériser l'activité des argiles contenues dans les sols. Il est utilisé également pour quantifier de manière sûre et simple la propreté des granulats. Appelé aussi l'essai au bleu, utilisé en géotechnique pour déterminer l'argilosité d'un sol. Elle est mesurée sur la fraction 0/5mm et exprime en grammes de bleu par cent grammes de la fraction 0/50mm du sol sec étudié, elle est notée valeur au bleu de méthylène du sol « VBS ».

5.8.1 Principe de l'essai

Il consiste à introduire dans un échantillon des quantités croissantes de bleu de méthylène, par doses successives jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées. Le sol adsorbera d'autant plus de bleu de méthylène que :

- la quantité d'argile qu'il contient est importante ;

- cette argile est active, c'est-à-dire qu'elle développe une surface spécifique élevée et qu'elle est abondamment chargée.

5.8.2 Mode opératoire

- Tamiser l'échantillon de sol au tamis 5 mm et prélever une masse.
- Verser un échantillon de 30 gr de sol sec dans le Bécher et ajouter 500g de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- Agiter sans arrêt le mélange à l'aide de l'agitateur.
- Ajouter 5 cm³ de bleu de méthylène dans le Bécher.
- Prélever une goutte de mélange et la placer sur papier filtre.
- Si la tache centrale est entourée d'une auréole bleu turquoise, le test est positif. Dans ce cas l'essai est terminé, les particules argileuses sont alors saturées en Bleu de Méthylène. Figure 5-19
- On recommence l'essai cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer.
- Si la tache est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5 jusqu'à 3 cm ce que le teste soit positif.



Figure 5.18-Tache référence d'essai bleu de méthylène.

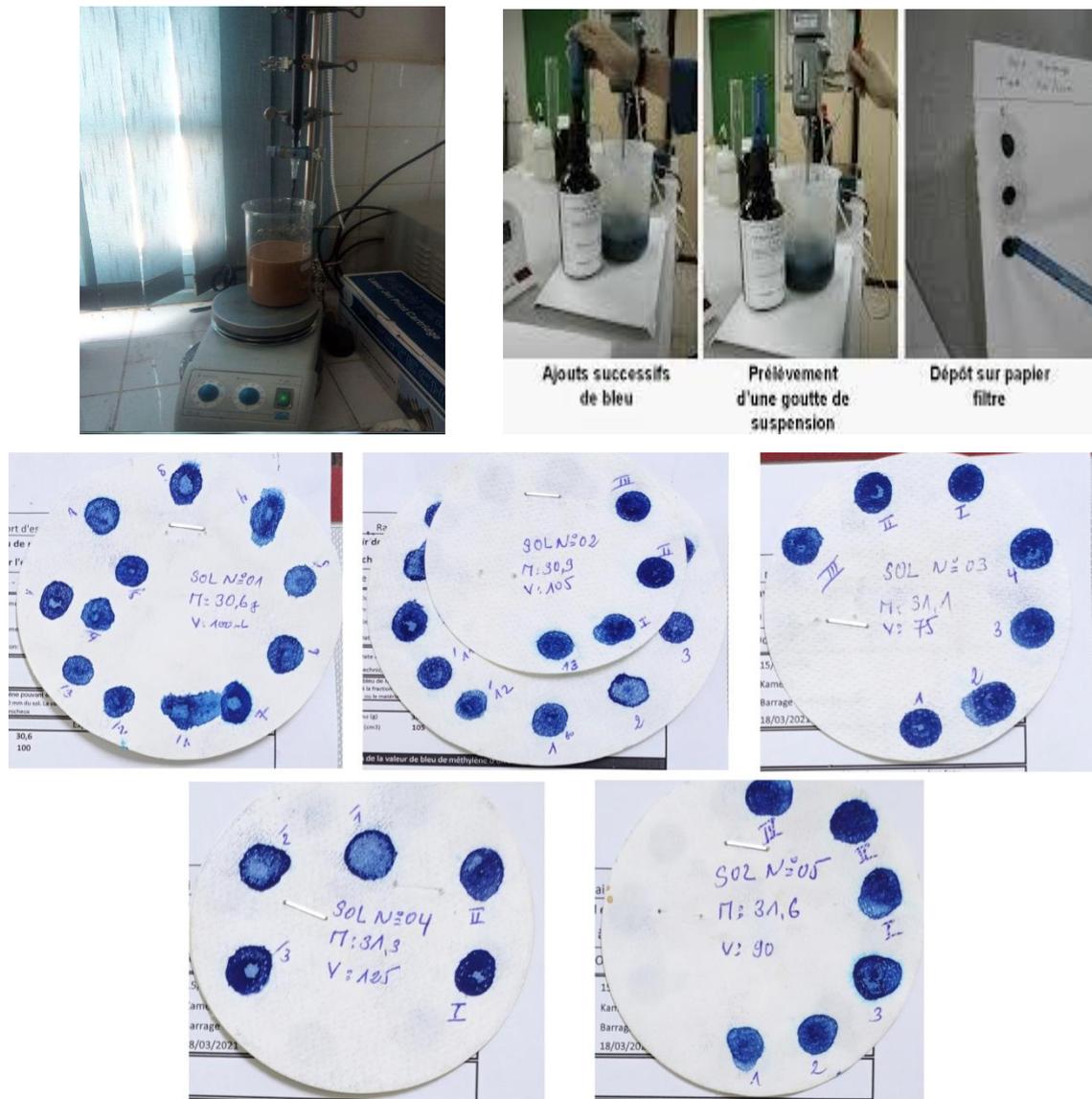


Figure 5.19-Les étapes de l’essai bleu méthylène

Cet essai est une mesure indirecte de la surface spécifique des grains solides par adsorption d’une solution de bleu de méthylène jusqu’à saturation. En d’autres termes, il exprime la quantité de bleu de méthylène pouvant être absorbée par les surfaces des particules de sols.

5.8.3 Calculs et expression des résultats :

Dans la présente étude, l’essai est réalisé sur un 05 échantillon. Les résultats sont représentés sur le tableau 5-15

Tableau 5.15- Résultats de l'essai bleu méthylène.

| Désignation | | U | SOL 1 | SOL 2 | SOL 3 | SOL 4 | SOL 5 |
|--------------------------------------|-----|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| La masse du sol | mh1 | g | 30,6 | 30,9 | 31,1 | 31,3 | 31,6 |
| La masse de l'eau | mh2 | g | 0,9 | 1,85 | 1,65 | 2,05 | 1,5 |
| La masse du bleu | mh3 | g | 1 | 1,05 | 0,75 | 1,25 | 0,9 |
| La masse de sol + eau + bleu | mh4 | g | 32,5 | 32,75 | 32,75 | 33,35 | 33,1 |
| La masse de sol + l'eau | mh5 | g | 31,5 | 31,7 | 32 | 32,1 | 32,2 |
| Le volume de bleu utilisé | V | cm ³ | 100 | 105 | 75 | 125 | 90 |
| $W = \frac{m_{h4} - m_{h1}}{m_{h1}}$ | | % | 6,21 | 5,99 | 5,31 | 6,55 | 4,75 |
| $m_0 = \frac{m_{h5}}{1+w}$ | | g | 29,66 | 29,91 | 30,39 | 30,13 | 30,74 |
| $B = V * 0,01$ | | g | 1 | 1,05 | 0,75 | 1,25 | 0,9 |
| $VBS = \frac{B}{m_0} * 100$ | | % | 3,37 | 3,51 | 2,47 | 4,15 | 2,93 |

m_{h1} = La masse du sol en g

m_{h2} = La masse de l'eau en g

m_{h3} = La masse du bleu en g

m_{h4} = La masse de sol + eau + bleu en g

m_{h5} = La masse de sol + l'eau en g

V = Le volume de bleu utilisé en cm²

$W = \frac{m_{h4} - m_{h1}}{m_{h1}}$ — teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5 mm) ;

$m_0 = \frac{m_{h5}}{1+w}$ — masse sèche de la prise d'essai ;

$B = V * 0,01$ — masse de bleu introduite (solution à 10 g/l) ;

$VBS = \frac{B}{m_0} * 100$ - Pour les matériaux dont le D_{max} est inférieur à 5 mm, l'expression du

résultat est :

D'après le tableau de classification, Tableau 5-16 :

Tableau 5.16- Classification de sol par valeur de bleu de méthylène

| Valeur de VBS | valeur de bleu de méthylène |
|-------------------------|--------------------------------------|
| $V_{BS} < 0,1$ | sol insensible à l'eau |
| $0,2 \leq V_{BS} < 1,5$ | sol sablo limoneux, sensible à l'eau |
| $1,5 \leq V_{BS} < 2,5$ | Sol sable argileux, peu plastiques |
| $2,5 \leq V_{BS} < 6$ | sol limoneux de plasticité moyenne |
| $6 \leq V_{BS} < 8$ | sol argileux |
| $V_{BS} > 8$ | sol très argileux |

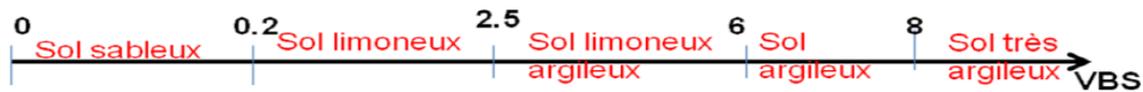


Figure 5-20-Nature du sol selon VBS.

Les sols testés sont classés sur tableau 5-17 :

Tableau 5.17-Classement des sols selon Valeur de VBS.

| Echantillon | Valeur de VBS | Intervalle Valeur de VBS | Nature du sol selon Ic |
|-------------|---------------|--------------------------|------------------------------------|
| Sol 1 | 3,37 | $2,5 \leq V_{BS} < 6$ | Sol limoneux de plasticité moyenne |
| Sol 2 | 3,51 | $2,5 \leq V_{BS} < 6$ | Sol limoneux de plasticité moyenne |
| Sol 3 | 2,47 | $1,5 \leq V_{BS} < 2,5$ | Sol sable argileux, peu plastiques |
| Sol 4 | 4,15 | $2,5 \leq V_{BS} < 6$ | Sol limoneux de plasticité moyenne |
| Sol 5 | 2,93 | $2,5 \leq V_{BS} < 6$ | Sol limoneux de plasticité moyenne |

Constataion : L'indice de plasticité et la valeur de bleu d'un sol sont des paramètres qui mesurent l'argilosité. Il existe des corrélations entre les valeurs de bleu d'un sol et son indice de plasticité pour les sols cohérents. L'indice de plasticité est un paramètre plus sensible que la valeur de bleu pour des sols moyennement à très argileux. Enfin l'indice de plasticité est à la fois un paramètre d'identification et de comportement du sol qui définit l'intervalle de teneur en eau dans lequel le sol reste souple et déformable tout en conservant une certaine résistance au cisaillement.

5.8.4 Surface spécifique

La surface spécifique est une des caractéristiques liées au type et à la quantité d'argile, à la teneur en eau, à la minéralogie, à la capacité d'échange cationique et à la limite de liquidité. Elle est aussi utilisée pour interpréter les potentiels de retrait - gonflement et la susceptibilité au gel. La surface spécifique est calculée par la relation : $Sp=20.93.VBS$

Dans le cas de la présente étude, d'après la classification de Mitchell (1993) Tableau 5-18, les sols sont classé comme suit :

Tableau 5.18-Surface spécifique des minéraux argileux les plus courants.

| | Kaolinite | Illite | Montmorillonite |
|------------------------------------|-----------|--------|-----------------|
| S _p (m ² /g) | 10-20 | 80-100 | 400-800 |

Tableau 5.19-Classement des sols selon classification de Mitchell (1993).

| Echantillon | Valeur de VBS | Valeur de VBS x20.93 (SP) (m ² /g) | Nature du sol selon Ic |
|-------------|---------------|--|---------------------------|
| Sol 1 | 3,37 | 70,57 | Entre Kaolinite et Illite |
| Sol 2 | 3,51 | 73,48 | Entre Kaolinite et Illite |
| Sol 3 | 2,47 | 51,66 | Entre Kaolinite et Illite |
| Sol 4 | 4,15 | 86,84 | Illite |
| Sol 5 | 2,93 | 61,28 | Entre Kaolinite et Illite |

5.9 Densités spécifiques des grains solides

Le rapport du poids du matériau sec contenu dans une certaine quantité de sol au volume des grains du sol, représente le poids volumique des grains du sol. Figure 5-22

$$\gamma_s = \frac{w_s}{V_s}$$

Le matériel requis pour la détermination de ce paramètre est constitué d'un pycnomètre, d'une étuve de 60° à 105°C et d'une balane de précision.



Figure 5.21-Manipulation d'essai densités spécifiques.

La formule utilisée pour calculer le poids spécifique est:

$$\gamma_s = \frac{(M_1 - M_0) \cdot \rho_{eau}}{M_3 + M_1 - M_0 - M_2} \quad (\text{g/cm}^3)$$

Avec:

M_0 : Masse de pycnomètre

M_1 : Masse de (pycnomètre + grains solides)

M_2 : Masse de (pycnomètre + grains solides + eau)

M_3 : Masse de (pycnomètre + eau).

Les valeurs des densités spécifiques des grains solides pour les différents matériaux testés sont présentées au Tableau 5-20.

Tableau 5.20-Poids spécifiques du sol.

| Echantillon | N° d'essai | M0 (g) | M1 (g) | M2 (g) | M3 (g) | γ_s (g/cm ³) | $\gamma_{s,moy}$ (g/cm ³) |
|--------------|------------|--------|--------|--------|--------|---------------------------------|---------------------------------------|
| SOL 1 | 1 | 170,55 | 393,68 | 805 | 670 | 2,532 | 2,603 |
| | 2 | 170,55 | 400,6 | 804 | 660 | 2,673 | |
| SOL 2 | 1 | 170,55 | 381,1 | 780 | 670 | 2,094 | 2,148 |
| | 2 | 170,55 | 399,6 | 785 | 660 | 2,201 | |
| SOL 3 | 1 | 170,55 | 311,68 | 750 | 670 | 2,309 | 2,270 |
| | 2 | 170,55 | 330 | 753 | 665 | 2,232 | |
| SOL 4 | 1 | 170,55 | 319,69 | 755 | 670 | 2,325 | 2,234 |
| | 2 | 170,55 | 320,5 | 753 | 673 | 2,144 | |
| SOL 5 | 1 | 170,55 | 296,1 | 730 | 670 | 1,915 | 2,100 |
| | 2 | 170,55 | 295 | 735 | 665 | 2,286 | |

5.10 Essai de carbonate de calcium CaCO₃

La mesure d'argilosité et le pourcentage de calcaire de l'échantillon utilisé. L'appareil utilisé est le calcimètre figure 5-23, selon la norme NF P 94-048. Le mode Opérateur est :

- Peser 5g de l'échantillon.
- Mettre l'échantillon dans l'appareil calcimètre et ajouter 10ml acide chloridrique.
- noter la lecture et déduire la teneur en carbonates CaCO₃ de l'échantillon.



Figure 5.22-Manipulation de l'essai de calcimétrie.

Le taux de calcaire total est déterminé par la méthode du calcimètre de Bernard.

Le principe de dosage est fondé sur la réaction caractéristique suivante:



C'est la mesure de CO₂ dégagé suite à l'action d'un excès d'acide Chlorhydrique sur un point connu de l'échantillon. Le volume de CO₂ dégagé est proportionnel à la quantité de carbonate de calcium existante dans l'échantillon analysé.

Exemple de calcul pour sol 5 :

Pour 100 g de CaCO₃ on a un déplacement de 22400 ml de HCl,

$$\begin{array}{ccc} 100 \text{ g} & \xrightarrow{\hspace{10em}} & 22400 \text{ ml} \\ x & \xrightarrow{\hspace{10em}} & 65 \text{ ml} \end{array}$$

$$x(\text{g}) = \frac{65 \times 100}{22400} = 0.29 \text{ g de CaCO}_3.$$

Pourcentage du CaCO₃.

$$0.29 \text{ g} \xrightarrow{\hspace{10em}} 5 \text{ g (Masse d'échantillon)}$$

$$y \xrightarrow{\hspace{10em}} 100 \text{ g (Pour 100 g)}$$

$$y(\%) = \frac{0.29 \times 100}{5} = 5.80 \% \text{ de CaCO}_3$$

La classification des sols selon la teneur en carbonate de calcium est résumée sur le tableau 5-21 :

Tableau 5.21-Classification selon la teneur en carbonate de calcium.

| Teneur en CaCO ₃ (%) | Désignation géotechnique | Nature |
|---------------------------------|--------------------------|--------|
| 0-10 | Argile | Sol |
| 10-30 | Argile marneuse | |
| 30-70 | Marne | |
| 70-90 | Calcaire marneux | Roche |
| 90-100 | Calcaire | |

| Echantillon | Déplacement (ml), | Masse CaCO ₃ (g) | Masse du sol (g), | Teneur en CaCO ₃ (%) | Teneur en carbonate de calcium. | Désignation géotechnique |
|--------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| SOL 1 | 73 | 0,33 | 5 | 6,52% | 0-10 | Argile |
| SOL 2 | 81 | 0,36 | 5 | 7,23% | 0-10 | Argile |
| SOL 3 | 46 | 0,21 | 5 | 4,11% | 0-10 | Argile |
| SOL 4 | 55 | 0,25 | 5 | 4,91% | 0-10 | Argile |
| SOL 5 | 65 | 0,29 | 5 | 5,80% | 0-10 | Argile |

5.11 Teneur en matières organiques (MO%)

La présence des matières organiques 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:

5.11.1 La méthode Chimique

L'essai consiste à déterminer, par un procédé chimique, la teneur en carbonate d'un échantillon de sédiment brut du barrage. Elle consiste à prendre une prise de l'échantillon préparé et mélangée à une solution oxydante de caractéristique et de quantité connues, une fois l'oxydation réalisée, il est procédé au dosage de la quantité de produit à 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).

La classification des sols selon MO. Dans le tableau 5-22

Tableau 5.22-Classification des sols selon MO.

| TENEUR EN MO | INTERPRETATION | |
|------------------|--|---|
| MO < 14 ‰ | Sol très pauvre en matière organique | |
| 14 ‰ ≤ MO < 20 ‰ | Sol pauvre en matière organique | |
| 20 ‰ ≤ MO < 30 ‰ | Argile < 22% | Sol bien pourvu en matière organique |
| | 22% < ARG. < 30% (Ou teneur en argile inconnue) | Sol moyennement pourvu en matière organique |
| | Argile > 30% | Sol pauvre en matière organique |
| 30 ‰ ≤ MO < 40 ‰ | Sol bien pourvu en matière organique | |
| MO ≥ 40 ‰ | Teneur élevée en matière organique | |

(Source : programme d'interprétation LANO/CA de Basse Normandie)

| Echantillon | Masse ech (Kg) | Solution oxydante (Kg) | Total (Kg) | H2O2 (Kg) | Matière organique | |
|--------------|----------------|------------------------|------------|-----------|-------------------|-------------|
| | | | | | Poids(KG) | Pourcentage |
| SOL 1 | 0,0586 | 0,01 | 0,0686 | 0,0685 | 0,0001 | 0,15% |
| SOL 2 | 0,0665 | 0,01 | 0,0765 | 0,0763 | 0,0002 | 0,26% |
| SOL 3 | 0,0795 | 0,01 | 0,0895 | 0,0892 | 0,0003 | 0,34% |
| SOL 4 | 0,0715 | 0,01 | 0,0815 | 0,0814 | 0,0001 | 0,12% |
| SOL 5 | 0,079 | 0,01 | 0,0890 | 0,0889 | 0,0001 | 0,11% |

Résultat : Tous les sols sont très pauvre en matière organique.

5.12 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 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. La suspension obtenue est laissée au repos pendant 2h et le pH est mesuré avec un pH-mètre figure 5-24. On obtient les résultats du pH comme suit : Présente un caractère nettement basique

| Echantillon | Ph | Comportement |
|--------------|------|---|
| SOL 1 | 8,39 | Présente un caractère nettement basique |
| SOL 2 | 9 | Présente un caractère nettement basique |
| SOL 3 | 9,06 | Présente un caractère nettement basique |
| SOL 4 | 9,32 | Présente un caractère nettement basique |
| SOL 5 | 9,26 | Présente un caractère nettement basique |



Figure 5.23-Mesure de l'acidité de sédiment de drague par un appareil de pH-mètre

5.13 Essais Proctor

Des essais de compactage Proctor ont été réalisés selon la norme NF P 94-093, ceci pour déterminer les caractéristiques à l'optimum Proctor Normal (OPN) et modifié (OPM). L'analyse des résultats des essais Proctor donne ce qui suit :

À l'Optimum du Proctor Modifié, le poids volumique sec maximal est nettement supérieur à celui de l'Optimum Proctor Normal, cette augmentation est estimée à %).

La teneur en eau optimale se décale vers le côté sec en augmentant l'énergie de compactage. Elle passe de 15% à l'OPN à 12% pour l'OPM.

5.13.1 Résultats des essais Proctor

Les résultats du compactage dynamique sont résumés dans le tableau. Ci-dessus ; Selon le moule et la dame de compactage utilisé, on peut effectuer deux types de compactage : essai Proctor normale Selon NF P 94 093 et essai Proctor modifié, figure 5-25. L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et densité sèche après compactage. L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau, on trace cette courbe qui a pour objectif la détermination de la teneur en eau optimale qui donnera la masse volumique sèche maximale du sol après son compactage. L'essai de compactage le plus utilisé est l'essai Proctor.

Lorsque le matériau est destiné à être utilisé en couches d'assises de chaussées, on adopte la version dite « Proctor modifié » pour laquelle l'énergie de compactage est plus importante. Le compactage dans ce cas s'effectue en trois couches successives avec « la dame Proctor modifié ». tableau 5-23.

Le choix de l'intensité de compactage est fait en fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie :

_ Essai Proctor normal : Résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé,

_ Essai Proctor modifié : Forte résistance souhaitée, du type chaussé autoroutière.

Tableau 5-23-Conditions des essais Proctor normal et modifié.

| Norme | Masse de marteau (Kg) | Hauteur de chute du marteau (cm) | Volume du moule (cm ³) | Nombre de coups/ couche | Nombre des couches | Energie de compactage (Kj/m ³) |
|----------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------|--|
| Normal (NF P94-093) | 2.49 | 30.50 | 944 | 25(moule Proctor) | 3 | 592 |
| | | | 2124 | 56(moule CBR) | | 589 |
| Modifié (NF P94-093) | 4.54 | 45.70 | 944 | 25(moule Proctor) | 5 | 2695 |
| | | | 2124 | 56(moule CBR) | | 2683 |

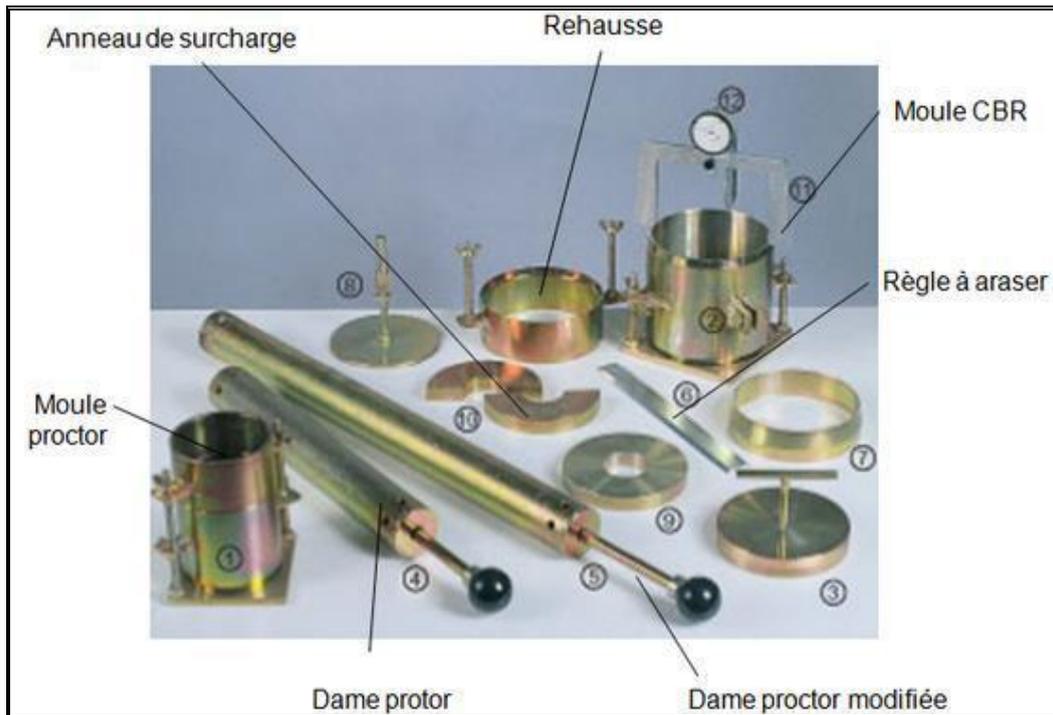


Figure 4.1: Appareillage pour essais de Proctor.



Figure 5.24-Etapes de l'essai Proctor

Les résultats des densités sèches maximales et des teneurs en eau correspondantes sont présentés au tableau 5-24 et à la figure 5-26.

Tableau 5.24-Résultats essai Proctor normal et modifié Sol 1.

| PROCTOR SOL 1 | | | |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Essai Proctor normal | | Essai Proctor modifié | |
| ω % | γ_d (g/cm ³) | ω % | γ_d (g/cm ³) |
| 11,3 | 1.4 | 11,25 | 1.5 |
| 12,80 | 1,42 | 13,82 | 1,67 |
| 14,30 | 1,47 | 15,65 | 1,71 |
| 15,50 | 1,50 | 17,91 | 1,62 |
| 18,32 | 1,49 | 20,38 | 1,55 |

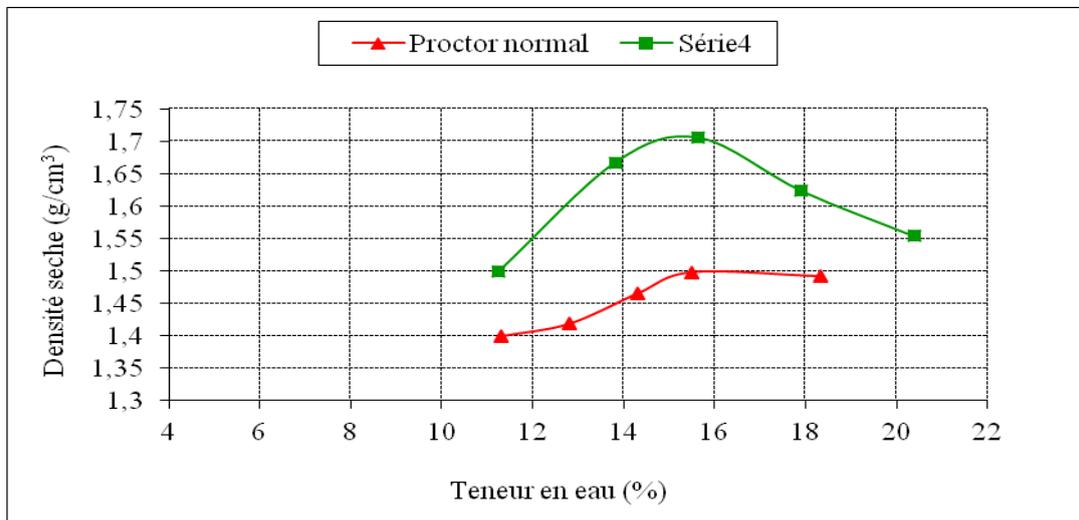


Figure 5.25-Diagramme des essais Proctor normal et modifié Sol 1.

Tableau 5.25-Résultats essai Proctor normal et modifié Sol 2.

| PROCTOR SOL 2 | | | |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Essai Proctor normal | | Essai Proctor modifié | |
| ω % | γ_d (g/cm ³) | ω % | γ_d (g/cm ³) |
| 8,3 | 1.43 | 9,45 | 1.75 |
| 11,20 | 1,55 | 11,45 | 1,81 |
| 13,40 | 1,56 | 14,02 | 1,84 |
| 14,96 | 1,53 | 15,96 | 1,70 |
| 16,90 | 1,47 | 17,96 | 1,60 |

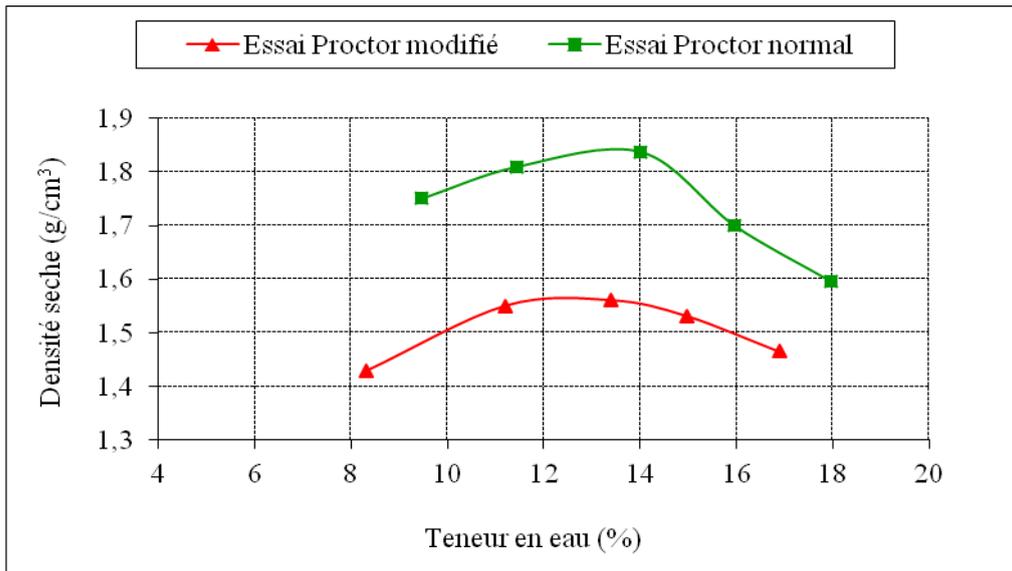


Figure 5.26-Diagramme des essais Proctor normal et modifié Sol 2.

Tableau 5.26-Résultats essai Proctor normal et modifié Sol 3.

| PROCTOR SOL 3 | | | |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Essai Proctor normal | | Essai Proctor modifié | |
| ω % | γ_d (g/cm ³) | ω % | γ_d (g/cm ³) |
| 8,5 | 1,45 | 10 | 1,65 |
| 10,80 | 1,49 | 11,90 | 1,76 |
| 13,40 | 1,52 | 14,34 | 1,79 |
| 15,60 | 1,47 | 16,07 | 1,66 |
| 16,48 | 1,43 | 17,57 | 1,60 |

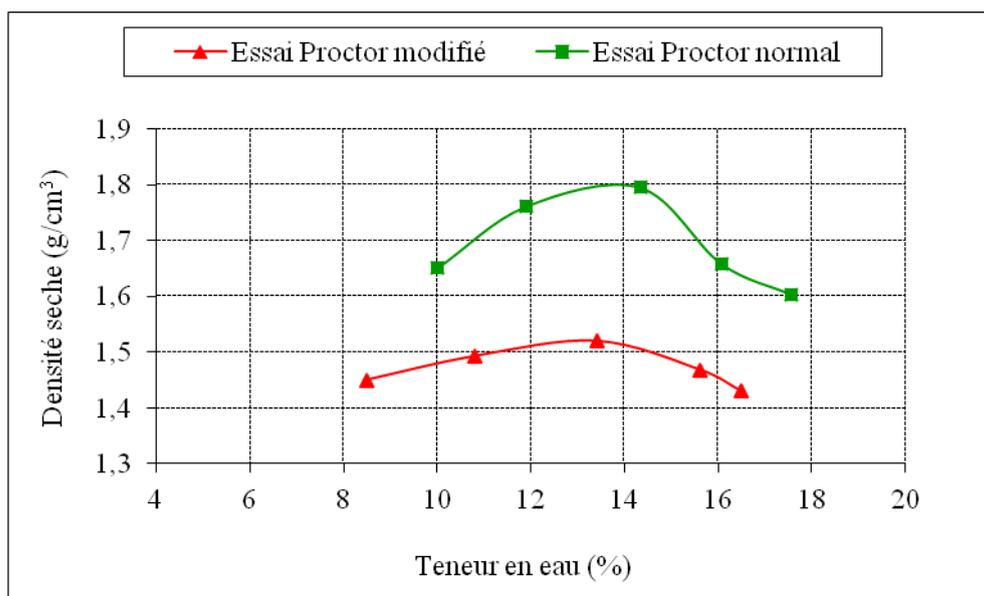


Figure 5.27-Diagramme des essais Proctor normal et modifié Sol 13.

Tableau 5.27-Résultats essai Proctor normal et modifié Sol 4.

| PROCTOR SOL 4 | | | |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Essai Proctor normal | | Essai Proctor modifié | |
| ω % | γ_d (g/cm ³) | ω % | γ_d (g/cm ³) |
| 10,50 | 1,51 | 12,16 | 1,76 |
| 11,20 | 1,55 | 14,23 | 1,81 |
| 14,50 | 1,64 | 16,97 | 1,75 |
| 16,30 | 1,63 | 18,07 | 1,70 |
| 17,70 | 1,53 | 19,60 | 1,63 |

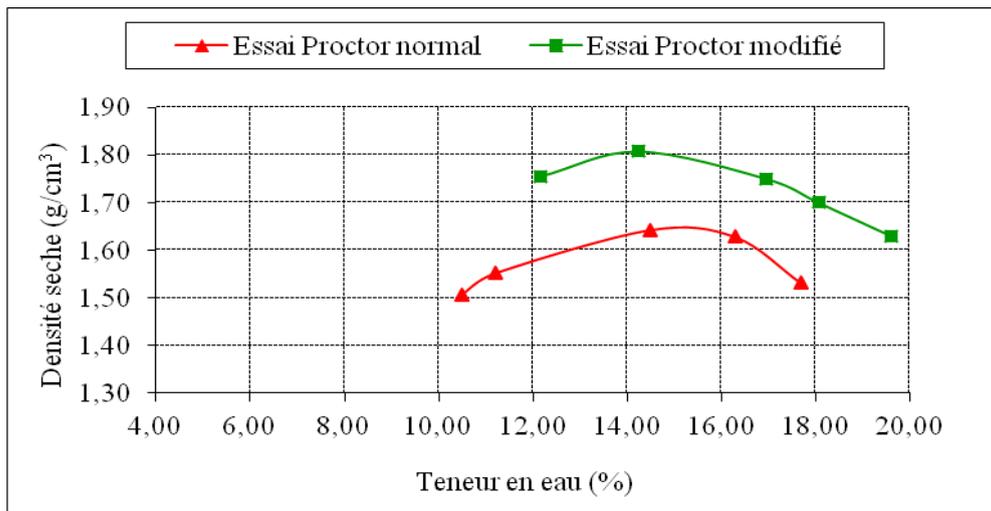


Figure 5.28-Diagramme des essais Proctor normal et modifié Sol 4.

Tableau 5.28-Résultats essai Proctor normal et modifié Sol 5.

| PROCTOR SOL 5 | | | |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Essai Proctor normal | | Essai Proctor modifié | |
| ω % | γ_d (g/cm ³) | ω % | γ_d (g/cm ³) |
| 9,15 | 1,35 | 10 | 1,52 |
| 11,17 | 1,41 | 12,00 | 1,58 |
| 12,83 | 1,48 | 14,53 | 1,62 |
| 14,17 | 1,43 | 16,00 | 1,56 |
| 16,00 | 1,39 | 17,00 | 1,50 |

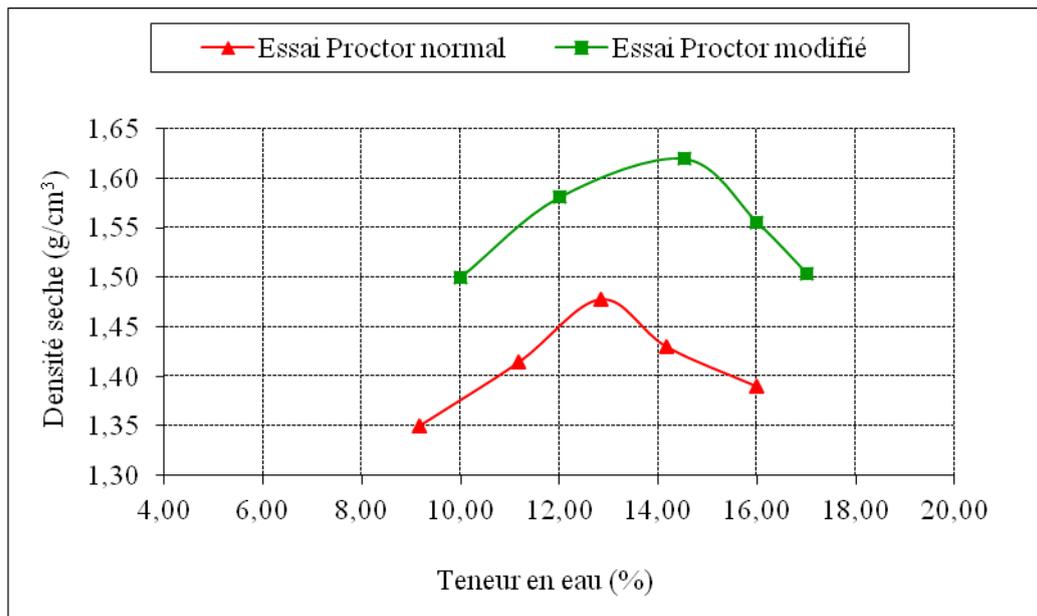


Figure 5.29-Diagramme des essais Proctor normal et modifié Sol 5.

5.13.2-L'essai CBR

L'essai CBR (Californian-Bearing-Ratio) est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers.

Il s'agit de déterminer l'Indice Portant Immédiat, Indice CBR (Californian-Bearing-Ratio) après immersion d'un sol ou d'un matériau granulaire utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées. C'est un essai de poinçonnement à l'aide d'une presse standard (presse CBR) à vitesse constante (1,27 tr/mn) et le diamètre du piston 19,6 cm.

5.13.2.1 Principe de l'essai

Il mesure la résistance à l'effort tranchant d'un sol et le gonflement du sol sous charge. Il nous permet de calculer la portance du sol, en estimant sa résistance au poinçonnement. Il est applicable aux sols fins, ainsi qu'aux sols grenus dont la teneur en éléments de plus de 20mm de dimension maximale ne dépasse pas 25%.

L'essai CBR nous permet de mesurer 2 types d'indices en fonction des buts fixés :

5.13.2.2 L'essai CBR immédiat (IPI)

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

5.13.2.3 L'essai CBR après immersion

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

5.13.3 Mode Opérateur de l'essai CBR immédiat (IPI)

- On prend un échantillon de 5,5 kg, qui doivent être compactés jusqu'à l'obtention des densités compactées variant entre 95% à 100% en général avec 10, 30 et 65 coups, figure 5-31
- Peser de moule vide.
- Ajouter de l'eau pour le premier échantillon (compacté en cinq couches en donnant 56 coups par couche).
- Après compactage, retirer le collier et niveler la surface.
- Prélevez un échantillon pour déterminer la teneur en humidité.
- On mesure le poids de l'échantillon moule compactés.
- Ensuite, placez l'échantillon sous le piston de pénétration et placez la charge.
- Appliquer la charge et notez les valeurs de charge de pénétration.
- Dessiner les graphiques entre la pénétration (en) et la charge de pénétration (en) et de trouver la valeur de CBR (Californian-Bearing-Ratio)



Figure 5.30-Réalisation de l'essai CBR.

Les résultats du pourcentage de manipulation sont présentés au Tableau 5-29.

Tableau 5.29-Les résultats du pourcentage de manipulation.

| Enfoncement (mm) | Charge (KN) | | | | |
|---------------------|-------------|--------|---------|--------|---------|
| | Sol 1 | Sol 2 | Sol 3 | Sol 4 | Sol 5 |
| 1,25 | 1,0416 | 2,6666 | 2,1666 | 3,0624 | 1,3958 |
| 2 | 1,8541 | 3,7916 | 3,7991 | 4,1458 | 3,9791 |
| 2,5 | 2,2916 | 4,1878 | 5,1694 | 4,5833 | 5,1694 |
| 5 | 3,5208 | 5,572 | 8,3898 | 6,0593 | 8,5805 |
| 7,5 | 4,1249 | 6,2288 | 9,894 | 6,8008 | 10,3862 |
| 10 | 4,6249 | 6,4194 | 11,4377 | 6,9279 | 11,6309 |

$$CBR1 = \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (KN)}}{13.35} * 100$$

$$CBR2 = \frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (KN)}}{19.93} * 100$$

$$CBR = \max (CBR1; CBR2) = 40.61 \text{ KN}$$

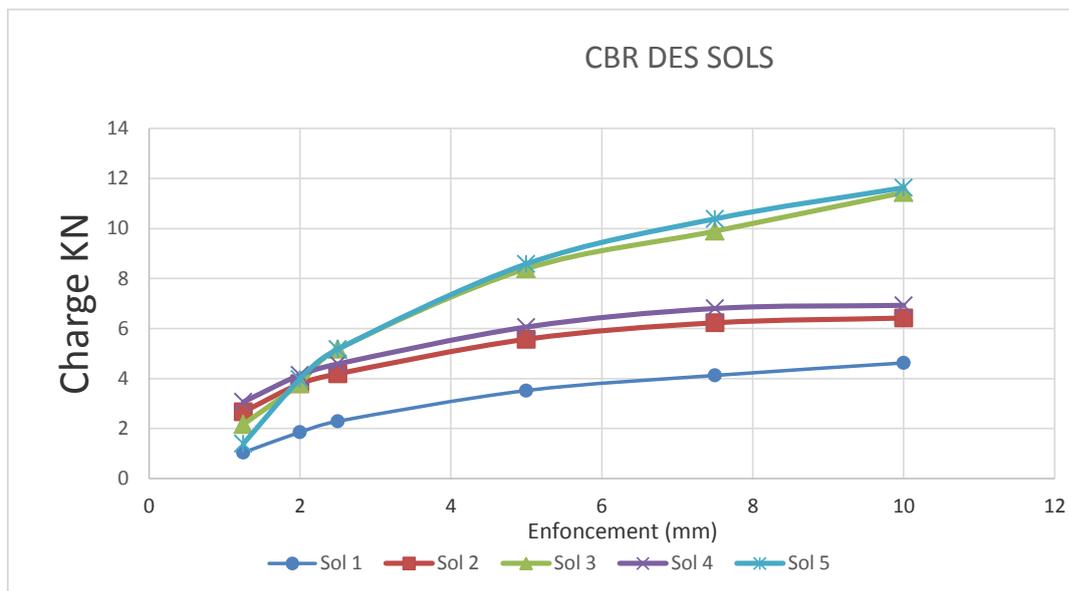


Figure 5.31-Variation des déplacements en fonction l’effort. CBR immédiat

Tableau 5.30-Résultats des l’essai CBR

| Désignation | CBR | | |
|-----------------|-------------|-------|-----------------------|
| | Charge (KN) | | |
| | CBR 1 | CBR2 | CBR= max (CBR1; CBR2) |
| Sol 1 | 17,17 | 17,67 | 17,67 |
| Sol 2 | 31,37 | 27,96 | 31,37 |
| Sol 3 | 38,72 | 42,10 | 42,10 |
| Sol 4 | 34,33 | 30,40 | 34,33 |
| Sol 5 | 38,72 | 43,05 | 43,05 |
| Sol 5 immersion | 2,34 | 2,40 | 2,40 |

5.13.4 Mode Opérateur de l’essai CBR après immersion

– On prend 3 échantillons chacun environ 7 kg doit être compacté jusqu’à ou on obtient la densité compactés varient entre 95% à 100% en général avec 10, 30 et 65 coups.

- Peser de moule vide.
- Ajouter de l'eau pour le premier échantillon (compacter en cinq couches en donnant coups par couche).
- Après compactage, retirer le collier et niveler la surface.
- Prélevez un échantillon pour déterminer la teneur en humidité.
- Mesurer le poids de l'échantillon compacté.
- Placer le moule dans la cuve de trempage pendant quatre jours (ignorer cette étape en cas de non trempé CBR (Californian-Bearing-Ratio)).
- Après quatre jours, mesurer la nouvelle lecture.
- Retirer le moule de la cuve et permettre à l'eau de vidange.
- Placez l'échantillon sous le piston de pénétration et placer la charge.
- Appliquer la charge et notez les valeurs de charge de pénétration.
- Tracer la pénétration en fonction de l'effort appliqué
- calculer la valeur de CBR (Californian-Bearing-Ratio).
- Classification de la portance du sol selon l'indice de CBR Tableau 5-31:

Tableau 5.31-Classification selon l'indice de CBR.

| Classe de portance | Valeur de CBR |
|---------------------------|----------------------|
| Portance très faible | CBR<3 |
| Portance faible | 3<CBR<6 |
| Portance moyenne | 6<CBR<12 |
| Portance élevé | 12<CBR<25 |
| Portance très élevé | CBR>25 |



Figure 5.32 -Manipulation d'essai CBR.

– Dans la présente étude, l'essai est réalisé sur un échantillon de sol dont la quantité est égale à 5500 grammes. Le Tableau 5-32, présente les résultats obtenus.

Tableau 5.32-Résultats de l'essai CBR après immersion.

| | | | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Déplacement (mm) | 1,25 | 2 | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 |
| Enfoncement | 10,05 | 14 | 15 | 23 | 30 | 36 |
| Effort (KN) | 0,2083 | 0,2916 | 0,3124 | 0,4791 | 0,6249 | 0,7499 |

5.13.5 Calcul des valeurs de CBR

La lecture du démarrage = 6,00 cm

La lecture finale = 6,4 cm

Hauteur du moule = 12,7 cm

Calcule de : $\frac{\Delta h}{h} = \frac{6,4-6}{12,7} = 5.93\text{cm}$

$$\text{CBR1} = \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (KN)}}{13.35} * 100$$

$$\text{CBR1} = 2.34 \text{ KN}$$

$$\text{CBR2} = \frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (KN)}}{19.93} * 100$$

$$\text{CBR2} = 3.59 \text{ KN}$$

$$\text{CBR} = \max (\text{CBR1}; \text{CBR2}) = 3.59 \text{ KN}$$

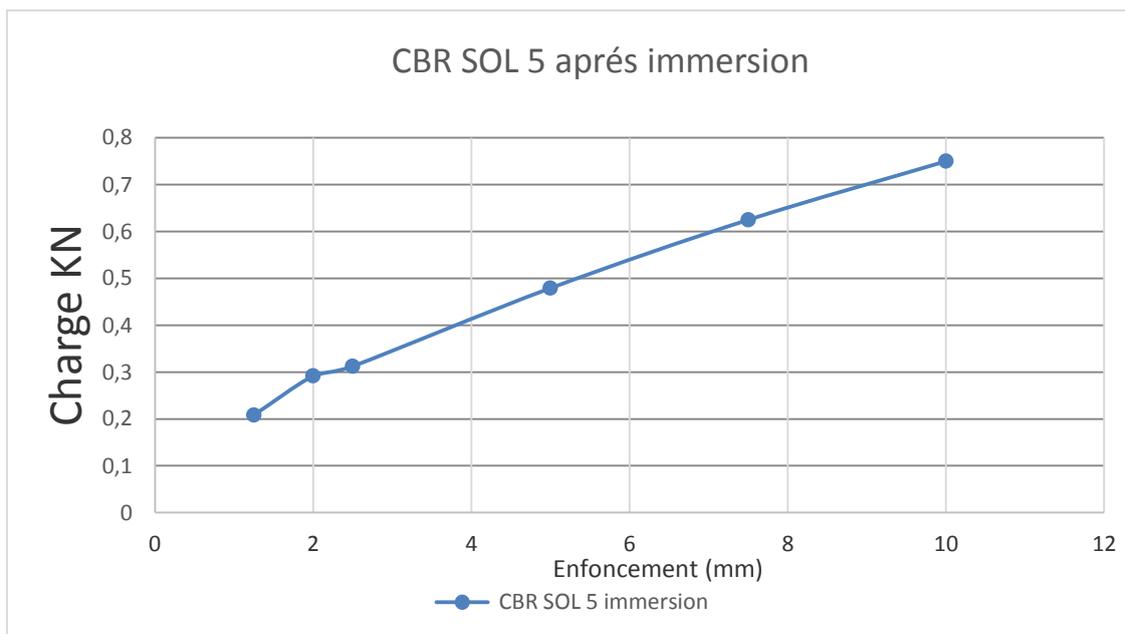


Figure 5.33-Variation des déplacements en fonction l'effort CBR après immersion.

5.13.6-Résultats obtenues et la classification de sol étudié

Tableau 5.33-Classification du sol étudié.

| Essai | L'indice de CBR | Classement |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|
| Sol 1(immédiat) | 17,67 | Portance élevé |
| Sol 2(immédiat) | 31,37 | Portance très élevé |
| Sol 3(immédiat) | 42,10 | Portance très élevé |
| Sol 4(immédiat) | 34,33 | Portance très élevé |
| Sol 5(immédiat) | 43,05 | Portance très élevé |
| CBR sol 5 (après immersion) | ICBR= 2.40 KN | Portance faible |

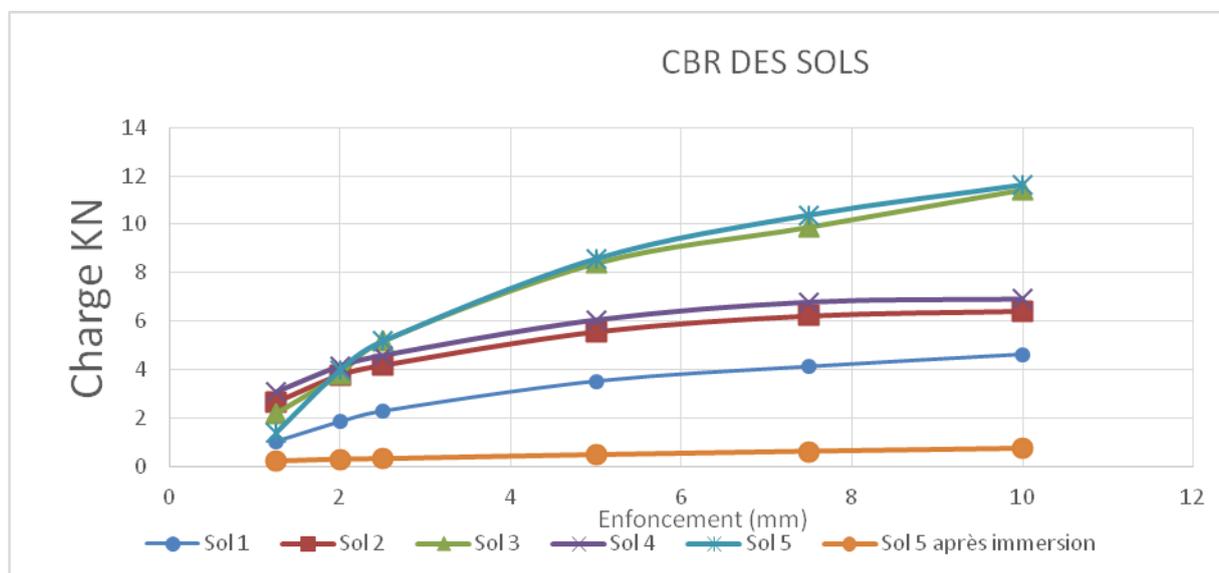


Figure 5.34-La différence entre les deux essais.

5.14 Classification du Sédiment du barrage Ouldjet Mellegue selon le GTR (LCPC-SETRA, 2000)

Les caractéristiques physiques mesurées dans cette étude ont été choisies en fonction du secteur de valorisation envisagé.

Dans notre prochaine étude, on va se basé sur le sol n°5, qui est un sédiment naturel du barrage Ouldjet Mellegue, a cause du suivant :

- Ces caractéristiques physique et mécanique sont les plus favorables.
- C'est le sol le plus disponible au niveau des sédiments existant au barrage.

-C'est le sédiment qui se trouve au fonds de la cuvette du barrage.

-C'est le sédiment qu'on peut l'atteindre par les engins de dragage.

Les résultats obtenus sont assemblés dans le Tableau 5-34

Tableau 5.34-Caractéristiques géotechniques du Sol 5 du barrage Ouldjet Mellegue.

| Désignation | Valeur | Classification |
|---------------------------------|-------------------|--|
| % des fines < 80µm | 1.76 | – |
| Fraction sableuse > 63 µm | 1,637 | – |
| Fraction silteuse 2 µm <Ø< 60µm | 39.65 | – |
| Fraction argileuse < 2µm | 0,561 | – |
| D 10 | 0,23 | – |
| D 30 | 0,7 | – |
| D 50 | 1,50 | sol grenu |
| D 60 | 2 | – |
| D 90 | 4.7 | – |
| Cu | 8.69 | granulométrie semi-étalée |
| Cc | 4.26 | le sol mal gradué |
| WL (%) | 57.43 | Argile très plastique. |
| Wp (%) | 21.32 | – |
| Ip (%) | 13,19 | Sol argileux. |
| WL,Ip | 53.43 et 36.11 | Argile très plastique. |
| Ic | 0.66 | Argile ferme |
| Wn | 33.5 | |
| Ac | 64.36 | Argile très active |
| Sp | 61.28 | Entre Kaolinite et Illite (peu sensible) |
| VBS | 2.93 | Sol limoneux de plasticité moyenne |
| γs (g/cm ³) | 2.10 | – |
| W (caco ₃) (%) | 5.80 | Argile |
| MO (%) | 0.11 | Sol pauvre en matière organique |
| PH (%) | 9.26 | Présente un caractère nettement basique |
| Wopt (%) normal | 14.17 | – |
| Wopt (%) modifié | 18.07 | – |
| CBR immédiat | 64.27 | Portance très élevé |
| CBR après immersion | 3.59 | Portance faible |

Du point de vue granulométrique, les sédiments prélevés du barrage d'Ouldjet Mellegue se classent comme des sols fins sableux, assimilés à la classe B définie par des matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 50 mm et dont la proportion de fine (passant à 80 µm) est inférieure 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 A4h (Figure 5-36).

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.

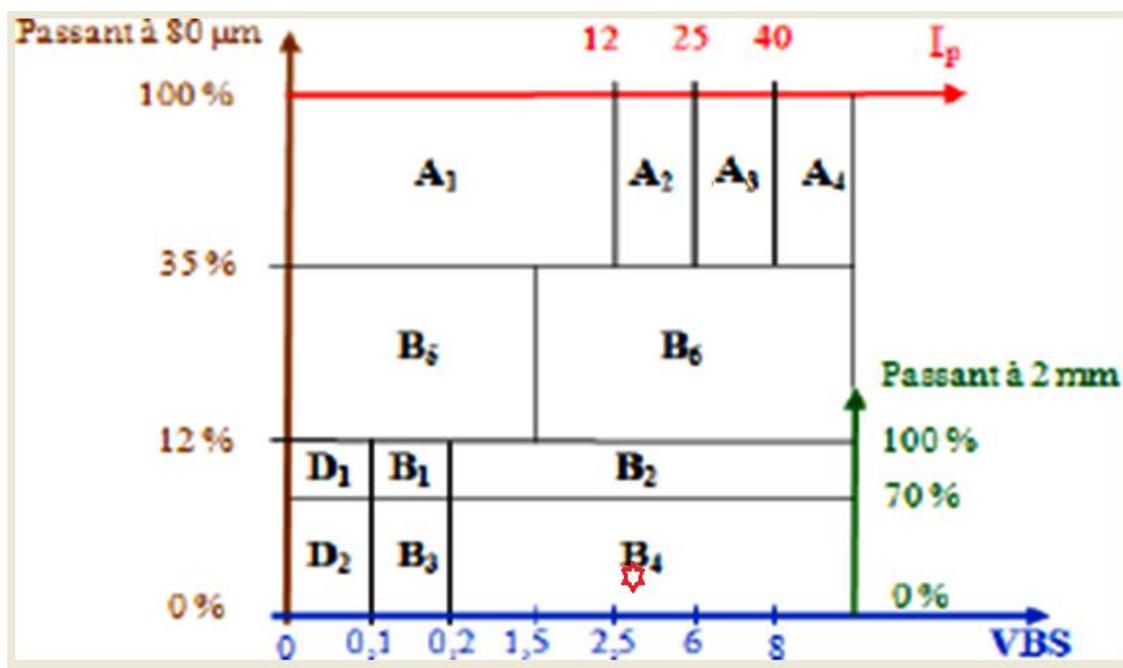


Figure 5-35-Classification du sédiment Sol 5 du barrage Ouldjet Mellegue selon la classification du GTR (LCPC-SETRA, 2000).

Selon la classification de G.T.R.92, présentée à la figure 5-37, Le sol étudié est classé dans la classe B4, donc c'est un sol qui peut être entre les : Sol sableux et graveleux avec fines.

Classe B (suite) Tableau 2 - **Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines**

| CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS | | | | | | | | | |
|--|--|---|---|---|---|---|---|---------------------|--------------------|
| CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME | | | | | | | | | |
| Classement selon la nature | | | | Classement selon l'état hydrique | | Classement selon le comportement | | | |
| Paramètres de nature Premier niveau de classification | Classe | Paramètres de nature Deuxième niveau de classification | Sous classe fonction de la nature | Paramètres d'état | Sous classe fonction de l'état | Paramètres de comportement | sous classe fonction du comportement | | |
| D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm ≤ 35% | B Sols sableux et graveleux avec fines | tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS > 0,2 | B₄ Graves argileuses (peu argileuses)... | IP _I ⁽¹⁾ ≤ 7 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN} | B ₄ th | LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 | B ₄₁ th | | |
| | | | | 7 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 15 ou 1,10 W _{OPN} ≤ W _n < 1,25 W _{OPN} | B ₄ h | LA > 45 et MDE > 45 | B ₄₂ th | | |
| | | | | 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,10 W _{OPN} | B ₄ m | LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 | B ₄₁ h | | |
| | | | | 0,8 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN} | B ₄ s | LA > 45 et MDE > 45 | B ₄₂ h | | |
| | | | | W _n < 0,8 W _{OPN} | B ₄ ts | LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 | B ₄₁ m | | |
| | | | | | B ₄ ts | LA > 45 et MDE > 45 | B ₄₂ m | | |
| | | tamisat à 80 μm compris entre 12 et 35% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS < 1,5 ⁽¹⁾ ou I _p ≤ 12 | B₅ Sables et graves très silteux... | tamisat à 80 μm compris entre 12 et 35% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS < 1,5 ⁽¹⁾ ou I _p ≤ 12 | B₅ Sables et graves très silteux... | IP _I ⁽¹⁾ ≤ 5 ou W _n ≥ 1,25 W _{OPN} | B ₅ th | LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 | B ₅₁ th |
| | | | | | | 5 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 12 ou 1,1 W _{OPN} ≤ W _n < 1,25 W _{OPN} | B ₅ h | LA > 45 et MDE > 45 | B ₅₂ th |
| | | | | | | 12 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 30 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n < 1,10 W _{OPN} | B ₅ m | LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 | B ₅₁ h |
| | | | | | | 0,8 W _{OPN} ≤ W _n < 0,9 W _{OPN} | B ₅ s | LA > 45 et MDE > 45 | B ₅₂ h |
| | | | | | | W _n < 0,8 W _{OPN} | B ₅ ts | LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 | B ₅₁ m |
| | | | | | | | B ₅ ts | LA > 45 et MDE > 45 | B ₅₂ m |
| | | tamisat à 80 μm compris entre 12 et 35% VBS > 1,5 ⁽¹⁾ ou I _p > 12 | B₆ Sables et graves argileux à très argileux | tamisat à 80 μm compris entre 12 et 35% VBS > 1,5 ⁽¹⁾ ou I _p > 12 | B₆ Sables et graves argileux à très argileux | IP _I ⁽¹⁾ ≤ 4 ou W _n ≥ 1,3 W _{OPN} ou I _c ≤ 0,8 | B ₆ th | LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 | B ₆₁ th |
| | | | | | | 4 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 10 ou 0,8 < I _c ≤ 1 ou 1,1 W _{OPN} ≤ W _n < 1,3 W _{OPN} | B ₆ h | | |
| | | | | | | 10 < IP _I ⁽¹⁾ ≤ 25 ou 1 < I _c ≤ 1,2 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W _n ⁽¹⁾ < 1,1 W _{OPN} | B ₆ m | | |
| | | | | | | 0,7 W _{OPN} ≤ W _n ⁽¹⁾ < 0,9 W _{OPN} ou 1,2 < I _c ≤ 1,3 | B ₆ s | | |
| | | W _n ⁽¹⁾ < 0,7 W _{OPN} ou I _c > 1,3 | B ₆ ts | LA > 45 et MDE > 45 | B ₆₂ ts | | | | |

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Figure 5.36-Classement du sol 5 selon G.T.R.92.

5.15 – Conclusion

Les sédiments utilisés dans notre étude sont des vases naturelles. Elles viennent plus précisément du barrage d’Oueldjet Mellegue situé dans la wilaya de Tebessa Est 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 sédiment présente une granulométrie étalée 100 % passant à moins de 200 μm. Les essais physiques ont donné les valeurs cité si dessus ; Ces majorité des analyses ont

été réalisées au laboratoire de mécanique de sol de l'université de sciences et technologie de Tébessa.

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 sableux et graveleux avec fins, note classe B 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 B4, les limites d'Atterberg nous permettent d'identifier le sédiment brut comme la sous classe B4h, 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 B4. Avec la densification et la portance de sédiment de notre site (γ_{dmax} , W_{opm} , IP_{Iopm}) 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 6:
VALORISATION DU SEDIMENT
DU BARRAGE OUELDJET MELLEGUE

Chapitre 6 :

6. -Valorisation du sédiment du barrage Ouldjet Mellegue

6.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédant, 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.

6.2 Méthodologie de traitement des Sédiments du barrage d'Ouldjet Mellegue 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 6.1 résume la méthodologie mise en place et le déroulement global de cette étude.

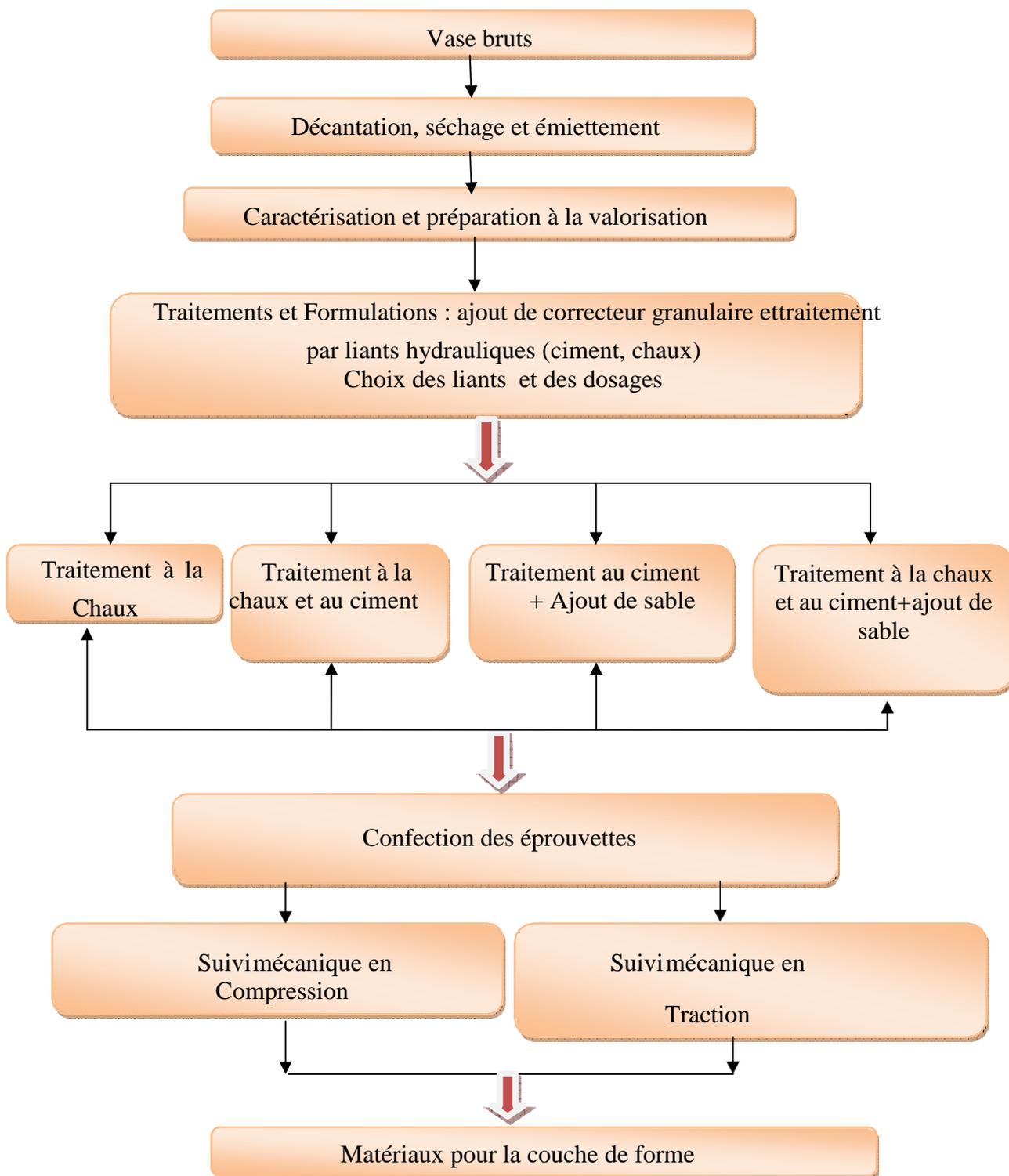


Figure 6.1-Démarche de la valorisation du sédiment en couche de forme

6.3 Préparation de la vase du barrage de Ouldjet Mellegue

La phase de caractérisation des sédiments bruts a montré que dans un premier temps, on permet une décantation naturelle en bac. 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 6-2 représente les différents états du sédiment lors de la préparation.

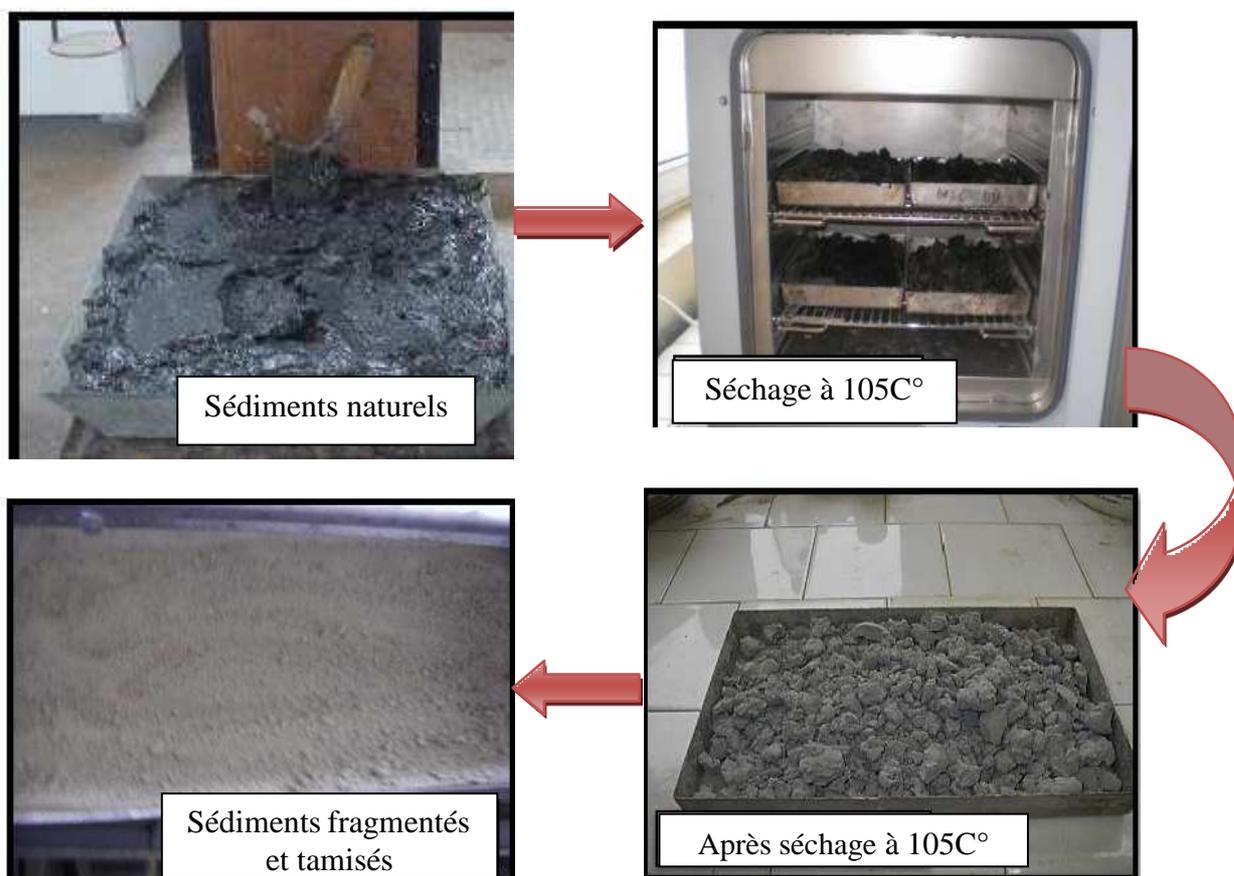


Figure 6.2-Etat des sédiments avant le traitement

6.4 Constitution du squelette de la formulation

Les sédiments étudiés appartiennent à la classe des matériaux sableux-limoneux à faible 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

6.4.1 Sables de dunes comme correcteurs granulaires

L'apport de sables dans les mélanges de sédiments à 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.

On apporte des sables pour en modifier la granularité et améliorer les propriétés mécaniques. On a utilisé un sable de dune de la région d'Oum Ali, situé à la région de Tébessa. Le tableau 6.1 et les figures 6.3, présentent successivement les résultats de l'analyse granulométrique du sable. Ceci permet de déduire : le Coefficient d'uniformité = 3.91 et le Coefficient de courbure = 1.33.

6.4.2 -Granulométries du sable

Tableau 6.1-Granulométries par tamisage du sable.

| Diamètres des Tamis (mm) | Tamisât cumulés en (%) |
|--------------------------|------------------------|
| | Sable de dunes |
| 2 | 100 |
| 1,25 | 96,87 |
| 1 | 94,17 |
| 0,8 | 85,68 |
| 0,63 | 72,94 |
| 0,5 | 48,81 |
| 0,315 | 31,31 |
| 0,2 | 17,83 |
| 0.08 | 1,36 |

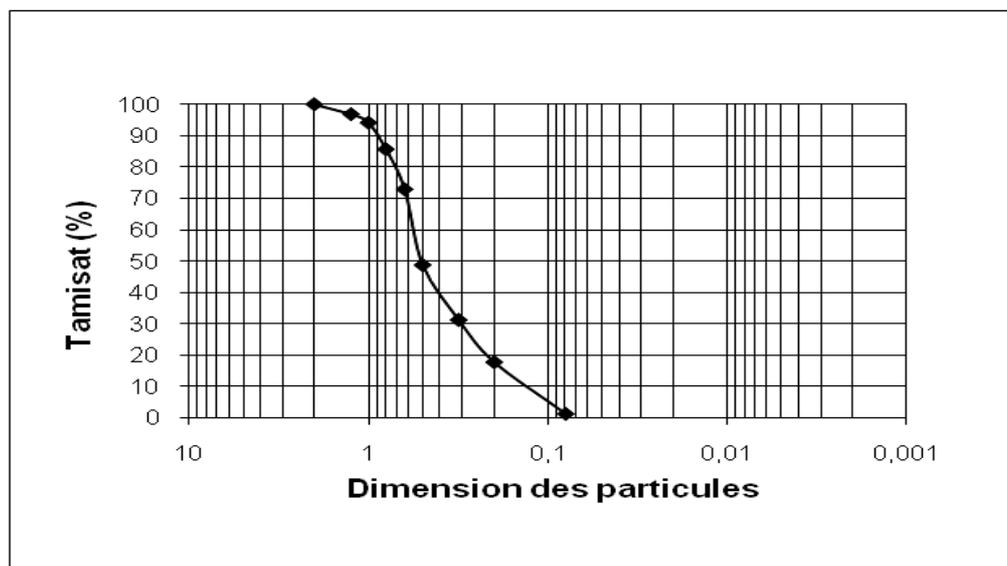


Figure 6.3 -Courbe granulométrique de sable de dunes.

6.4.3 Le Ciment

Le ciment utilisé est un ciment CPJ CEM II/A de classe 42.5 provenant de la cimenterie de TEBESSA (EL-MALABIOD), sa surface spécifique Blaine de 3560 cm²/g. Les caractéristiques physiques du ciment sont mentionnées dans le tableau 6-3, et la composition chimique (% en masse) du ciment est donnée dans le tableau 6-4.

Tableau 6.3-Caractéristiques physique du ciment CPJ 42.5 Tébessa.

| Caractéristiques | Valeurs | Unités |
|-----------------------------|---------|-------------------|
| - Consistance Normale | 27 | % |
| - Début de prise | 150 | min |
| - Fin de prise | 270 | min |
| - Expansion A chaud | 1.1 | % |
| - masse volumique absolue | 3.1 | g/cm ³ |
| - masse volumique apparente | 1 | g/cm ³ |
| - Refus au tamis 45μ | 18 | % |
| - Retrait sur mortier μm/m | ≤ 1000 | μm/m |

Tableau 6.4-Analyse chimiques du ciment CPJ 42,5 (L.T.P.O).

| | |
|------------------|-------|
| SIO2 % | 25.5 |
| CAO % | 58 |
| MGO % | 1.35 |
| FE2O3 % | 3.00 |
| AL2O3 % | 6.25 |
| SO3 % | 2.44 |
| C3S % | 63.07 |
| C2S % | 9.92 |
| C3A % | 9.2 |
| C4AF% | 8.23 |
| K2O | 0.45 |
| Na2O | 0.12 |
| RI | 4.6 |
| CaO libre | 1.12 |
| CI | 0.01 |

6.4.4 La chaux

La chaux utilisée dans notre étude est de la chaux vive 0/2mm, qui provient de l'unité four à chaux d'EIKhroub (Cevital) ; Cette propose des produits de qualité optimale certifiés EINECS 215-137-3 pour une utilisation avec plus de réussite et sérénité dans différents domaines d'utilisation à savoir L'industrie sucrière, sidérurgie, agriculture, stabilisation des sols. La composition chimique de la chaux vive, selon la fiche technique élaborée par l'unité de production, est présentée dans le tableau 6-3, et les caractéristiques physique sont résumés dans le tableau 6.4

Tableau 6.2-La composition chimique de la chaux.

| Oxides | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | MgO | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O |
|-------------|------------------|-------|--------------------------------|------|--------------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Teneurs (%) | 1.35 | 82.77 | 10.63 | 1.83 | 3.27 | 0.11 | 0.151 | 0.064 |

Tableau 6.3 -Caractéristiques physiques de la chaux..

| | |
|-------------------|--------------------------|
| granulométrie | Morceau de 40 → 70mm |
| | Poudre 86.72% < 2mm |
| Densité apparente | 1.31 g/cm ³ |
| Poids moléculaire | 56.08 g/ mole |
| Etat physique | solide |
| Aspect | Blanche ou beige inodore |

Tableau 6.4-Caractéristiques chimiques.

| | |
|------------------------------|----------------------|
| Nom chimique : | Oxyde de calcium CaO |
| % CaO Total | 98.31% |
| % CaO Actif | ≥ 88.68 % |
| Réactivité t60 | < 2 minutes |
| Ph (solution saturé à 20 °C) | 12.3 |

- **Méthode de production** : La chaux vive résulte de la cuisson à environ 1100 -1200° C de pierres calcaires

- **Condition de stockage** : Garder les contenants bien fermés dans un endroit frais sec et bien aéré à l'abri des acides.

6.4.4.1 –Utilisation de la chaux

- Fabrication de produits chimiques et pharmaceutiques
- Assainissement de l'environnement
- Traitement des eaux
- Industrie papetière
- Fabrication de peintures, vernis, encres et mastics, plâtre,
- Verre et céramique Additifs pour produits alimentaires
- Fabrication de produits alimentaires
- Exploitation minière, (y compris les industries offshore)
- Fabrication d'autres produits minéraux non métalliques, p. ex. plâtre, ciment
- Bâtiment et travaux de construction

6.5 Les formulations proposées

En vue d'étudier l'apport de chaque constituant sur le comportement mécanique du sédiment d'Ouldjet Mellegue, dix types de formulations ont été prises des combinaisons d'essais (Tableau 6-6).

Tableau 6.5-Formulation étudiés.

| N° | Code | Sédiments [%] | Sable [%] | Chaux (0/2mm) [%] | Ciment 42,5CPJ CEMII/A [%] |
|----|------|---------------|-----------|-------------------|----------------------------|
| 1 | F1 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | F2 | 95 | 0 | 5 | 0 |
| 3 | F3 | 95 | 0 | 0 | 5 |
| 4 | F4 | 85 | 10 | 5 | 0 |
| 5 | F5 | 80 | 15 | 5 | 0 |
| 6 | F6 | 75 | 20 | 5 | 0 |
| 7 | F7 | 85 | 10 | 0 | 5 |
| 8 | F8 | 80 | 15 | 0 | 5 |
| 9 | F9 | 75 | 20 | 0 | 5 |
| 10 | F10 | 80 | 15 | 2.5 | 2.5 |

6.6 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.

6.7 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, un type d'éprouvettes cylindriques est utilisée pour réaliser ces essais :

L'essai de la résistance à la compression et l'essai de traction fendage (essai brésilien) R_{tb} , R_t avec des éprouvettes cylindriques « 10 x 16.5 » ($d = 10$ cm ; $h = 16.8$ cm), qui sont fabriquées avec une teneur en eau Proctor W_{OPN} . Confectionnées par un compactage vibro-compression suivant la norme (NF P94-093) ; Le moule utilisé est celui conçu pour la confection d'éprouvettes cylindriques 10 x16.8 dans les études en laboratoire (Photo 6.4), le dispositif de l'essai se compose :

1) Moule Proctor avec embase et hausse d'un cylindre de 10 m de diamètre et de 16.8 cm de hauteur,

- 2) Dame Proctor normal
- 3) Une balance sensible
- 4) Une règle à araser.

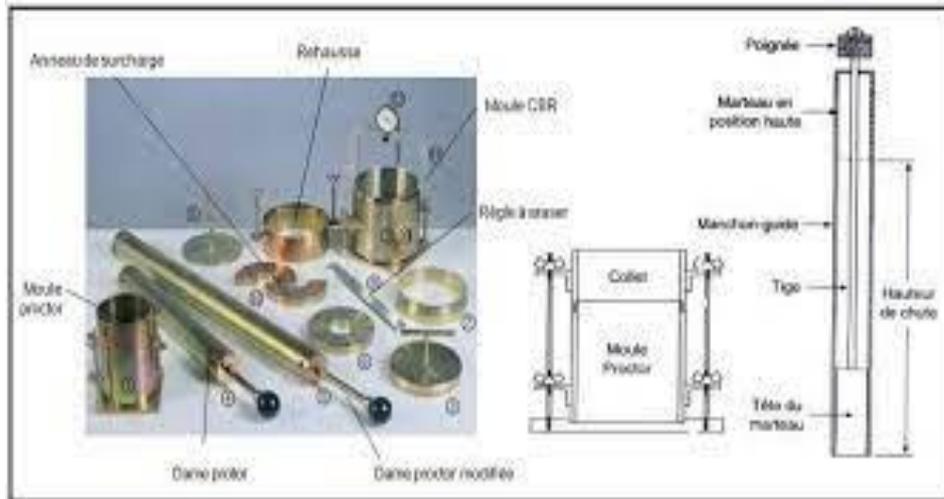


Figure 6.4 -Illustration de la confection des éprouvettes.

Pour le démoulage des éprouvettes, on utilise un extracteur hydraulique



Figure 6.5-Matériel de l'essai Proctor Normale.

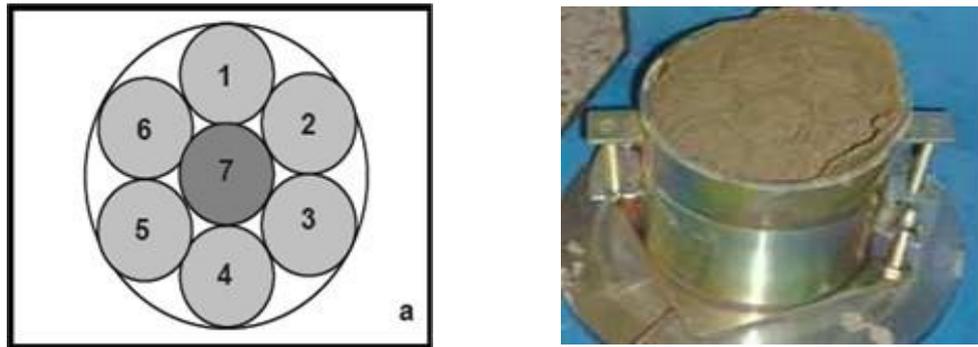


Figure 6.6- a) Protocole de compactage b) Aspect du moule à la fin de l'essai.

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

Pour chaque temps 7, 14, 21 et 28 jours, nous avons confectionné 20 éprouvettes, dont la répartition en fonction des essais est précisée tableau 6-7. Au total, ce sont donc $4 \times 20 = 80$ éprouvettes qui ont été fabriquées pour l'ensemble de ce travail expérimental.

Tableau 6.6-Répartition des éprouvettes en fonction des essais et formulation

| Essai réalisé | Résistance à la compression (Rc) | Résistance au fendage (Rtb) | Module de Young |
|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Formulations | 10 Formulation | 10 Formulation | 10 Formulation |
| Type d'éprouvette | 10 x 16,8 (cm) | 10 x 16,8 (cm) | 11 x 16,8 (cm) |
| Nombre d'éprouvettes | 10 par âge (7, 14, 21 et 28 jours) | 10 par âge (7, 14, 21 et 28 jours) | 20 par âge (7, 14, 21 et 28 jours) |
| Nombre totale d'éprouvettes | 40 Unité | 40 Unité | 80 éprouvettes |

6.9 Essai de compression

6.9.1 Poids des éprouvettes

Tableau 6.7-Poids des éprouvettes (essais de compression)

| Poids Eprouvettes (g) | | | | |
|-----------------------|---------|----------|----------|----------|
| Formulation | 7 Jours | 14 Jours | 21 Jours | 28 Jours |
| F1 | 2 135 | 2 110 | 2 140 | 2 065 |
| F2 | 2 060 | 2 055 | 2 030 | 2 065 |
| F3 | 2 095 | 2 090 | 2 105 | 2 085 |
| F4 | 2 140 | 2 130 | 2 105 | 2 140 |
| F5 | 2 150 | 2 160 | 2 185 | 2 280 |
| F6 | 2 185 | 2 160 | 2 190 | 2 215 |
| F7 | 2 430 | 2 365 | 2 410 | 2 445 |
| F8 | 2 430 | 2 365 | 2 435 | 2 475 |
| F9 | 2 465 | 2 435 | 2 450 | 2 545 |
| F10 | 2 080 | 2 210 | 2 265 | 2265 |

6.9.2 Mesure du module d'Young d'un matériau poreux par ultrasons

Dans un solide, la vitesse des ondes mécaniques est dépendante de la masse volumique γ et des constantes d'élasticité. Des ondes tant longitudinales que transverses peuvent se propager dont les vitesses sont données par :

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad , \quad V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

Où :

V_L : la vitesse ultrasonique longitudinale ;

V_T : la vitesse ultrasonique transversale ;

E : le module de Young ;

μ : le coefficient de Poisson du matériau.

6.9.2.1 Mesure des vitesses longitudinales

Les mesures sont effectuées à l'oscilloscope. Les graduations visuelles n'étant que peu précise sur cette appareil, nous allons superposer un signal carré de fréquence connue sur les signales d'échos. On pourra ainsi remonté à une valeur précise des temps inter-échos.

6.9.2.2 Mesure des vitesses transversales

On utilise un premier transducteur transverse et un deuxième transducteur incliné à 90° de façon à ce que l'onde transmise longitudinale se propage en surface du matériau. Ce transducteur étant calibré seulement sur l'acier, ce type de mesure ne s'effectuera que sur l'acier. Cependant on l'utilise sur un demi-disque de cuivre, nous permettant ainsi de déterminer le diamètre du disque. Pour cela, on cherche sur l'oscilloscope le maximum d'intensité en déplaçant le transducteur. En cette position, le transducteur est au centre de l'échantillon, on mesure ainsi le temps correspondant au diamètre de l'échantillon (2fois le rayon – aller et retour de l'onde).

6.9.3 -Essai ultrasonique longitudinale

Les essais d'ultrasonique longitudinale sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de 10 cm de diamètre et de 16.8 cm de longueur, fabriquées avec une teneur en eau Proctor WOPN, confectionnées à et compactées statiquement à l'aide d'une dame de compactage suivant la norme (NF P94-093) (figure 6-9). Les résultats sont présentés au tableau 6-9 :

Tableau 6.8-Vitesse ultrasoniques longitudinales (essai compression).

| Vitesse des ultrasoniques longitudinales (m/s) | | | | |
|---|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Temps | 7 Jours | 14 Jours | 21 Jours | 28 Jours |
| F1 | 883 | 446 | 350 | 284 |
| F2 | 1 215 | 828 | 780 | 665 |
| F3 | 1 851 | 1 440 | 1 227 | 1 208 |
| F4 | 1 402 | 924 | 850 | 779 |
| F5 | 1 758 | 1 192 | 1 049 | 1 029 |
| F6 | 1 605 | 1 128 | 967 | 923 |
| F7 | 2 000 | 1 782 | 1 690 | 1 535 |
| F8 | 2 235 | 1 890 | 1 800 | 1 700 |
| F9 | 1 956 | 1 510 | 1 423 | 1 214 |
| F10 | 1 905 | 1 459 | 1 321 | 1 220 |

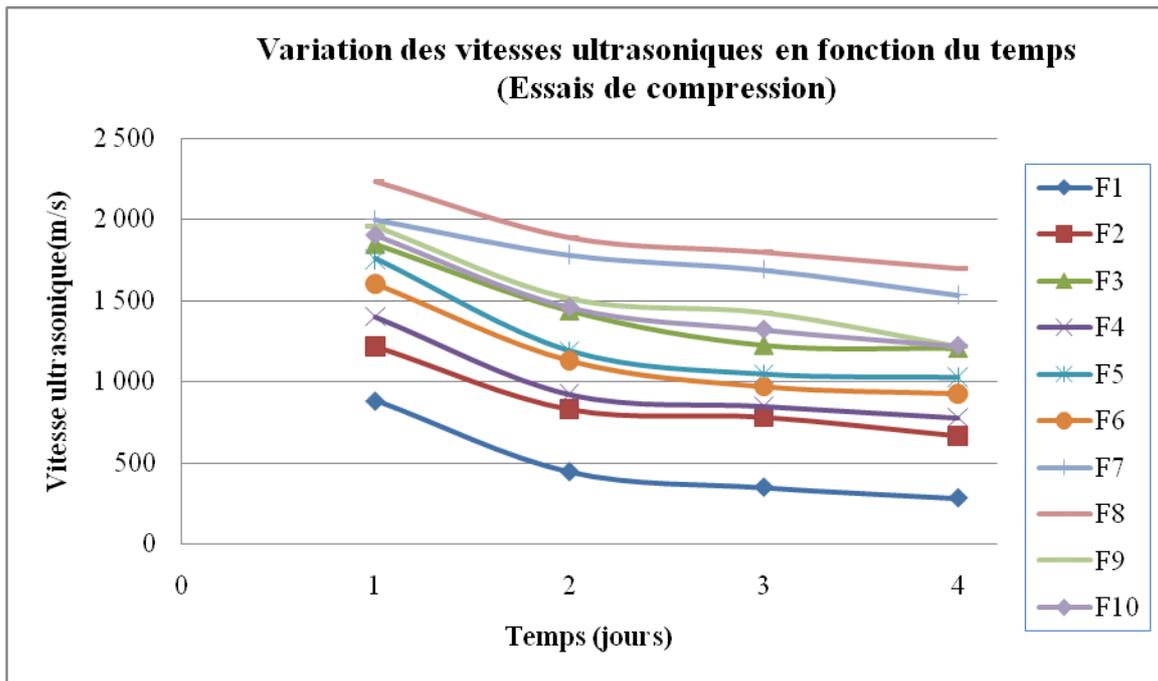


Figure 6.7-Vitesse ultrasoniques longitudinales (essai compression).

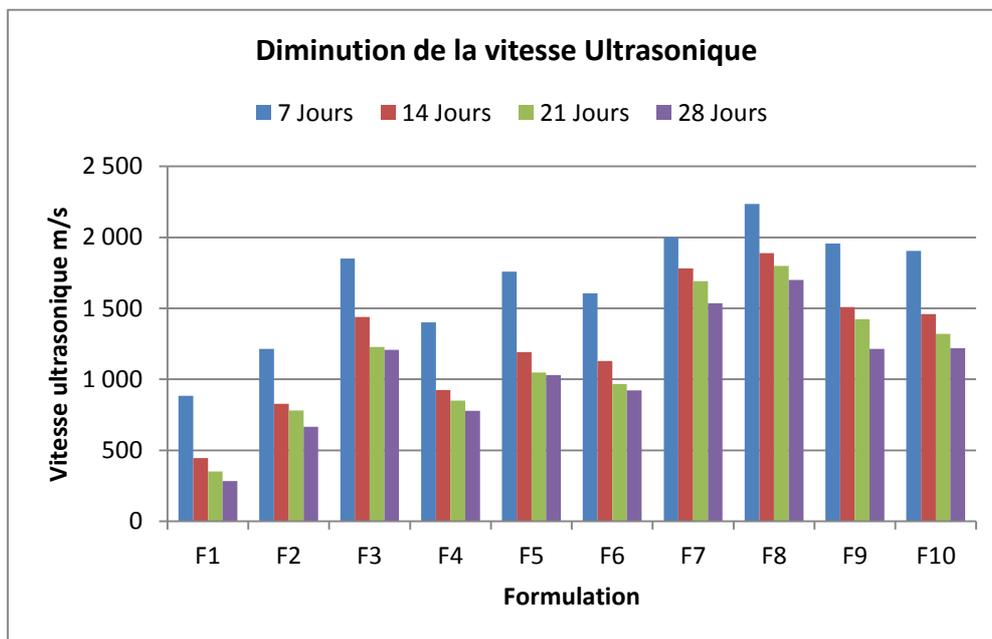


Figure 6.8-Diminution de la vitesse ultrasonique en fonction du temps

6.9.3.1 Le but de l'essai

La détermination de la vitesse des ultrasoniques a pour but de déterminer le module de Young comme suit :

$$E = \frac{V^2 \cdot \gamma \cdot 10^{-3} \cdot (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{g(1 - \mu)}$$

Avec : $V = \frac{d}{t}$

Et : $\gamma = \frac{P}{v} \cdot 10$

D'où :

E : Module de Young en MPa.

γ : Poids volumique (kN/m³)

V : vitesse (m/s)

μ : Coefficient de Poisson

g : Pesanteur g (m/s²)

d : distance entre sondes (mm)

t : temps de transit (microsecondes)

P : poids (g)

v : volume (cm³)

6.9.4 Module de Young

Tableau 6.9- Module de Young des éprouvettes (essai de compression).

| Module de Young (N/mm ²) | | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Formulation | 7 Jours | 14 Jours | 21 Jours | 28 Jours |
| F1 | 955,82 | 241,00 | 150,52 | 95,63 |
| F2 | 1 746,13 | 808,97 | 709,16 | 524,35 |
| F3 | 4 121,49 | 2 488,45 | 1 819,69 | 1 747,02 |
| F4 | 2 415,28 | 1 044,19 | 873,27 | 745,67 |
| F5 | 3 815,34 | 1 762,23 | 1 380,57 | 1 386,19 |
| F6 | 3 231,91 | 1 578,08 | 1 175,86 | 1 083,51 |
| F7 | 5 581,15 | 4 312,25 | 3 952,28 | 3 307,90 |
| F8 | 6 969,77 | 4 850,79 | 4 530,03 | 4 107,05 |
| F9 | 5 415,17 | 3 187,94 | 2 848,61 | 2 153,69 |
| F10 | 4 334,22 | 2 701,22 | 2 269,51 | 1 935,73 |

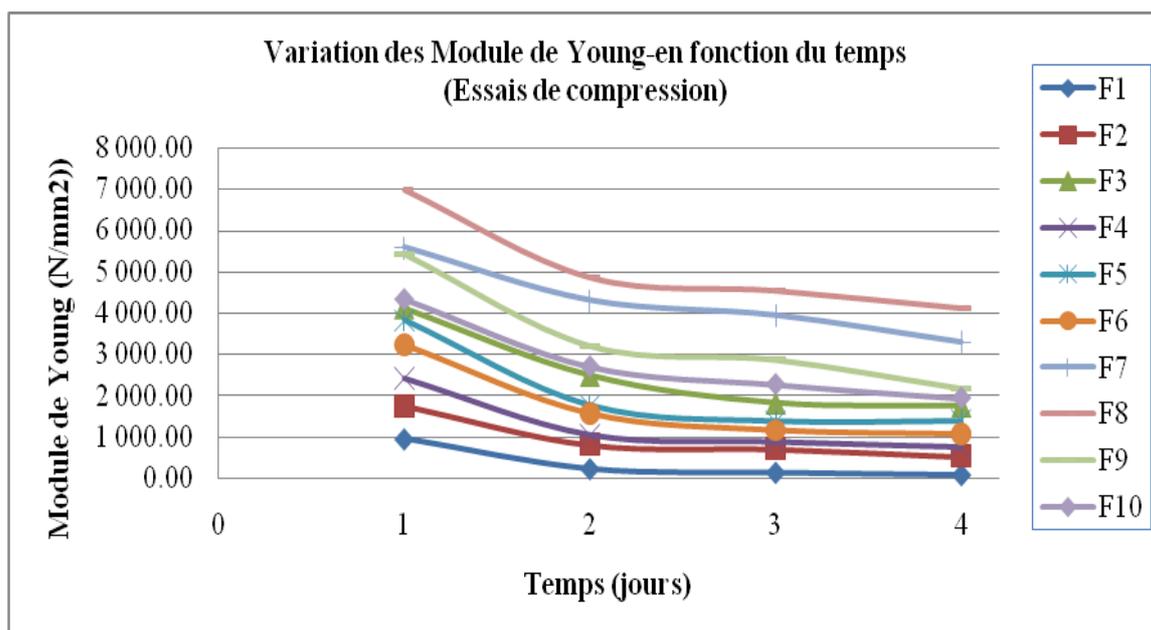


Figure 6.9-variation du module de Young en fonction du temps

6.10 -Essai de fendage

6.10.1-Poids des éprouvettes

Tableau 6.10-Poids des éprouvettes (essais de fendage).

| Poids Eprouvettes (g) | | | | |
|------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Formulation | 7 Jours | 14 Jours | 21 Jours | 28 Jours |
| F1 | 2 080 | 2 030 | 2100 | 2102 |
| F2 | 2 125 | 2 055 | 2120 | 2103 |
| F3 | 2 100 | 2 110 | 2085 | 2074 |
| F4 | 2 150 | 2 140 | 2130 | 2115 |
| F5 | 2 215 | 2 250 | 2201 | 2203 |
| F6 | 2 210 | 2 200 | 2200 | 2180 |
| F7 | 2 395 | 2 400 | 2302 | 2 350 |
| F8 | 2 420 | 2 435 | 2442 | 2441 |
| F9 | 2 495 | 2 460 | 2450 | 2520 |
| F10 | 2 260 | 2 230 | 2220 | 2140 |

6.10.2 Essai ultrasonique longitudinale

Tableau 6.11-Vitesse ultrasoniques longitudinales- fendage-

| Vitesse des ultrasoniques longitudinales (m/s) | | | | |
|--|---------|----------|----------|----------|
| Formulation | 7 Jours | 14 Jours | 21 Jours | 28 Jours |
| <i>F1</i> | 538 | 479 | 433 | 350 |
| <i>F2</i> | 811 | 781 | 707 | 655 |
| <i>F3</i> | 1 447 | 1 336 | 1 220 | 1 027 |
| <i>F4</i> | 998 | 919 | 892 | 743 |
| <i>F5</i> | 1 354 | 1 242 | 1 162 | 957 |
| <i>F6</i> | 1 201 | 1 108 | 1 019 | 883 |
| <i>F7</i> | 1 632 | 1 596 | 1 594 | 1 243 |
| <i>F8</i> | 1 790 | 1 720 | 1 690 | 1 550 |
| <i>F9</i> | 1 552 | 1 468 | 1 408 | 1 120 |
| <i>F10</i> | 1 501 | 1 376 | 1 257 | 1 100 |

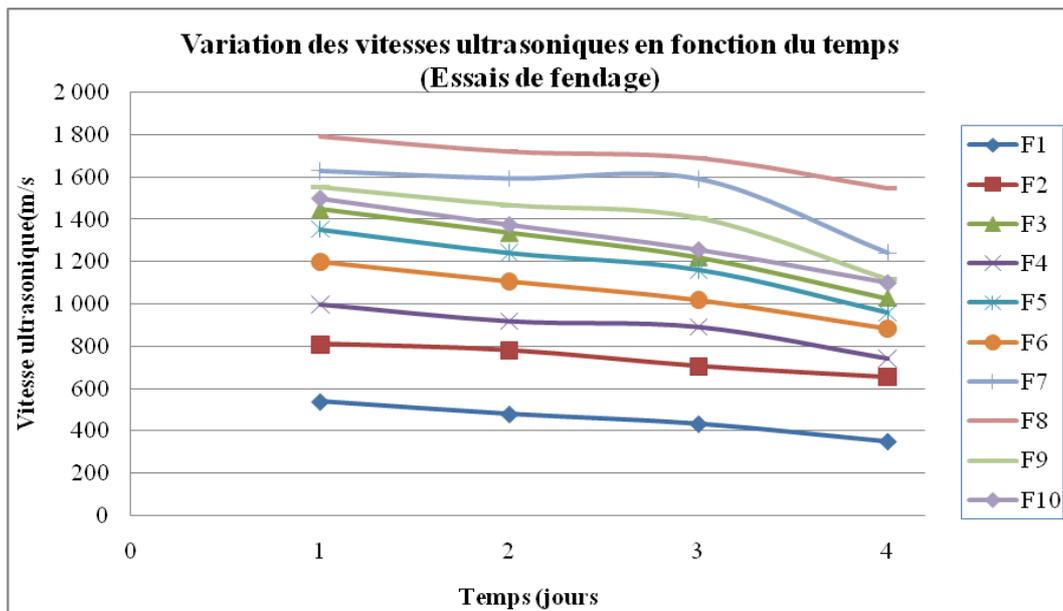


Figure 6.10-La vitesse ultrasonique en fonction du temps (essais de fendage)

6.10.3 Module de Young

Tableau 6.12--Module de Young -essai de fendage.

| Formulation | Module de Young (N/mm ²) | | | |
|-------------|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| | 7 Jours | 14 Jours | 21 Jours | 28 Jours |
| F1 | 345,69 | 267,44 | 226,07 | 147,85 |
| F2 | 802,52 | 719,73 | 608,46 | 518,06 |
| F3 | 2 524,72 | 2 162,48 | 1 781,90 | 1 256,05 |
| F4 | 1 229,58 | 1 037,77 | 973,12 | 670,42 |
| F5 | 2 331,68 | 1 992,89 | 1 706,43 | 1 158,50 |
| F6 | 1 830,36 | 1 550,81 | 1 311,68 | 975,97 |
| F7 | 3 662,72 | 3 510,22 | 3 358,45 | 2 084,81 |
| F8 | 4 452,24 | 4 136,31 | 4 004,76 | 3 367,35 |
| F9 | 3 450,73 | 3 044,00 | 2 788,87 | 1 815,07 |
| F10 | 2 923,66 | 3 987,77 | 2 014,10 | 1 486,81 |

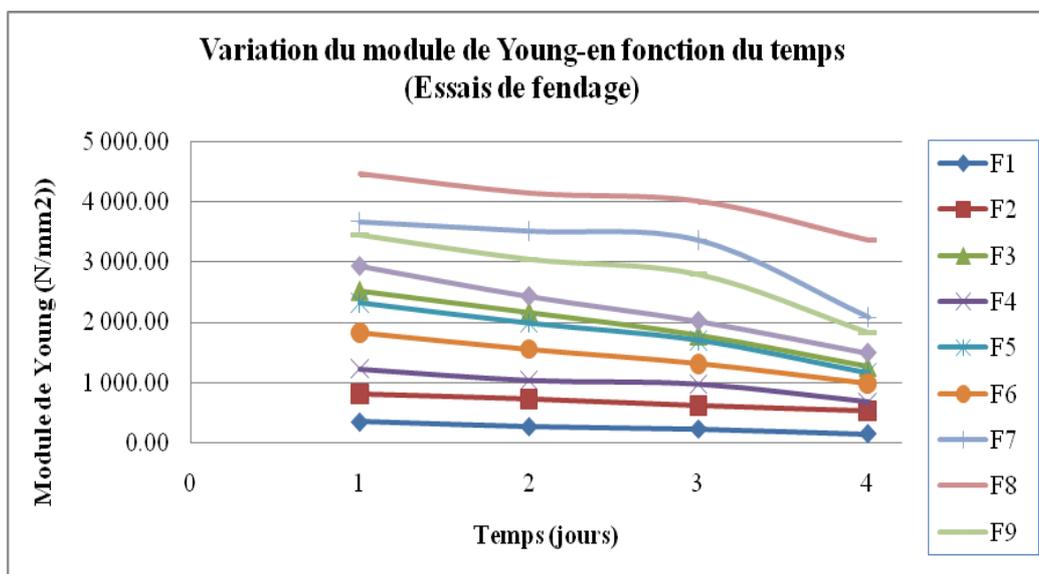


Figure 6.11-Module de Young en fonction du temps

6.11 -Essai de rupture en compression simple

Les essais de résistance à la compression simple (R_c) sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de 10 cm de diamètre et de 16.8 cm de longueur, fabriquées avec une teneur en eau Proctor sèche optimum, confectionnées et compactées statiquement à l'aide d'une dame suivant la norme (NF P98-230-2) (Figure 6-18). 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.



Figure 6.12- lustration des éprouvettes pour écrasement.

Nous allons donc mesurer les résistances à la compression simple des éprouvettes pour le sédiment brut sans traitement et les formulations proposées après, 7, 14, 21 et 28 jours ..

6.11.1-Évolution 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 6.14 et représenté sur la figure 6-20.

Tableau 6.13-Résistances en compression simple des sédiments

| Résistance de compression maximale Rc (N/mm2): | | | | | |
|--|--|---------|----------|----------|----------|
| Formulation | Formulations (%) | 7 Jours | 14 Jours | 21 Jours | 28 Jours |
| F1 | F1 100 % SN (1) | 0,200 | 0,337 | 0,233 | 0,127 |
| F2 | F2---95% SN +5% Chaux | 0,198 | 0,265 | 0,736 | 0,804 |
| F3 | F3---95% SN +5%Ciment | 0,221 | 0,497 | 0,964 | 0,97 |
| F4 | F4---85% SN + 10% Sable + 5% Chaux | 0,253 | 0,728 | 0,829 | 0,830 |
| F5 | F5---80% SN + 15% Sable + 5% Chaux | 0,072 | 0,880 | 0,890 | 0,910 |
| F6 | F6---75% SN + 20% Sable + 5% Chaux | 0,251 | 0,776 | 0,898 | 0,962 |
| F7 | F7---85% SN+ 10% Sable + 5% Ciment | 0,132 | 1,352 | 1,705 | 1,698 |
| F8 | F8---80% SN + 15% Sable + 5% Ciment | 0,231 | 1,552 | 1,905 | 1,898 |
| F9 | F9---75% SN + 20% Sable + 5% Ciment | 0,340 | 1,342 | 1,695 | 1,788 |
| F10 | F10---80% SN + 15% Sable + 2.5% Ciment +2.5% Chaux | 0,222 | 1,049 | 1,067 | 1,060 |

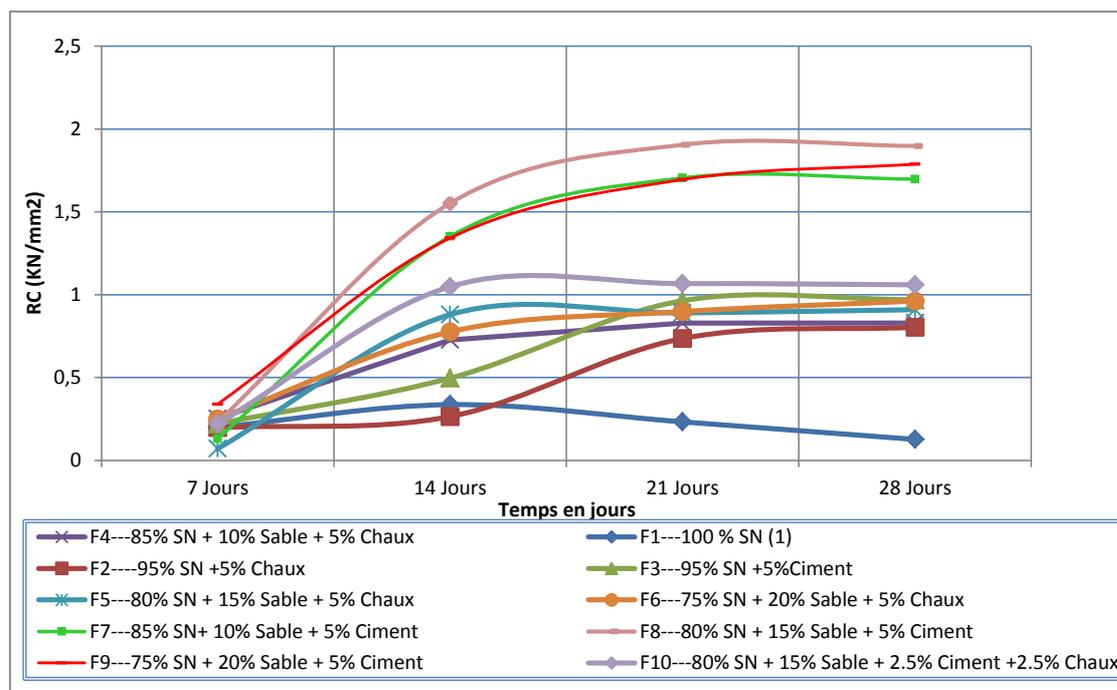


Figure 6.13-la résistance de compression en fonction du temps.

6.11.2-Interprétation

On conclure que les formulations F8, F9, F7 ont la plus grande résistance de compression a cause de ces constitutions, d’où le mélange Ciment –sable donne une bonne adhésion et par conséquent une bonne résistance.

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 (5%). On constate que les résistances augmentent jusqu'à 21 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 28 jours. Le seuil de 1 MPa résistance seuil autorisant la circulation sur la couche traitée est dépassé pour les formulations F7, 8, 9, 10, voir figure 6-21, les sédiments traités à la chaux F2, F5, F6 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].

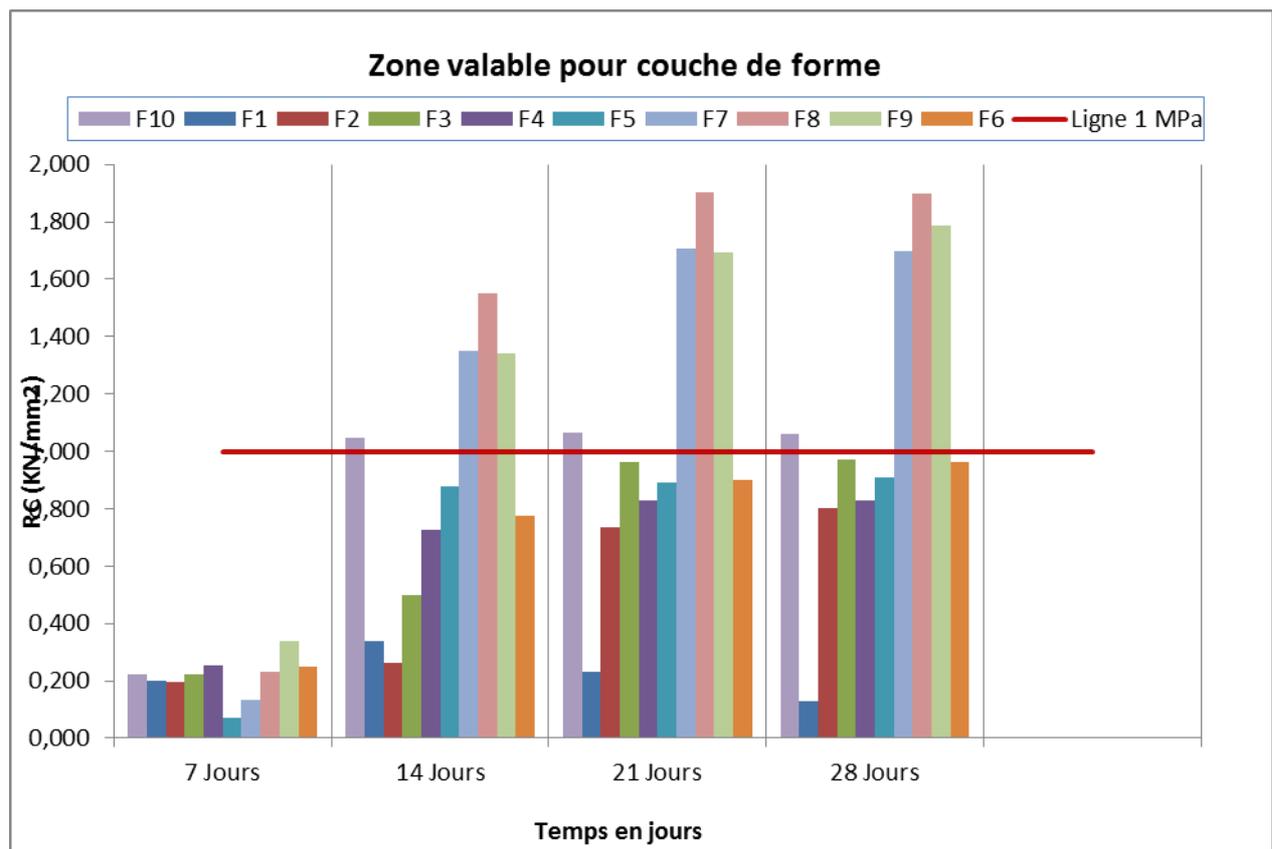


Figure 6.14 La résistance seuil autorisant la circulation sur la couche (1 MPa).

6.11.3-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 6-14, cette valeur est atteinte dès 14 jours pour les formulations étudiés F7, F8, F9 et F10. 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.

6.11.4-Détermination des rapports de conversion

Nous avons déterminé le rapport de R_c/R_{tb} à 14 et 28 jours de maturation. K_c/t est la moyenne des 2 valeurs obtenues (Tableau 6.15).

$K_c/t = \text{Moyenne} (R_c/R_{tb} \text{ à } 14 + R_c/R_{tb} \text{ à } 28)$.

Tableau 6.14-Facteurs de conversion entre (R_c) et (R_{tb}).

| Code des Formulations | Formulations (%) | R_c/R_{tb} à 14 jours (N/mm ²) | R_c/R_{tb} à 28 jours (N/mm ²) | K_c/t |
|-----------------------|--|--|--|---------|
| F1 | F1---100 % SN (1) | 4,746 | 6,046 | 5,396 |
| F2 | F2---95% SN +5% Chaux | 2,387 | 5,153 | 3,770 |
| F3 | F3---95% SN +5% Ciment | 3,525 | 6,689 | 5,107 |
| F4 | F4---85% SN + 10% Sable + 5% Chaux | 3,772 | 4,257 | 4,014 |
| F5 | F5---80% SN + 15% Sable + 5% Chaux | 5,465 | 5,416 | 5,440 |
| F6 | F6---75% SN + 20% Sable + 5% Chaux | 4,912 | 5,228 | 5,070 |
| F7 | F7---85% SN+ 10% Sable + 5% Ciment | 5,366 | 5,305 | 5,335 |
| F8 | F8---80% SN + 15% Sable + 5% Ciment | 5,191 | 5,033 | 5,112 |
| F9 | F9---75% SN + 20% Sable + 5% Ciment | 5,122 | 5,182 | 5,152 |
| F10 | F10---80% SN + 15% Sable + 2.5% Ciment +2.5% Chaux | 5,670 | 4,030 | 4,850 |

6.11.4.1 Résultats et interprétation

A partir des données du tableau 6.15 et l'évolution de la résistance en compression (Tableau 6.14), 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 6.16).

Tableau 6.15-Age à partir duquel R_c $K_{c/t} \times 0,25$ en fonction des formulations étudiées

| Formulation | Formulations (%) | $K_{c/t}$ | Valeur minimale de R_c ($K_{c/t} \times 0,25$ en (N/mm ²)) | Temps (jours) |
|-------------|--|-----------|---|---------------|
| F1 | F1---100 % SN (1) | 5,396 | 1,349 | ND |
| F2 | F2---95% SN +5% Chaux | 3,770 | 0,943 | ND |
| F3 | F3---95% SN +5% Ciment | 5,107 | 1,277 | ND |
| F4 | F4---85% SN + 10% Sable + 5% Chaux | 4,014 | 1,004 | ND |
| F5 | F5---80% SN + 15% Sable + 5% Chaux | 5,440 | 1,360 | ND |
| F6 | F6---75% SN + 20% Sable + 5% Chaux | 5,070 | 1,268 | ND |
| F7 | F7---85% SN+ 10% Sable + 5% Ciment | 5,335 | 1,334 | 14 jours |
| F8 | F8---80% SN + 15% Sable + 5% Ciment | 5,112 | 1,278 | 14 jours |
| F9 | F9---75% SN + 20% Sable + 5% Ciment | 5,152 | 1,288 | 14 jours |
| F10 | F10---80% SN + 15% Sable + 2.5% Ciment +2.5% Chaux | 4,850 | 1,213 | 14 jours |

6.11.5– Les 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 7,14,21 et 28 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, confectionnées à Wopn.

Dans notre cas, nous avons utilisé des moules ayant les dimensions suivantes :

$D=10$ cm ; $h = 16.8$ 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 6.24).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 (F_r en Newton), en utilisant la formule suivante :

$$R_{tb} = 2. 10^2. \frac{F_r}{\pi d h}$$

$$R_t = 0,8. R_{tb}$$

Avec:

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

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

H : Hauteur de l'éprouvette (cm),

d : Diamètre de l'éprouvette (cm).

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

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 6.15-Illustration de l'essai de compression diamétrale.

Tableau 6.16-Résistances en Fendage des sédiments

| Résistance de fendage maximale (N/mm²): | | | | | |
|---|--|----------|----------|----------|----------|
| | Formulations (%) | 7 Jours | 14 Jours | 21Jours | 28Jours |
| F1 | F1---100 % SN (1) | 0,034008 | 0,071012 | 0,063012 | 0,021004 |
| F2 | F2----95% SN +5% Chaux | 0,031013 | 0,111010 | 0,14164 | 0,156013 |
| F3 | F3---95% SN +5% Ciment | 0,052017 | 0,140999 | 0,143995 | 0,145018 |
| F4 | F4---85% SN + 10% Sable + 5% Chaux | 0,026008 | 0,193016 | 0,194002 | 0,194988 |
| F5 | F5---80% SN + 15% Sable + 5% Chaux | 0,018995 | 0,161018 | 0,199007 | 0,168032 |
| F6 | F6---75% SN + 20% Sable + 5% Chaux | 0,024985 | 0,157985 | 0,175993 | 0,183993 |
| F7 | F7---85% SN+ 10% Sable + 5% Ciment | 0,034994 | 0,251971 | 0,313998 | 0,319988 |
| F8 | F8---80% SN + 15% Sable + 5% Ciment | 0,044017 | 0,298984 | 0,375986 | 0,377009 |
| F9 | F9---75% SN + 20% Sable + 5% Ciment | 0,045003 | 0,262019 | 0,334016 | 0,345011 |
| F10 | F10---80% SN + 15% Sable + 2.5% Ciment +2.5% Chaux | 0,069002 | 0,185017 | 0,239005 | 0,263004 |

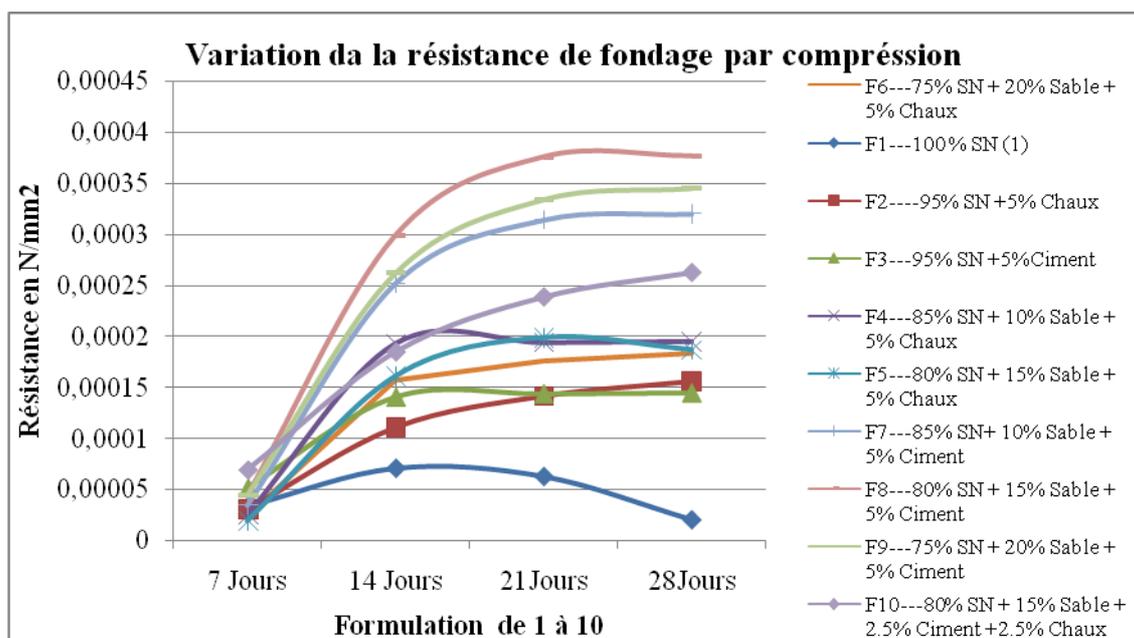


Figure 6.16-La résistance en fonction du temps (essais brésilien).

6.11.5.1 Résultats et interprétation

Les résultats des essais (R_t , E) sur les formulations de mélanges étudiés à 14j et 28j sont rassemblés dans le tableau V-14. R_t est évalué en multipliant R_{tb} par 0,8.

Tableau 6.17-Résultats des essais (Rt, E) sur les formulations à 14 et 28 jours.

| <i>Formulation</i> | <i>14 Jours</i> | | | <i>28 Jours</i> | | |
|---|------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| | <i>Rtb (N/mm2)</i> | <i>Rt (N/mm2)</i> | <i>E (N/mm2)</i> | <i>Rtb (N/mm2)</i> | <i>Rt (N/mm2)</i> | <i>E (N/mm2)</i> |
| <i>F1---100 % SN (1)</i> | 0,071 | 0,057 | 267,44 | 0,021 | 147,852 | 147,85 |
| <i>F2----95% SN +5% Chaux</i> | 0,111 | 0,089 | 719,73 | 0,156 | 0,125 | 518,06 |
| <i>F3---95% SN +5%Ciment</i> | 0,141 | 0,113 | 2 162,48 | 0,145 | 0,116 | 1 256,05 |
| <i>F4---85% SN + 10% Sable + 5% Chaux</i> | 0,193 | 0,154 | 1 037,77 | 0,195 | 0,156 | 670,42 |
| <i>F5---80% SN + 15% Sable + 5% Chaux</i> | 0,161 | 0,129 | 1 992,89 | 0,168 | 0,134 | 1 158,50 |
| <i>F6---75% SN + 20% Sable + 5% Chaux</i> | 0,158 | 0,126 | 1 550,81 | 0,184 | 0,147 | 975,97 |
| <i>F7---85% SN+ 10% Sable + 5% Ciment</i> | 0,252 | 0,202 | 3 510,22 | 0,320 | 0,256 | 2 084,81 |
| <i>F8---80% SN + 15% Sable + 5% Ciment</i> | 0,299 | 0,239 | 4 136,31 | 0,377 | 0,302 | 3 367,35 |
| <i>F9---75% SN + 20% Sable + 5% Ciment</i> | 0,262 | 0,210 | 3 044,00 | 0,345 | 0,276 | 1 815,07 |
| <i>F10---80% SN + 15% Sable + 2.5% Ciment +2.5% Chaux</i> | 0,185 | 0,148 | 3 987,77 | 0,263 | 0,210 | 1 486,81 |

Les résultats du tableau 6-19 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 6-29). 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 :

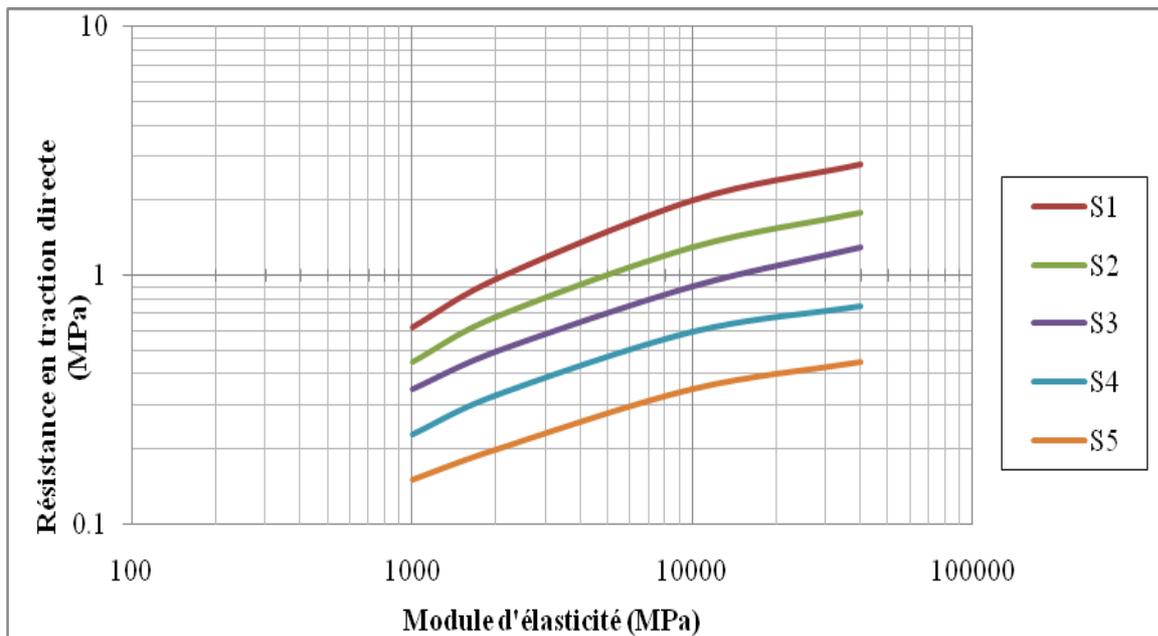
$$R_{t28}/R_{t360} = 0.60$$

$$E_{28}/E_{360} = 0.65$$

Tableau 6.18-Résultats des essais (Rt, E).à 28 et 360 jours

| Formulation | 28Jours | | | 360 Jours | |
|--|-------------|------------|-----------|------------|-----------|
| | Rtb (N/mm2) | Rt (N/mm2) | E (N/mm2) | Rt (N/mm2) | E (N/mm2) |
| F1---100 % SN (I) | 0,021 | 0,017 | 147,85 | 0,028 | 227,46 |
| F2---95% SN +5% Chaux | 0,156 | 0,125 | 518,06 | 0,208 | 797,01 |
| F3---95% SN +5%Ciment | 0,145 | 0,116 | 1 256,05 | 0,193 | 1 932,38 |
| F4---85% SN + 10% Sable + 5% Chaux | 0,195 | 0,156 | 670,42 | 0,260 | 1 031,41 |
| F5---80% SN + 15% Sable + 5% Chaux | 0,168 | 0,134 | 1 158,50 | 0,224 | 1 782,31 |
| F6---75% SN + 20% Sable + 5% Chaux | 0,184 | 0,147 | 975,97 | 0,245 | 1 501,49 |
| F7---85% SN+ 10% Sable + 5% Ciment | 0,320 | 0,256 | 2 084,81 | 0,427 | 3 207,41 |
| F8---80% SN + 15% Sable + 5% Ciment | 0,377 | 0,302 | 3 367,35 | 0,503 | 5 180,54 |
| F9---75% SN + 20% Sable + 5% Ciment | 0,345 | 0,276 | 1 815,07 | 0,460 | 2 792,42 |
| F10---80% SN + 15% Sable + 2.5% Ciment +2.5% Chaux | 0,263 | 0,210 | 1 486,81 | 0,351 | 2 287,41 |

La classification des formulations à base de sédiments sont présentés sur la figure 6-22 pour les résultats estimés à 360 jours.



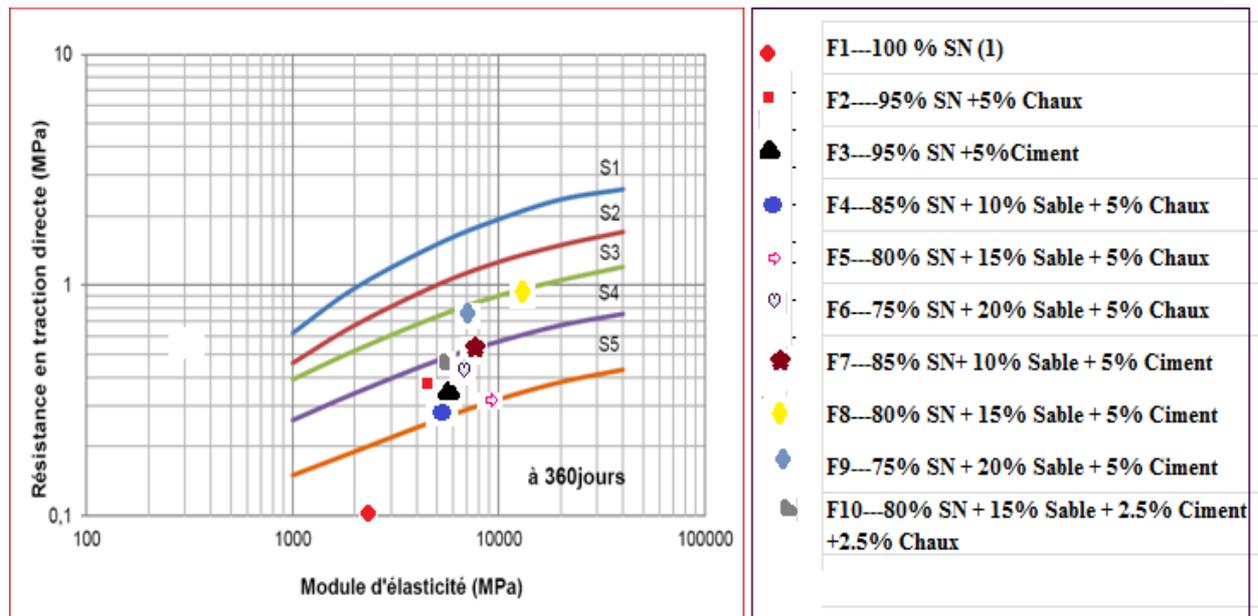


Figure 6.17-Positionnement de formulations étudiées à 360 jours dans l'abaque de classement du GTS 2000.

6.12 -Résultats et interprétation

À partir des résultats obtenus R_t et E , On peut observer qu'à 28 jours, aucun des traitements utilisés ne permet d'atteindre ce niveau de performance. En revanche, à 360 jours, la formulation F8, F9 (80% SN + 15% Sable + 5% Ciment et 75% SN + 20% Sable + 5% Ciment) se situe en Zone 3(S3) qui est une bonne classe pour une valorisation en couche de forme. Par contre la formulation F7,F10 (85% SN+ 10% Sable + 5% Ciment et 80% SN + 15% Sable + 2.5%) est en limite haute de la Zone 4 et F4 et F5 (85% SN + 10% Sable + 5% Chaux et 80% SN + 15% Sable + 5% Chaux) 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.

5.1.1 Conclusion

Après ces étapes d'études et des essais on constate que 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 Ouldjet Mellegue .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 d'Ouldjet Mellegue 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 F8 et F9 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 , pour une utilisation comme couche de forme, les formulation F2,F3,F7 peuvent être utiliser comme couche de forme avec simple amélioration , F4 et F5 ont des performances inférieures (Zone 5).

CONCLUSION GENERALE
&
PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans ce mémoire, on a évoqué une problématique de gestion des sédiments, en particulier les sédiments du barrage d'Ouldjet Mellegue qui peuvent représenter un problème économique et environnemental majeur. Dans le contexte d'une gestion écologique basée sur le développement durable, la valorisation des sédiments en technique routière est aujourd'hui un enjeu intéressant, car elle permet à la fois d'éviter la mobilité des contaminants potentiellement toxiques et de protéger le volume du barrage de l'envasement.

La méthodologie générale de valorisation décrite dans cette étude a pour objectif l'utilisation des sédiments de dragage qui seront prélevés du barrage d'Ouldjet Mellegue, et de proposer des formulations combinant le sédiment en question avec des ajouts en vue de leur utilisation dans les travaux routiers. Une caractérisation géotechnique et physico-chimique de tous les matériaux utilisés est très nécessaire pour la suite du travail. Par la suite un protocole expérimental des essais principaux contenant des essais mécaniques et des essais non destructifs est proposé. Les résultats obtenus montrent clairement la pertinence de la méthodologie suivie.

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 B4 h ; sol sableux et graveleux avec fines.

Les formulations F4 et F5 montrent qu'un traitement mixte à base de 5% de chaux vive et du sable ne donne pas une résistance acceptable.

Pour les formulations (F2, F4, F5 et F6), l'ajout de 5% de chaux sur le sédiment brut a conduit à une augmentation des caractéristiques mécaniques, mais sur une période plus longue en comparaison avec le ciment, ceci est grâce aux réactions pouzzolaniques du ciment. La valeur seuil de 1 MPa fixé par le GTS, est atteinte à 28 jours.

Quant aux formulations F7, F8, F9, et F10, elles atteignent le seuil de 1 MPa dès le 7^{ème} jour.

Les formulations F8 et F9, l'ajout de correcteur granulométrique en complément avec le liant hydraulique ont montré une amélioration de la densité sèche et une réduction de la teneur en eau optimale, ce qui donne un matériau compact et plus sec, un avantage pour les matériaux routier.

En conclusion, on peut admettre que les résultats obtenus sont encourageants pour envisager des valorisations en matière de sédiments du barrage d'Ouldjet Mellegue dans des applications géotechniques et routières.

Au terme de ce travail, les perspectives qui se dégagent peuvent être regroupées comme suit :

- le présent travail reste extensible à d'autres axes, avec la proposition d'autres formulations et d'autres paramètres.
- L'utilisation de l'outil numérique peut fournir des aboutissements appréciables.
- La proposition d'un abaque regroupant et tient en compte les divers paramètres retenus.
- L'utilisation du sédiment de dragage du barrage d'ouldjet Mellegue dans la fabrication des céramiques est un axe de recherches intéressant, mérite d'être à développer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

Abriak. N. E, 2003 « Etude d'une grave routière a base de sable de dragage ». 2nd International Symposium on Contaminated Sédiments.

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

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)

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

BENAISSA Assia (2017) Valorisation de la vase pour l'utilisation dans la technique routière. Thèse de doctorat en Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbas.

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

BOUKEMMOUM Nour El Houda et NOUAOURIA Abdessalam (2019), Valorisation des sédiments de barrages Cas du barrage de Ain Dalia (Souk Ahras) Mémoire de Master l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

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

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.

Boutouil. M, 1998 « Traitement des vases de dragage par

stabilisation/solidification à base de ciment et additifs ». Thèse de doctorat, Université du Havre, 245p.

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'Alès.

Carte géologique détaillée, 1/50 000, Djebel Ouenza, Service de la Carte Géologique del'Algérie, 1949.

COLIN D. (2003), Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière. Ph.D Thesis, Université de Caen, 180 p.

Cuisinier. O, deneele. D, masrouri. F, 18-20juin2008 « Effets des composés chimiques sur le traitement des sols a la chaux et/ou au liant hydraulique ». Journées nationales de géotechnique et de geologie de l'ingenieurJNGG08-Nantes.

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.

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.

Dongxing Wang, 2011 « solidification et valorisation de sédiments du port de dunkerque entravaux routiers » Thèse de doctorat de l'Université de Lille1.

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).

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 l'Université de CAEN.

Etude géologique de la région de l'Ouenza, par G. Dubourdiou, 1956

Etudes de faisabilité des sites de barrages de Nememcha, Barrage: Mellegue, Energoprojekt, 1988.

GTR (1992), Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule I, principes généraux, 100 p.

GTS (2000), Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques-Guide technique, LCPC- SETRA, 240p

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.

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.

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.

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

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.

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.

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>

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.

Mekerta. B, Semcha. A, Bendaoud. M, Troalen. J.P, 9- 11février, 2007 « Caractérisation et répartition spatiale des propriétés géotechniques des Sédiments d'envasement de la retenue du barrage du Ouldjet Mellegue ». Colloque sols et matériaux à problèmes – Tunisie.

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.

Practical estimates of rock mass strength, E.Hoek et E.T.Brown, Int. J. Rock Mech. Min.Sci. Vol 34, No.8, pp 1165-1186, 1997.

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 (U de S)

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

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

Scordia P-Y (2008), Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille.

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).

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

Taleb. A, 1987 « conception d'un barrage en vue de réduire l'envasement de la

retenue ». Thèse de doctorat Université de Liège.

Tran N.T. (2009), Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Thèse, Ecole des Mines de Douai, 187p

Yingjie LIANG, 2012 « Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et defibres » Thèse de doctorat de l'Université de CAEN.

8. 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.
- **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.