

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université De Jijel



Département de Génie Civil et Hydraulique

PROJET DE FIN D'ETUDE

En vue de L'obtention du Diplôme

MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Option : Géotechnique

Thème :

Etude de stabilisation chimique des sols

Présenté par :

- **Boudjadja Rafika**
- **Benkedidah Amina**

Encadré par :

Arabet .Leila

Année universitaire : 2017 - 2018

Remerciements:

« Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir données la force et la patience pour achever ce travail »

Nous tenons à remercier notre encadreur M^{elle} Arabet Leila, d'avoir posé un sujet très intéressant et pour leur conseils, leur disponibilité et pour Nous avoir fait profiter de leur connaissance et de leur qualité tant professionnelle qu'humaine

Nous remercier Souad hank la responsable au laboratoire MDS qui a été toujours disponible avec nous pour donner toutes les informations et les conseils pour un bon déroulement de travail.

Nous remercie également les membres des jurys. Pour l'effort qu'ils feront dans le but d'examiner ce modeste travail. Et tous les enseignants de département Génie civil

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de cette mémoire.

Merci

Dédicaces

Ce mémoire est dédié à toutes celles et ceux qui ont choisi de se consacrer, en
génie civil.

Nous remercieront également le président et les membres de jury d'avoir
accepté d'examiner notre travail.

Mon père «Ammar» qui a été le premier à m'encourager pour suivi l'étude
en master, et que c'est grâce à lui que je n'ai pas trouvé des difficultés à l'étude.

Ma mère «Fatima» qui a représenté toujours pour moi une source de
tendresse et de soutien moral, c'est grâce à elle que j'ai pu garder toujours
l'esprit de travailler même très tard la nuit.

Mes frère **Nadir, Samir, Massoud, Saddik et Abdelmalek** et mes soeurs
Iman et Lamia qui ont été à coté de moi et qui m'ont encouragés et aidés pour
aboutir ce travail.

Et sans oublier mes amis Sarah, Zineb, Amina et Naima.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

À Mon père «Ahcene» qui a été le premier à m'encourager pour suivre l'étude en master, et que c'est grâce à lui que je n'ai pas trouvé de difficultés pour assumer les deux responsabilités en même temps.

À Ma mère «Fatiha» qui a représenté toujours pour moi une source de tendresse et de soutien moral, c'est grâce à elle que j'ai pu garder toujours l'esprit de travail,

À mon époux «Abd El-Rahim » qui m'a aidé et soutenu durant toutes mes années d'étude universitaire

Mes chers frères ; Nedjmeddine ; Adil ; Fatah

et

Mes chers sœurs ; Assia , Yasmine ;

et tout ma famille de mon mari

Une dédicace toute spéciale à l'encadreur, M^{elle} : Arabet Leila

Surtout mon binôme et je la remercie pour tous ses efforts

Tout la promotion 2017-2018

Amina

RÉSUMÉ :

Avec la réduction de ressources en matériaux de qualité, de plus en plus les constructions de structures de génie civil sont réalisées sur le sol de faible résistance, ce qui mène à penser au développement de techniques de stabilisation du sol. La stabilisation chimique a été largement appliquée en pratique du génie civil comme les fondations. Avec l'ajout de la chaux ou ciment aux sols, des réactions sont établies avec les grains du sol qui mènent à l'amélioration des propriétés géotechniques du sol traité. Dans ce mémoire, une méthodologie expérimentale a été développée permettant d'étudier le comportement physique et mécanique des mélanges traités par l'évaluation de l'influence d'une variété des pourcentages en chaux (2, 3 et 4%) et en ciment (2, 3 et 4%) sur les limites d'Atterberg et la portance immédiate et à 7 jours de cure du sol. Une augmentation continue en chaux et en ciment de 2 à 4% implique une amélioration des paramètres physico-mécaniques, à court et à long terme, ce qui signifie le bon comportement des mélanges traités.

Mots clés : Argile, traitement, chaux, ciment, limite d'Atterberg, la portance.

ABSTRACT:

With the reduction of resource quality materials, more and more construction of civil engineering structures are made on the ground with low resistance, which leads to believe the development of techniques to stabilize the soil type. The chemical stabilization has been widely applied in civil engineering practice as foundations. With the addition of lime and cement to the soil reaction is established with the grain of the soil leading to improved engineering properties of treated soil. In this thesis, An experimental methodology was developed to study the physical and mechanical behavior of mixtures treated by evaluating the influence of a variety of percentages of lime (2, 3 and 4%) and cement (1, 2 and 4%) on the limits of 'Atterberg and the bearing capacity immediate and at 7 of soil treatment. A continuous increase in lime and cement (1 to 4%) implies an improvement of parameters physicoméchanical, which means the good behavior of mixtures treated.

Key words: Clay, treatment, lime, cement, Atterberg limit, the bearing capacity.

ملخص:

مع نقص من الموارد في المواد ذات الجودة، و مع التزايد في انجاز المشاريع الهندسية على أساسات ذات مقاومة ضعيفة، يؤدي بنا للتفكير في تطوير تقنيات تثبيت هذا النوع من التربة. تم تطبيق التثبيت الكيميائي على نطاق واسع في ممارسة الهندسة المدنية كحل. مع إضافة الجير أو الأسمنت إلى التربة، يتم إنشاء تفاعلات مع حبيبات التربة التي تؤدي إلى تحسين الخصائص الجيوتقنية للتربة المعالجة. في هذه الأطروحة، تم تطوير منهجية تجريبية لدراسة السلوك الفيزيائي والميكانيكي للمزيج المعالج بتقييم تأثير مجموعة متنوعة من النسب المئوية (2، 3 و 4%) والإسمنت (2 و 3 و 4%) على حدود أتربا رغ والرفع الفوري و في 7 أيام من علاج التربة. تشير الزيادة المستمرة في الجير والأسمنت بنسبة 1 إلى 4% إلى تحسين معايير الفيزيوميكانيك، على المدى القصير والطويل، مما يعني السلوك الجيد للخلائط المعالجة.

الكلمات المفتاحية : الطين، العلاج، الجير، الاسمنت، حد أتربا رغ، الرفع.

Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
légende	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur stabilisation des sols	
I.1. Introduction.....	3
I.2.Caractérisation des sols.....	3
I.3.Les différentes techniques d'amélioration des sols.....	4
I.3.1. Introduction.....	4
I.3.2. Classification des méthodes d'amélioration et de renforcement des sols.....	5
I.3.2.1 Amélioration de la masse du sol.....	5
I.3.2.2 Amélioration par inclusions (renforcement).....	5
I.3.2.3 Renforcement des sols.....	5
I.3.3 Domaine et limites d'application des différentes techniques.....	5
I.4 Méthodes de reconnaissance en place et en laboratoire.....	8
I.5. Méthodes d'amélioration des sols fins.....	9
I.5.1 Pré-chargement.....	9
I.5.2 Accélération de la consolidation.....	10
I.5.3 Renforcement par colonnes.....	12
I.5.3.1. Colonnes ballastées.....	12
I.5.3.2. Colonnes pilonnées.....	13
I.5.3.3. Colonnes de sol traité en place.....	14
I.5.4 Amélioration temporaire par congélation.....	15
I.6.Méthodes d'amélioration des sols grenus.....	15
I.6.1. Pré-chargement	15
I.6.2 Vibro-compactage.....	15

I.6.3 Pilonnage	16
I.6.4. Compactage statique en profondeur	17
I.6.5 Colonnes de sol traité.....	17
I.6.6. Micro pieux.....	17
I.6.7. Amélioration temporaire par congélation.....	18
I.7. Amélioration de sols particuliers.....	18
I.7.1. Tourbe.....	18
I.7.2 Lœss.....	19
I.8. Conclusion.....	19

Chapitre 2 : Stabilisation au chaux et ciment

II.1. Introduction.....	20
II.2. Traitement des sols à la chaux.....	20
II.2.1 Principe et objectifs.....	20
II.2.2. Définition.....	20
II.2.3. Différents types de la chaux.....	20
II.2.4.Applications.....	21
II.2.5. Avantages de la stabilisation à la chaux.....	21
II.2.6. inconvénients de stabilisation à la chaux.....	21
II.3. Traitement des sols au ciment.....	21
II.3.1. Principe et objectifs.....	21
II.3.2.Définition de ciment.....	21
II.3.3 Constituants.....	22
II.3.4. Type de ciment.....	23
II.3.5. Applications.....	23
II.3.6. Avantages de la stabilisation de ciment.....	23
II.3.7. inconvénients de stabilisation ciment.....	23
II.4. Traitement mixte « chaux-ciment »	24
II.5. Modalités d'exécution.....	24
II.5.1. Introduction	24
II.5.2. Préparation du sol.....	26

II.5.2.1. Scarification.....	26
II.5.2.2. Humidification.....	26
II.5.2.3. Criblage.....	27
II.5.3. Épandage.....	27
II.5.4. Malaxage	28
II.5.5. Aération du mélange.....	29
II.5.6. Compactage.....	29
II.6. Principes d'action des produits de traitement sur les sols.....	30
I.6.1. Action de la chaux aérienne.....	30
I.6.1.1 Action immédiates.....	30
II.6.1.2. Actions à long terme.....	32
II.6.2. Action de ciment.....	33
II.6.2.1. Actions immédiates.....	33
II.6.2.2. Actions à moyen et long terme.....	34
II.7. Les recherches effectuées sur le traitement chimique des sols.....	35
II.7.1. Traitement à la chaux.....	35
II.7.1.1. Effet de la chaux sur la plasticité.....	35
II.7.1.2 Effet de la chaux sur le compactage.....	36
II.7.2. Traitement au ciment.....	36
II.7.2.1. Effet du ciment sur la plasticité.....	36
II.7.2.2. Effet du ciment sur le compactage.....	38
II.8. Conclusion.....	38

Chapitre 3 : Le sol étudié et traitement utilisé

III.1. Introduction.....	40
III.2. Les essais d'identification de sol utilisé.....	40
III.2.1. Introduction	40
III.2.2. La teneur en eau de sol (NF P94-050)	40
III.2.3 Détermination de la masse volumique.....	42
III.2.3.4. Masse volumique humide (NF P 94-064).....	42
III.2.4. Équivalent de sable (NF P18-598).....	43

III.2.5. Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068).....	45
III.2.5.7. Classification des sols d'après l'essai	47
III.2.6. La limite d'Atterberg (NF P 94-051).....	48
III.2.7. Essais d'analyse granulométrique.....	52
III.2.7.1 Tamisage par voie humide (XP P 94-041).....	52
III.2.7.2 analyse granulométrique par sédimentométrie.....	55
III.3. Les essais mécaniques de sol étudié.....	59
III.3.1 Proctor normal (NF P 94-093)	61
III.3.2. Essai œdométrique (NP P 94-091)	62
III.3.3. Essai de CBR.....	66
III.4. Caractéristiques physico-chimiques de la chaux utilisée.....	69
III.5. Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ciment utilisé.....	70
III.6. Conclusion.....	71

Chapitre 4 : interprétation des résultats

IV.1. Introduction.....	72
IV.2. L'essai de limite d'Atterberg	72
IV.2.1. Traitement à la chaux	72
IV.2.1.4. Récapitulatifs des résultats obtenus.....	74
IV.2.2. Traitement au ciment.....	75
IV.2.2.4. Récapitulatifs des résultats obtenus.....	77
IV.3. Étude de la portance immédiate (Essai CBR Immédiat).....	78
IV.3.1. Traitement de la chaux.....	78
IV.3.1.1. L'ajout de 2% chaux.....	78
IV.3.1.2. L'ajout de 3% chaux.....	79
IV.3.1.3. L'ajout de 4% chaux.....	79
IV.3.1.4. Récapitulatifs des résultats obtenus.....	80
IV.3.2. Traitement de ciment.....	81
IV.3.2.1. L'ajout de 2% de ciment.....	81
IV.3.2.2. L'ajout de 3% de ciment.....	82
IV.3.2.3. L'ajout de 4% de ciment.....	82

IV.3.2.4. Récapitulatifs des résultats obtenus.....	83
IV.4. Étude de la portance après 7 jours de traitement	84
IV.4.1. Traitement à la chaux	84
IV.4.1.1. L'ajout de 2% chaux.....	84
IV.4.1.2. L'ajout de 3% chaux.....	85
IV.4.1.3. L'ajout de 4% chaux.....	85
IV.4.1.4. Récapitulatifs des résultats obtenus.....	86
IV.4.2. Traitement au ciment	87
IV.4.2.1. L'ajout de 2% ciment.....	87
IV.4.2.2. L'ajout de 3% ciment.....	88
IV.4.2.3. L'ajout de 4% ciment.....	88
IV.4.2.4. Récapitulatifs des résultats obtenus.....	89
IV. 5 Conclusion.....	90
Conclusion générale	

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les principales méthodes de renforcement de sol de fondation pour l'édification des remblais d'après Magnan (1994)

Tableau I.2 : Amélioration des sols et méthodes de reconnaissance.

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients des deux méthodes d'un traitement de terres

Tableau II.2 : Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg (George et al. 1992).

Tableau II.3 : Effet de la chaux sur les limites d'atterberg

Tableau II.4 : Effet de la chaux sur le compactage, CBR sur la kaolinite et montmorillonite (Bell, 1996).

Tableau II.5 : Effet de l'ajout du ciment sur le comptage (Okagbue et al.2007).

Tableau III.1 : La teneur en eau

Tableau III.2 : le poids volumique de sol étudié

Tableau III.3 : Équivalent de sable par piston

Tableau III.4 : Résultat de l'essai limite de liquidité

Tableau III.5 : Classification des sols

Tableau III.6 : Degré de plasticité de sol

Tableau III.7 : Description de sol en fonction du coefficient d'uniformité.

Tableau III.8 : Granulométrie par voie humide

Tableau III.9 : Granulométrie par sédimentation

Tableau III.10 : Caractéristiques physique de la chaux.

Tableau III.11 : Caractéristiques chimiques de la chaux.

Tableau III.12 : Les caractéristiques mécaniques de ciment utilisé.

Liste des figures

- Figure I.1** : Limites et domaine de validité des techniques d'amélioration des sols
- Figure I.2** : Principe du pré-chargement pour le contrôle des tassements
- Figure I.3** : Techniques de pré-chargement
- Figure I.4** : Réseaux de drains verticaux
- Figure I.5** : Drains préfabriqués
- Figure I.6** : Phases d'exécution des colonnes ballastées
- Figure I.7** : Colonne de sol traité à la chaux
- Figure I.8** : Chantier de Vibro-compaction.
- Figure I.9** : Chantier de pilonnage.
- Figure I.10** : Principe de compactage statique en profondeur.
- Figure II.1**: Les Constituants du ciment.
- Figure II.2** : Scarificateur
- Figure II.3** : (a). Arroseuse-enfouisseuse (b). Arroseuse
- Figure II.4** : Épandeur (remorqué par un tracteur, autotracté sur chenilles).
- Figure II.5** : Charrue à disques
- Figure II.6** : Compacteurs
- Figure II.7** : Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive.
- Figure II.8** : Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol de classe A2 traité d 2 % de chaux vive
- Figure II.9** : Effet du ciment sur les limites d'atterberg (Osula 1996).
- Figure II.10** : Évolution des limites d'Atterberg (basha et al. 2005).
- Figure III.1** : Essai d'éprouvette graduée.
- Figure III.2** : Échantillon équivalent de sable.
- Figure III.3** : Appareillage pour essai au bleu de méthylène
- Figure III.4** : Essai de bleu de méthylène à la tache
- Figure III.5**: Représentation des limites d'Atterberg
- Figure III.6**: étapes de l'essai avec l'appareille de Casa grande.
- Figure III.7**: Détermination de la limite de plasticité.
- Figure III.8**: La courbe de la limite de liquidité
- Figure III.9** : Analyse granulométrie par voie humide
- Figure III.10** : Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie
- Figure III.11** : Lecture du densimètre
- Figure III.12** : Lecture corrigé du densimètre.
- Figure III.13** : Courbe granulométrique
- Figure III.14**: Mode opératoire de l'essai Proctor
- Figure III.15** : Courbe de compactage
- Figure III.16** : Appareille d'œdométrie

Figure III.17 : Courbe de compressibilité.

Figure III.18 : Appareillage de l'essai CBR

Figure III.19 : Courbe de l'essai CBR du sol étudié.

Figure IV.1 : Courbe de la limite de liquidité

Figure IV.2 : Courbe de la limite de liquidité.

Figure IV.3 : Courbe de la limite de liquidité.

Figure IV.4 : La variation de la limite de liquidité en fonction de % de la chaux

Figure IV.5 : Variation de la limite de plasticité en fonction du % de chaux

Figure IV.6 : Variation de l'indice de plasticité en fonction de % de chaux

Figure IV.7 : la courbe limite de liquidité de 2% ciment.

Figure IV.8 : la courbe de la limite de liquidité de 3% ciment.

Figure IV.9 : la courbe de la limite de liquidité de 4% ciment.

Figure IV.11 : La courbe de limite de plasticité en fonction de % ciment.

Figure IV.12 : la courbe de l'indice de plasticité en fonction de dosage ciment.

Figure IV.13 : Courbe de la portance IPI (2% chaux).

Figure IV.14 : Courbe de la portance IPI (3% chaux).

Figure IV.15 : Courbe de la portance IPI (4% chaux).

Figure IV.16 : Variation de la force de poinçonnement en fonction de % d'ajout de la chaux.

Figure IV.17 : Variation de « IPI » en fonction de % d'ajout de la chaux.

Figure IV.18 : Courbe de la portance IPI (2% ciment).

Figure IV.19 : Courbe de la portance IPI (3% ciment).

Figure IV.20 : Courbe de la portance IPI (4% ciment).

Figure IV.21 : Courbe de poinçonnement en fonction de % d'ajout de ciment.

Figure IV.22 : Variations d'IPI en fonction de % de ciment.

Figure IV.23 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (2% chaux).

Figure IV.24 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (3% chaux).

Figure IV.25 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (4% chaux).

Figure IV.26 : Variation des forces de poinçonnements en fonction de % d'ajout de la chaux (après 7 jours).

Figure IV.27 : Variation d'IPI en fonction de % d'ajout de la chaux (Après 7 jours).

Figure IV.28 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (2% ciment).

Figure IV.29 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (3% ciment).

Figure IV.30 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (4% ciment).

Figure IV.31 : Variation de la force de poinçonnement en fonction de % d'ajout de ciment après 7 jours.

Figure IV.32 : Variations d'IPI en fonction de % de ciment après 7 jours.

Figure IV.33 : Échantillon de sol+ 4% ciment après 7 jours de traitement.

Notations

- **MPT** : Essais au pressiomètre Ménard;
- **CPT** : Essais de pénétration statique et essais de cisaillement au piézocône;
- **SPT** : Essais de pénétration au carottier ;
- **p_l** : Pression limite mesurée au pressiomètre Ménard;
- **E_M** : Module pressiométrique mesuré au pressiomètre Ménard ;
- **q_c** : Résistance de pointe mesurée au pénétromètre statique ou au piézocône ;
- **f_s** : Frottement latéral mesuré au pénétromètre statique ou au piézocône ;
- **NSPT** : Nombre de coups, déterminé au pénétromètre à carottier ;
- **C_u** : Cohésion non drainée (résistance au cisaillement) du sol « intact » mesurée au scissomètre de chantier;
- **C_R** : Cohésion non drainée (résistance au cisaillement) du sol remanié mesurée au scissomètre de chantier ;
- **sr** : Coefficient de sensibilité (cu/cr) ;
- **c', φ'** : Cohésion effective et angle de frottement interne déterminés à l'appareil triaxial
- **C_u** : Cohésion non drainée déterminée à l'appareil triaxial
- **λ_{cu}** : Taux de variation de la cohésion non drainée en fonction de la contrainte de consolidation $\lambda_{cu} = \Delta c_u / \Delta \sigma'_3$;
- **C_s** : Indice de gonflement déterminé à l'oedomètre ;
- **C_c** : Indice de compression déterminé à l'oedomètre;
- **e₀** : Indice des vides déterminé à l'oedomètre;
- **C_α** : Indice de compression secondaire déterminé à l'oedomètre;
- **cv** : Coefficient de consolidation déterminé à l'oedomètre ;
- **σ'_p** : Pression de préconsolidation déterminée à l'oedomètre;

- **GTR** :Guide technique des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme
- **LCPC** :Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
- **d_{dopt}** : masse volumique sèche optimum Proctor
- **W_{op}** : Teneur en eau à l'optimum Proctor
- **PST** : Partie Supérieure de Terrassement
- **k** : Coefficient de perméabilité déterminé en laboratoire ou en place par les essais Lugeon ou par pompage.
- **I_p** : Indice de plasticité
- **WL** : Limite de liquidité
- **WP** : Limite de plasticité
- **VBS**: Valeur du bleu méthyle
- **IPI** : indice portant immédiat
- **OPN** : Optimum Proctor Normal
- **ES** : équivalent de sable
- **A1, A2**, : Classes de sols (selon le GTR)
- **CBR** :California Bearing Ratio
- **D** : Dimension maximale pour laquelle le passant est compris entre 80 et 99%
- **D_{max}** : Diamètre maximal des grains (mm)
- **CEM I à V** :Classes de ciment (selon NF EN 197-1)
- **E_{oed}** : Module d'élasticité œdométrique
- **γ** : Poids volumique
- **γ_d** : Poids volumique sec
- **γ_{sat}** : Poids volumique de sol à l'état saturé
- **γ_h** : Poids volumique humide
- **γ_{sat}** : Poids volumique de sol à l'état saturé
- **γ_w** : Poids volumique de l'eau
- **γ_d** : Poids volumique sec
- **γ_h** : Poids volumique humide
- **C_u** : coefficient d'uniformité
- **C_e** : coefficient de courbure

- **Cc** : Indice de compression (%)
- **Cg** : Indice de gonflement (%)

Introduction générale :

*L*e traitement des sols est souvent opéré pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs.

*L'*amélioration des sols: elle est appliquée aux sols ayant une grande plasticité (limon, argile), afin d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques ; facilité de mise en oeuvre et de compactage, portance et résistance au poinçonnement. Ceci se traduit par une meilleure praticabilité pour le trafic de chantier.

*L*a stabilisation des sols: elle a pour objectif la réalisation des couches de fondations de qualité dont les caractéristiques mécaniques ont été considérablement rehaussées, ce qui donne une plus grande portance et une meilleure distribution des charges. En outre, ces couches acquièrent ainsi une meilleure résistance à l'érosion et au gel, augmentant dès lors sensiblement leur durabilité.

*P*armi les technique d'amélioration des sols ; Une large variété des méthodes d'amélioration et de stabilisation des mauvais sols est actuellement utilisée et les techniques les plus appropriées sont d'habitude classées comme les méthodes mécaniques, hydromécaniques, thermiques et chimiques. Les méthodes thermiques concernent surtout la stabilisation par congélation ou par chauffage. Ce sont donc des méthodes d'amélioration temporaires, par contre les méthodes mécaniques et chimiques sont permanentes. Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que, les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

*T*raiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol, pratiquement tous les sols peuvent être traités. La stabilisation peut être utilisée, avant compactage, in situ ou avec des sols excavés ou amenés d'ailleurs. Cependant une analyse préalable de leur nature est nécessaire avant chaque traitement. Elle détermine la

technique et les moyens les plus appropriés à mettre en oeuvre, en fonction des spécificités du terrain:

- Utilisation d'addition (chaux, ciment, ajouts minéraux.....);
- Dosages à respecter;

*L*es méthodes d'amélioration mécaniques et hydromécaniques des sols sont coûteuses et demandent un savoir faire élevé ce qui n'est pas toujours permis dans les pays en voie de développement comme l'Algérie. De plus, les méthodes d'amélioration thermiques des sols restent elles aussi efficaces mais dont l'emploi reste limité en raison de leurs coûts très élevés.

*P*ar ailleurs, la méthode d'amélioration chimique des sols par addition de la chaux, du ciment ou d'autres ajouts cimentaires restent la plus utilisée et la moins onéreuse. Cette technique s'est développée très rapidement à travers le monde et qui est encore menée à connaître une importante croissance.

*L'*objectif de ce travail est d'étudier le comportement d'un sol traité à la chaux ou au ciment pour la réemployer dans la réalisation d'un remblai routier. Le travail s'attache à évaluer au laboratoire l'influence d'une variation du pourcentage en chaux/ ou ciment sur les paramètres physiques et mécaniques du sol.

*C*e travail se compose de quatre chapitres; introduction générale et une conclusion générale.

- **Le premier chapitre** présente les techniques de stabilisation chimique et mécanique des sols.
- **Le deuxième chapitre** présente une étude bibliographique sur traitement à la chaux et au ciment.
- **Le troisième chapitre** présente une série des essais d'identification, pour étudier les propriétés physiques et mécaniques de matériaux utilisés.
- **Le quatrième chapitre** porte sur une étude expérimentale qui a été effectuée dans le laboratoire afin de déterminer l'effet des différents ajouts utilisés sur le comportement du sol utilisé.

I.1. Introduction :

L'aménagement de sol de qualité médiocre est de plus en plus nécessaire, compte tenu de la croissance de l'humanité et de ses activités. Certains types de sol, jusque-là délaissés, car présentant des caractéristiques mécaniques faibles, doivent être renforcés pour assurer la stabilité des édifices et des infrastructures de génie civil qu'ils sont appelés à porter.

Dans le cadre des techniques de modifications des sols, il faut faire la distinction entre trois termes :

- Traitement : terme général pour désigner un procédé consistant à modifier un sol donné afin qu'il puisse remplir les fonctions auxquelles on le destine.
- Amélioration : opération quasi instantanée qui consiste à améliorer les propriétés géotechniques du sol (augmentation de la portance, de la résistance à la pénétration, amélioration de l'aptitude du sol au compactage), alors que la nature du sol reste la même. Cette opération permet d'assurer la mise en œuvre du sol avec les ateliers traditionnels de terrassement. Ce traitement ne donne pas une garantie de durabilité vis-à-vis de l'eau et du gel.
- Stabilisation : opération à moyen ou à long terme consistant à augmenter très sensiblement les caractéristiques mécaniques d'un sol, de manière à conférer durablement au sol un état définitif de stabilité à l'eau et au gel. Elle se traduit, entre autres par un durcissement graduel du mélange au cours des semaines et des mois qui suivent le compactage. Ces effets pourraient être mis à profit dans le dimensionnement de certaines chaussées, mais n'interviennent pas au niveau des travaux de terrassement.

I.2. Caractérisation des sols :

Les sols, sont des matériaux complexes constitués d'un squelette minéral plus ou moins compact présentant une porosité naturelle où l'air et l'eau circulent librement. Les grains du sol proviennent de la fragmentation plus ou moins grossière de la roche en cailloux, gravier, sable ou limon, mais aussi de la décomposition chimique de certains composés de la roche en particules microscopiques d'argile. Dans les sols perméables, comme les cailloux, les graviers et les sables, l'eau circule facilement. Ce n'est pas le cas dans les sols peu perméables voire imperméables, comme le limon et l'argile. L'eau circule ainsi 1 million de fois moins vite dans l'argile que dans le gravier. Par ailleurs, suite à des sollicitations extérieures telles que des venues d'eau, des périodes de sécheresse ou des séismes, les caractéristiques mécaniques des sols peuvent évoluer et ne plus être adaptées à l'usage qui leur était destiné.

On distingue trois grandes familles de paramètres dont la connaissance est capitale pour la caractérisation d'un sol vis-à-vis de son traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (ciment, liants hydrauliques routiers – LHR):

Pour décider de la pertinence d'un traitement de sol, il faut le reconnaître et en prélever des échantillons représentatifs. L'étude préalable de ces échantillons en laboratoire portera sur l'état et les caractéristiques des sols à traiter:

- Granulométrie «simplifiée» : détermination visuelle du D_{max} ;
- Indice de plasticité (limites d'Atterberg);
- Valeur de bleu (VBS);
- Teneur en eau naturelle;
- Présence de matières organiques;
- Présence de constituants chimiques particuliers (sulfures, sulfates, chlorures, phosphates et nitrates).

La complexité de cette étude d'identification varie avec la diversité géologique du terrain et l'application visée (remblai, sous-fondation, tranchée, fond de coffre, fondation de bâtiment). Cette étude permet de regrouper les terrains rencontrés en familles homogènes et représentatives et de déterminer l'utilité ou non d'un recours au traitement en fonction de leur teneur en eau. On peut ainsi:

- Éliminer les sols pour lesquels le traitement serait:
 - Superflu (le sol non traité est satisfaisant);
 - Inopérant (le sol ne réagit pas avec l'agent de traitement);
 - Trop onéreux: sols trop humides, trop argileux ou trop pierreux pour le type de traitement envisagé;
- Connaître le (ou les) agent(s) de traitement le(s) mieux adapté(s) à chaque famille de sols pour l'application envisagée;
- Sélectionner les échantillons représentatifs avec lesquels seront faites les études de formulation proprement dites;
- Évaluer, en première approximation les dosages à apporter.

I.3. Les différentes techniques d'amélioration des sols :

I.3.1. Introduction :

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20^{ème} siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

I.3.2. Classification des méthodes d'amélioration et de renforcement des sols:

I.3.2.1 Amélioration de la masse du sol

- Consolidation et drainage ;
- Préchargement par remblai ou par le vide ;
- Injections ;
- Vibrocompactage ;
- Compactage dynamique ;
- Compactage statique ;
- Explosifs (*électroconsolidation, congélation*).

I.3.2.2 Amélioration par inclusions (renforcement)

- Colonnes ballastées ;
- Inclusions rigides ;
- Colonnes de mortier sol-ciment réalisées par jet (jet grouting) ;
- Colonnes de sol-chaux-ciment réalisées par malaxage.

I.3.2.3 Renforcement des sols

- Remblais en sol renforcé (Terre Armée, géotextiles, géogrilles) ;
- Clouage des talus et des glissements de terrain.

I.3.3 Domaine et limites d'application des différentes techniques :

La démarche d'application d'une technique d'amélioration des sols comporte quatre étapes (Dhouib, 2003) :

- Définition des critères du projet : emprise, sollicitations, tassements tolérés;
- Identification des sols : nature, granulométrie, présence d'eau ;
- Choix de la solution d'amélioration des sols ;
- Optimisation de la solution d'amélioration des sols la mieux adaptée.

L'application des techniques d'amélioration des sols est directement liée à la granulométrie des sols à traiter. L'expérience dans ce domaine permet de tirer les conclusions suivantes :

- Il est possible de procéder à des compactages dynamique, statique (Compactage horizontal statique/statique horizontal) ou par vibration radiale, ou de réaliser des colonnes de mortier sol-ciment par jet (jet grouting) dans des matériaux sablo-graveleux plus ou moins fins,
- Lorsque les sols à compacter présentent un fuseau granulométrique qui tend vers celui des sols fins à très fins, la limite des procédés de compactage correspond au début de l'application des techniques de colonnes ballastées, d'inclusions rigides et de colonnes chaux-ciment ;

- Le préchargement par remblais ou par le vide est techniquement possible, mais se pose toujours le problème du temps nécessaire à la consolidation, à moins de mettre en place des drains verticaux pour accélérer cette consolidation ;
- La réalisation des colonnes ballastées impose que le sol avoisinant offre une étreinte latérale suffisante pour éviter l'expansion latérale du ballast, qui n'a pas cohésion,
- Lorsque les sols à traiter sont mous et compressibles, purement organiques ou contiennent une forte proportion de matériaux organiques, le terrain ne peut offrir de résistance au refoulement. L'amélioration des sols par colonnes ballastées ne peut être pérenne à cause du comportement évolutif des matériaux organiques et de leurs déformations par fluage ; l'incorporation d'inclusions rigides est dans ce cas nécessaire ;
- Dans les sols organiques caractérisés par des teneurs en eau naturelles élevées, une solution de colonnes chaux-ciment incorporées par voie sèche est techniquement adaptée ; lorsque la teneur en eau naturelle est faible, cette technique peut être employée par voie humide (« mélange par malaxage en profondeur »).
- La figure I.1 présente une description des domaines d'utilisation des différentes méthodes d'amélioration des sols par création d'inclusions, qui combine les classes granulométriques et l'état du sol, représenté par sa résistance de cône q_c au pénétromètre statique. L'amélioration des sols a en effet un domaine d'action optimale pour chaque technique, qui dépend de la nature des sols mais aussi de leur état de compacité et de surconsolidation. Des gammes de résistance différentes sont spécifiées pour les sols fins, d'une part, et pour les sols grenus, d'autre part. La classification d'après les essais au pénétromètre statique peut être remplacée par une classification au scissomètre de chantier pour les sols fins, au pénétromètre à carottier (SPT) pour les sables lâches, en particulier, et au pressiomètre, en général.

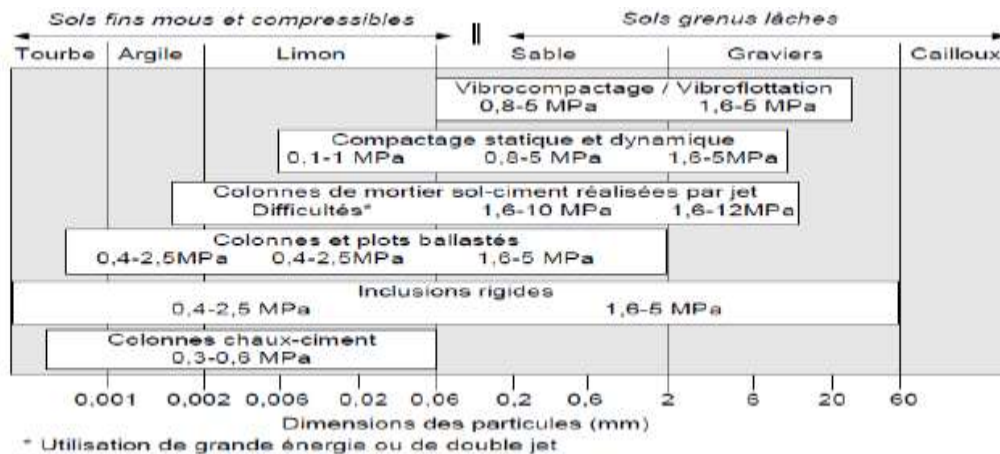


Figure. I.1 : Limites et domaine de validité des techniques d'amélioration des sols

Magnan (1994) présente un bilan des méthodes permettant de réduire les tassements des remblais édifiés sur sols compressibles. Les diverses méthodes ainsi que les principales conclusions sont reportées dans le Tableau I.1.

Tableau I.1. Les principales méthodes de renforcement de sol de fondation pour l'édification des remblais d'après Magnan (1994)

Technique	Données nécessaires	Contrainte	Fiabilité	Commentaires
Préchargement	Compressibilité Perméabilité	Temps nécessaire	Peu fiable pour obtenir de faibles déplacements	Lent Peu cher
Préchargement avec drains verticaux	Compressibilité Perméabilités verticales et horizontales	Plus rapide	Plus flexible	Rapide Relativement cher
Remplacement du sol	Epaisseur de la couche	Mise en dépôt du sol Nouveau matériau	Bonne en cas de remplacement total	Rapide Cher
Colonnes ballastées, colonnes de sable compacté	Résistance et déformabilité du sol	Equipements Plot expérimental	Bonne après analyse de plots expérimentaux	Cher Rapide
Dalle sur pieux	Résistance du sol	/	Bonne	Très cher
Electro-osmose et injection	Propriétés chimicophysiques Compressibilité Perméabilité	Destruction des électrodes Alimentation électrique	Incertaine	Très cher
Remblai léger	Compressibilité Perméabilité	Protection du matériau léger	Peu fiable pour obtenir de faibles déplacements	Cher
Remblai sur inclusions rigides	Résistance et déformabilité du sol	/	Bonne	Cher Rapide
Colonnes de jet grouting	Résistance et déformabilité du sol	/	Bonne	Cher Rapide

I.4 Méthodes de reconnaissance en place et en laboratoire :

Les méthodes de reconnaissance géotechnique en place et en laboratoire doivent fournir, d'après le schéma général de la figure I.1, l'identification du sol à traiter à partir de sa granulométrie, pour pouvoir choisir la meilleure méthode d'amélioration, et sa résistance mécanique pour optimiser la solution adoptée.

Le tableau I.2 donne, pour les différentes techniques d'amélioration et les natures de sols correspondantes, les méthodes de reconnaissance géotechnique appropriées et les paramètres qui doivent être mesurés. Le choix des méthodes de reconnaissance dépend principalement de la nature des terrains à traiter : pour les sols grenus (sables, graviers), la reconnaissance est centrée, selon les pays, sur les essais en place (pressiomètre-MPT, pénétromètre-CPT, SPT) avec des essais de laboratoire pour obtenir la granulométrie, la teneur en eau, la teneur en fines 80µm et les caractéristiques de ces particules fines : valeur de bleu VBs ou indice de plasticité IP. Pour les sols fins, on utilise principalement des essais en place (pressiomètre, pénétromètre, scissomètre) et des essais de laboratoire à l'oedomètre et à l'appareil triaxial, plus tous les essais d'identification spécifiques aux sols fins, y compris la mesure de la teneur en matières organiques.

Tableau I.2 Amélioration des sols et méthodes de reconnaissance.

Classe	Techniques d'amélioration	Nature sols	Méthodes de reconnaissance	Paramètres mesurés
Amélioration en masse	Vibro-compactage/ Vibroflottation	Sables lâches ($C_{80} < 10$)	MPT, CPT, SPT + laboratoire	$p_t, E_M, q_c, f_s, N_{SPT}$ Granulométrie, w, C_{80}, V_{Bs}, I_p
	Compactage dynamique	Sables lâches, limons, silts (sans eau)	MPT, CPT, SPT + laboratoire	$p_t, E_M, q_c, f_s, N_{SPT}$ Granulométrie, w, C_{80}, V_{Bs}, I_p
	Compactage statique / Injection solide	Sables lâches, limons, silts	MPT, CPT, SPT + laboratoire	$p_t, E_M, q_c, f_s, N_{SPT}$ Granulométrie, w, C_{80}, V_{Bs}, I_p
	Préchargement Drains verticaux	Sols fins mous et compressibles	Scissomètre + Laboratoire	$c_u, c_r, s_r, \lambda_{cu}$ $w, I_p, C_s, C_c, e_0, C_a, c_v, \sigma_p$
	Injection (pérenne)	Sols meubles (pas de sable)	MPT, CPT, SPT + laboratoire	$p_t, E_M, q_c, f_s, N_{SPT}$ Identification
	Congélation	Sols aquifères (sans écoulement)	Laboratoire	Perméabilité k w, C_{80}, V_{Bs}, I_p
Amélioration par inclusions	Injection solide	Sols grenus et sols fins (limon et silt)	MPT, CPT, SPT + laboratoire	$p_t, E_M, q_c, f_s, N_{SPT}$ Granulométrie, w, C_{80}, V_{Bs}, I_p
	Colonnes de mortier sol-ciment réalisées par jet (jet grouting)	Sols grenus et sols fins (limons, voire argile)	MPT, CPT, SPT + laboratoire	$p_t, E_M, q_c, f_s, N_{SPT}$ Granulométrie, w, C_{80}, V_{Bs}, I_p
	Inclusions rigides	Sables lâches et sols fins (limons, argile, tourbe, vase)	MPT, CPT, SPT + Scissomètre + laboratoire	p_t, E_M, q_c, f_s et N_{SPT} c_u, c_r, s_r $w, I_p, C_s, C_c, e_0, C_a, c_v, \sigma_p$
	Colonnes ballastées	Sables lâches	SPT, CPT, MPT + laboratoire	q_c, f_s, N_{SPT} Granulométrie, C_{80}, V_{Bs} essais cycliques
		Sols mous et compressibles	Scissomètre + laboratoire	c_u, c_r, s_r $w, I_p, C_s, C_c, e_0, C_a, c_v, \sigma_p$ C_{MO}
	Plots ballastés	Sables lâches et sols fins	CPT, MPT, SPT + Scissomètre + laboratoire	p_t, E_M, q_c, f_s et N_{SPT} c_u, c_r, s_r $w, I_p, C_s, C_c, e_0, C_a, c_v, \sigma_p$
Colonnes chaux- ciment	Sols très mous et très compressibles	Scissomètre + laboratoire	c_u, c_r, s_r $w, I_p, C_s, C_c, e_0, C_a, c_v, \sigma_p$	

I.5. Méthodes d'amélioration des sols fins :

I.5.1 Pré-chargement

Cette technique consiste à placer sur le terrain une charge égale à la charge définitive pf augmentée éventuellement d'une surcharge ps qui assure tout ou partie des effets suivants (figure I.2) :

- produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de compression secondaire ; on peut rendre ainsi le sol traité plus rapidement constructible, sans redouter à moyen ou à long terme des tassements absolus ou différentiels importants ;
- augmenter la résistance au cisaillement et la capacité portante du massif de sol, ce qui peut être utilisé pour une construction par étapes.
- Pratiquement, deux techniques sont utilisées pour appliquer au sol la contrainte de pré-chargement :
 - la méthode la plus courante (figure I.3a) consiste à édifier sur le site un remblai (une solution alternative est de remplir des réservoirs d'eau) ; on augmente ainsi la contrainte totale appliquée à la surface de la couche compressible ; en fin de consolidation, quand les surpressions interstitielles créées par la charge sont dissipées, la charge apportée par le remblai est supportée par le squelette du sol, qui se déforme sur toute son épaisseur ;
 - une autre méthode consiste à utiliser la pression atmosphérique, en appliquant un vide partiel sous une membrane étanche posée à la surface du sol (figure I.3b); on diminue dans ce cas la distribution d'équilibre des pressions interstitielles dans le massif de sol, à contraintes totales constantes ; l'utilisation de cette technique a été limitée pendant longtemps par la mauvaise qualité des membranes disponibles ; cet obstacle est désormais levé et le recours à l'application du vide devrait se développer.
- On peut aussi diminuer les pressions interstitielles, et donc pré-charger le sol, en rabattant la nappe dans la zone à consolider (figure I.3c); les effets de cet abaissement de la nappe sur le voisinage doivent être soigneusement étudiés dans ce cas.

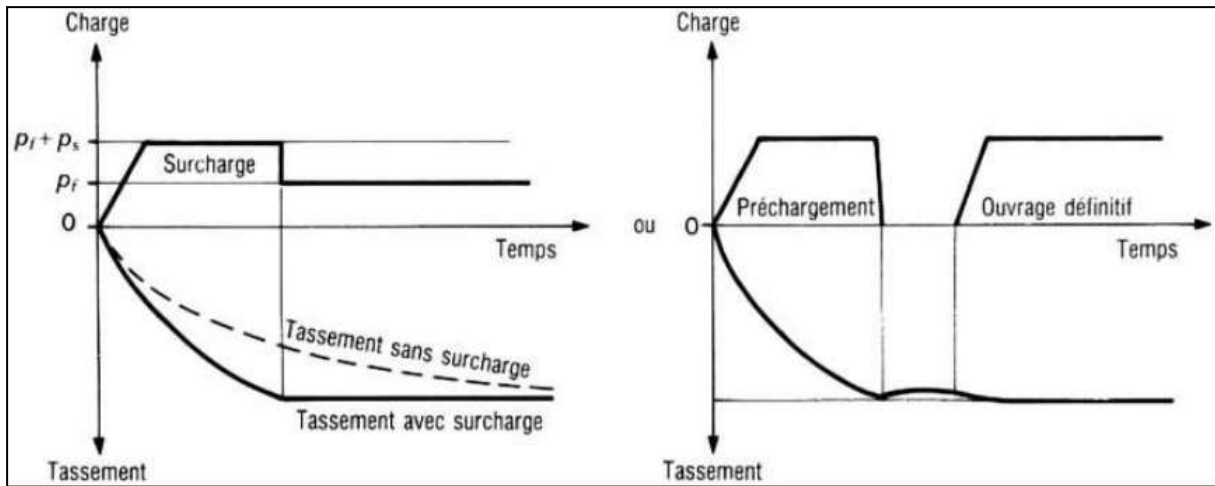


Figure I.2. Principe du pré-chargement pour le contrôle des tassements

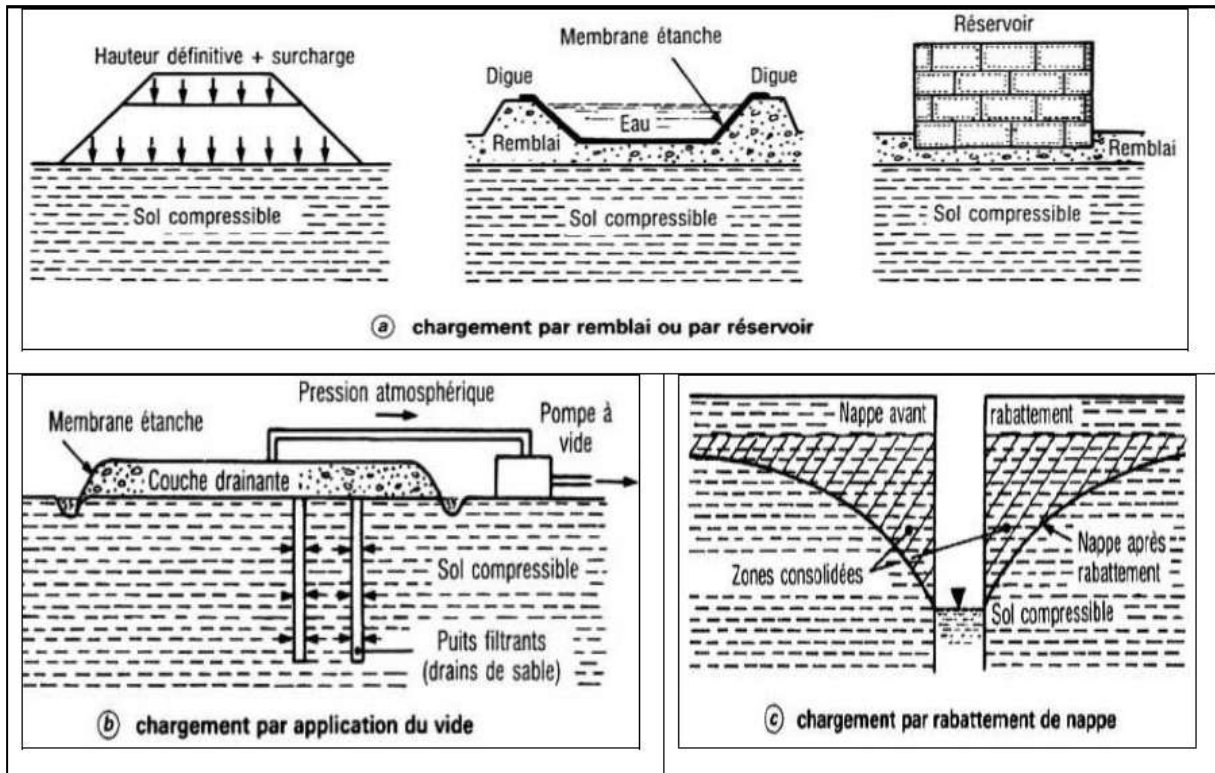


Figure I.3. Techniques de pré-chargement

I.5.2 Accélération de la consolidation

Dans les dépôts de sols fins, les vitesses de consolidation sont en général très faibles parce que l'eau interstitielle doit parcourir un long chemin pour sortir du massif de sol. Il s'ensuit que les tassements peuvent durer pendant de longues périodes (plusieurs mois, années ou dizaines d'années, suivant les sites), ce qui est souvent inacceptable, tant pour les ouvrages définitifs que pour les opérations de pré-chargement. La mise en place de réseaux drainants dans le massif de sol (drains verticaux ou tranchées drainantes) réduit la distance que l'eau doit parcourir pour atteindre une surface drainante et sortir du sol fin, ce qui a un effet très bénéfique sur les temps de consolidation.

La technique de drainage la plus fréquemment employée consiste à mettre en place un maillage régulier (maille triangulaire ou carrée) de drains verticaux (figure I.4).

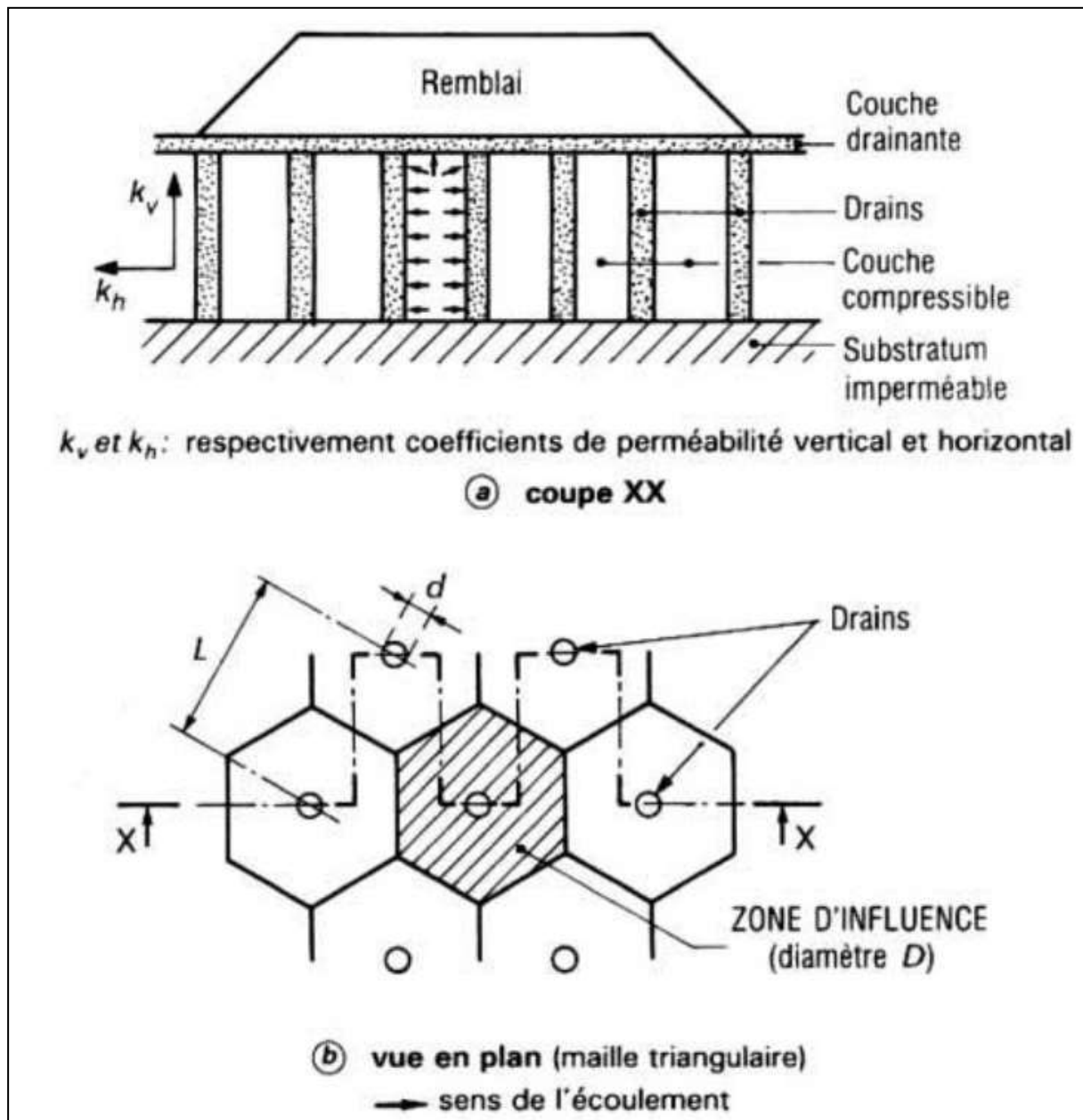


Figure I.4. Réseaux de drains verticaux

Jusqu'au début des années 80, les drains verticaux étaient en général des drains de sable, réalisés par diverses techniques : battage, vibro-fonçage ou lançage d'un tube fermé ou d'un tube ouvert, forage à la tarière pleine ou creuse. Pour un diamètre nominal donné, les drains réalisés par lançage ou par forage à la tarière creuse sont considérés comme les plus efficaces. À partir des années 80, la part des drains préfabriqués en forme de bandes de 10 cm de largeur et quelques millimètres d'épaisseur (figure I.5) a augmenté de façon très rapide. Ces drains comportent, en général, une partie centrale (l'âme) assurant la circulation de l'eau le long du drain et une gaine filtrante en géotextile ou en papier. Une structure unique peut aussi jouer à la fois le rôle de filtre et de canal. Les drains préfabriqués sont habituellement mis en place

par fonçage à l'intérieur d'un mandrin tubulaire, de section toujours supérieure à celle du drain. La longueur des drains peut atteindre plusieurs dizaines de mètres.



Figure I.5 : Drains préfabriqués

Le drainage peut être également réalisé par des tranchées de quelques dizaines de centimètres de largeur et de quelques mètres de profondeur remplies de matériau perméable. Cette technique est plus rarement utilisée.

Les sols traités par des réseaux drainants sont toujours recouverts d'une couche drainante de 0,5 à 1 m d'épaisseur. Cette couche est souvent mise en place avant les drains, pour permettre la circulation des engins sur le chantier. Elle peut être partiellement remplacée par une ou plusieurs nappes de géotextiles.

I.5.3 Renforcement par colonnes :

On peut aussi réduire les tassements et augmenter la stabilité des massifs de sols mous en utilisant différentes techniques de réalisation de colonnes de matériau plus résistant à l'intérieur du sol. Ces colonnes supportent une part importante de la charge appliquée à la surface du sol, ce qui augmente la capacité portante et diminue les tassements. Quand les colonnes sont constituées de matériau drainant, elles jouent également le rôle de drain.

I.5.3.1. Colonnes ballastées :

Leur exécution s'effectue en deux phases (figure I.6) :

- on réalise d'abord un forage jusqu'à la profondeur désirée (10 ou 20 m au maximum) au moyen d'une *aiguille vibrante*, corps cylindrique de 30 à 40 cm de diamètre et de quelques mètres de longueur comportant un vibreur ; cette

aiguille vibrante pénètre dans le sol sous l'action de son propre poids, conjuguée à un lançage en pointe ; le lançage peut être réalisé à l'eau ou à l'air ;

- le forage est ensuite rempli de matériaux grenus à fort angle de frottement interne et la colonne ainsi constituée est compactée grâce au vibreur ; le diamètre de la colonne obtenue dépend de la consistance du terrain qui l'entoure. Il atteint couramment 0,6 à 1 m.

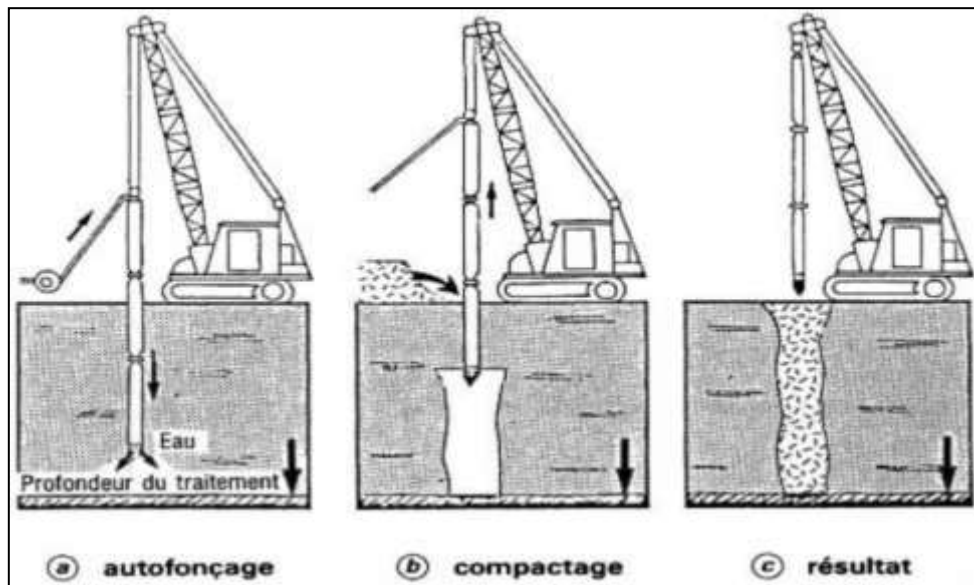


Figure I.6 : Phases d'exécution des colonnes ballastées

La densité des colonnes est adaptée à l'amélioration souhaitée du sol. On dispose en général les colonnes ballastées à raison d'une tous les 1 à 5 m².

En raison de leur coût assez élevé, les colonnes ballastées sont destinées à des traitements localisés : fondations d'ouvrage d'art ou de bâtiment, remblais d'accès à des ouvrages d'art, sols supports de réservoirs, etc.

Une autre méthode de réalisation de colonnes de matériaux frottants, dans des sols mous, tout en compactant le sol à l'entour, consiste à poinçonner le sol avec un pilon de masse élevée et de géométrie adaptée, à remplir l'empreinte de ballast, puis à recommencer le pilonnage, jusqu'à ce que l'on obtienne la colonne désirée (puits ballasté). Dans la pratique, cette technique permet de réaliser des colonnes de 5 à 7 m de profondeur, mais de diamètre plus grand que les colonnes ballastées classiques (de l'ordre de 2,5 m).

I.5.3.2. Colonnes pilonnées :

On peut réaliser des pieux de ballast compacté par la technique des colonnes pilonnées. On enfonce dans le sol un tube creux, que l'on remplit de matériau grenu.

Le matériau est compacté à la base du tube au moyen d'un pilon que l'on lâche dans le tube. Cette technique permet aussi de réaliser des pieux de sable.

I.5.3.3. Colonnes de sol traité en place :

Dans le cas des argiles molles peu consistantes et des limons, on peut réaliser des colonnes de sol traité en place. La technique a été développée pour les argiles sensibles scandinaves, avec un traitement à la chaux. Le mélange de la chaux avec le sol en place se fait au moyen d'une machine de forage équipée d'une tarière spéciale. Les colonnes produites ont un diamètre de 50 cm et une longueur maximale de 15 m (figure I.7).



Figure I.7 : Colonne de sol traité à la chaux

Les colonnes de sol traité à la chaux sont utilisées pour:

- Renforcer les fondations argileuses supports de remblais ou de bâtiments légers ;
- Conforter des glissements de versants naturels ;
- Réaliser des ouvrages de soutènement.

Suivant les besoins, on peut utiliser aussi du ciment, dont la cinétique de prise est différente de celle de la chaux.

Une technique semblable a été développée au Japon, où elle est utilisée principalement pour les travaux de construction portuaire. On a réalisé des colonnes atteignant 1,75 m de diamètre et 60 m de profondeur. Une variante de ces procédés, développée récemment en France, permet de réaliser des colonnes de matériau traité et compacté dotées de résistances élevées sans que l'on ait besoin de charger le massif de sol traité. Cette technique est utilisée, en particulier, pour le traitement des talus instables.

I.5.4 Amélioration temporaire par congélation :

La méthode de renforcement temporaire des sols par congélation, développée principalement pour les matériaux grenus (sables, graviers,), peut être appliquée aux argiles molles et aux limons, lorsqu'aucune autre solution n'est possible. L'effet de la congélation dépend de la température (il augmente quand la température diminue). Par ailleurs, il faut réaliser la congélation le plus rapidement possible pour limiter le gonflement du sol et il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel.

Les techniques de refroidissement utilisées reposent, comme pour les sables et les graviers, sur la circulation d'un fluide froid (azote liquide, habituellement) dans des tubes enfoncés dans le massif de sol.

I.6.Méthodes d'amélioration des sols grenus :

I.6.1. Pré-chargement :

Le pré-chargement des sols grenus s'opère selon les mêmes principes que dans le cas des sols fins. Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs.

I.6.2 Vibro-compactage

Cette technique est utilisée depuis les années trente. Elle consiste à provoquer une vibration entretenue dans le sol au moyen d'une aiguille vibrante (figure I.8). Cette vibration provoque une densification du matériau qui se traduit par l'affaissement du sol autour du vibreur.

Les vibreurs actuellement utilisés comportent, à l'intérieur de l'aiguille vibrante, un ou plusieurs balourds entraînés par un moteur hydraulique ou électrique. Leur puissance est de l'ordre de 75 à 150 kW. L'appareil est suspendu à un engin de levage et s'introduit dans le sol sous l'effet de son propre poids et de la vibration, avec éventuellement un lancement à l'air ou à l'eau, comme dans le cas des colonnes ballastées. L'aiguille vibrante est descendue jusqu'à la base du sol à traiter, puis le vibreur est remonté lentement par une succession de mouvements verticaux. Le compactage est suivi en observant l'énergie consommée par le vibreur. L'opérateur peut modifier la fréquence des vibrations afin d'améliorer l'efficacité du compactage. On peut, dans certains cas, faire un apport de matériaux grenus, notamment pour jouer le rôle de drains en cas de séisme et lutter contre la liquéfaction des sables lâches. En fin de traitement, une finition de surface doit être réalisée, par réglage et compactage superficiel.

Des techniques voisines sont quelquefois employées : vibration de palplanches ou de profilés métalliques divers, par exemple.



Figure I.8. Chantier de vibro-compaction.

I.6.3 Pilonnage

L'application de chocs à la surface d'un massif de sol grenu est un moyen efficace de compactage. Avant le pilonnage, le sol est recouvert d'une couche de matériaux grossiers d'un mètre d'épaisseur au minimum, destinée à éviter un enfoncement trop important du pilon. Le pilon est lâché d'une grue, plusieurs impacts étant réalisés au même endroit. Cette opération est répétée sur toute la surface à traiter, selon un maillage défini au préalable (figure I.9).

Entre les phases de pilonnage, un temps de repos permet la dissipation des surpressions interstitielles créées par les chocs. En fin de chantier, une dernière phase, dite de tapotage, est réalisée pour compacter la surface du sol, désorganisée par les chocs. Les traitements courants sont réalisés avec des pilons de 10 à 20 t tombant de 15 à 20 m de hauteur. On a utilisé sur des chantiers exceptionnels des pilons de 40 t lâchés de 40 m et de 200 t lâchés de 20 m.

Les impacts du pilon induisent des vibrations dont l'effet sur l'environnement doit être pris en compte.



Figure I.9. Chantier de pilonnage.

I.6.4. Compactage statique en profondeur

L'introduction en force de mortier ou de béton spécial (micro-béton) dans un massif de sol meuble, à partir de forages, permet de provoquer la densification du sol naturel sans détruire sa structure ni l'imprégner (figure I.10). Outre la densification de la masse du sol entre les forages, on obtient en plus des colonnes de matériau plus résistant, qui reprennent une partie des charges appliquées au massif de sol. L'injection s'effectue à partir de forages primaires, secondaires et éventuellement tertiaires, selon un maillage adapté au problème à résoudre. Le tube d'injection est descendu dans un forage de diamètre voisin de 10 cm.

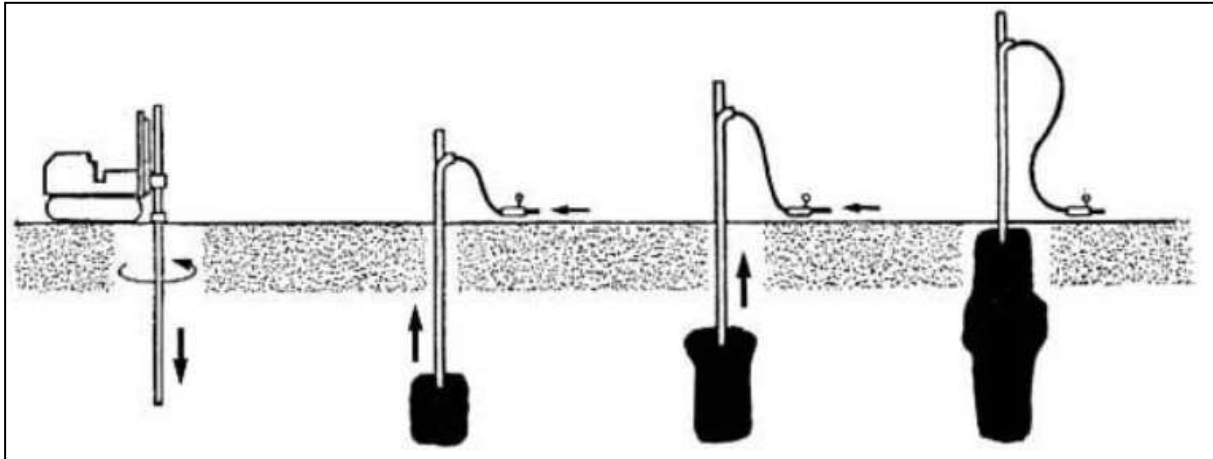


Figure I.10. Principe de compactage statique en profondeur.

I.6.5 Colonnes de sol traité :

Différentes techniques permettent de constituer dans le sol des colonnes de sol traité, en général au ciment. Dans le cas des sols grenus, les techniques de mélange hydrodynamique, souvent appelées *jet grouting*, sont les plus répandues, pour une gamme de sols allant des limons argileux aux alluvions grossières. Dans les applications courantes, on réalise ainsi des colonnes ou des parois de sol-ciment.

La technique de réalisation de colonnes de sol traité par mélange hydrodynamique fait appel, séparément ou en combinaison, à trois phénomènes : déstructuration du terrain sous l'effet dynamique d'un jet de fluide à très grande vitesse, extraction d'une partie du terrain qui remonte en surface avec le fluide, incorporation d'un matériau liant extérieur qui se mélange avec le sol. Différentes méthodes de mise en oeuvre ont été développées (injection simple, injection double et injection triple), avec des performances adaptées aux problèmes à traiter en pratique. On peut réaliser, par ce procédé, des colonnes de plusieurs mètres de diamètre et de plusieurs dizaines de mètres de longueur.

I.6.6. Micropieux

La réalisation de réseaux de Micropieux dans un massif de sols lâches offre une alternative aux autres méthodes de renforcement des sols de ce type, notamment quand les conditions d'exécution des travaux sont contraignantes et ne permettent pas d'utiliser des

matériels encombrants ou des techniques perturbant l'environnement du chantier. Les Micropieux sont réalisés dans des forages de petit diamètre. Ils sont souvent associés à une injection du massif de sol.

I.6.7. Amélioration temporaire par congélation

La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

La congélation est réalisée par circulation de saumure ou d'un gaz réfrigérant (azote liquide, habituellement) dans des tubes mis en place dans le sol à traiter. L'utilisation d'azote liquide permet une progression rapide du front de gel et une plus grande souplesse dans le maintien de la zone gelée.

L'augmentation de volume de l'eau lors de sa transformation en glace peut provoquer des désordres dans le voisinage de la zone traitée et doit être prise en compte lors de l'élaboration du projet de traitement.

I.7. Amélioration de sols particuliers :

Les particularités du comportement mécanique de certains sols de fondation naturels (tourbe, loess, etc.) ou artificiels (déchets industriels ou urbains) rendent nécessaires certaines modifications des méthodes d'amélioration des sols décrites dans les paragraphes précédents, tandis que d'autres méthodes deviennent inopérantes. Les méthodes utilisables en pratique dans ces sols particuliers sont brièvement décrites dans ce qui suit.

I.7.1. Tourbe :

Le mot tourbe peut représenter des matériaux organiques extrêmement divers : tourbe fibreuse, partiellement humifiée ou amorphe, tourbe très humide et compressible des dépôts de surface ou tourbe décomposée et déjà compacte des couches profondes recouvertes par d'autres sols quaternaires plus récents. Ces matériaux ont en commun une déformabilité élevée, avec une part importante de déformation visqueuse, et une résistance au cisaillement faible. Par ailleurs, l'effet de certains liants sur les matières organiques est limité.

En pratique, les méthodes de construction sur les couches de sols tourbeux utilisent les techniques suivantes :

- Substitution partielle ou totale pour les dépôts de surface ;
- Pré-chargement, en essayant d'obtenir par avance une partie au moins des déformations de fluage.

Les drains verticaux permettent d'accélérer la consolidation primaire des dépôts de tourbes comme des autres sols fins, mais leur utilisation ne suffit pas à elle seule pour limiter le tassement secondaire (de fluage). Les méthodes d'amélioration qui supposent que le sol exerce une certaine pression latérale sur des colonnes ne sont pas utilisables dans les dépôts de surface. Pour les couches profondes, certains procédés d'injection pourraient toutefois être employés.

I.7.2 Loess :

Des couches de loess de plusieurs dizaines de mètres existent dans certaines zones arides du monde. En cas d'humidification, qui se produit presque inévitablement lorsque l'on entreprend de mettre en valeur ces territoires, ces couches de loess peuvent s'affaisser soudainement de près de 10 % de leur épaisseur si des travaux d'amélioration ne sont pas exécutés en temps utile. Les méthodes de traitement des sols loessiques affaissables sont variées :

- Compactage des dépôts affaissables par pilonnage en surface ;
- Compactage en profondeur à l'explosif ou par battage ;
- Traitement thermique ;
- Traitement chimique (injection de silicates) ;
- Humidification préalable.

Lorsque les loess ont été humidifiés, ce qui est le cas normal dans les pays d'Europe occidentale, ils se comportent comme des sols fins classiques.

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les différentes techniques d'amélioration des sols (fins, grenus ou particulière). L'application de ces techniques d'amélioration dépend de la granulométrie mais aussi de la résistance des sols à traiter, donc des paramètres mesurés par les divers procédés appliqués en place et/ou en laboratoire.

II.1. Introduction :

Le traitement chimique des sols est un procédé connu et depuis des décennies. Extrêmement écologique et économique, elle a connu un véritable essor ces dernières années, accompagnées d'une hausse des exigences en termes de qualité des travaux et de précision et de fiabilité des liants

Dans ce chapitre, on discute en détaille deux types de traitements chimiques des sols :

- Traitement de sol par la chaux ;
- Traitement de sol par le ciment.

II.2. Traitement des sols à la chaux :

II.2.1 Principe et objectifs :

Elles permettent de mettre en œuvre et de compacter les sols mouillés qui, normalement, ne pourraient pas être compactés correctement. L'incorporation de la chaux génère immédiatement la formation d'une masse granuleuse, et a pour effet de réduire le taux d'humidité.

Ce procédé convient par exemple pour la réalisation de remblais, de talus ou de voies de circulation sur le chantier.

II.2.2. Définition :

La chaux est un produit naturel et biologique, qui respecte l'environnement, la chaux est une matière, généralement, poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée dans le secteur du traitement des sols, et sa qualité a une influence directe sur l'efficacité du traitement des sols. Certaines propriétés de la chaux présentent des avantages particuliers pour les traitements de sols.

II.2.3. Différents types de la chaux

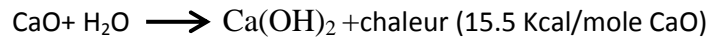
La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs type de chaux :

- Chaux aérienne provenant d'un calcaire pur ;
- Chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium ;
- Chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux (Djaani & benmansour 2011)

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

- Chaux vive :: elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO
- Chaux éteinte (ou hydraté) : elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 . elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique

L'extinction de la chaux vive par l'eau entraîne une pulvérisation très fine du produit



II.2.4. Applications

La stabilisation du sol à la chaux trouve son application dans la construction de routes et chemins de toutes natures. Effectuée dans la zone supérieure de la couche de base ou de la sous couche, cette stabilisation à la chaux utilisée comme technique de construction pour protéger les routes contre les actions du gel ou du dégel

II.2.5. Avantages de la stabilisation à la chaux

- Augmenter la résistance;
- Il est efficace pour les sols ;
- Stabilisation à la chaux augmente la résistance à la compression parfois aussi élevé que 60 fois ;
- Force est généralement améliorée ;
- Le sol devient plus réalisable.

II.2.6. Inconvénients de stabilisation à la chaux :

- La chaux est produite par la combustion de la pierre à chaux dans les fours, de sorte qu'il est nocif pour l'environnement ;
- Il a besoin de plus de frais pour la pierre de chaux vive ;
- Il n'est pas efficace pour les sols sableux ;
- Il y a une limite de la quantité de chaux nécessaire environ 2 à 10% du sol ;

II.3. Traitement des sols au ciment :

II.3.1. Principe et objectifs

Le ciment incorporé au sol va se dissoudre et s'hydrater. L'hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres est suivie par une phase de prise. En s'hydratant, les constituants du liant hydraulique enrobent et relient les grains entre eux: c'est la prise hydraulique. Celle-ci conduit assez rapidement et durablement au durcissement du mélange et à sa stabilité à l'eau et au gel. Ce traitement assure l'augmentation de la portance.

II.3.2. Définition de ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite de réaction et de

processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment agglomère fortement les matériaux inertes incorporés le mélange.

II.3.3 Constituants :

Le ciment est obtenu par le mélange homogène dans certaines proportions des principaux et des constituants secondaires avec du sulfate de calcium la norme européenne relative au ciment définit les constituants suivants :

- ✚ Constituants principaux : Ces constituants sont plus de 95 % de la somme des constituants de ciment:
 - Clinker Portland (K) ;
 - Laitier granulé de haut-fourneau (S) ;
 - Matériaux pouzzolaniques ;
 - Pouzzolane naturelle (P) ;
 - Pouzzolane naturelle calcinée (Q) ;
 - Cendres volantes :
 - Cendre volante siliceuse (V) ;
 - Cendre volante calcique (W).
 - Schiste calciné (T) ;
 - Calcaire (L - LL) ;
 - Fumée de silice (D).
- ✚ Constituants secondaires : Ces constituants sont moins de 5 % de la somme des constituants principaux de ciment:
- ✚ Additifs : sont moins de 1 % de la somme des constituants principaux et secondaires de ciment.
- ✚ Sulfate de calcium (l'addition de cette matière a pour objet de réguler le temps de prise du ciment dans certaines limites).

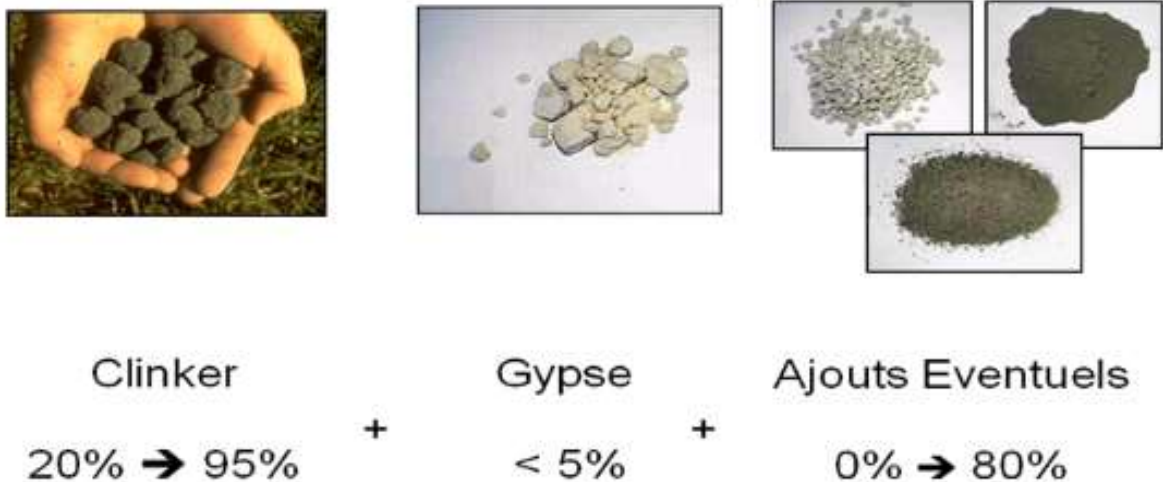


Figure II.1: Les Constituants du ciment.

II.3.4. Type de ciment :

Les ciments selon la norme européenne doivent au moins être désignés par leur type, complété du nombre 32.5, 42.5 ou 52.5 qui désigne la classe de résistance. La classe de résistance à jeune âge est fixée par l'ajout de la lettre N ou R On distingue cinq types de ciments courants :

- **CEM I** :Ciment portland ;
- **CEM II** :Ciment portland composé ;
- **CEM III**:Ciment de haut-fourneau ;
- **CEM IV** : Cimentpouzzolanique ;
- **CEM V**: Ciment composé.

II.3.5. Applications :

La stabilisation de sols au ciment trouve son application tant pour les couches que pour la zone supérieure de la couche de fondation ou de la sous couche de fondation ou de la sous couche de route et chemins de toute nature. On l'utilise également pour d'autres surfaces de circulation, telles que :

- Les chemins ruraux, pistes cyclables ou chemins pour piétons,
- Les aires de trafic sur les aéroports,
- Les sites industriels, les sols de halls,
- Les dalles de fondation,
- Les terrains de sport,

Dans le secteur de la construction ferroviaire, la stabilisation des sols au ciment se pratique par exemple pour réaliser une plat- forme.

II.3.6. Avantages de la stabilisation de ciment :

- Diminuer la plasticité
- Réduire le potentiel de variation de volume
- Augmenter la limite de retrait
- Augmenter la résistance
- Le coût est relativement faible
- Ciment du sol réduit les caractéristiques de gonflement du sol
- Il est très durable
- Il est largement disponible

II.3.7. inconvénients de stabilisation ciment

- des fissures peuvent se forme dans le ciment du sol
- il est nocif pour l'environnement
- il nécessite un travail supplémentaire

II.4. Traitement mixte « chaux-ciment » :

Le traitement mixte consiste en l'utilisation de deux agents de traitement complémentaires:

- Un traitement préalable à la chaux qui floccule les argiles et assèche les matériaux humides, ce qui facilite l'incorporation du liant hydraulique dans des conditions idéales garantissant une bonne homogénéité du mélange;
- Un traitement au ciment qui apporte une rigidification rapide.

Les caractéristiques des sols stabilisés par un traitement mixte dépendent:

- De la nature du sol;
- De la teneur en eau du sol;
- De la présence de certaines substances (la teneur en matières organiques et autres constituants chimiques particuliers);
- Des quantités de chaux et de ciment utilisées.

Le délai entre traitement à la chaux et traitement au ciment dépend de l'organisation du chantier. Entout état de cause, la réactivité et la finesse de la chaux vive routière normalisée sont telles qu'on peut enchaîner deux traitements dans la même journée (en respectant une finition intermédiaire). Letraitement mixte d'une sous-fondation (prétraitement à la chaux suivi d'un traitement au ciment). Le sol traité aprésenté des capacités portantes beaucoup plus élevées que les exigences requises, ainsi qu'une résistance à l'eau et au gel très satisfaisante.

II.5. Modalités d'exécution :

II.5.1. Introduction :

On distingue en principe deux méthodes lors d'un traitement de terres:

- Le malaxage en place de l'agent de traitement (chaux et/ou ciment) dans le sol;
- Le malaxage du sol et de l'agent de traitement dans une installation de malaxage.

Ces deux méthodes se différencient d'une manière générale par les avantages et inconvénients suivants (Tableau II.1):

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients des deux méthodes d'un traitement de terres

Investissement	Le malaxage en place nécessite un plus faible investissement qu'une installation de malaxage.
Manipulation du sol	Le malaxage en place demande moins de manipulations du sol et ne nécessite pas de stockage temporaire des terres excavées et malaxées. Dans le cas d'une installation de malaxage, la terre doit être excavée, transportée vers l'installation et le produit traité doit ensuite être ramené sur chantier.
Formation de poussière	Le malaxage en place peut engendrer la formation de poussière Avec une installation de malaxage, la formation de poussière peut être limitée du fait que l'agent de traitement est directement dosé dans le malaxeur.
Dosage de l'agent de traitement	Dans une installation de malaxage, en particulier du type discontinu (malaxeur séparé) le dosage du sol et de l'agent de traitement permet de mieux maîtriser la phase de malaxage que dans le cas d'un malaxage en place.
Homogénéité du mélange	Dans une installation de malaxage, le contrôle continu de quantités dosées permet de mieux garantir l'homogénéité du mélange que dans le cas du malaxage en place.
Multifonctionnalité	Certaines installations de malaxage peuvent être utilisées pour d'autres applications. Dans le cas d'un traitement en place, certaines machines peuvent être utilisées pour d'autres usages.
Permis d'environnement	Les installations de traitement requièrent souvent l'obtention d'un permis d'environnement; ce qui n'est pas le cas pour le traitement en place.

Comme il apparaît dans le tableau ci-dessus, le choix de la technique de travail dépend de paramètres très différents tels que le domaine d'application, les exigences du cahier des charges, les frais d'investissement, les coûts de fonctionnement, l'environnement, la possibilité d'effectuer des contrôles durant le malaxage, la possibilité de combiner le traitement à d'autres applications, etc. Il convient donc de considérer chaque projet au cas par cas.

Le traitement d'un sol, que ce soit pour une amélioration ou une stabilisation, se fait toujours par couche d'épaisseur appropriée aux possibilités de l'engin de malaxage qui sera utilisé. Cette couche aura éventuellement été ameublie par une scarification préalable.

Les travaux de traitement de sols se caractérisent par la nécessité de mettre en oeuvre une grande variété de matériels et de techniques d'exécution:

- Préparation du sol;
- Epannage;
- Malaxage;
- Aération du mélange;
- Compactage.

II.5.2. Préparation du sol :

Certains sols exigent une préparation avant de pouvoir être traités. Cette préparation du sol peut conditionner la réussite sur le chantier, tant sur le plan économique que technique. Elle permet de:

- Faciliter le travail du malaxeur;
- Modifier l'état hydrique du sol.

On distingue essentiellement les opérations suivantes:

II.5.2.1. Scarification:

Cette opération élimine les gros éléments susceptibles d'entraver le malaxage, ameublir et aérer le sol. Elle permet:

- D'améliorer les rendements des malaxeurs;
- De réduire l'usure des couteaux des appareils;
- D'assécher le sol (si les conditions climatiques sont favorables).

Elle se réalise à l'aide d'un ripper, d'une herse ou d'une charrue (Figure II.2).



Figure II.2 : Scarificateur

II.5.2.2. Humidification:

il s'agit d'une opération très difficile à réaliser car l'arrosage se fait en surface alors qu'on recherche une humidification homogène dans la masse. La méthode la plus courante consiste en:

- Une scarification (Figure II.2);
- Un arrosage à l'aide d'arroseuses de type gravitaire (Figure II.3 (b)), à pression ou à pompe ou un arrosage en profondeur à l'aide d'une arroseuse en-fouisseuse (Figure II.3 (a)) (machine permettant un ajout d'eau avec débit et répartition contrôlés, ce qui améliore la cinétique et

l'homogénéité d'hydratation des matériaux; diminution des pertes d'eau).



Figure II.3 : (a). Arroseuse-enfouisseuse (b). Arroseuse

Certains malaxeurs sont équipés d'une rampe d'injection (raccordée à une citerne d'eau qui accompagne le malaxeur) qui arrose le matériau foisonné dans la masse. Ceci permet de regrouper deux opérations en une.

II.5.2.3. Criblage

Éventuel: pour un malaxage en installation prévue à cet effet, il peut s'avérer nécessaire de procéder à un criblage du sol à traiter afin d'éliminer les gros éléments dont les dimensions sont supérieures à la dimension maximale admissible par l'installation.

II.5.3. Épandage :

On utilise des épandeurs à dosage volumétrique à trémie fermée, autotractés ou remorqués par camion, tracteur agricole ou bulldozer sur chenilles. Ces épandeurs déversent l'agent de traitement à l'arrière (Figure II.4). On distingue:

- Les épandeurs à dosage volumétrique non asservi à la vitesse d'avancement: épandeurs de la première génération, ils se règlent en deux temps. Leur point faible est l'imprécision de l'épandage. Ce type d'épandeur n'est pas à utiliser lorsque le but du traitement est une stabilisation;
- Les épandeurs à dosage volumétrique asservi à la vitesse d'avancement: ce sont les engins les plus répandus. Le dosage est rendu dépendant de la vitesse d'avancement par un asservissement de la vis de répartition à la rotation d'un essieu;
- Les épandeurs à dosage volumétrique asservi à la vitesse d'avancement et à contrôle pondéral: ils se distinguent du modèle précédent par de nombreux perfectionnements (régularisation de l'écoulement de l'agent de traitement, enregistrement des données de fonctionnement, sécurités, etc.) ainsi que par la présence d'un contrôle pondéral embarqué grâce à des pesons

électroniques placés sous la cuve. Le réglage est simplifié et la précision de l'épandage améliorée.



Figure II.4.Épandeur (remorqué par un tracteur, autotracteur sur chenilles).

Le choix d'un épandeur dépend de la précision recherchée ainsi que des caractéristiques particulières telles que: capacité, aptitude à circuler sur des sols difficiles, débit, réglage de la largeur d'épandage, équipements susceptibles de faciliter la conduite, hauteur de chute de l'agent de traitement, indicateurs du niveau de remplissage de la cuve, etc.

II.5.4. Malaxage :

Le malaxage consiste à mélanger l'agent de traitement et le sol afin d'incorporer l'agent de traitement de façon homogène. D'une manière générale, plus les sols sont argileux, plus ils sont difficiles à malaxer (nombre de passes plus élevé, malaxage plus intensif). Toutefois, certains sols très argileux ont pu être malaxés avec succès. Dans ce cas, plusieurs passes de malaxage s'avèrent souvent nécessaires.

Lorsque l'on épand un agent de traitement pulvérulent, il est recommandé de faire suivre l'épandeur le plus près possible par l'engin malaxeur qui incorpore l'agent de traitement à la couche de sol traitée.

Cette mesure permet d'éviter la dispersion de l'additif par le vent et assure une utilisation optimale de celui-ci. Le choix de l'engin de malaxage dépend de la nature du sol, de la taille et du type de chantier.

Il est important de respecter un bon équilibre entre la capacité de malaxage et la capacité disponible de compactage (y compris en ce qui concerne l'épaisseur des couches).

Les malaxeurs à outils fixes consistent en des machines agricoles telles que charrues (Figure II.5), herses, etc. Elles sont utilisées pour un malaxage grossier, acceptable pour des traitements d'amélioration. Avec ces machines, il est difficile de contrôler l'épaisseur de la couche traitée et la qualité du malaxage. Elles peuvent

cependant constituer une alternative relativement bon marché pour les chantiers de petite taille.



Figure II.5. Charrue à disques

II.5.5. Aération du mélange :

En raison de l'action de déshydratation de la chaux, les couches de sol humides traitées à la chaux peuvent être laissées exposées à l'air avant d'être compactées aussi longtemps que le cycle des opérations et les circonstances atmosphériques le permettent (en cas de menace de pluie, le mélange doit cependant être compacté rapidement et sa surface doit être lissée pour limiter l'humidification par la pluie). On compacte au plus tard en fin de journée pour éviter tout risque d'imbibition par les eaux de pluie et pour profiter du début des effets à long terme du traitement. En outre, l'évaporation pendant la nuit est relativement faible.

Le faible délai de maniabilité des ciments impose que les couches de sol traitées soient compactées dans les 2 h qui suivent le malaxage, le matériau ne peut rester exposé à l'air.

II.5.6. Compactage :

Le compactage des matériaux traités suit leur régalage par des engins à lame (bulldozer, niveleuse) en couches d'épaisseur compatible avec les performances des compacteurs et le domaine d'application. Les compacteurs utilisés sont à pneus, vibrants ou à pieds dameurs (Figure II.6).

Le compactage des sols traités, notamment dans les fonds de coffre et fondations/sous-fondations, doit être particulièrement soigné. Cela implique la mise en oeuvre d'une énergie de compactage élevée.

Le compactage peut être contrôlé par une mesure de densité (densitomètres ou gamma-densimètres). L'importance de la couche compactée est contrôlée par l'essai à la plaque ou la sonde de battage.



Figure II.6. Compacteurs

II.6. Principes d'action des produits de traitement sur les sols :

I.6.1. Action de la chaux aérienne :

I.6.1.1 Action immédiates :

+ Modifications de l'état hydrique :

Ces modifications dépendent de la forme (vive, éteinte, lait) sous laquelle la chaux se trouve et de la quantité introduite.

- La chaux vive : provoque un abaissement de la teneur en eau du sol par l'action combinée des deux phénomènes suivants : hydratation de la chaux vive et apport de matière sèche
- La chaux éteinte : agit également sur la teneur en eau, mais cette fois uniquement par le phénomène d'apport de matière sèche, c'est-à-dire que l'abaissement total n'est plus que de l'ordre de 0, 3 % de teneur en eau par pour-cent de chaux éteinte introduite.

+ Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol :

Dès son incorporation dans un sol argileux humide, la chaux agit sur les charges électriques des particules fines et modifie les champs électriques inter-particulaires, ce qui entraîne leur floculation. Cette floculation se traduit géo-techniquement par :

- Une élévation importante de la limite de plasticité du sol sans modification concomitante significative de sa limite de liquidité : Il y a donc réduction de l'indice de plasticité. Ainsi comme indiqué sur la figure II.7 ; si une certaine quantité de chaux vive est introduite dans un sol argileux dont la teneur en eau naturelle w_{nat} se situe dans le domaine plastique, la réduction de l'indice de plasticité qui se produit en concomitance avec celle de la teneur en eau modifie radicalement le comportement du sol. Celui-ci passe brutalement de l'état plastique, c'est-à-dire déformable, collant, à l'état solide, c'est-à-dire

rigide, frottant et fragile. Dans cet état, il devient alors facile à travailler (extraire, charger, décharger, circuler, régaler, compacter, etc.).

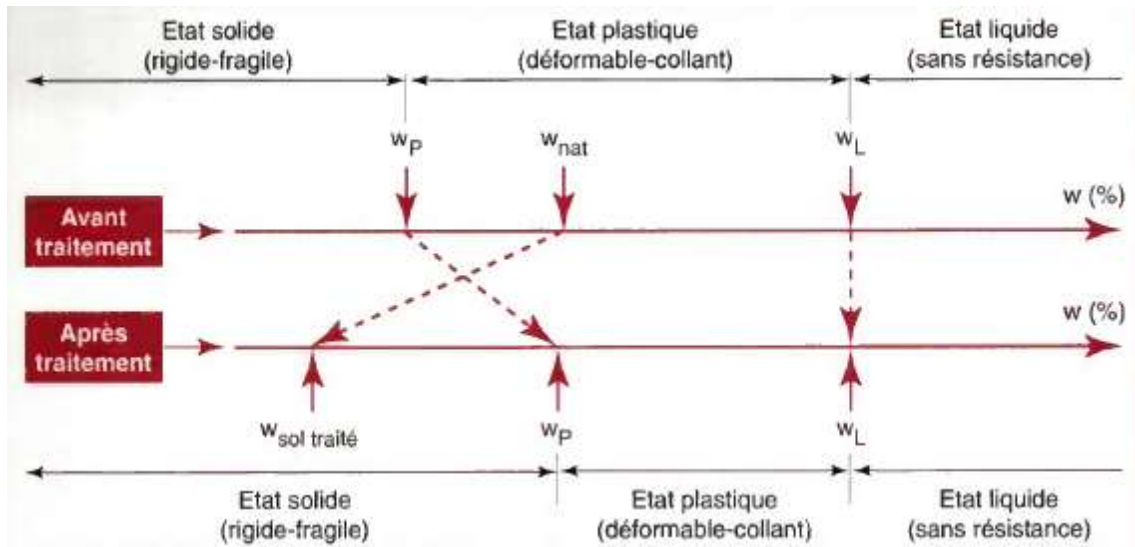


Figure II.7 : Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive.

- Une augmentation de la résistance au cisaillement du sol : Elle s'opère en même temps que le changement d'état décrit précédemment et se traduit par une élévation de l'IPI dont l'ampleur dépend, toutes choses égales par ailleurs, de l'état hydrique du sol avant traitement. Dans le cas du traitement à la chaux vive limité à la réutilisation de sols trop humides, on constate généralement que l'efficacité du traitement est maximale lorsque l'état hydrique du sol se situe aux alentours de 1,1 à 1,3 W_{OPN} (ou, dans le cas de sols fins, lorsque la w_{nat} est voisine de la w_p). En effet, dans ces conditions d'état, on peut en général réutiliser le sol avec des dosages n'excédant pas 1 %. Si l'humidité dépasse sensiblement ces valeurs, les dosages nécessaires croissent alors rapidement car il faut tout d'abord hydrater une quantité de chaux vive importante pour assécher le sol jusqu'à revenir à l'état hydrique évoqué précédemment. Si, au contraire, l'état hydrique du sol est « moyen » et a fortiori « sec », situation qui peut se présenter principalement dans le cas du traitement mixte de sols pour utilisation en couche de forme, l'incorporation de chaux vive (mais aussi éteinte) va conduire également à une forte augmentation de l'IPI, comme le montre la figure II.8. Cette augmentation de la rigidité devient alors un handicap car elle rend le sol traité beaucoup plus difficile à compacter et nécessite de prendre des dispositions particulières telles que : arrosage, sur-compaction, traitement au lait de chaux, etc.
- Une modification des caractéristiques de compactage du sol : Comme le montre la figure II.8, la courbe « Procter » du sol traité s'inscrit en dessous et à droite de celle du sol naturel. Cette tendance s'observe quelle que soit l'énergie de compactage appliquée et est d'autant plus marquée que le sol est argileux. Autrement dit, le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse

volumique apparente sèche pouvant être atteinte pour l'énergie de compactage considérée et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir.

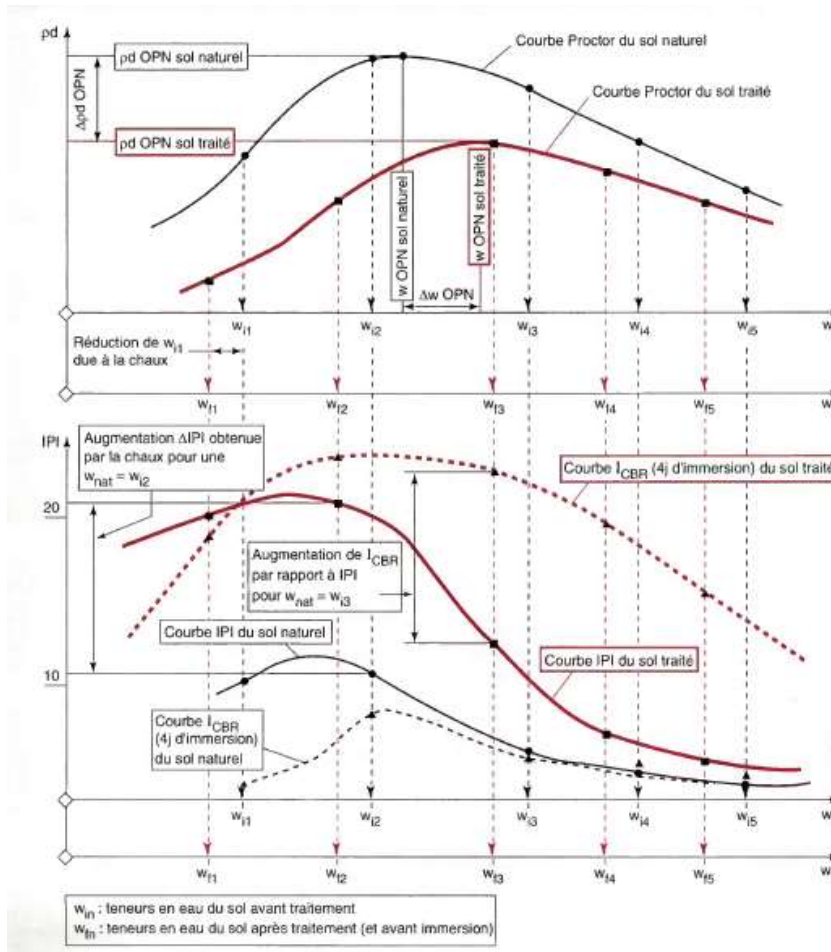


Figure II.8 : Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol de classe A2 traité d 2 % de chaux vive

II.6.1.2. Actions à long terme :

✚ Action pouzzolanique

Cette action se produit entre la chaux et les minéraux argileux présents dans le sol, lorsque leur proportion est significative (I_p mesurable ou VBs > 0,5 g).

On rappelle que le principe de l'action pouzzolanique repose sur la possibilité, en milieu de pH élevé (supérieur à 12), de mise en solution de la silice, de l'alumine, des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées. Ces éléments en solution réagissent ensuite avec la chaux pour former des ferro-silico-aluminates de chaux insolubles qui précipitent et cristallisent en présence d'eau créant ainsi des liaisons de même nature que celles produites avec les liants hydrauliques.

La manifestation de cette action se traduit sur la figure II.8 par l'augmentation de I'_{CBR} après 4 j d'immersion par rapport à l'IPI pour la teneur en eau du sol traité considérée. Son importance dépend, toutes choses égales par ailleurs, de cette teneur en eau.

Action de syntaxie :

Cette action se produit avec les craies et les calcaires tendres saturés (ou proches de la saturation). Son principe peut être décrit simplement de la manière suivante:

- La chaux vive, mélangée à des granulats de matériaux calcaires poreux humides, s'hydrate en provoquant simultanément un abaissement de la teneur en eau libre des granulats et la formation de chaux éteinte,
- La chaux éteinte, ayant une surface spécifique très élevée, peut se répartir à la surface de chaque granulat, à la manière d'une sorte de « pralinage »,
- L'abaissement de teneur en eau produit par l'extinction de la chaux vive et par l'évaporation provoque la précipitation, sous forme de calcite, des carbonates présents en solution saturée dans l'eau libre du granulat. Cette calcite obture les pores des grains augmentant ainsi leur résistance.

L'action de syntaxie explique, en particulier, l'intérêt du traitement à la chaux vive des craies humides en vue de leur utilisation en remblai et en PST. Par ailleurs, comme les actions immédiates, elle ne semble pas être significativement influencée par la température du milieu.

II.6.2. Action de ciment :

Comme pour la chaux aérienne, on peut distinguer également des actions immédiates et des actions à long terme, mais, avec ces produits, ce sont principalement les modifications à moyen et long terme qui sont recherchées.

II.6.2.1. Actions immédiates

Modifications de l'état hydrique

Les actions immédiates portent principalement sur l'état hydrique du sol qui subit un assèchement du fait de l'ajout d'une certaine quantité de matière sèche et, dans une moindre mesure, de la perte d'eau consommée dans l'hydratation de ciment. Cet assèchement qui, selon les dosages appliqués, reste théoriquement de l'ordre de 0,3 à 0,5 % de teneur en eau par pour-cent de ciment, ne prend cependant pas en compte, l'évaporation plus ou moins importante pouvant se produire au cours du malaxage sur le chantier.

✚ Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol

Avec certains ciments spéciaux, il faut également inclure dans les modifications immédiates la floculation des minéraux argileux, comme cela a été décrit pour la chaux (mais sans être ni aussi rapide, ni aussi intense).

II.6.2.2. Actions à moyen et long terme

Elles résultent de la prise hydraulique qui confère aux matériaux traités une résistance en traction qui devient alors prédominante dans leur comportement. La valeur de cette résistance peut être choisie dans un domaine extrêmement large en fonction principalement du liant hydraulique et du dosage retenus.

On peut considérer, en simplifiant, que la prise hydraulique se développe en trois étapes. La durée de chacune d'elles dépend de la nature du liant et de la température du mélange.

- La première étape : est celle du démarrage de la prise (également dénommée : phase dormante). Elle correspond au temps nécessaire à la mise en solution et à la précipitation sous forme de gel des silico-ferro-aluminates de calcium dans l'eau libre du sol. Ce temps qui correspond au « délai de maniabilité » peut varier entre 2 et 24, voire 48 h après fabrication du mélange. Ce délai est très important dans les opérations de traitement de sols, car il fixe la durée possible des opérations de mise en œuvre.
- La deuxième étape : correspond au développement de la cristallisation du gel et donc de la rigidification du mélange provoquant la prise hydraulique proprement dite. Elle s'étend de quelques jours pour les liants à forte proportion de clinker (ciments de type CEM I, par exemple) à quelques semaines pour les liants à prise lente comme certains liants spéciaux routiers.
- Dernière étape : une fois la prise terminée, c'est-à-dire après formation de la quasi-totalité des ferro-silico-aluminates hydratés, il y a une période dite de durcissement qui correspond à la troisième étape durant laquelle on observe une poursuite de la croissance des résistances mécaniques, sa durée peut s'échelonner, toujours suivant la nature des liants et pour les climats tempérés, entre quelques semaines et plusieurs mois.

En traitement de sol, les durées de prise et de durcissement interviennent pour évaluer, d'une part, le temps au bout duquel il est possible de solliciter mécaniquement le matériau traité (notamment la possibilité d'être circulé par les engins de chantier) et, d'autre part, les délais d'étude nécessaires pour caractériser les résistances pouvant être escomptées à long terme avec la formule du mélange retenue.

II.7. Les recherches effectuées sur le traitement chimique des sols :

II.7.1. Traitement à la chaux :

II.7.1.1. Effet de la chaux sur la plasticité :

La chaux est généralement utilisée pour les sols où la plasticité est élevée. Tous les auteurs s'accordent que l'addition de la chaux entraîne une amélioration de la consistance en réduisant l'indice de plasticité qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant à une diminution de la limite de liquidité, cela est prouvé à long terme. Ainsi la surface spécifique est réduite immédiatement après l'incorporation de la chaux à l'issue de la floculation des argiles. Ces résultats ont été confirmés par de nombreux chercheurs (Mellal, 2010).

Les travaux effectués par George et al. (1992) ont permis d'observer que lorsqu'un sol est traité avec la chaux il y a une diminution notable de l'indice de plasticité. De plus, la limite de liquidité présente une augmentation peu marquée que celle de la limite de plasticité (Tableau II.2).

Tableau II.2. influence de la chaux sur les limites d'Atterberg (George et al., 1992).

Type de sol	Chaux (%)	W _L (%)	W _P (%)	I _p (%)
Sol A	0	55.0	30.0	25.0
	6	56.1	39.3	16.8
Sol B	0	26.5	19.4	7.1
	9	28.0	24.5	3.5

Les travaux effectués par Ola (1977), montrent que l'indice de plasticité après addition de 10% de chaux au sol a diminué de 17.8% à 1.3% (Tableau II.3).

Tableau II.3 : Effet de la chaux sur les limites d'atterberg

Chaux (%)	WL(%)	WP(%)	IP(%)
0	36.0	18.2	17.8
2	36.5	22.8	13.7
4	37.2	28.0	9.2
6	38.0	31.8	6.2
8	38.5	36.5	2.0
10	41.5	40.2	1.3

Dans la plupart des cas, l'effet de la chaux sur la plasticité du sol est plus ou moins instantané les ions calcium de la chaux provoquent une diminution de la plasticité et les sols sont de plus en plus friables et plus faciles à manipuler

D'autres chercheurs (Osula, 1991 et Kavak & Akyarli, 2007] ont observé que la limite de liquidité diminue avec l'augmentation de la teneur de la chaux alors que la limite de plasticité augmente.

II.7.1.2 Effet de la chaux sur le compactage

Les caractéristiques de compactage dépendent de deux paramètres, la distribution de la granulométrie des grains et le poids spécifique du sol et des ajouts minéraux stabilisateurs. Ces stabilisateurs réagissent initialement avec le sol pour former des grands agrégats par conséquent ils occupent un grand espace. Cependant, les fines du sol tendent à diminuer la densité sèche, les stabilisateurs (qui tendent à augmenter la densité sèche) compensent les espaces plus grands.

D'après Bell (1996) l'addition de la chaux aux sols argileux augmente leur teneur en eau optimale et réduit leur densité sèche maximale ce qui est conforme avec les résultats de plusieurs chercheurs : George et al 1992, Ola 1977, Gay et Schad 2000, Kavak et Akyarh 2007, Hossain et al 2007, Manasseh et Olufmi 2008. Une densité de compactage plus élevée a été obtenue par l'argile de kaolinite, que pour les argiles expansibles telles que la montmorillonite. Le CBR aussi a été amélioré pour les deux types du sol, avec l'addition de la chaux il augmente immédiatement et continue d'augmenter avec le temps (Tableau II.4).

Tableau II.4. Effet de la chaux sur le compactage, CBR sur la kaolinite et montmorillonite (Bell, 1996).

Matériaux	Teneur en Chaux Optimal (%)	Teneur en Eau Optimal (%)	La densité sèche maximale (Mg/m ³)	CBR (%)
Kaolinite	0	29	1.4	1
	6	31	1.33	14
Montmorillonite	0	20	1.29	9
	4	25	1.15	18

La réduction de la densité sèche maximale est due premièrement, à la formation des particules d'agrégat de sorte qu'elle va occuper un large espace et par conséquent la gradation des sols (Attoh-Okine, 1995). Deuxièmement, la densité spécifique de la chaux est plus faible que la densité spécifique du sol latérique, ce qui a été confirmé par Ola (1977). Troisièmement, l'augmentation de la teneur en eau optimal avec l'augmentation de la chaux est due à l'eau supplémentaire exigée pour les réactions pouzzolaniques (Manassah et Olufmi, 2008).

II.7.2. Traitement au ciment :

II.7.2.1. Effet du ciment sur la plasticité

Le ciment est un autre produit envisageable pour le traitement de certaines catégories des sols considérés comme instables. Le ciment est généralement utilisé pour les sols faibles plasticité, et d'une teneur en eau élevée. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment portland comme stabilisants. Certaines distinctions doivent être identifiées en passant en revue des travaux de recherche effectués à travers le monde sur l'influence du ciment sur la plasticité des sols. Plusieurs chercheurs : Osula 1996, AlRawas et al. 2005, Basha et al. 2005,

Kalkan2006, Eren and Filiz 2009, Sariosseiri and Muhunthan 2009, ont postulé que l'addition du ciment au sol fait diminuer l'indice de plasticité d'une façon remarquable.

De plus, Osula (1996) a montré que l'addition du ciment a engendré une diminution de l'indice de plasticité (Figure II.9). Cette diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration de la maniabilité du sol instable. Une addition de 3% de ciment est suffisante pour augmenter la maniabilité du sol, en réduisant l'indice de plasticité de 21.7% à 12.7 %; Le même comportement est observé par Basha et al. (2005) (Figure II.9 et 10).

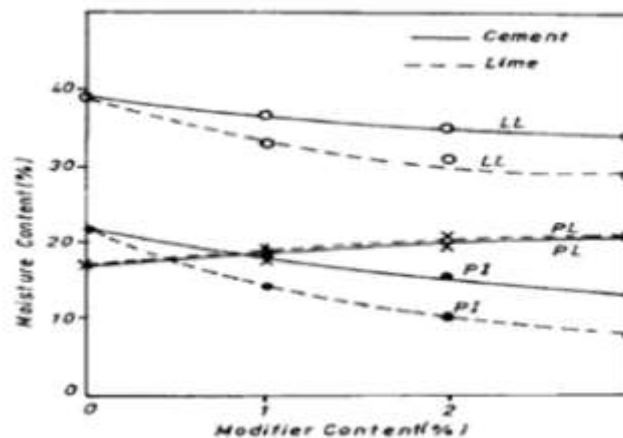


Figure II.9 : Effet du ciment sur les limites d'atterberg (Osula 1996).

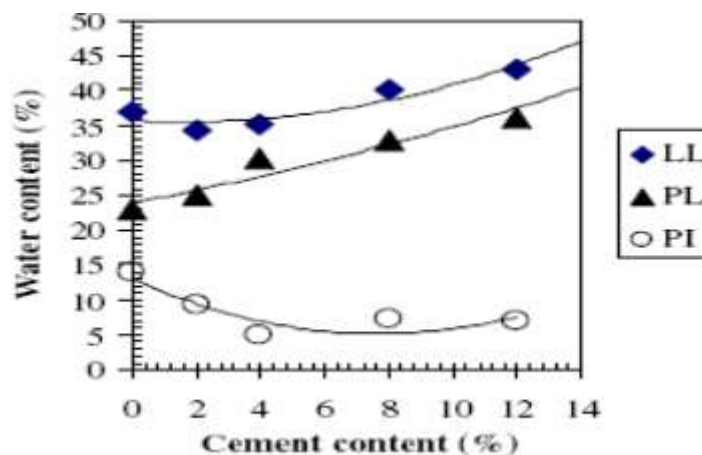


Figure II.10 : Évolution des limites d'Atterberg (basha et al. 2005).

Le processus de stabilisation initié par l'addition du ciment à l'argile engendre plusieurs étapes distinctes à savoir : l'échange cationique, la floculation par cimentation, l'hydratation par cimentation et les réactions pouzzolaniques. Le ciment portland possède des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux, soit celle de l'hydratation en produisant des agents de cimentation.

II.7.2.2. Effet du ciment sur le compactage

Gay et Schah (2000) ont prouvé que l'addition du ciment à un sol argileux de haute plasticité augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale.

La réduction de la densité sèche maximale est due à la floculation et l'agglomération des particules d'argile tandis que l'augmentation de la teneur en eau optimale est due à l'affinité du sol à l'eau nécessaire pour l'hydratation et pour la réaction pouzzolanique. Cependant, les résultats d'Okagbue et al. (2007) montrent que l'addition de 0%, 2%, 6%, et 10% de ciment au sol cause une augmentation de la densité sèche maximale, avec une légère réduction de la teneur en eau optimale. L'augmentation de la densité sèche peut être attribuée par la nature du sol étudié. L'addition du ciment améliore et modifie les caractéristiques du sol, menant encore à un compactage performant avec une augmentation de la densité sèche.

L'agglomération du ciment autour des grains de sol, causes une augmentation de la taille des particules fines, peut aussi avoir une légère réduction de la teneur en eau optimale. C'est parce que l'addition du ciment affecte la distribution des particules du sol en augmentant la taille des particules fines et de ce fait une réduction de l'attraction d'eau (Tableau II.5).

Tableau II.5. Effet de l'ajout du ciment sur le comptage (Okagbue et al.2007).

Ciment (%)	Standard Britannique		Standard.O.A		AASHTO Modifié	
	γ_d max (Mg/m ³)	W _{op} (%)	γ_d max (Mg/m ³)	W _{op} (%)	γ_d max (Mg/m ³)	W _{op} (%)
0	1.30	19.8	1.33	16.3	1.6	15.0
2	1.31	16.7	1.33	15.8	1.44	15.2
6	1.39	19.0	1.41	16.5	1.46	15.0
10	1.41	16.7	1.44	16.2	1.48	12.6

Les résultats de Osula (1996) suggère que la réaction pouzzolanique du mélange "sol-ciment" semble débiter à environ une heure après le malaxage, mais ne contribue pas dans la modification. En outre, la chaux fortement réactive produite dans l'hydratation du ciment devient plus efficace avec le temps qu'avec la teneur de ciment.

II.8. Conclusion :

Ce chapitre présente une recherche bibliographique sur le traitement chimique de sol ; des nombreux chercheurs ont étudié différentes méthodes avec différents ajouts (ciment ou chaux) en vue de stabiliser les sols médiocres.

Les différents résultats trouvés concernant le traitement chimique des sols sont les suivantes :

- Il faut savoir que le traitement à la chaux ne s'applique que sur une épaisseur de terrain extrêmement faible.
- Le traitement au ciment s'applique pour les sols contenant peu ou presque pas d'argile ;
- Les chaux s'utilisent dans des sols ayant une teneur en argile non négligeable. La chaux vive s'utilise plus particulièrement pour les sols argileux qui contenant beaucoup trop d'eau ; la chaux ayant alors un effet de dessiccation par réaction thermique. Dans certains cas, il est possible de procéder par un traitement mixte : chaux puis ciment.
- La chaux doit répondre certains critères granulométriques et chimiques. Elle doit être réactive.

C'est pourquoi nous avons décidé d'étudier l'influence du traitement par la chaux et le ciment sur notre sol.

III.1. Introduction

Quelque soient les objectifs recherchés dans une étude géotechnique, il est de règle d'effectuer initialement l'identification des sols concernés. Cette procédure permet d'orienter les analyses géotechniques ultérieures et surtout d'effectuer une classification des matériaux rencontrés. Les paramètres nécessaires pour cette classification sont aussi bien de natures physico-chimiques et mécaniques.

Ce chapitre est consacré à l'identification des matériaux désirés pour cette étude qui sont le sol, le ciment et la chaux.

III.2. Les essais d'identification de sol utilisé

III.2.1. Introduction :

Le terrain de prélèvement se situe dans la zone dite « HADDADA » à la wilaya de « Jijel ». Non loin du château d'eau. Avec une faible pente orientée SUD-NORD

III.2.2. La teneur en eau de sol (NF P94-050)

III.2.2.1 Introduction

La teneur en eau d'un sol est le paramètre d'état fondamental de son comportement. Elle est définie par le rapport du poids de l'eau au poids des particules solides d'un volume donné de sol. Cette grandeur est noté (w) et exprime en pourcentage. On distingue:

✚ **La teneur en eau pondérale:** définie par

$$Wp = \frac{M_w}{M} * 100$$

- M_w : la masse de l'eau dans l'échantillon;
- M : la masse totale de l'échantillon.

✚ **La teneur en eau gravimétrique:** utilisée en Géotechnique et définie par :

$$w = \frac{M_w}{M_s} * 100$$

- M_s : la masse sèche mesurée après le passage à l'étuve.

- ✚ **La teneur en eau volumique:** qui intègre les variations de volume de l'échantillon et définie par

$$\theta = \frac{V_w}{V} * 100$$

- V_w : le volume de l'eau dans l'échantillon.
- V : le volume total de l'échantillon.

III.2.2.2. Principe de détermination de la teneur en eau

L'objectif de cet essai est la détermination de la teneur en eau d'un sol au laboratoire, pour prévoir son comportement. Elle est déterminée lorsque les conditions de prélèvement sur site, de transport et de conservation de l'échantillon n'ont entraîné aucune modification de celle-ci.

III.2.2.3. Appareillage utilisée :

- Une balance électrique de précision.
- Une étuve électrique.
- Destares.

III.2.2.4. Résultats obtenus

$$w\% = \frac{M_w}{M_d}$$

Où:

- M_w : est la masse d'eau.
- M_d : est la masse de matériau sec

Tableau III.1 : La teneur en eau

Échantillon	$M_{tare}(g)$	$M_h(g)$	$M_d(g)$	W%	$W_{moyenne}(\%)$
01	18	61	52	26.47	28.23
02	18	75	63	26.66	
03	18	68	56	31.57	

D'après le tableau III.1, la teneur en eau de sol étudié égal 28.23 %. Donc, le sol est humide.

III.2.3 Détermination de la masse volumique

III.2.3.1 Définition de la masse volumique

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

III.2.3.2. Appareillage utilisé :

- Un échantillon,
- Éprouvette graduée remplie d'eau
- Une balance électronique.
- Une étuve électrique.

III.2.3.3. Méthode de l'éprouvette graduée

Cette méthode est très simple et très rapide et elle utilise du matériel très courant de laboratoire. Toutefois sa précision est faible.

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau
- Peser un échantillon M de granulats (environ 400g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air
- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 la masse volumique est alors :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_2 - V_1}$$

III.2.3.4. Masse volumique humide (NF P 94-064)

La masse volumique humide ρ_s d'un échantillon de sol est le quotient de sa masse total par volume V qu'il occupe y compris le vide, elle est exprimée en Kg /m³. L'essai consiste à mesurer la masse et le volume d'un échantillon de sol.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_t}$$



Figure III.1 : Essai d'éprouvette graduée.

III.2.3.5. Résultats obtenus :

Le tableau III.2 donne les résultats du poids volumique humide en KN/m³:

Tableau III.2 : le poids volumique de sol étudié

Échantillon	Volume de l'eau (ml)	Volume totale (ml)	Poids volumique (KN/m ³)	γ_s moyen (KN/m ³)
01	1500	185	21.6	21.9
02	1500	180	22.2	

D'après les résultats obtenus, le sol est un sol **tré dense**

III.2.4. Équivalent de sable (NF P18-598)

III.2.4.1. Introduction :

Le sable est un élément très essentiel qui joue un rôle très important dans la composition du béton vis-à-vis des ouvrages en béton armé (les voiles en béton armé, les fondations et les superstructures de différentes constructions.), pour ça il faut être très vigilant dans le choix du sable qui convient et qui a des meilleures caractéristiques qui donnent un béton solide homogène résistant.

III.2.4.2. Le but de l'essai

Cet essai, est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sols utilisés. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sol.

III.2.4.3.Principe

L'essai est effectué sur la proportion 0/5mm du matériau, on level'échantillon et on laisse reposer le tour pendant 20 mn, et on mesure les éléments suivant :

On déduit l'équivalent de sable :

$$ES = h_2/h_1 * 100$$

- Équivalent de sable : ES.
- Hauteur h1 : sable propre + éléments fines.
- Hauteur h2 : sable propre seulement.

III.2.4.4. Appareillage

- Balance électronique de précision
- Éprouvette
- Entonnoir pour l'introduction du sable
- Tube laveur métallique plongeant
- Machine agitatrice
- Règle métallique pour mesure
- Piston taré a masse de 1kg pour la mesure de ES
- Spatule
- Solution lavant destinée à séparer les grains les uns des autres
- Chronomètre
- Tamis de 5 mm

III.2.4.5. Mode opératoire

on tamise le matériau à tester de façon à séparer l'élément sableuse les plus grossiers des particules fin (fraction 0/5) , puis On remplit un éprouvettes de l'eau jusqu'un trait inférieure, puis onverse une masse de sable qui égale a 120g pour chaque cylindre à l'aide de l'entonnoir et on laisse reposer pendant 10 minutes, après ce temps on remplit une fois les éprouvettes avec un peu d'eau et une autre on les agite avec la machine agitatrice , on refait ça jusqu'à atteindre le trait supérieure. Enfin on laisse ce mélange reposé pendant 20 min (figure III.2).

III.2.4.6. Les formules :

- Équivalent de sable à vue ESP : $ESP = \left(\frac{h_2^2}{h_1} \right) \times 100$
 - h_2 : hauteur de sable propre
 - h_1 : hauteur de sable propre des imputées (éléments fins)



Figure III.2 :Échantillon équivalent de sable.

III.2.4.7. résultat obtenu:

Le tableau III.3 présente les lectures pour calculer l'équivalent de sable par piston

Tableau III.3 :Équivalent de sable par piston

Échantillon	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	ESP (%)	La moyenne(%)
01	17	3.5	20.58	
02	3.7	3.7	24.66	22.62

D'après les résultats obtenus, le sol étudié contient des fins **ES=22.62%(n'pas propre)**

III.2.5. Essai au bleu de méthylène(NF P 94-068)

III.2.5.1 Introduction:

La valeur au bleu désigné par VBS est le nombre de grammes de bleu nécessaire pour saturer 100 g de fines inférieur à 0.08 mm. Cet essai est réalisé sur la fraction 0/2 mm ou 0/5 mm et ramené par une règle de proportionnalité à la fraction 0/50.

III.2.5.2. But de l'essai :

Cet essai est utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sol. Il consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans l'échantillon. Pour cela on utilise de bleu de méthylène, substance adsorbée de préférence par les argiles.

III.2.5.3. Principe d'essai :

L'essai au bleu de méthylène permet la détermination de l'activité et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement des quantités de solution de "bleu" et en contrôlant l'adsorption au fur et à mesure. Une goutte de suspension est prélevée et est déposée sur un filtre. L'essai consiste à déterminer l'adsorption maximale obtenue lorsque la tâche est entourée d'une auréole bleu-clair persistante.

III.2.5.4. Appareillage :

- Balance
- Chronomètre ou équivalente indiquant la seconde
- Agitateur mécanique à ailettes ayant une vitesse de rotation couvrant au moins la plage de 400 tr/min à 700 tr/min.
- un récipient cylindrique d'une capacité minimale de 3 000 cm³
- un tamis
- papier filtre blanc
- Eau distillée + pissette
- Bleu de méthylène
- D max du matériau =5mm



Figure III.3 : Appareillage pour essai au bleu de méthylène

III.2.5.5. Mode opératoire

On prépare 100 g de fraction 0/5 mm sèche que l'on met à tremper dans 500 ml d'eau déminéralisé. Le tout est maintenu en agitation permanente au moyen de l'agitateur à ailettes.

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu'atteindre la saturation des particules d'argile. On prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12 mm). Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif ;
- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide teintée de bleu, le test est positif.

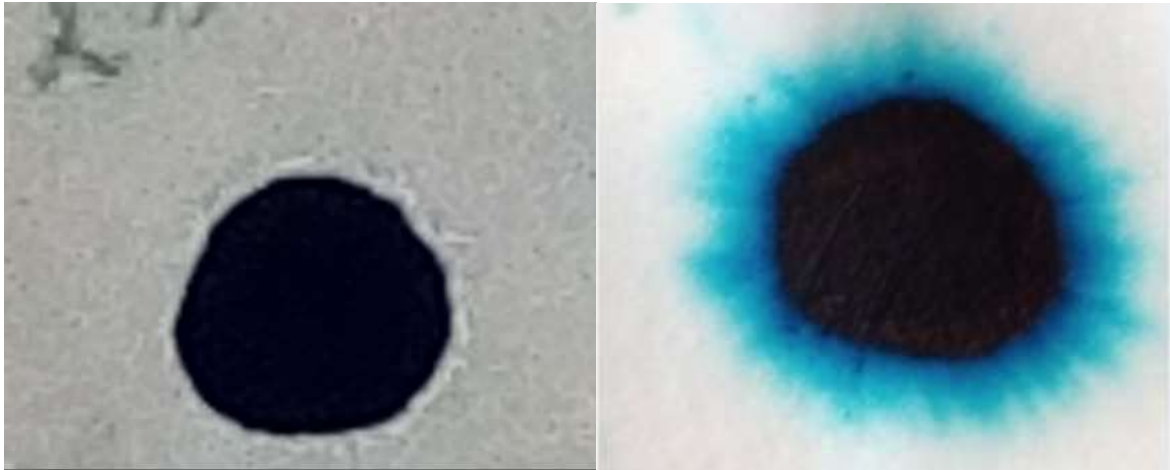


Figure III.4 : Essai de bleu de méthylène à la tache

III.2.5.6. Résultats obtenus:

Les calculs à exécuter sont :

- L'expression du résultat est :

$$VBS = \frac{B}{M} \times 100$$

- Masse de bleu introduite (solution à 10 g/l) :

$$B = V \times 0.01$$

B : masse de bleu introduite dans le bêcher (en gr)

M : masse sèche de la prise d'essai (en gr)

Dans notre sol : **VBS = 7,10**

III.2.5.7. Classification des sols d'après l'essai

La VBS est une grandeur qui exprime globalement la quantité et l'activité de l'argile contenu dans le matériau étudié. Le GTR retient 6 seuils:

- VBS=0.1 : sol insensible à l'eau
- VBS=0.2 : apparition de la sensibilité à l'eau
- VBS=1.5 : seuil distinguant les sols sablo- limoneux des sols sablo-argileux

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

- VBS=2.5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne
- VBS=6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
- VBS=8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux

D'Après les calculs effectués, le sol est un sol argileux.

III.2.6. La limite d'Atterberg (NF P 94-051):

III.2.6.1 Introduction :

En fonction de la teneur en eau, un sol remanié se présente suivant des consistances variables pour lesquelles on peut distinguer quatre états : liquide, plastique, solide avec retrait et solide sans retrait. En réalité, le sol passe graduellement d'un état à un autre et les frontières respectives ne sont définies que conventionnellement par les limites d'Atterberg.

Les limites d'Atterberg sont donc des teneurs en eau qui on les détermine dans laboratoire bien équipé.

III.2.6.2 Définitions:

- **Les limites d'Atterberg:**

Sont des teneurs en eau pondérales, caractéristiques du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action des variations de la teneur en eau. Ces limites sont déterminées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 400 μ m.

- **La limite de liquidité (W_L) :**

Est une valeur de teneur en eau qui indique le passage du sol à l'état liquide, elle est obtenue théoriquement par une fermeture correspondant à N=25chocs.

- **La limite de plasticité (W_P):**

Teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide - le sol est durcit et se fissure.

- **Indice de plasticité (I_P):**

Est une caractéristique du sol, indépendante de sa teneur en eau (cet indice définit l'étude du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité), donné par la relation suivante : $I_P = W_L - W_P$

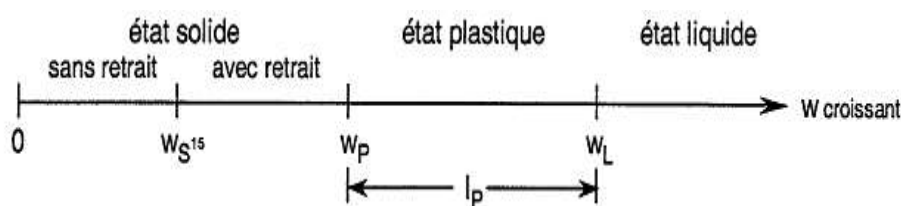


Figure III.5: Représentation des limites d'Atterberg

III.2.6.3. But de l'essai :

Le but de cette essai est la détermination expérimentale de la limite de liquidité (W_L) et de la limite de plasticité (W_P), ainsi que le sol étudié et leurs caractéristiques.

III.2.6.4. Principe de l'essai :

L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande.
- Recherche de la limite de plasticité par formation de rouleaux de 3mm de diamètre.

III.2.6.5. Matériels utilisés :

- Appareille de Casagrande.
- outil a rainuré.
- Coupelle.
- Verres de montres tarés.
- Pissette.
- Spatule.
- Balance électronique.
- Four électrique

III.2.6.6. Mode opératoire :

Les opérations décrites ci-dessous sont à réaliser successivement

Préparation du sol :

Après échantillonnage du sol une masse de matériau m est mise à imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins 24h.

Pour déterminer limite de liquidité W_L :

- Rempli la coupelle de casa grand d'une certaine manière avec l'échantillon.
- Réaliser la rainure au milieu de la couple.
- Soumettre la couple a une série de choc régulier.
- Note le nombre de coups pour la rainure se referme sur 1cm environ.
- Prélever à l'aide de la spatule 1 échantillon au voisinage de l'endroit au la rainure s'est refermée.
- Mesurer la teneur en eau de cet échant ion.



Figure III.6: étapes de l'essai avec l'appareille de Casa grande.

✚ Pour déterminer limite de liquidité W_P :

- Sécher le sol malaxant sur le marbre et en l'étalant.
- Former une boulette avec une partie de l'échantillon puis roule à la main sur la marbre de façon à former un rouleau de 3mm de diamètre et une largeur de 10/15cm environ.
- Si aucune fissure n'apparait, le rouleau est réintégrer à la boulette. la pote est de nouveau malaxée tout en la séchant un peu.
- La limite de plasticité est obtenue quand le rouleau de 3mm sur 15cm et qu'il se fissure lorsqu'on le soulève de 1cm en son centre.
- Effectuer une mesure en eau de a rouleau.



Figure III.7: Détermination de la limite de plasticité.

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

III.2.6.7. Résultats obtenus :

✚ limite de liquidité et de plasticité

Le tableau III.4 : présente les lectures pour calculer la limite de liquidité

Tableau III.4 :Résultat de l'essai limite de liquidité

Nombre de coups	8	11	12	28	32
Limite liquidité (%)	37,33	42,24	36,6	40,55	34,34
Moyenne (%)	38,2145				

D'après le tableau III.4 on peut tracer la courbe suivante (Figure III.8):

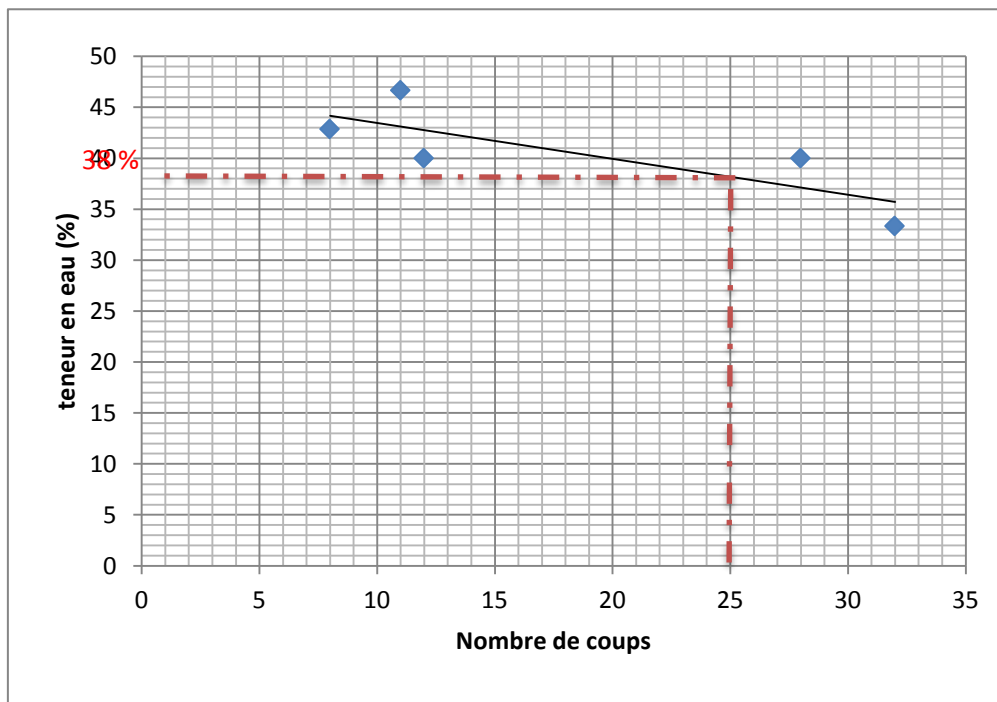


Figure III.8:La courbe de la limite de liquidité

D'après la figure III.8 ; la limite de liquidité égal **38 %**, et d'après l'essai de plasticité la limite de plasticité égal **20,52%**

✚ Indice de plasticité :

$$I_p = W_L - W_P$$

$$I_p = 17,49\%$$

III.2.6.8. Interprétation des résultats:

Le tableau III.5 présente les différentes classifications de sol selon l'indice de plasticité I_p

Tableau III.5 : Classification des sols

Type du sol	Limite de liquidité W_L %	Indice de plasticité I_p %
sable	$W_L < 35$	$I_p < 15$
Limon	$20 < W_L < 60$	$5 < I_p < 25$
argile	$W_L > 30$	$I_p > 15$

Le tableau III.6 présente les différents degrés de plasticité du sol selon l'indice de plasticité I_p .

Tableau III.6 : Degré de plasticité de sol

Indice de plasticité I_p (%)	degré de plasticité
12	Non plastique
12-25	Peu plastique
25-40	Plastique
40	Très plastique

D'après les résultats obtenus, et selon les deux tableaux de classifications le sol étudié est une « **Argile peu plastique** ».

III.2.7. Essais d'analyse granulométrique

III.2.7.1 Tamisage par voie humide (XP P 94-041) :

Introduction :

L'analyse granulométrique d'un sol consiste à déterminer la proportion des diverses classes de grosseur des particules. Il n'existe pas de méthode parfaite pour déterminer la granulométrie; l'exactitude de la méthode dépend de la nature du sol et, plus précisément, de la forme géométrique des particules et du pourcentage des matières organiques qu'elles renferment. L'étude granulométrique des particules permet de déterminer la surface spécifique (m^2/g) du sol, ce qui permet d'estimer sa capacité d'adsorption des métaux et des substances organiques. Elle permet aussi d'estimer la quantité de matières en suspension et la quantité de matières sédimentées lors des travaux de dragage sont effectués.

+ Définition

L'analyse granulométrique se propose de définir la répartition des grains constitutifs d'un sol selon leurs dimensions. On étudie la granulométrie en tamisant le matériau sur une série Normalisée de tamis à mailles carrées. Les grains sont ainsi séparés selon leur taille.

+ Principes du l'essai :

L'essai consiste à séparer par lavage les grains agglomérés d'une échantillon d'une masse connue de matériau puis à les fractionner, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement après séchage le refus cumulé sur chaque tamis.

+ Appareillage

- un dispositif de lavage avec arroseur et, éventuellement, de trempage et de malaxage ;
- un jeu de tamis emboîtables à mailles d'ouvertures carrées
- couvercles et fonds de tamis de diamètre compatible avec celui des tamis ;
- récipients en matériau non altérable, brosse, pinceau,... ;
- balances
- une enceinte thermique ou une étuve



Figure III.9 : Analyse granulométrique par voie humide

+ Le mode opératoire :

- Lavage

Déverser, en une ou plusieurs fois, la totalité du matériau à analyser sur une colonne constituée de tamis d'ouverture de maille croissant de bas en haut et surmontée d'un dispositif arroseur avec :

- un tamis d'ouverture adapté à la dimension des plus gros éléments de la prise d'essai ;
- un tamis inférieur d'ouverture de maille de 80 μm ;

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

- le nombre des tamis intermédiaires et l'ouverture des mailles sont choisis de telle sorte qu'il n'y ait pas surcharge sur les tamis.

Séparer, par brassage manuel combiné à un arrosage, les éléments retenus sur le tamis d'ouverture de maille la plus grande. Lorsque le refus sur le tamis est propre, le tamis est retiré. L'opération est poursuivie sur le tamis inférieur jusqu'à ce que l'eau s'écoulant sous le dernier tamis soit pratiquement claire.

Lorsque malgré le brassage et le brossage, des particules fines adhèrent aux grains, un trempage est nécessaire. Dans cette éventualité, verser la totalité du matériau dans un récipient et brasser avec une quantité d'eau

- Pesage des refus
 - Peser le récipient contenant le refus sur le tamis d'ouverture la plus grande ;
 - Peser les refus cumulés successifs R.
- Séchage

Placer les récipients contenant le refus obtenu sur chaque tamis dans une étuve

✚ Expression des résultats :

- Pourcentage massique de refus :

Le rapport entre la masse R des refus cumulés de matériau sec sur le tamis d'ouverture d à la masse totale initiale de l'échantillon de sol sec (m_s) fournit le pourcentage de refus :

$$r = 100 R / m_s$$

- Pourcentage massique de passant

Ce pourcentage est calculé par l'expression :

$$p = 100 - r$$

- Calcul des facteurs de courbure et d'uniformité

La forme générale et la pente de la courbe peuvent être décrites en fonction du coefficient d'uniformité « C_u » dit aussi coefficient de Hazen, 1930 ou bien le facteur de pente (coefficient de courbature) « C_c ».

- Le facteur de courbure est calculé à partir de :

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

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

- Granulométrie uniforme : grains à peu près de mêmes dimensions
- Granulométrie discontinue: pas de grains dans certains intervalles de dimension.
 - Le facteur d'uniformité est calculé à partir de :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

- D_{60} : Diamètre correspondant à 60% (tamisât) ;
- D_{10} : Diamètre correspondant à 10% (tamisât), Il est appelé aussi « diamètre efficace ».

Tableau III.7 : Description de sol en fonction du coefficient d'uniformité.

Cu	Description de courbe
≤ 2	granulométrie uniforme
> 2	granulométrie étalée

Ce coefficient est donc immédiatement calculé à partir de la courbe granulométrique

✚ Résultats obtenus :

Le tableau III.8 contient le pourcentage massique de passés, en fonction de la série de tamis utilisés

Tableau III.8 : Granulométrie par voie humide

Tamis (mm)	5	4	3.15	2.5	1.6	1	0.63	0.4	0.25	0.16	0.125	0.08
Tamisât (%)	87	84	80	77	75	72	69	67	64	61	59	57

III.2.7.2 analyse granulométrique par sédimentométrie

✚ But de l'essai

L'analyse granulométrique par sédimentométrie permet de déterminer la distribution en poids des particules fines (de diamètre inférieur à 80 μ) d'un sol en fonction de leurs dimensions donc elle complète l'analyse par tamisage. La séparation par décantation consiste à déterminer les diamètres équivalents des particules sphériques en fonction de leur vitesse de chute dans un environnement visqueux afin d'obtenir le tracé d'une courbe Granulométrique pour des particules inférieures à 0,08mm.

✚ Principe de l'essai

Dans un liquide au repos, des grains de diamètres différents sédimentent à des vitesses différentes. La sédimentométrie se base sur la loi de Stokes exprimant la relation entre la

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

vitesse-limite de sédimentation (v) et le diamètre (D) d'une particule solide sphérique. En l'appliquant à des grains de forme quelconque, on n'obtiendra que des diamètres équivalents.

+ Appareillage

- Balance
- Étuve
- Agitateur mécanique
- bac
- Un tamis de 80 μm
- Eau distillée ou déminéralisée et défloculant
- Deux éprouvettes
- Un densimètre gradué de 0.995 à 1.035 g/cm^3 de forme torpille avec des graduations tous les 0.005 g/cm^3
- Thermomètre
- Chronomètre
- thermomètre de la salle d'essai
- Des éprouvettes de 2L de contenance



Figure III.10 : Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie

+ Mode opératoire

Les opérations décrites ci-dessous sont successivement à réaliser dans une salle d'essai dont la température doit être contrôlée. Le tamisât, au tamis de 80 μm , de l'échantillon de sol, préparé selon la NF P 94-056, est recueilli avec son eau de lavage dans un bac, le tout est mis à décanter. Une fois redevenue claire, l'eau du bac est siphonnée sans entrainer d'éléments fins.

Le bac est son contenu sont ensuite placés dans une étuve. Conventionnellement, l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse du matériau contenu dans le bac ne varie pas de plus de 2/1000 entre deux pesées successives effectuées immédiatement après la sortie de l'étuve.

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

Sur le tamisât séché, désagrégé avec le pilon dans le mortier puis homogénéisé, prélever une prise d'essai de 80g (+ ou moins 10g).

Introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique, ajouter 500 cm³ du mélange spéciale et garder à la température ambiante. Laisser imbiber pendant au moins 15 h à la température ambiante. La prise d'essai est dispersée dans la solution d'eau est de défloculant au moyen de l'agitateur mécanique qui doit fonctionner pendant 3min minimum à 10000 tr/min.

Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation, compléter par de l'eau distillée jusqu'à 2000 cm³. Verser 2000 cm³ de la même eau distillée dans une seconde éprouvette témoin et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propre.

Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre ; faire les lectures depuis le début de l'essai aussi longtemps que nécessaire, aux temps suivants : 0.5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 ; 80 ; 240 ; 1440 minute. Faire les lectures du densimètre au sommet du minisque. À partir de 5mn plonger le densimètre avec précaution dans la solution au minimum 30 s avant la mesure (figure III.11).

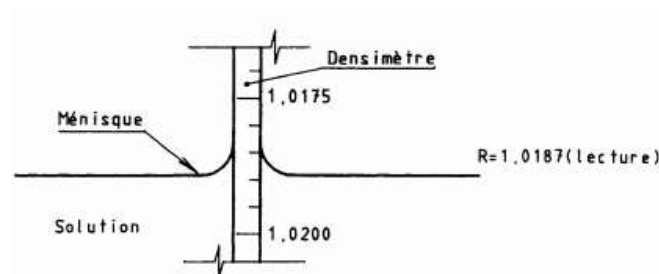


Figure III.11 : Lecture du densimètre

✚ Expression des résultats :

- Le pourcentage d'éléments inférieur ou égaux à D

$$\rho = \frac{V_s}{m} \times \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_e} \times \rho_e \left[\frac{\rho_t}{\rho_e} - 1 \right]$$

- Vs: volume de la suspension ;
- m: la masse de sol sec prélevée ;
- ρ_t : masse volumique de la suspension au temps « t »
- $\rho_t = R_C \times \rho_e = (R + C_m + C_t + C_d) \rho_e$

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

- R_c : lecture corrigée du densimètre à l'instant « t »
- R : lecture du densimètre (sommet de ménisque) à l'instant « t »
- C_m : correction due au ménisque $C_m = n^{-1} \sum_{i=1}^i (R - R')$

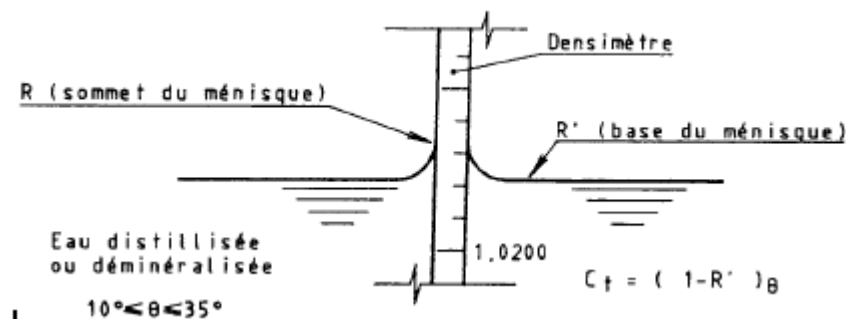


Figure III.12. Lecture corrigé du densimètre.

- C_t : correction due aux variations de température en cours d'essai $C_t = 1 - R'$
- C_d : correction due aux défloculant $C_d = R_1 - R_2$ (avec R_1 lecture de ménisque à l'éprouvette de l'eau et $R_2 = R$ au même temps)
- N : nombre des mesures effectuées.
- Diamètre d'éléments D

De la formule de Stokes, le plus large diamètre des particules solides en suspension dans l'eau à un temps « t » est déduit :

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(\gamma_s - \gamma_e)}} \sqrt{\frac{Ht}{t}}$$

η : La viscosité dynamique de la solution à l'instant « t »

$$\eta = \frac{0.00179}{1 + 0.03368 t + 0.00022 t^2}$$

H_t : Profondeur effective du centre de poussée du densimètre à l'instant « t »

$$H_t = H - [100 H_1 (R + C_m - 1)] - H_c$$

H_c : le déplacement du niveau de la solution lié à l'introduction di densimètre dans l'éprouvette d'essai (Pour calculer H , h et h_1 voir la figure III.12)

$$H_c = 0.5 \frac{V_d}{A}$$

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

avec V_d volume de densimètre et « A » la section droite de l'éprouvette d'essai.

t : temps.

Les particules de sol ayant un diamètre plus grand que D calculé descendent plus bas que la zone de mesure. Ainsi, avec des lectures à l'hydromètre prises à des intervalles de temps variés, le pourcentage des particules plus fines peut être calculé et leur distribution représentée

Résultats obtenus:

Le tableau III.9 contient le pourcentage massique de passés, en fonction de la série de tamis utilisés

Tableau III.9 : Granulométrie par sédimentation

Tamis (μm)	71,12	50,29	35,56	22,53	16,21	11,52	8,18	5,81	3,37	3,04
tamisât (%)	48,81	41,63	35,91	28,48	21,54	15,3	9,78	4,96	1,56	0

La courbe granulométrique:

La distribution de la taille des particules doit être présentée sous forme graphique sur un papier semi-logarithmique sur lequel la taille des particules en millimètres sera portée en abscisse (échelle logarithmique) et leur pourcentage pondéral en ordonnée (figure III.13).

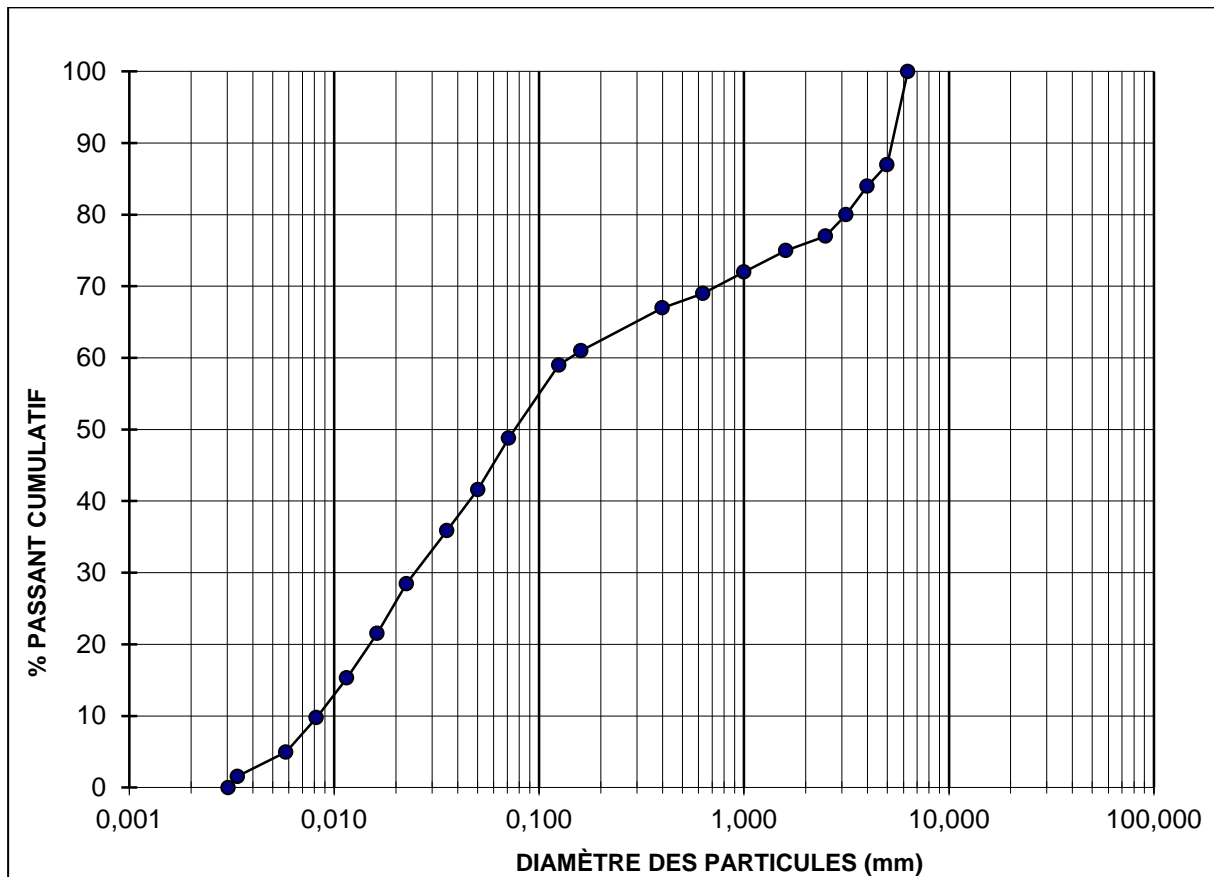


Figure III.13 : Courbe granulométrique

Les diamètres effectifs de la courbe granulométrique sont :

- $D_{10}=0,008$ mm ;
- $D_{30}= 0,025$ mm ;
- $D_{50}= 0,125$ mm ;
- $D_{60}= 0,7$ mm.

Les coefficients de la courbe granulométrique sont :

- $C_u= 3.125$ Courbe étalée
- $C_c= 0,11$ Courbe bien graduée

Selon le **GTR** avec l'utilisation de pourcentage des passantes 80 μ m, valeur de VBS et l'indice de plasticité I_p le sol est classifié par **A₂**(sable fin argileux, limon argileux et marne peu plastique)

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

Selon la classification de LCPC avec l'utilisation de pourcentage des passantes 80 μ m, et l'indice de plasticité I_p , le sol est classifié par "Argile peu plastique"

III.3. Les essais mécaniques de sol étudié :

III.3.1 Proctor normal (NF P 94-093) :

III.3.1.1 But de l'essai

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

III.3.1.2. Définition :

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à accroître la densité en place d'un sol. Il augmente la compacité du sol, donc réduit ses possibilités de déformation et améliore sa capacité portante. Il agit en réduisant presque instantanément le volume du sol, essentiellement par réduction de volume des vides remplis d'air.

III.3.1.3. Principe de l'essai :

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

III.3.1.4. Matériel nécessaire :

- Moule CBR (éventuellement Proctor),
- Dame Proctor normal ,
- Règle à araser,
- Disque d'espacement,
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau,
- Tamis 5 et 20 mm (contrôle et écrêtage le cas échéant de l'échantillon),
- Truelle, spatule, pinceau, etc...
- Éprouvette graduée 150 ml environ,
- Petits récipients (mesures des teneurs en eau),

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

- Balance,
- Étuve.

III.3.1.5. Mode opératoire :

Le matériau à étudier est tamisé « granulométrie < 5mm ».

- Prendre environ **2,5Kg** de matériau
- Ajouter pour chacun une quantité d'eau ;
- Placer la hausse sur le moule et donner 25coups pour chaque couche.
- Compacter le sol en trois **03** couches d'argile à avoir la dernière débordant légèrement le haut de moule.
- Enlever la hausse et araser soigneusement le haut du moule.
- Peser le moule avec le sol.
- On prend de chaque cotés (au-dessus et au-dessous) de ce moule une quantité pour la détermination de la teneur en eau.
- Répéter l'essai pour des teneurs en eau croissante.
- Mettre les tares dans l'étuve pendant 24heures.



Figure III.14:Modeopératoire de l'essai Proctor

III.3.1.6. Les résultats obtenus:

La figure II.15 présente la courbe de compactage et donne les valeurs optimum suivante: $W_{opt} = 16.52\%$ et $\rho_{d\ opt} = 1.17$

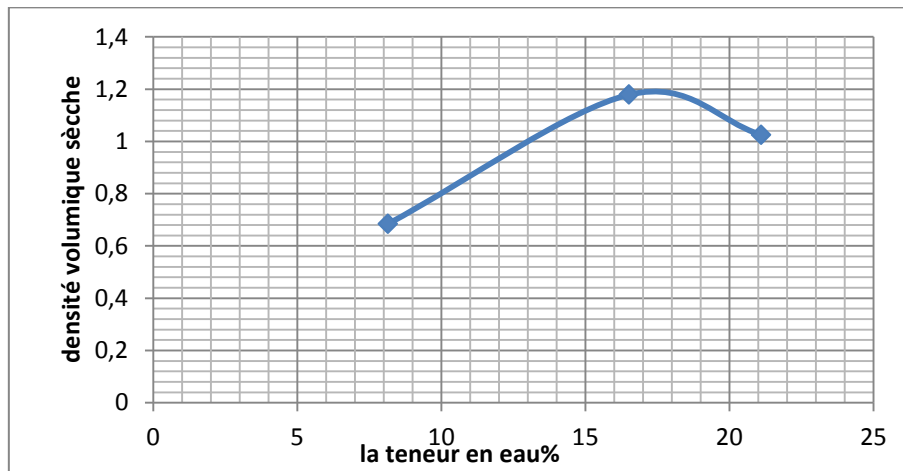


Figure III.15 : Courbe de compactage

III.3.2. Essai œdométrique (NP P 94-091) :

III.3.2.1. But de l'essai :

Le but de l'essai est la détermination des paramètres suivants :

- La contrainte effective verticale de consolidation
- L'indice de compression (chargement, courbe vierge)
- L'indice de gonflement (décharge)
- Le coefficient de consolidation

III.3.2.2. Principe de l'essai :

L'essai s'effectue sur plusieurs éprouvettes provenant d'un même échantillon et prélevées sensiblement au même niveau. Chaque éprouvette de sol est placée dans une enceinte cylindrique rigide (œdomètre) et un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical maintenu constant.

L'essai consiste à appliquer à chaque éprouvette une contrainte verticale différente et à mesurer sa variation de hauteur lorsqu'elle est mise en présence d'eau.

III.3.2.3. Appareillage utilisé :

L'œdomètre comporte les éléments suivants :

- un bâti permettant d'appliquer les pressions de chargement sur les éprouvettes ;
- une cellule dans laquelle l'éprouvette est placée ;
- un système de mesure permettant de connaître les variations de hauteur de l'éprouvette en fonction du temps.

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

La réalisation de l'essai nécessite en outre l'appareillage courant pour l'extraction des échantillons de leur conteneur, la préparation des éprouvettes et la détermination des teneurs en eau et des masses volumiques.

- Bâti

Le bâti, indéformable sous l'effet des efforts appliqués, supporte la cellule œdométrique et maintient sa base horizontale avec une incertitude de 1 % (figure III.16).

- Cellule œdométrique

La cellule œdométrique, en matériaux inertes chimiquement vis-à-vis de l'éprouvette et des fluides qu'elle contient, comporte les éléments suivants :

- une bague œdométrique ou enceinte cylindrique rigide qui reçoit l'éprouvette de sol. Le diamètre intérieur D de la bague ou de la trousse coupante doit être supérieur ou égal à 50 mm et sa hauteur telle que la hauteur initiale de l'éprouvette (H_0) soit comprise entre 10 mm et 0,4 fois son diamètre.
- un réservoir servant de bac d'imbibition muni d'un logement recevant la bague œdométrique ;
- un dispositif permettant de répartir l'effort appliqué sur l'éprouvette de sol par l'intermédiaire d'un disque cylindrique rigide de diamètre très légèrement inférieur à celui de l'éprouvette et coulissant librement dans la hausse surmontant la bague ou la trousse coupante. Dans le cas d'utilisation d'un piston, ce dernier doit posséder en son centre, à sa partie supérieure, un logement pour la rotule transmettant l'effort axial ;
- deux disques drainants rigides (pierres poreuses,...) plans et permettant la circulation des fluides.



Figure III.16 :Appareille d'œdométrique

III.3.2.4. Mode opératoire :

Les opérations décrites ci-dessous sont à réaliser successivement :

- préparer les plaques drainantes
- introduire l'éprouvette dans la cellule
- placer la cellule sur le bâti œdométrique
- régler la position du capteur de mesure de déplacement vertical
- et noter la valeur d'origine
- remplir la cellule d'eau déminéralisée
- appliquer l'effort N sur la partie supérieure de la cellule
- entamer le déchargement par intervalle de 24 heures
- mesure le déplacement verticale jusqu' à stabilisation
- arrêter le chargement des que le sol est consolidé
- entamer le déchargement jusqu' à atteindre le poids mort dusystème d'application
- peser l'éprouvette
- déterminer sa teneur en eau
- déterminer sa teneur en eau finale
- faire les lectures depuis le début de l'essai, aux temps suivants : 1 min — 5 min — 30 min — 1 h — 2h — 4h — 8h — 24 h.

III.3.2.5. Résultats obtenus:

La figure III.17 montre la courbe de compressibilité du sol étudié ; le coefficient de compressibilité égal 0,294 et le coefficient de gonflement égal 0,082 la contrainte de consolidation égal 2,25 Kg/m².

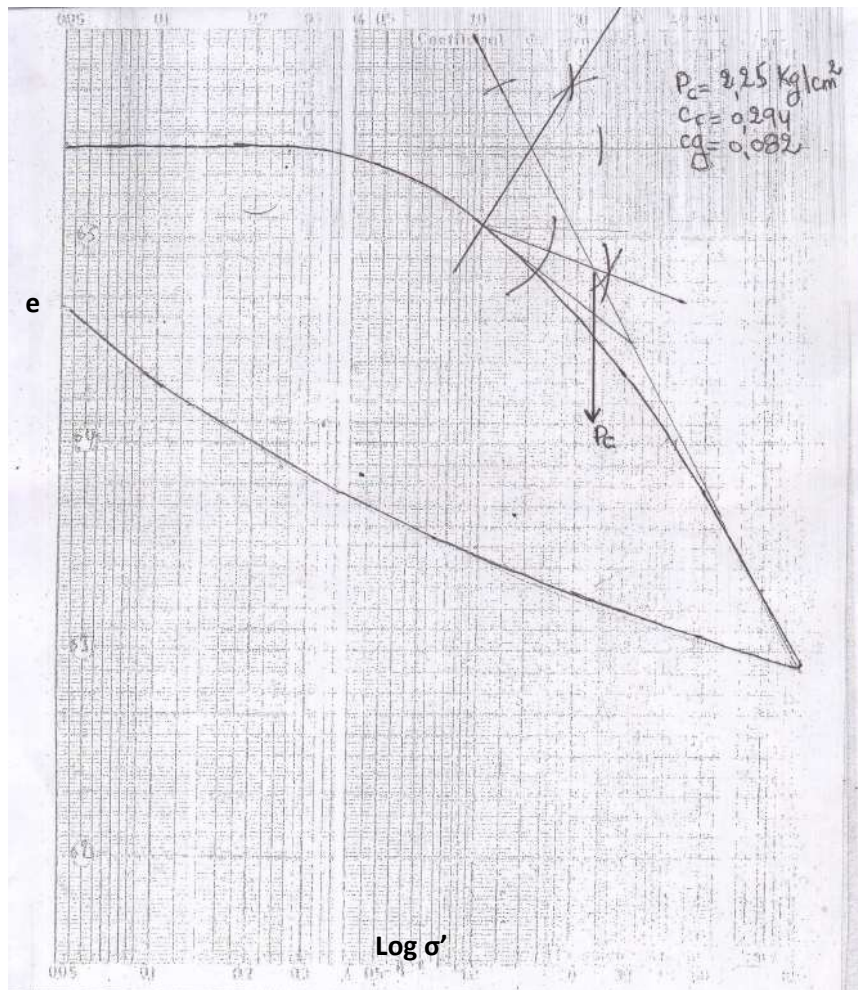


Figure III.17 Courbe de compressibilité.

III.3.3. Essai de CBR

III.3.3.1. Introduction

L'essai CBR (California Bearing Ratio) proposé en 1938, est universellement utilisé pour apprécier la résistance des sols supports de chaussée.

L'essai permet de déterminer la résistance de sol à la rupture par l'essai C.B.R et en obtient l'indice portant qui est le nombre exprimant le rapport de pression sur l'échantillon à la pression obtenue sur terrain par suite et grâce à des abaques on peut déterminer l'épaisseur de la couche de fondation nécessaire à la construction d'une chaussée.

Avant d'effectuer n'importe quel essai C.B.R., il faut faire un essai Proctor modifié pour déterminer la teneur en eau optimum qui sera la teneur en eau de compactage dans l'essai C.B.R.

L'essai C.B.R. consiste à mesurer la résistance au poinçonnement des sols dans des conditions bien déterminées.

III.3.3.2. But de l'essai :

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

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

- Déterminer l'aptitude des matériaux à supporter les charges.
- Déterminer expérimentalement les indices portant (IPI)
- Déterminer expérimentalement les indices (I_{CBR})

III.3.3.3. Principe de l'essai :

Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

III.3.3.4. Appareillage :

- le moule CBR ;
- les dames ou machines de compactage Proctor normal
- l'ensemble des accessoires (plaque de base, rehausse, disque d'espacement, règle à araser,...) ;
- Le matériel d'usage courant (balances, étuve, bacs,...).
- Presse équipé de poinçon cylindrique et de plusieurs dispositifs de mesuré
- Les surcharges



Figure III.19 :Appareillage de l'essai CBR

III.3.3.5. Exécution de l'essai

L'essai C.B.R sur un matériau doit être toujours précédé d'un essai Proctor modifié, qui permette d'obtenir la teneur en eau optimum (W_{OPT}) utilisés comme teneur en eau de compactage dans l'essai C.B.R Préparation et compactage des échantillons.

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

La préparation et le compactage des éprouvettes de l'essai C.B.R se fait de la même manière que dans l'essai Proctor modifié. Dans ce qui suit, nous allons utiliser l'éprouvette de l'essai Proctor modifié qui à la teneur en eau la plus proche de celle de l'optimum.

Placer l'ensemble embase, moule, éprouvette sur la presse, en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et procéder au poinçonnement de la manière suivante :

- Mettre en contact la surface supérieure de l'éprouvette avec le piston ;
- Initialiser les dispositifs de mesure des forces et des enfoncements ;
- Exécuter le poinçonnement en maintenant la vitesse de pénétration à $1,27 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$;
- établir la courbe effort-déformation correspondant, au moins, aux enfoncements de 1,25 mm ; 2 mm ; 2,5 mm ; 5 mm ; 7,5 mm et 10 mm ;
- déterminer la teneur en eau de l'éprouvette selon une des méthodes normalisées.

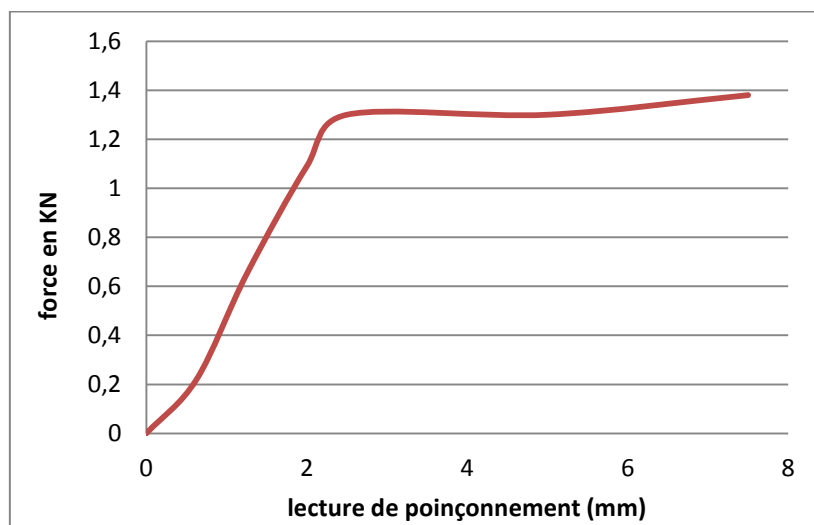
III.3.3.6. Calculs et résultats :

On calcule les valeurs suivantes ; le maximum entre ces dernières valeurs est l'indice portant immédiat « IPI » :

$$\frac{\text{effort de pénétration à 2.5mm d'enfoncement(en KN)}}{13.35} \times 100$$

$$\frac{\text{effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement(en KN)}}{19.93} \times 100$$

La figure III.20 montre la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement.



CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

Figure III.20. Courbe de l'essai CBR du sol étudié.

D'après la courbe de l'essai CBR, l'indice portant immédiat égal :

$$\text{IPI}=9.73\%$$

III.4. Caractéristiques physico-chimiques de la chaux utilisée:

III.4.1. Nom chimique :

Hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$

III.4.2. Caractéristiques physiques :

Le tableau III.10 montre les caractéristiques physiques de la chaux utilisée.

Tableau III.10 Caractéristiques physique de la chaux.

Finesse	68.52%	<300 μm
	51.82%	<200 μm
	42%	<150 μm
	38.02%	<125 μm
	31.61 %	<100 μm
	23.98%	<80 μm
Densité apparente	0.91 g/ cm ³	
Etat physique	solide	
Aspect	Fine poudre blanche inodore	

III.4.3. Caractéristiques chimiques :

Le tableau III.11 montre les caractéristiques chimiques de la chaux utilisée.

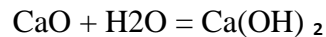
Tableau III.11 Caractéristiques chimiques de la chaux.

Hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ soluble	81.80 %
PH	12
Humidité	< 1%
Carbonate de calcium CaCO_3	18.47%
Dioxyde de carbone CO_2	8.14%

III.4.4. Méthode de production :

CHAPITRE III : Le sol étudié et traitement utilisé

La chaux vive résulte de la cuisson à environ 1100 -1200° C de pierres calcaires qui devient avec l'eau de la chaux hydratée (éteinte) :



Elle est obtenue en faisant agir de l'eau sur la chaux vive ou en laissant cette dernière à l'air.

III.4.5. Conditions de stockage :

- Conserver au sec.
- Stocker de façon isolée à l'abri de l'humidité.

III.5. Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ciment utilisé:

III.5.1. Définition :

Le ciment CPJ-CEM II/A 42,5 est un ciment Portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

III.5.2. Composition :

Le ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 est constitué de: 80 à 94% de clinker Portland. 6 à 20% maximum d'ajouts (calcaire pur). Constituants secondaires (0 à 5% sulfate de calcium comme régulateur de prise).

III.5.3 caractéristiques mécaniques

Le tableau III.11 présente les caractéristiques mécaniques, le ciment utilisé répond aux exigences de la norme NA 442- 2000.

Tableau III.11 Les caractéristiques mécaniques de ciment utilisé.

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES		CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	
Norme NA 442	Ciment ECDE	Norme NA 442	Ciment ECDE
Sulfates SO ₃ ≤ 3.5 %	SO ₃ ≤ 2.00 %	Début de prise ≥ 60 mn	Début de prise > 60 mn
Chlorures Cl ⁻ ≤ 0.1 %	Cl ⁻ ≤ 0.08 %	Stabilité à chaud ≤ 10mm	Stabilité à chaud < 7mm
		Retrait 28j ≤ 1000 µm/m	Retrait 28j < 650 µm/m

III.5.3.1 Évolution des résistances à la compression :

Les résistances mécaniques à la compression, mesurées sur éprouvettes de mortier normal à 28 jours d'âge conformément à la norme NA 234 donnent les résultats suivants:

- Limite inférieure (Li) : $\geq 42.5 \text{ Newtons/mm}^2$
- Limite supérieure (Ls) : $\leq 62.5 \text{ Newtons/mm}^2$

III.5.3.2. Valeurs limites garanties:

- A 02 jours d'âge : $10.0 \text{ Newtons/mm}^2$
- A 28 jours d'âge : $40.0 \text{ Newtons/mm}^2$

III.6. Conclusion :

Ce chapitre a pour but de présenter dans son ensemble notre démarche expérimentale ainsi que les moyens mis en œuvre et les protocoles développés pour atteindre les objectifs de ce travail, à savoir évaluer les propriétés mécaniques du sol utilisé en fonction des différents paramètres d'identification géotechniques du sol rencontré (classification, granulométrie, quantité des fines, teneur en eau et poids volumiquesetc.). Nous avons aussi étudié les propriétés physiques et mécaniques de la chaux et de ciment

IV.1. Introduction :

Ce chapitre a pour but de voir le comportement physique de sol traité par l'ajout des différents pourcentages de la chaux ou du ciment (2, 3 et 4%), et faire une comparaison entre les deux types du traitement.

Deux types d'essais effectués pour atteindre cet objectif : les essais de limite d'Atterberg et les essais de California Bearing Ratio « CBR » dans le temps (immédiat et après sept jours de traitement).

IV.2. L'essai de limite d'Atterberg :

IV.2.1. Traitement à la chaux :

Il y a une relation entre la sensibilité du sol à l'eau avec les limites de consistance des sols argileux. À cet effet, nous allons étudier l'influence des différents pourcentages de chaux sur les limites d'Atterberg de notre sol étudié.

IV.2.1.1. L'ajout de 2% de chaux :

La figure IV.1 montre la variation de la teneur en eau en fonction de nombre de coups à l'échelle semi- logarithmique:

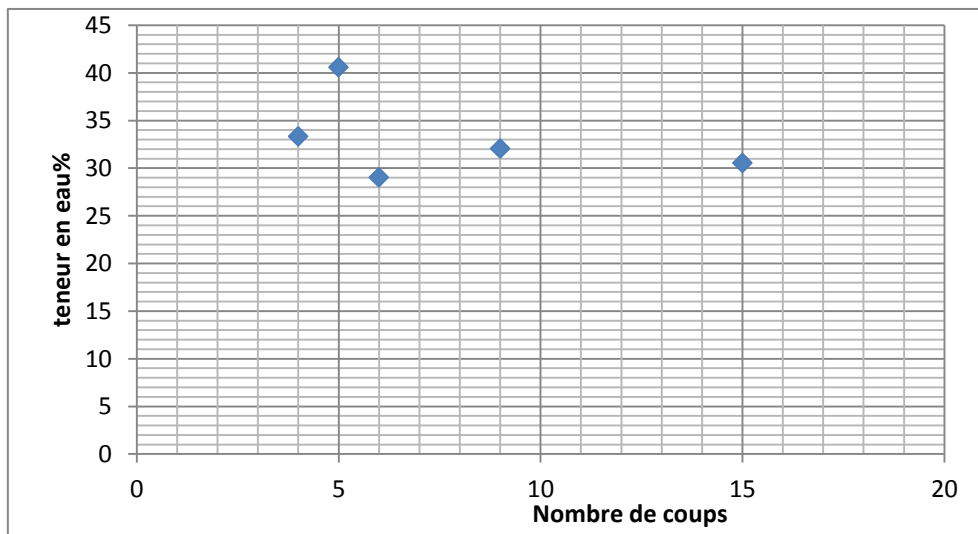


Figure IV.1 : Courbe de la limite de liquidité.

D'après la courbe de la limite de liquidité, $W_L = 28,7 \%$. L'essai de la limite de plasticité donne $W_p = 20,90\%$, donc l'indice de plasticité « I_p » égal $7,8 \%$.

IV.2.1.2. L'ajout de 3% de chaux :

La figure IV.2 montre la variation de la teneur en eau en fonction de nombre de coups à l'échelle semi-logarithmique :

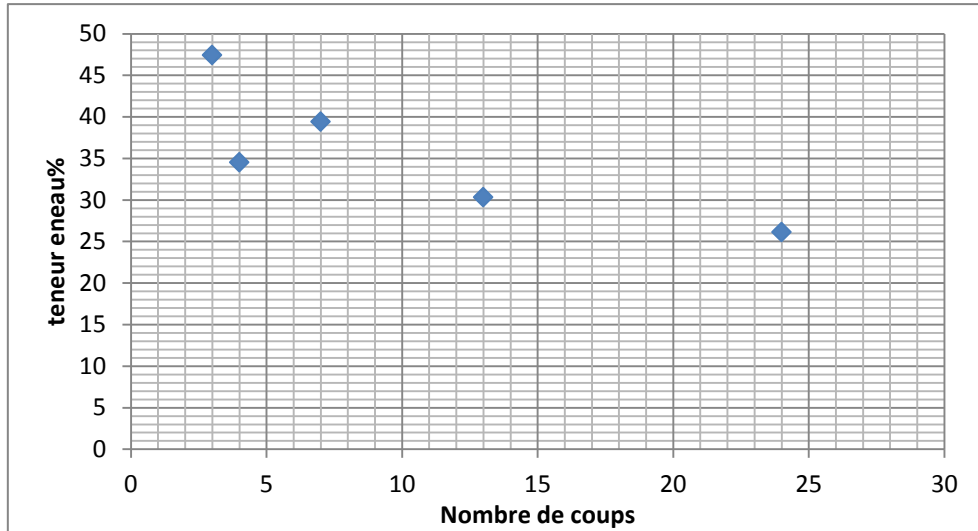


Figure IV.2 : Courbe de la limite de liquidité.

D'après la courbe de la limite de liquidité, $W_L = 27,4 \%$. L'essai de la limite de plasticité donne $W_p = 21,02\%$, donc l'indice de plasticité « I_p » égal $6,38 \%$.

IV.2.1.3. L'ajout de 4% de chaux :

La figure IV.3 montre la variation de la teneur en eau en fonction de nombre de coups à l'échelle semi-logarithmique :

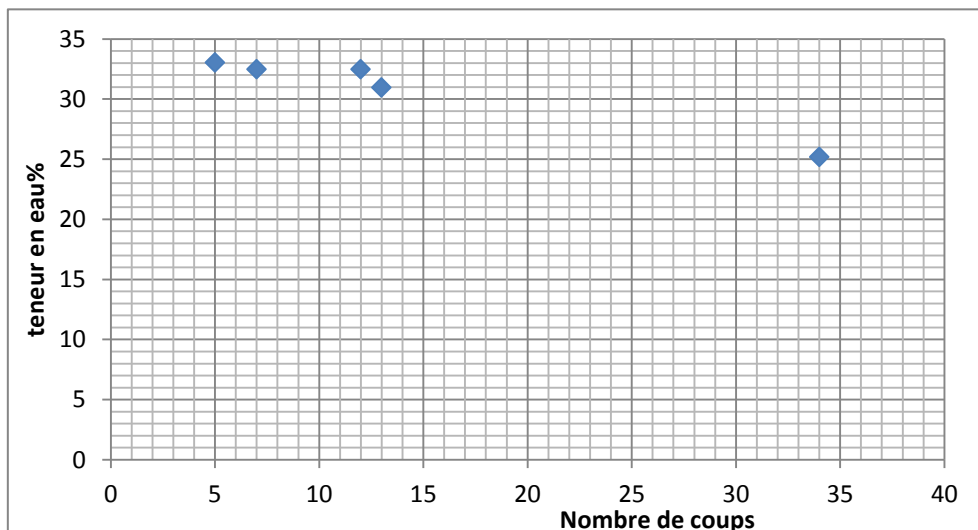


Figure IV.3 : Courbe de la limite de liquidité.

D'après la courbe de la limite de liquidité, $W_L = 27,61 \%$. L'essai de la limite de plasticité donne $W_p = 21,45\%$, donc l'indice de plasticité « I_p » égal $6,16 \%$.

IV.2.1.4. Récapitulatifs des résultats obtenus:

La figure IV.4 montre la variation de la limite de liquidité en fonction des différents pourcentages de chaux (2%, 3% et 4%).

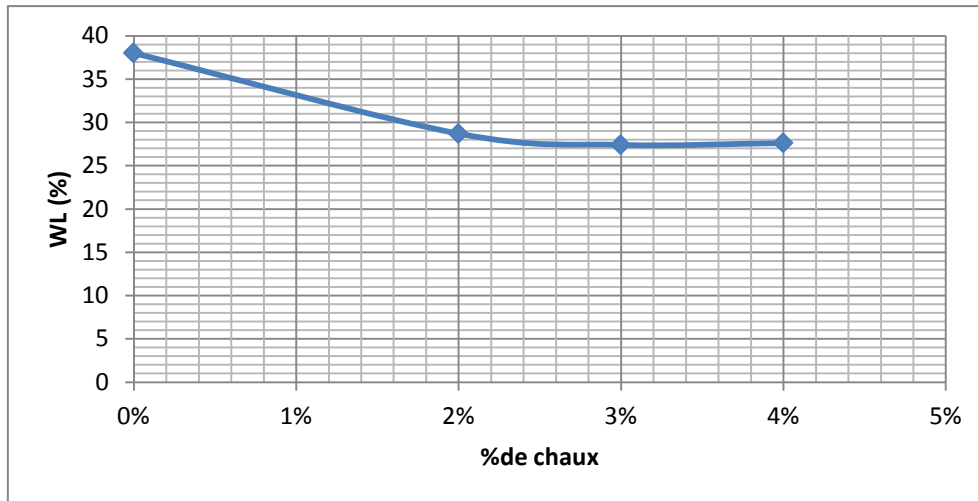


Figure IV.4 : La variation de la limite de liquidité en fonction de % de la chaux

Selon la figure IV.4 les limites de liquidités varient inversement avec l'augmentation du pourcentage de la chaux.

Selon la figure IV.5, les limites de plasticités varient presque linéairement avec l'augmentation du pourcentage de chaux.

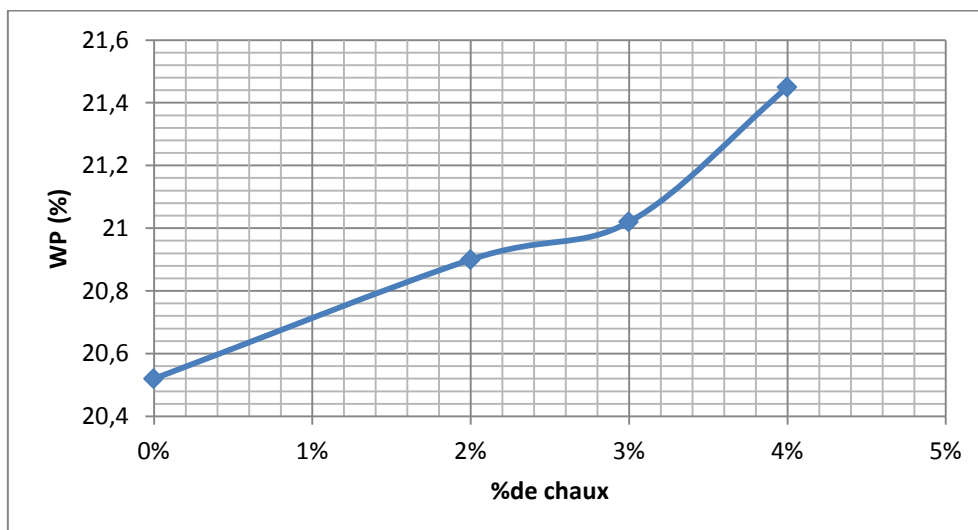


Figure IV.5 : Variation de la limite de plasticité en fonction du % de chaux

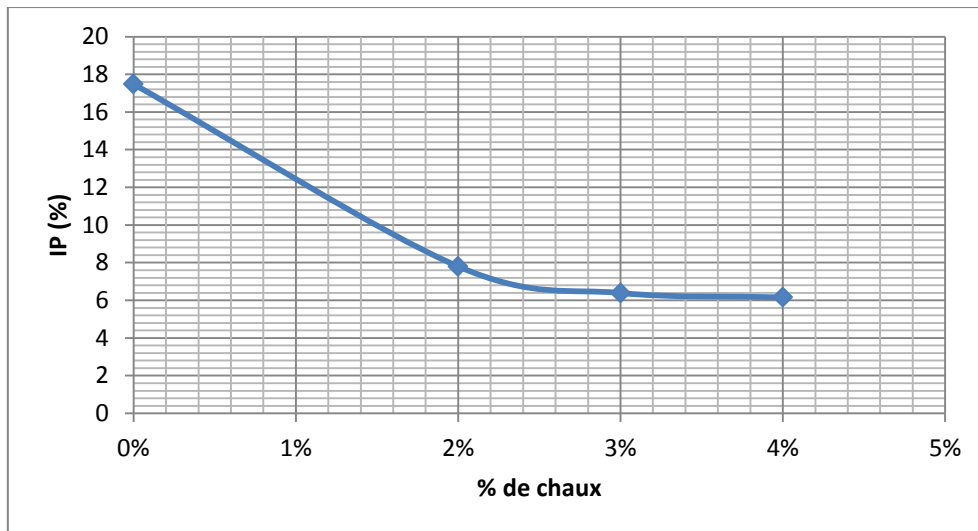


Figure IV.6 : Variation de l'indice de plasticité en fonction de % de chaux

D'après les résultats trouvés, on peut dire que l'addition de la chaux à notre type de sol avec les pourcentages 2, 3 et 4% implique une réduction de plasticité, donc une diminution de la sensibilité à l'eau. L'addition de la chaux peut faire passer un sol de l'état plastique (déformable et collant) à l'état sec (rigide, frottant, friable - donc beaucoup plus facile à travailler). La réaction chimique de la chaux avec le sol est la cause principale de cette modification d'état ; Les mêmes résultats sont constatés par nombreux chercheurs cités dans le chapitre II.

IV.2.2. Traitement au ciment :

IV.2.2.1. L'ajout de 2% ciment:

La figure IV.7 montre la variation de la teneur en eau en fonction de nombre de coups à l'échelle semi-logarithmique :

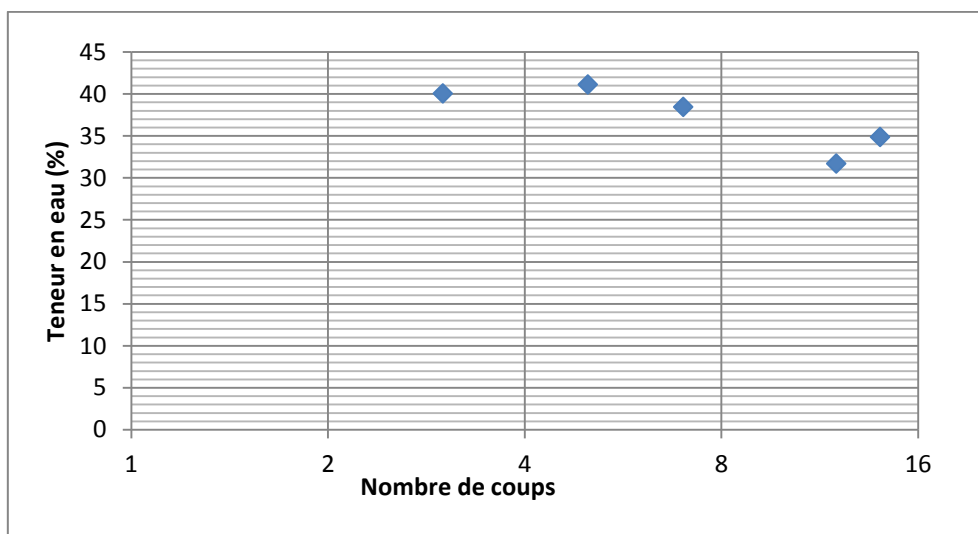


Figure IV.7 : la courbe limite de liquidité de 2% ciment.

D'après la courbe de la limite de liquidité, $WL = 24,98 \%$. L'essai de la limite de plasticité donne $Wp = 20,30\%$, donc l'indice de plasticité « I_p » égal $4,68 \%$.

IV.2.2.2. L'ajout de 3% ciment:

La figure IV.8 montre la variation de la teneur en eau en fonction de nombre de coups à l'échelle semi-logarithmique :

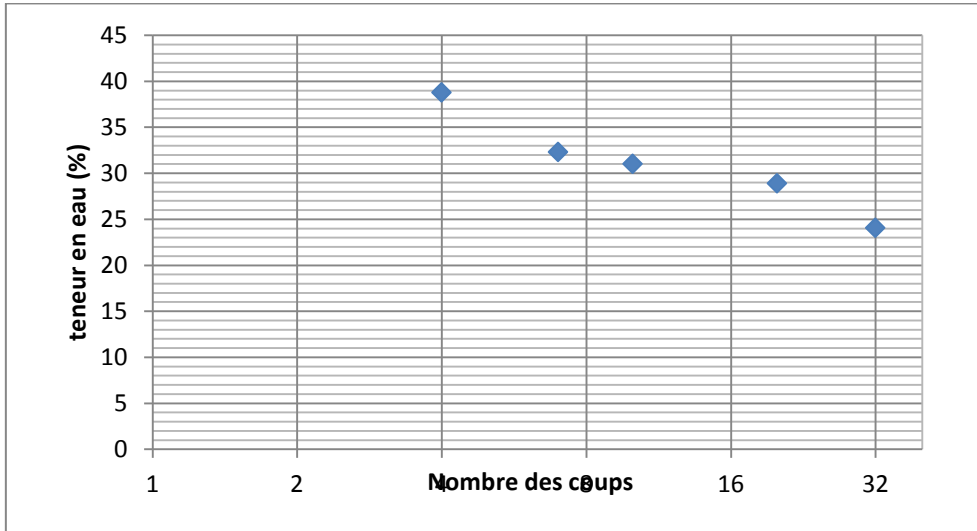


Figure IV.8 : la courbe de la limite de liquidité de 3% ciment.

D'après la courbe de la limite de liquidité, $WL = 26,55 \%$. L'essai de la limite de plasticité donne $Wp = 20,95\%$, donc l'indice de plasticité « I_p » égal $5,6 \%$.

IV.2.2.3. L'ajout de 4% ciment:

La figure IV.9 montre la variation de la teneur en eau en fonction de nombre de coups à l'échelle semi-logarithmique :

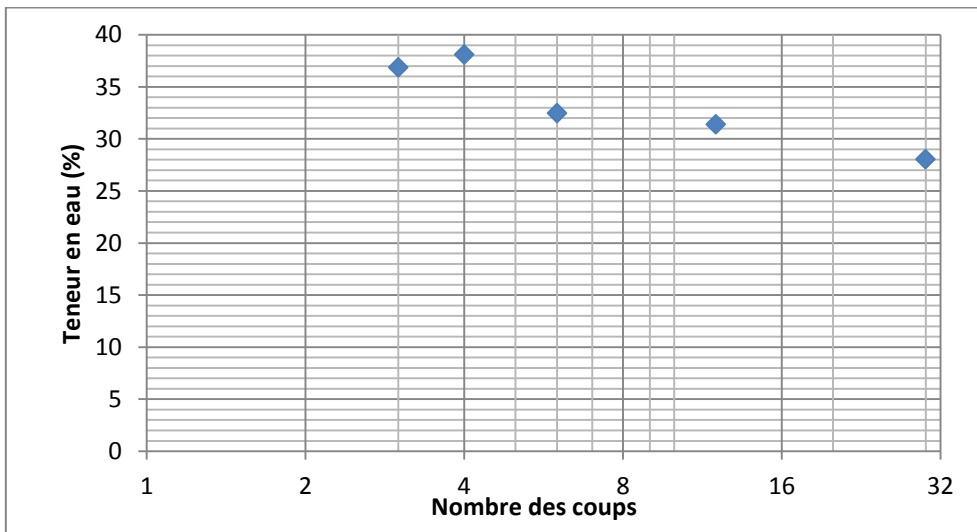


Figure IV.9 : la courbe de la limite de liquidité de 4% ciment.

D'après la courbe de la limite de liquidité, $WL = 28,89 \%$. L'essai de la limite de plasticité donne $Wp = 21,30\%$, donc l'indice de plasticité « I_p » égal $7,59 \%$.

IV.2.2.4. Récapitulatifs des résultats obtenus:

La figure IV.10 montre la variation de la limite de liquidité en fonction des différents pourcentages de ciment (2%, 3% et 4%).

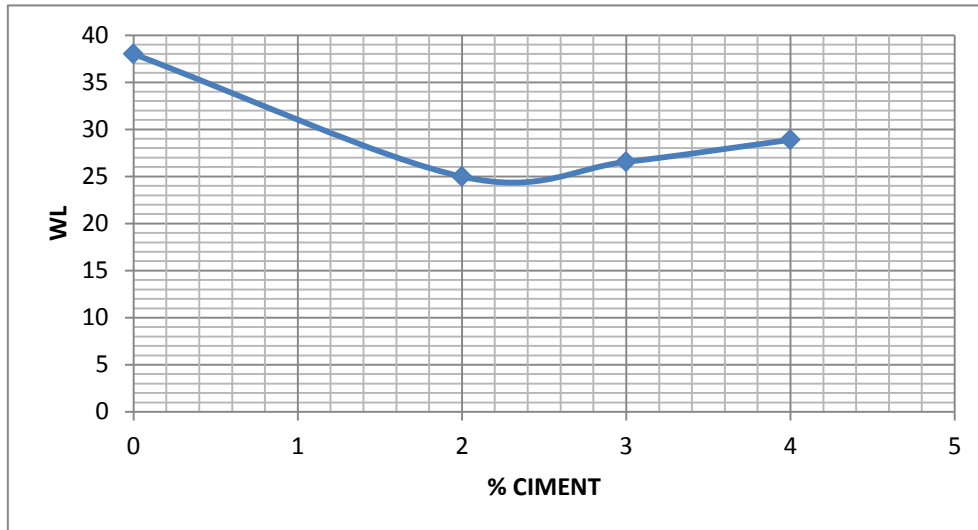


Figure IV.10 : la courbe de la limite de liquidité en fonction de % ciment.

Selon la figure IV.10 les limites de liquidités varient inversement avec l'augmentation du pourcentage du ciment. L'effet d'hydratation de ciment est la cause principale de cette réduction.

Selon la figure IV.11, les limites de plasticités augmentent et varient presque linéairement avec l'augmentation du pourcentage de ciment. (Sauf 2%)

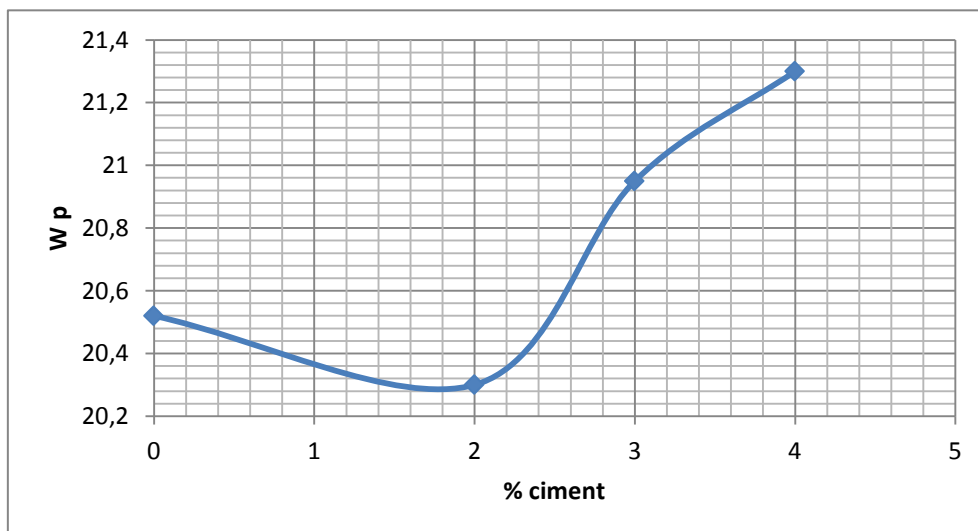


Figure IV.11 : La courbe de limite de plasticité en fonction de % ciment.

Selon la figure IV.11, les indices de plasticités varient inversement et presque linéairement avec l'augmentation du pourcentage de ciment. (Sauf 2%)

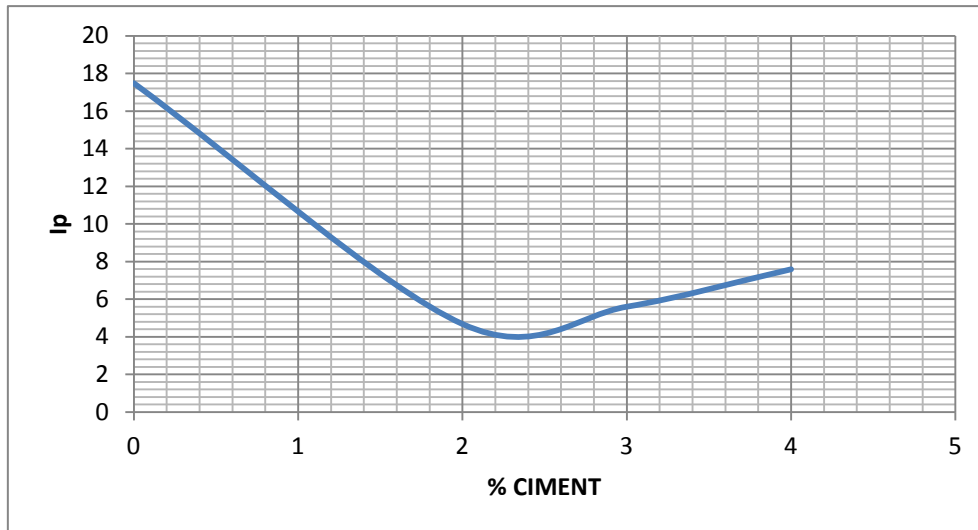


Figure IV.12 la courbe de l'indice de plasticité en fonction de dosage ciment.

D'après les résultats trouvés, on peut dire que l'addition du ciment à notre type de sol avec les pourcentages 2, 3 et 4% implique une réduction de plasticité, donc une diminution de la sensibilité à l'eau. L'addition du ciment a engendré une diminution de l'indice de plasticité. Cette diminution indique une amélioration de la maniabilité du sol non traité. Plus, nous avons noté qu'une addition de 4% de ciment est suffisante pour augmenter la maniabilité du sol, en réduisant l'indice de plasticité de 17,49% de sol non traité à 7% après traitement. La réaction chimique du ciment avec le sol est la cause principale de cette modification d'état ; Les mêmes résultats sont constatés par nombreux chercheurs cités dans le chapitre II (Osula (1996), Basha et al. (2005)etc).

IV.3. Étude de la portance immédiate (Essai CBR Immédiat):

Les tests de CBR ont été exécutés sur des échantillons traités à la chaux ou au ciment avec les pourcentages de 2, 3 et 4%.

IV.3.1. Traitement de la chaux :

IV.3.1.1. L'ajout de 2% chaux:

La figure IV.13 représente la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 22.77%.

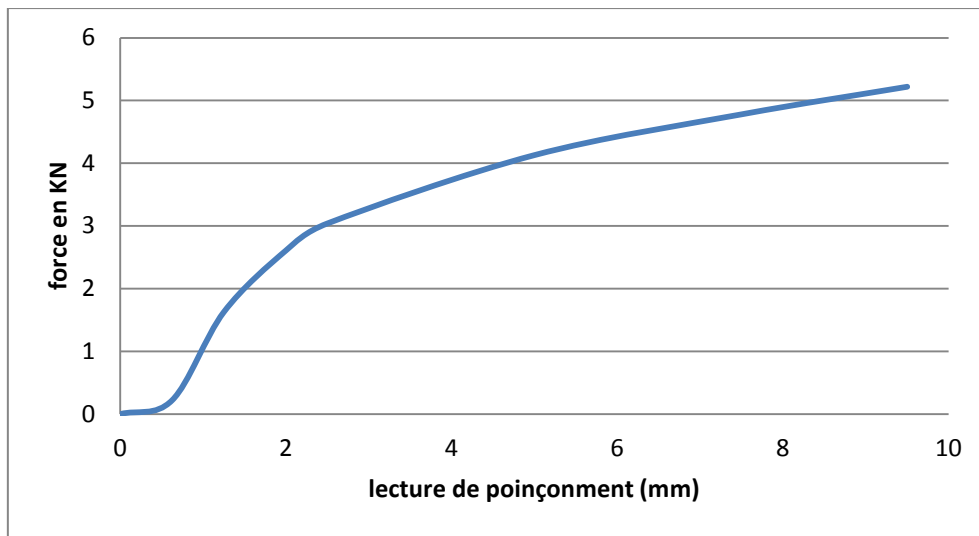


Figure IV.13 : Courbe de la portance IPI (2% chaux).

IV.3.1.2. L'ajout de 3% chaux:

La figure IV.14 représente la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 18.72%.

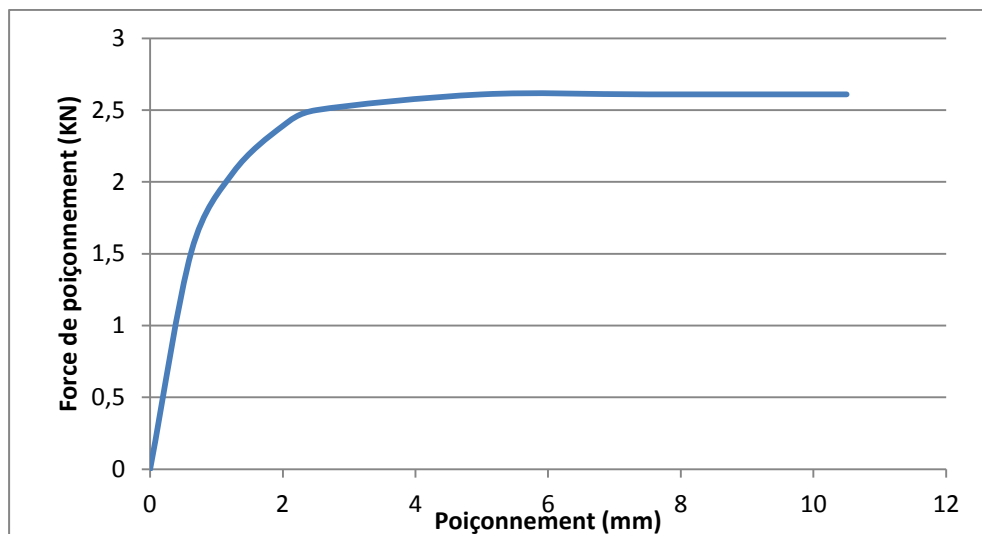


Figure IV.14 : Courbe de la portance IPI (3% chaux).

IV.3.1.3. L'ajout de 4% chaux:

La figure IV.15 représente la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 17.90.

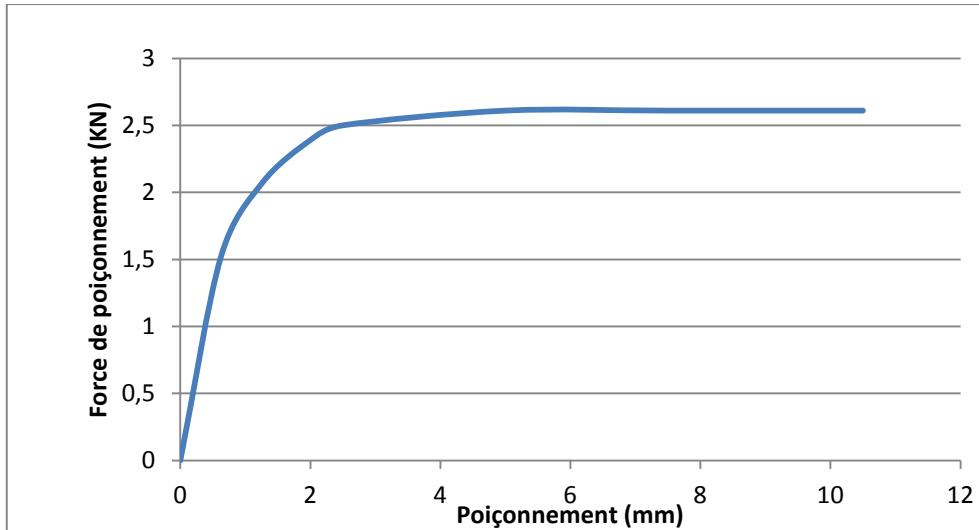


Figure IV.15 : Courbe de la portance IPI (4% chaux).

IV.3.1.4. Récapitulatifs des résultats obtenus:

La figure IV.16 présente la variation des forces de poinçonnements en fonction de la lecture de poinçonnements relatives pour les différents pourcentages d'ajout de la chaux (2% ,3% et 4%).

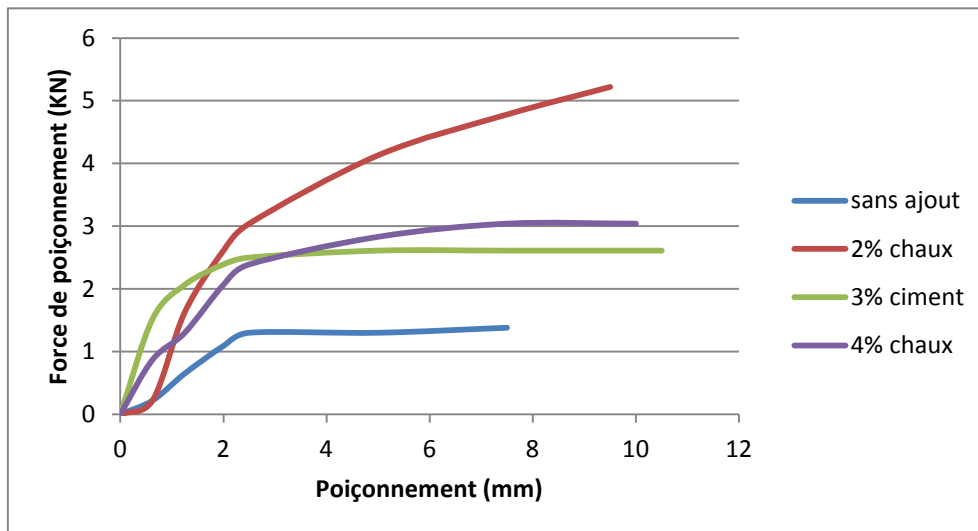


Figure IV.16. Variation de la force de poinçonnement en fonction de % d'ajout de la chaux.

La figure IV.17.représente la variation de l'IPI en fonction des différents pourcentages de la chaux.

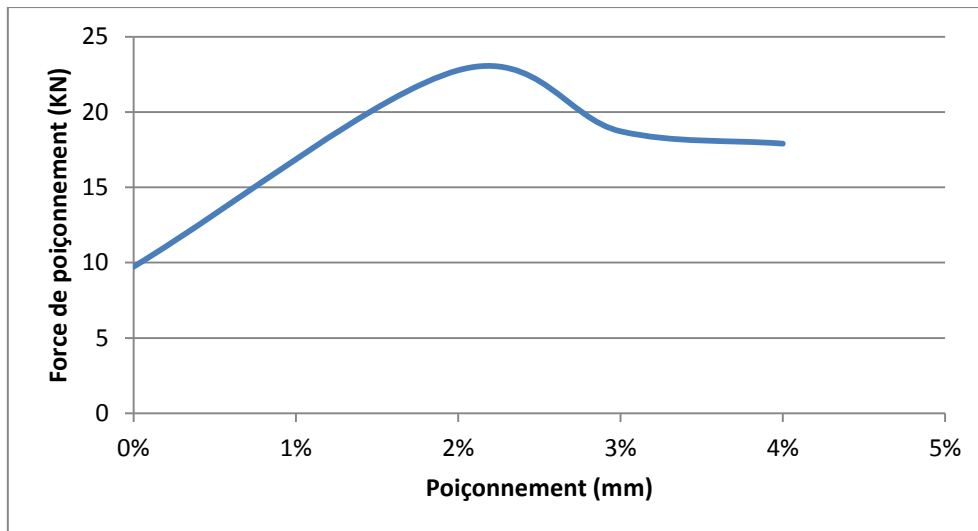


Figure VI .17: Variation de « IPI » en fonction de % d'ajout de la chaux.

Selon la figure IV.16 la force de poinçonnement de 2% d'ajout est plus élevée par rapport aux autres pourcentages ; en plus, la plage elasto-plastique de 2% est très élevée par rapport aux autres pourcentages. Cependant, l'indice de portance immédiat « IPI » du sol traité est toujours plus élevée que celle du sol naturel, ça signifie que l'effet de la chaux augmente les valeurs de l'IPI après le traitement ; nous avons aussi remarqué que l'ajout de 2% c'est le point d'optimum par rapport aux autres pourcentages 3% et 4%. La cause de ces observations peut être due à l'effet de la réaction chimique de la chaux avec le sol étudié.

Un accroissement de l'IPI de 134 à 84% a été montré sur les échantillons de sol stabilisés à la chaux avec un pourcentage variant de 2 à 4%.

IV.3.2. Traitement de ciment:

IV.3.2.1. L'ajout de 2% de ciment:

La figure IV.18 représente la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 9,21%.

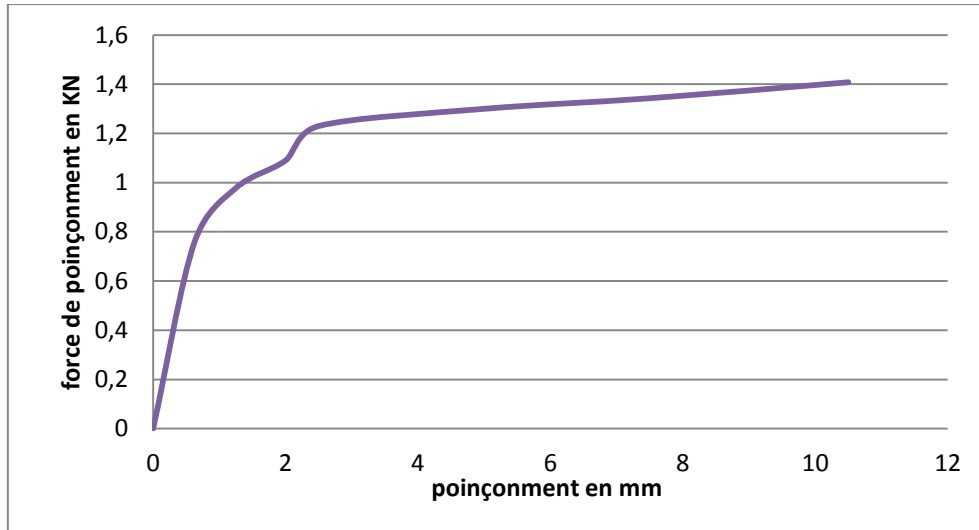


Figure IV.18 Courbe de la portance IPI (2% ciment).

IV.3.2.2. L'ajout de 3% de ciment:

La figure IV.19 représente la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 13,03%.

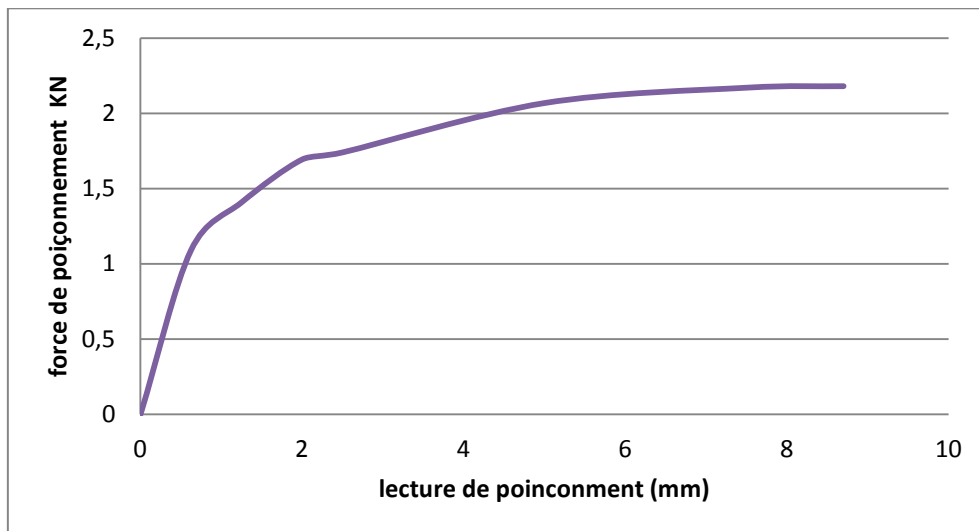


Figure IV.19 : Courbe de la portance IPI (3% ciment).

IV.3.2.3. L'ajout de 4% de ciment:

La figure IV.20 représente la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 13,03%.

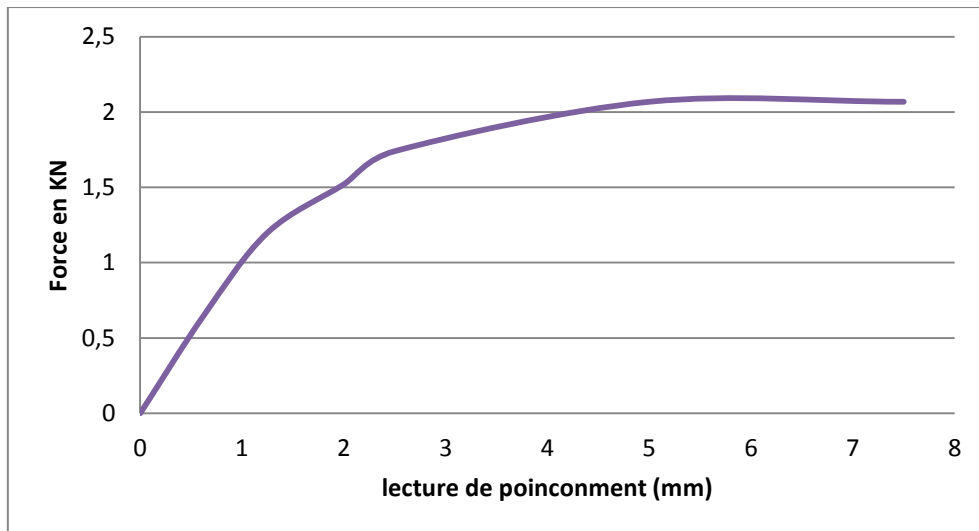


Figure IV.20 : Courbe de la portance IPI (4% ciment).

IV.3.2.4. Récapitulatifs des résultats obtenus:

La figure IV.21 montre la variation des forces de poinçonnements en fonction de la lecture de poinçonnements pour les différents pourcentages d'ajout du ciment (2% ,3% et 4%).

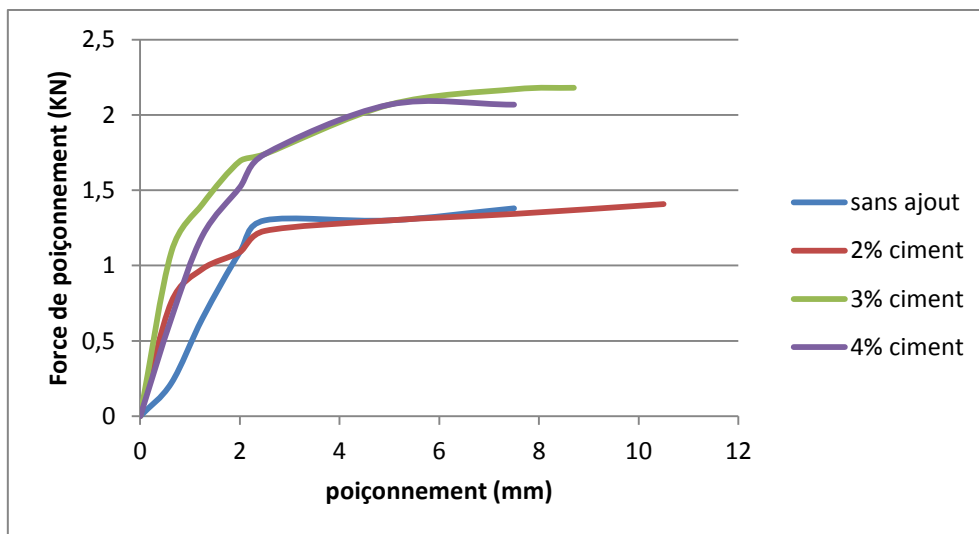


Figure IV.21 : Courbe de poinçonnement en fonction de % d'ajout de ciment.

La figure IV.22 montre la variation de l'IPI en fonction des différents pourcentages du ciment.

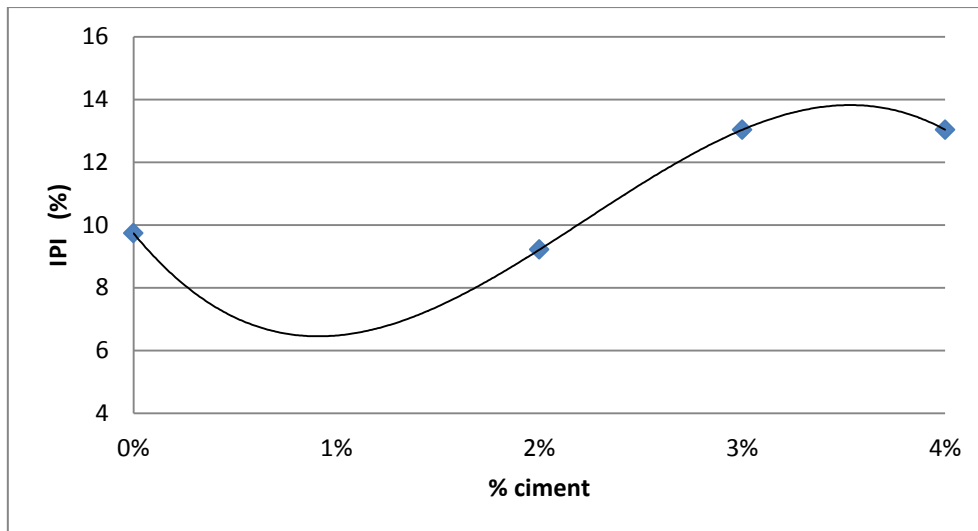


Figure IV.22 Variations d'IPI en fonction de % de ciment .

Selon la figure IV.21 la force de poinçonnement augmente avec le pourcentage d'ajout du ciment. Cependant, l'indice de portance immédiat « IPI » du sol traité est toujours plus élevée que celle du sol naturel, ça signifie que l'ajout du ciment augmente les valeurs de l'IPI après le traitement. La cause de ces observations peut être due à l'effet de la réaction chimique du ciment avec le sol étudié.

Un accroissement de l'IPI de 0 à 34% a été montré sur les échantillons de sol stabilisés au ciment avec un pourcentage variant de 2 à 4%.

IV.4. Étude de la portance après 7 jours de traitement :

Les tests de CBR après sept jours de traitement ont été exécutés sur des échantillons traités au ciment avec les pourcentages de 2, 3 et 4%.

VI.4.1. Traitement à la chaux :

IV.4.1.1. L'ajout de 2% chaux:

La figure IV.23 montre la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 22.93.

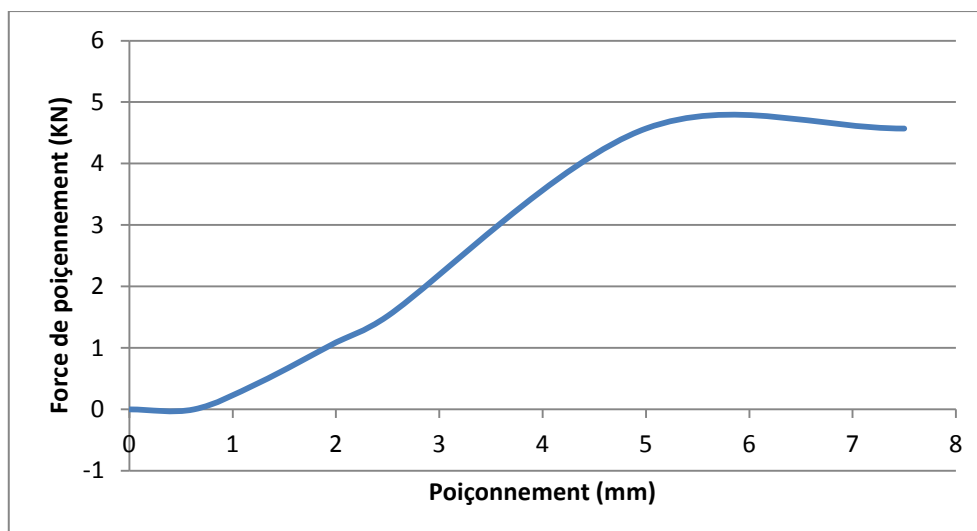


Figure IV.23 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (2% chaux).

IV.4.1.2. L'ajout de 3% chaux:

La figure IV.24 montre la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 37,45%.

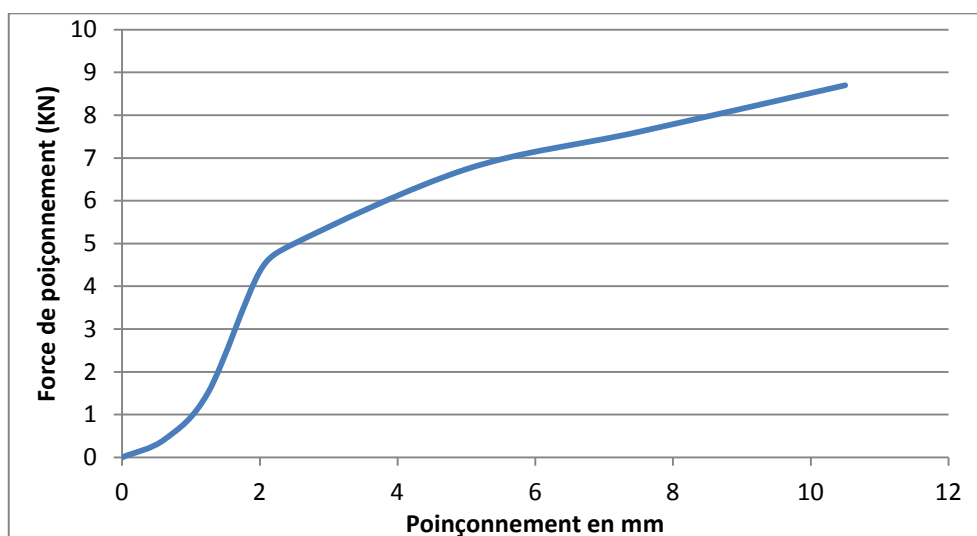


Figure IV.24 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (3% chaux).

IV.4.1.3. L'ajout de 4% chaux:

La figure IV.25 montre la variation de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 32,72%.

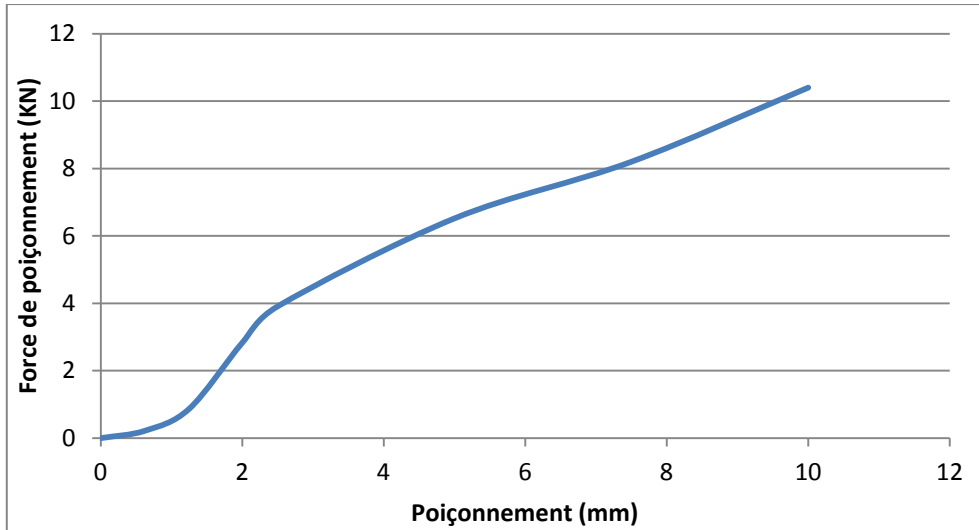


Figure IV.25 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (4% chaux).

IV.4.1.4. Récapitulatifs des résultats obtenus:

La figure IV.26 montre la variation des forces de poinçonnements en fonction de la lecture de poinçonnements pour les différents pourcentages d'ajout de la chaux (2% ,3% et 4%) après 7 jours du traitement.

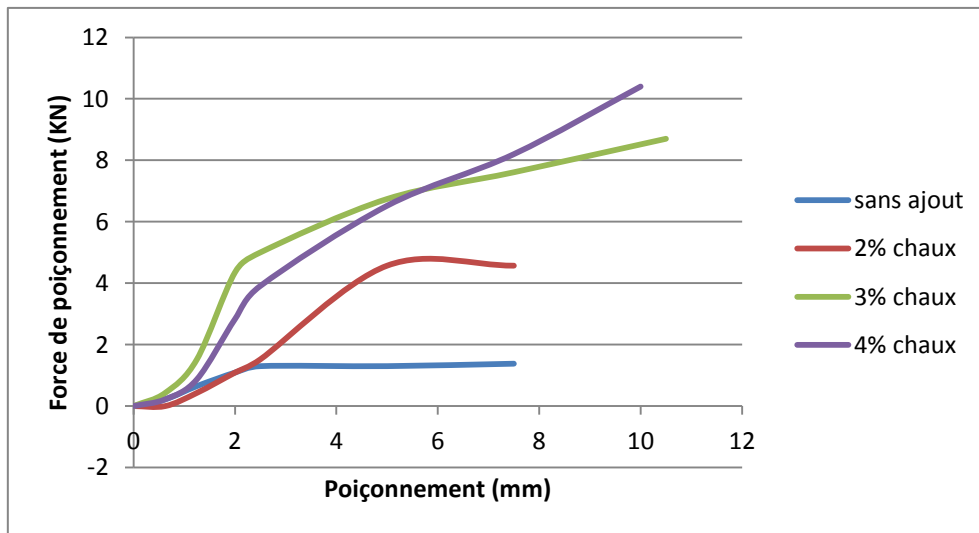


Figure IV.26. Variation des forces de poinçonnements en fonction de % d'ajout de la chaux (après 7 jours).

La figure IV.27 montre la variation de l'IPI en fonction des différents pourcentages du ciment après sept jours de traitement.

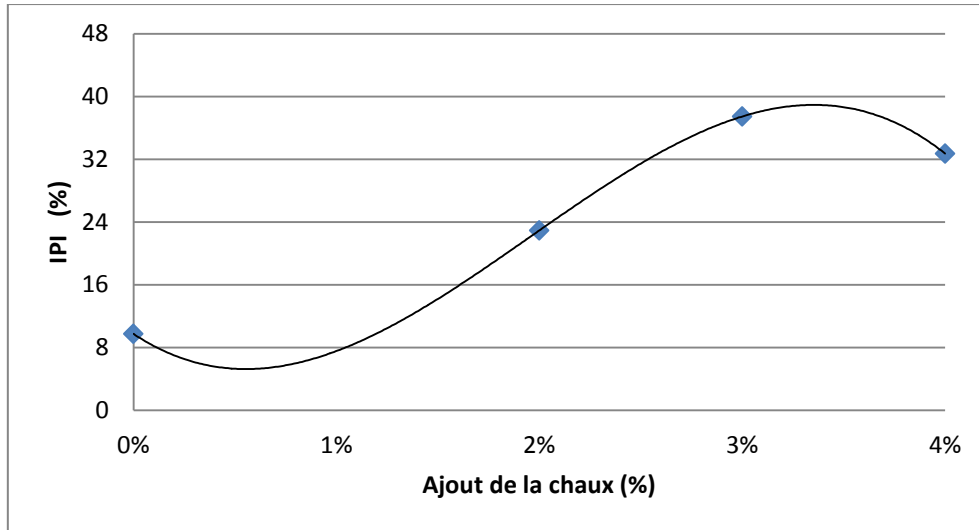


Figure IV.27 : Variation d'IPI en fonction de % d'ajout de la chaux (Après 7 jours).

Selon la figure IV.27 la force de poinçonnement augmente avec le pourcentage d'ajout de la chaux jusqu'à 4% (petite diminution). Cependant, l'indice de portance immédiat « IPI » du sol traité est toujours plus élevée que celle du sol naturel, ça signifie que l'ajout de la chaux augmente les valeurs de l'IPI après 7 jours du traitement. La cause de ces observations est le durcissement de la matrice étudiée.

Un accroissement de l'IPI de 136% à 285% a été montré sur les échantillons de sol stabilisés à la chaux avec un pourcentage variant de 2 à 4%.

VI.4.2. Traitement au ciment :

IV.4.2.1. L'ajout de 2% ciment:

La figure IV.28 montre les modifications de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement après sept jours du traitement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » est égal à 26,19%.

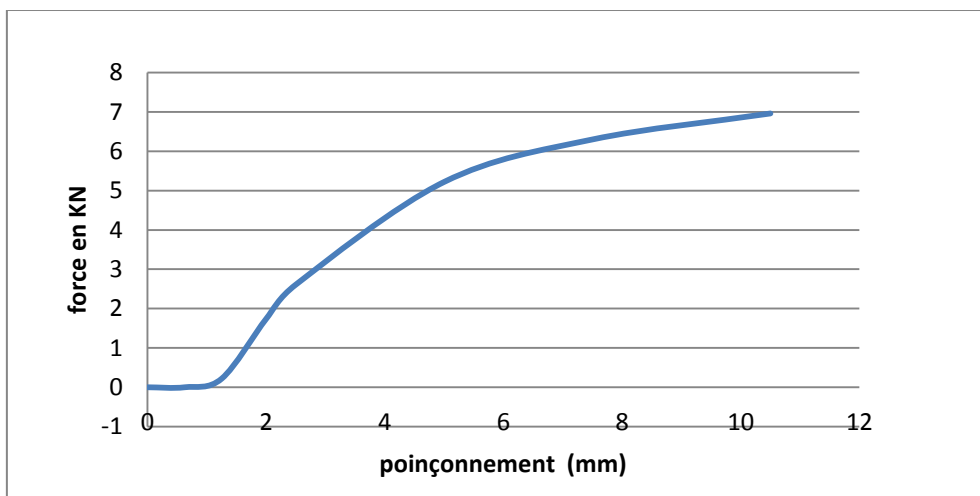


Figure IV.28 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (2% ciment).

IV.4.2.2. L'ajout de 3% ciment:

La figure IV.29 montre les modifications de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement après sept jours du traitement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 49,07%.

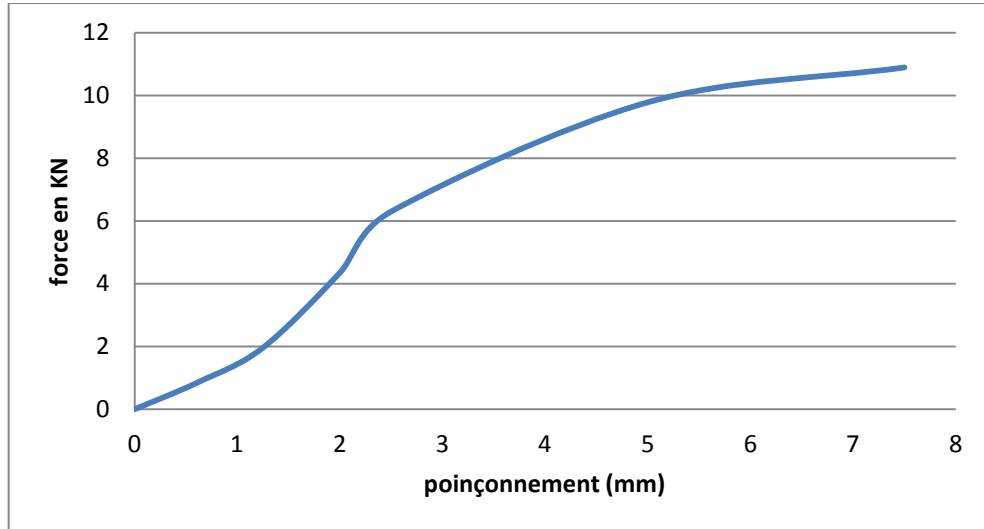


Figure IV.29 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (3% ciment).

IV.4.2.3. L'ajout de 4% ciment:

La figure IV.30 montre les modifications de la force de poinçonnement en fonction de la lecture de poinçonnement après sept jours du traitement, on trouve que l'indice de portance immédiat « IPI » égal 11,99%.

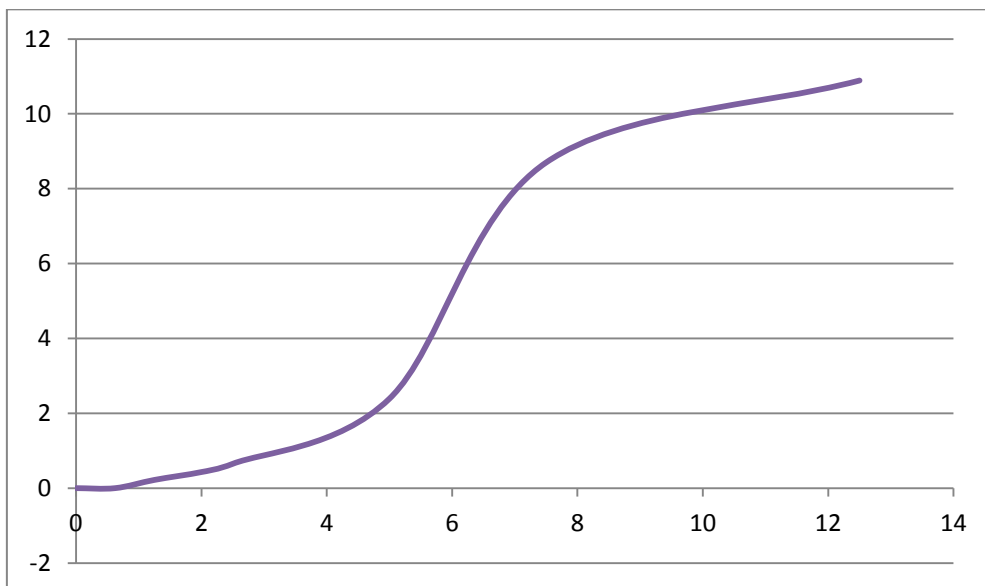


Figure IV.30 : Courbe de la portance IPI après 7 jours (4% ciment).

IV.4.2.4. Récapitulatifs des résultats obtenus:

La figure IV.31 montre la variation des forces de poinçonnements en fonction de la lecture de poinçonnements pour les différents pourcentages d'ajout de la chaux (2% ,3% et 4%) après 7 jours du traitement.

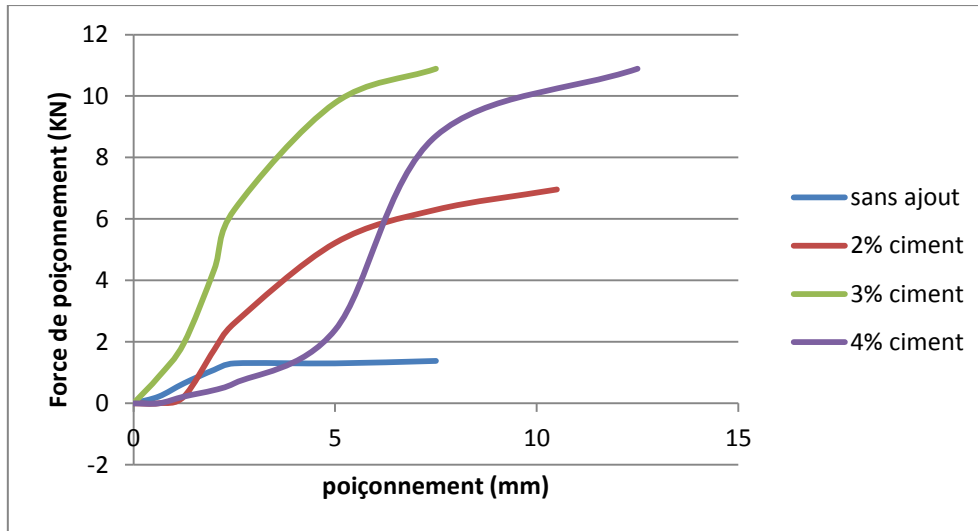


Figure IV.31 : Variation de la force de poinçonnement en fonction de % d'ajout de ciment après 7 jours.

La figure IV.32 montre la variation de l'IPI en fonction des différents pourcentages du ciment après sept jours de traitement.

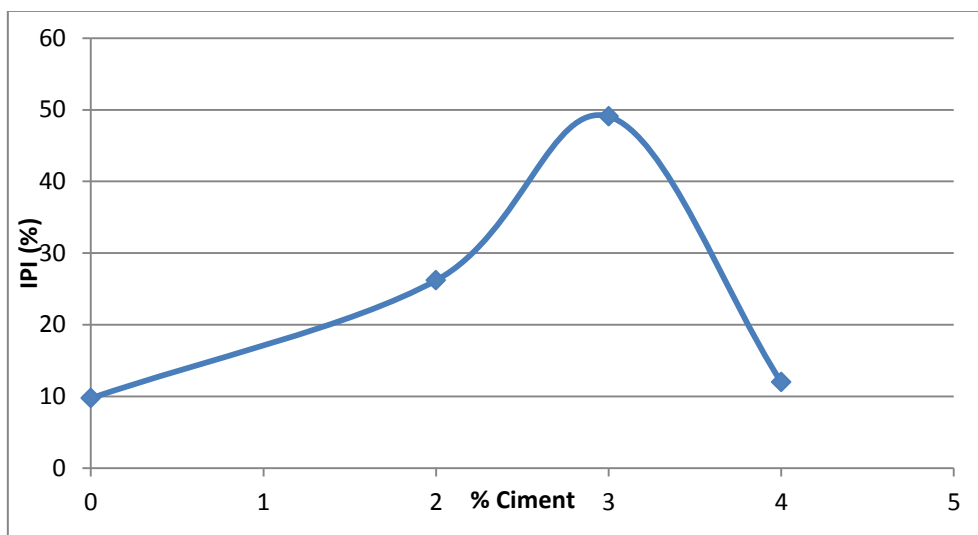


Figure IV.32 : Variations d'IPI en fonction de % de ciment après 7 jours.

Selon la figure IV.31 et 32 la force de poinçonnement et l'IPI augmentent avec le pourcentage d'ajout du ciment jusqu'à 4% (chute de « IPI » par rapport au dernier ajout). Cependant, l'indice de portance immédiat « IPI » du sol traité est toujours plus élevée que celle du sol naturel, ça signifie que l'ajout de la chaux augmente les valeurs de l'IPI après 7 jours du traitement. La cause de ces observations le

durcissement de la matrice étudiée jusqu'à 4% d'ajout du ciment on remarque des fissures dues à l'hydratation de ciment après 7 jours (Figure IV.33).



Figure IV.33. Échantillon de sol+ 4% ciment après 7 jours de traitement.

Un accroissement de l'IPI de 23% à 404% a été montré sur les échantillons de sol stabilisés au ciment avec un pourcentage variant de 2 à 4%.

IV. 5 Conclusion :

À la lumière des résultats trouvés dans ce chapitre on peut tirer les conclusions suivantes :

- L'addition de la chaux implique une diminution importante de la plasticité se qu'il faire passer le sol d'un état plastique à un état solide, friable, facilement travailleuse et perd une partie de sa sensibilité à l'eau (soit pour l'ajout de la chaux ou du ciment).
- L'amélioration de la portance du sol traitée (augmentation d'IPI) est justifiée par la diminution du volume des vides dans le sol qui est due à la bonne distribution des particules du sol avec les particules fine de l'additive chaux ou de ciment.
- Un accroissement très important de la portance est bien observé pour tous les mélanges traités, après une durée de cure de 7 jours jusqu'à un pourcentage de 4 % , on observe une chute dans la portance du sol par rapport aux derniers pourcentages.

- Pour le traitement immédiat le choix de type d'ajout est la chaux (2% suffit) et pour le traitement à long terme le ciment (3% suffit) est le meilleur choix du traitement dans notre sol étudié.

I. Conclusion générale :

L'étude a été entreprise pour étudier la stabilisation chimique des sols argileux traités à la chaux ou au ciment par une validation d'étude expérimentale au laboratoire. Les paramètres étudiés sont multiples et variés. Il s'agit notamment des pourcentages des constituants (ciment, chaux et eau), de la méthode de préparation des échantillons ainsi que les caractéristiques de chaque essai.

Après cette étude, on peut tirer les principaux résultats suivants :

L'introduction de la chaux dans les sols argileux a un effet considérable sur son comportement physique : il a été constaté une diminution des limites d'Atterberg et l'indice de plasticité ; c'est-à-dire, à court terme l'argile est passée d'un état déformable, collant à un état rigide, frottant, friable plus facile à travailler « diminution de sa sensibilité à l'eau » (3% d'addition est suffisante).

Les mêmes résultats sont observés à l'addition du ciment dans les sols argileux (changement sur son comportement physique). Cependant cette amélioration immédiate est très proche par rapport à l'ajout de la chaux (2% d'addition est suffisante).

Les paramètres mécaniques de l'argile étudiée sont clairement influencés par l'ajout de chaux ou du ciment.

- L'ajout de la chaux apporte une amélioration immédiate dans la portance d'argile par l'augmentation importante de son IPI (augmentation de 134% pour 2% d'addition), . par contre, l'addition du ciment donne une amélioration plus faible par rapport à l'ajout de la chaux (augmentation de 34% pour 4% d'ajout).
- Après 7 jours du traitement, l'ajout du ciment apporte une amélioration dans la portance d'argile par l'augmentation importante de son IPI (augmentation de 404% pour 3% d'addition). par contre, l'addition de la chaux donne une amélioration plus faible par rapport à l'ajout du ciment (augmentation de 285% pour 3% d'ajout).
- À long terme, l'addition de 4% du ciment donne une chute dans la portance de mélange par rapport aux autres ajouts, c'est-à-dire le traitement dans ce cas s'arrête à 3%.

L'amélioration du comportement physique et mécanique des mélanges traités peut être expliqué par :

- À court terme, l'addition de la chaux ou du ciment à l'argile est une réaction directe et rapide responsable à des effets immédiats produits par les deux ajouts (amélioration du sol). La chaux et le ciment peuvent alors réagir avec les minéraux argileux, provoquant une floculation et agglomération des argiles. Cette floculation diminue la plasticité du sol.
- À long terme (traitement à sept jours) est une réaction lente, qui durcit progressivement le mélange sol/chaux ou sol/ciment (stabilisation du sol). L'alcalinité de la chaux augmente le pH du sol, ce qui libère les aluminates et les silicates (réaction pozzolanique), qui sont les responsables à la solidification et le durcissement du sol. Le clincker du ciment augmente le pH du sol, qui subit un assèchement très important à long terme, donc un durcissement du sol. L'addition de 4% du ciment donne un assèchement très élevé qui provoque le phénomène du retrait dans le sol, donc il faut arrêter ce traitement à 3%.

Les conclusions ont été extrêmement positives et permettent d'affirmer la possibilité de l'utilisation de la chaux ou du ciment dans le traitement du sol étudié.

II. Perspective et recommandation :

Les perspectives et les suites à ce travail sont nombreuses :

- Étudier le comportement des sols argileux traités à l'aide de l'appareil triaxial de révolution qui permettra sans doute d'approfondir la compréhension du comportement mécanique de ce sol (module de déformation des matériaux à des cycles de déchargement rechargement) ;
- Étudier le comportement des sols argileux traités à 28 jours (pour le ciment) et à 90 jours (pour la chaux) ;
- Étudier le comportement des sols argileux traités par l'ajout mixte (chaux /ciment) ;
- Valider des résultats trouvés par la modélisation numérique du sol traité..... etc.

- **LCPC – SETRA**, « *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme* ». Guide Technique, Paris, janvier 2000
- **Centre de recherches routières**, « *Stabilisation des sols à la chaux* ». décembre 1971, La Technique Routière XVI, 4, Bruxelles 1971
- **Centre de recherches routières**, « *Mode opératoire des essais en laboratoire pour l'évaluation de l'aptitude d'un sol à la stabilisation immédiate à chaux vive* ». Méthode de mesure CRR-MF 33/72, Bruxelles, 1972
- **NF P 98-101**, « *Assises de chaussées - Chaux aérienne calcique pour sols et routes – Spécifications* ».
- **NF P 98-102**, « *Assises de chaussées - Chaux aérienne calcique pour sols et routes - Essai de réactivité de la chaux vive à l'eau* ».
- **Centre de recherches routières**, « *Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques* », Bruxelles 2009.
- **Dhouib A. (2003a)**, « *comportement des fondations sur sols traités par colonnes ballastées sous charge excentrée* ». Conférence international FONDSUP, ENPC/LCPC, Paris 2003.
- **Dhouib A. (2003b)**, « *Procédés et techniques d'amélioration des sols : état des connaissances et développements actuels* ». TPTECH, Paris 2003
- **Nedjaa.ch mémoire** « *Analyse de la stabilisation des sols expansifs par la chaux* » Mémoire de Master Académique, Université de Tébessa 2014-2015.
- **Mellal F.** « *Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana* » Université Hassiba Ben-Bouali -Chlef-2009
- **Natacha ; Jean.Ch ; Alain ;Assina** « *Amélioration des sols* » université de la réunion 2005-2006
- **JOUINI.M et SIAD. N**, « *Simulation paramétrique du comportement d'un remblai de sol pulvérulent reposant sur une couche d'argile gonflante par le logiciel PLAXIS,cas de l'évitement de la ville de Tébessa* ». mémoire master II , université de larbi tébessi - TÉBESSA2016.
- **TAALLAH.B** « *étude du comportement physico- mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres* » Thèse de Doctorat en Sciences ,2014
- **Walid.Z** « *Effet des résidus minéraux sur l'amélioration des sols fins argileux* » mémoire de magister II, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 2012.
- **TRAN Van.D** mémoire « *Étude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux* » Université de Liège 2012-2013
- **Djaani.M et Benmensour.S** « *Stabilisation des sols gonflants de la région d'In-Aménas par ajouts des liants hydrauliques (Chaux et Ciment). mémoire master II Promotion 2010-2011*
- **R. Dupain ;R. Lanchon ;J. C. Saint- Arroman** :granulats, sols ciment et bétons caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire 3^e édition CASTEILLA-25, rue Monge-75005 PARIS.

Références bibliographiques

- . [www.ente-aix.fr/documents/135 géotechnique /3_classificationSol/res/res_5_fiche Proctor .pdf](http://www.ente-aix.fr/documents/135_géotechnique/3_classificationSol/res/res_5_fiche_Proctor.pdf).
- www.memoireonline.com/12/07/783/m_rapport-de-stage-ETRHB15.html
- **Nicolas. C** ; «*Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. Matériaux*» Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2004. Français.
-

1) Classification selon GTR :

Classe **A**Tableau 1 - *Classification des sols fins*

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
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	
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm > 35%	A Sols fins	VBS ≤ 2,5 ⁽¹⁾ ou I _p ≤ 12	A₁ Limos peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 3 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}	A ₁ th	
				3 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 8 ou 1,10 ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}	A ₁ h	
				8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,1 w _{OPN}	A ₁ m	
				0,7 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}	A ₁ s	
				w _n < 0,7 w _{OPN}	A ₁ ts	
		12 < I _p ≤ 25 ⁽¹⁾ ou 2,5 < VBS ≤ 6	A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 2 ou I _c ⁽¹⁾ ≤ 0,9 ou w _n ≥ 1,3 w _{OPN}	A ₂ th	
				2 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 5 ou 0,9 ≤ I _c ⁽¹⁾ < 1,05 ou 1,1 w _{OPN} ≤ w _n < 1,3 w _{OPN}	A ₂ h	
				5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < I _c ≤ 1,2 ou 0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,1 w _{OPN}	A ₂ m	
				1,2 < I _c ≤ 1,4 ou 0,7 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}	A ₂ s	
				I _c > 1,3 ou w _n < 0,7 w _{OPN}	A ₂ ts	
		25 < I _p ≤ 40 ⁽¹⁾ ou 6 < VBS ≤ 8	A₃ Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 1 ou I _c ⁽¹⁾ ≤ 0,8 ou w _n ≥ 1,4 w _{OPN}	A ₃ th	
				1 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 3 ou 0,8 ≤ I _c ⁽¹⁾ < 1 ou 1,2 w _{OPN} ≤ w _n < 1,4 w _{OPN}	A ₃ h	
				3 < IPI ≤ 10 ou 1 < I _c ≤ 1,15 ou 0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,2 w _{OPN}	A ₃ m	
				1,15 < I _c ≤ 1,3 ou 0,7 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}	A ₃ s	
				I _c > 1,3 ou w _n < 0,7 w _{OPN}	A ₃ ts	
		I _p > 40 ⁽¹⁾ ou VBS > 8	A₄ Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique		A ₄ th
						A ₄ h
						A ₄ m
						A ₄ s

Annexe

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe **B**

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% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₁ Sables siliceux...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		FS ≤ 60	B ₁₁
						FS > 60	B ₁₂
				tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% VBS > 0,2	B₂ Sables argileux (peu argileux)...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 4 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}	B ₂ th
		FS > 60	B ₂₂ th				
		4 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 8 ou 1,10 w _{OPN} ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}	B ₂ h			FS ≤ 60	B ₂₁ h
						FS > 60	B ₂₂ h
		0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,10 w _{OPN}	B ₂ m			FS ≤ 60	B ₂₁ m
						FS > 60	B ₂₂ m
		0,5 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}	B ₂ s	FS ≤ 60	B ₂₁ s		
				FS > 60	B ₂₂ s		
		w _n < 0,5 w _{OPN}	B ₂ ts	FS ≤ 60	B ₂₁ ts		
				FS > 60	B ₂₂ ts		
tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₃ Graves siliceuses...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₃₁		
				LA > 45 et MDE > 45	B ₃₂		

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Annexe

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	tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS > 0,2	B₄ Graves argileuses (peu argileuses)...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 7 ou W ₀ ≥ 1,25 W _{OPN}	B ₄ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ th
				7 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 15 ou 1,10 W _{OPN} ≤ W ₀ < 1,25 W _{OPN}	B ₄ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ th
				0,9 W _{OPN} ≤ W ₀ < 1,10 W _{OPN}	B ₄ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ h
				0,6 W _{OPN} ≤ W ₀ < 0,9 W _{OPN}	B ₄ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ h
				W ₀ < 0,6 W _{OPN}	B ₄ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ m
			0,6 W _{OPN} ≤ W ₀ < 0,9 W _{OPN}	B ₄ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ m	
			0,6 W _{OPN} ≤ W ₀ < 0,9 W _{OPN}	B ₄ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ s	
			0,6 W _{OPN} ≤ W ₀ < 0,9 W _{OPN}	B ₄ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ s	
			0,6 W _{OPN} ≤ W ₀ < 0,9 W _{OPN}	B ₄ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ ts	
			0,6 W _{OPN} ≤ W ₀ < 0,9 W _{OPN}	B ₄ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ ts	
		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 sableux...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 5 ou W ₀ ≥ 1,25 W _{OPN}	B ₅ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ th
				5 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 12 ou 1,1 W _{OPN} ≤ W ₀ < 1,25 W _{OPN}	B ₅ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ th
				12 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 30 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W ₀ < 1,10 W _{OPN}	B ₅ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ h
				0,6 W _{OPN} ≤ W ₀ < 0,9 W _{OPN}	B ₅ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ h
			W ₀ < 0,6 W _{OPN}	B ₅ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ m	
			W ₀ < 0,6 W _{OPN}	B ₅ ts	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ m	
			W ₀ < 0,6 W _{OPN}	B ₅ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ s	
			W ₀ < 0,6 W _{OPN}	B ₅ ts	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ s	
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	IPI ⁽¹⁾ ≤ 4 ou W ₀ ≥ 1,3 W _{OPN} ou I _p ≤ 0,8	B ₆ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₆₁ th		
		4 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 10 ou 0,8 < I _p ≤ 1 ou 1,1 W _{OPN} ≤ W ₀ < 1,3 W _{OPN}	B ₆ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₆₂ th		
		10 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 25 ou 1 < I _p ≤ 1,2 ou 0,9 W _{OPN} ≤ W ₀ < 1,1 W _{OPN}	B ₆ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₆₁ h		
		0,7 W _{OPN} ≤ W ₀ < 0,9 W _{OPN} ou 1,2 < I _p ≤ 1,3	B ₆ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₆₂ h		
W ₀ < 0,7 W _{OPN} ou I _p > 1,3	B ₆ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₆₁ m				
W ₀ < 0,7 W _{OPN} ou I _p > 1,3	B ₆ ts	LA > 45 et MDE > 45	B ₆₂ m				

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

Classe **C**

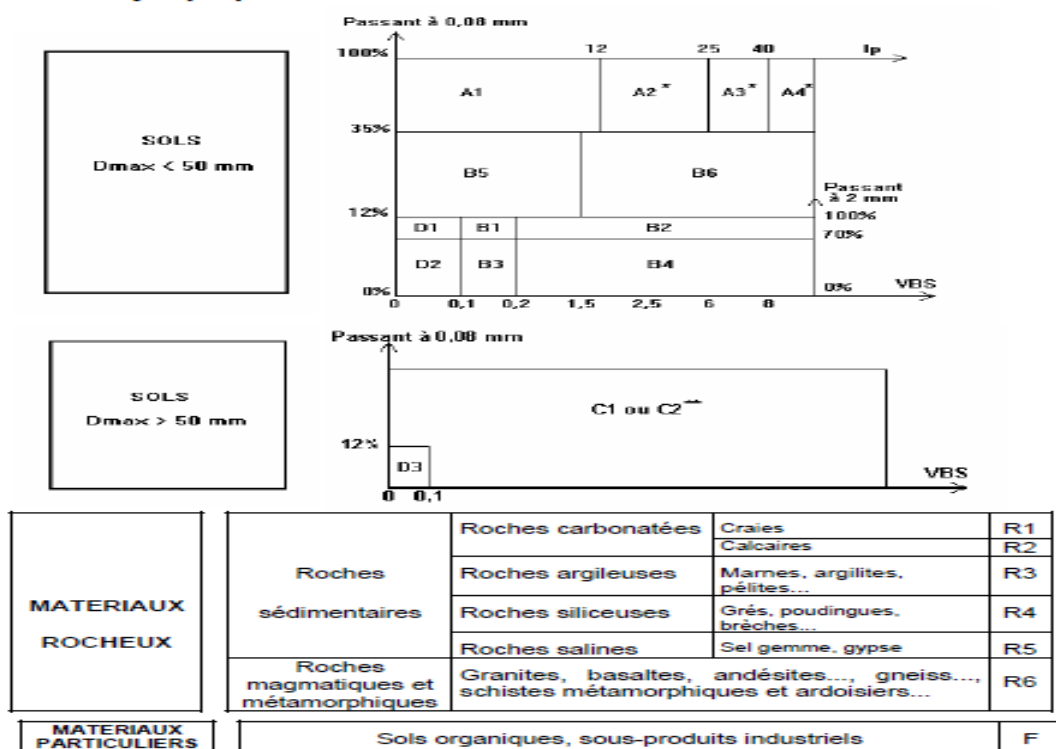
Tableau 3 - **Classification des sols comportant des fines et des gros éléments**

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique et le comportement																																				
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature																																					
D _{max} > 50 mm et tamisat à 80 μm > 12% ou si le tamisat à 80 μm ≤ 12% la VBS est > 0,1	C Sols comportant des fines et des gros éléments	Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm > 60 à 80% et matériaux roulés. La fraction 0/50 est un sol de classe A	C₁A_i Argiles à silex, éboulis, moraines, alluvions grossières...	<p>Le sous-classement, en fonction de l'état hydrique et du comportement des sols de cette classe, s'établit en considérant celui de leur fraction 0/50 mm qui peut être un sol de la classe A ou de la classe B</p> <p>* 1^{er} exemple : un sol désigné C₁A₂h est un sol qui est :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● soit entièrement roulé, ● soit entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 représente plus de 60 à 80% de la totalité du matériau. <p>Dans les deux cas, sa fraction 0/50 mm appartient à la classe A₂ avec un état hydrique h.</p> <p>* 2^{ème} exemple : un sol désigné C₁B₂₂m est un sol qui est :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 mm représente moins de 60 à 80% de la totalité du matériau. <p>La fraction 0/50 mm est un sol de la classe B₄₂ se trouvant dans un état hydrique m.</p> <p>Les différents sous-classes composant la classe C sont :</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center; font-size: small;"> <tr> <td>C₁A₁</td><td>C₁A₂</td><td>C₂A₁</td><td>C₂A₂</td><td rowspan="2">Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C₁A₃</td><td>C₁A₄</td><td>C₂A₃</td><td>C₂A₄</td> </tr> <tr> <td>C₁B₁₁</td><td>C₁B₂₁</td><td>C₂B₁₁</td><td>C₂B₂₁</td><td rowspan="2">Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique</td> </tr> <tr> <td>C₁B₁₂</td><td>C₁B₂₂</td><td>C₂B₁₂</td><td>C₂B₂₂</td> </tr> <tr> <td>C₁B₃₁</td><td>C₁B₄₁</td><td>C₂B₃₁</td><td>C₂B₄₁</td><td rowspan="2">Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C₁B₃₂</td><td>C₁B₄₂</td><td>C₂B₃₂</td><td>C₂B₄₂</td> </tr> <tr> <td>C₁B₄₁</td><td>C₁B₅</td><td>C₂B₄₁</td><td>C₂B₅</td> </tr> <tr> <td>C₁B₄₂</td><td></td><td>C₂B₄₂</td><td></td> </tr> </table>		C ₁ A ₁	C ₁ A ₂	C ₂ A ₁	C ₂ A ₂	Etat th, h, m, s ou ts	C ₁ A ₃	C ₁ A ₄	C ₂ A ₃	C ₂ A ₄	C ₁ B ₁₁	C ₁ B ₂₁	C ₂ B ₁₁	C ₂ B ₂₁	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique	C ₁ B ₁₂	C ₁ B ₂₂	C ₂ B ₁₂	C ₂ B ₂₂	C ₁ B ₃₁	C ₁ B ₄₁	C ₂ B ₃₁	C ₂ B ₄₁	Etat th, h, m, s ou ts	C ₁ B ₃₂	C ₁ B ₄₂	C ₂ B ₃₂	C ₂ B ₄₂	C ₁ B ₄₁	C ₁ B ₅	C ₂ B ₄₁	C ₂ B ₅	C ₁ B ₄₂		C ₂ B ₄₂	
		C ₁ A ₁	C ₁ A ₂			C ₂ A ₁	C ₂ A ₂	Etat th, h, m, s ou ts																																
		C ₁ A ₃	C ₁ A ₄			C ₂ A ₃	C ₂ A ₄																																	
		C ₁ B ₁₁	C ₁ B ₂₁			C ₂ B ₁₁	C ₂ B ₂₁	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique																																
C ₁ B ₁₂	C ₁ B ₂₂	C ₂ B ₁₂	C ₂ B ₂₂																																					
C ₁ B ₃₁	C ₁ B ₄₁	C ₂ B ₃₁	C ₂ B ₄₁	Etat th, h, m, s ou ts																																				
C ₁ B ₃₂	C ₁ B ₄₂	C ₂ B ₃₂	C ₂ B ₄₂																																					
C ₁ B ₄₁	C ₁ B ₅	C ₂ B ₄₁	C ₂ B ₅																																					
C ₁ B ₄₂		C ₂ B ₄₂																																						
Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm > 60 à 80% et matériaux roulés. La fraction 0/50 est un sol de classe B	C₁B_i Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...																																							
Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%... La fraction 0/50 est un sol de classe A	C₂A_i Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...																																							
Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%... La fraction 0/50 est un sol de classe B	C₂B_i Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...																																							

Annexe

Classe D						
Tableau 4 - <i>Classification des sols insensibles à l'eau</i>						
CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS						
CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME						
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Valeurs seuils retenues	Sous classe	
VBS $\leq 0,1$ et tamisat à 80 $\mu\text{m} \leq 12\%$	D Sols insensibles à l'eau	Dmax ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm > 70%	D₁ <small>Sables alluvionnaires propres, sables de dune...</small>	Matériaux insensibles à l'eau; mais leur emploi en couche de forme nécessite la mesure de leur résistance mécanique (Los Angeles - LA - et/ou Micro Deval - en présence d'eau - MDE -) ou Friabilité des sables (FS).	FS ≤ 60	D ₁₁
					FS > 60	D ₁₂
		Dmax ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm $\leq 70\%$	D₂ <small>Graves alluvionnaires propres, sables...</small>		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₂₁
					LA > 45 et MDE > 45	D ₂₂
		Dmax > 50 mm	D₃ <small>Graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires,...</small>		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₃₁
					LA > 45 et MDE > 45	D ₃₂

Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature



* Matériaux pour lesquels la mesure de l' I_p est à retenir comme base de classement. Pour les autres matériaux on utilisera la VBS.

** C1 : matériaux roulés et matériaux anguleux peu charpentés (0/50 > 60 à 80 %)

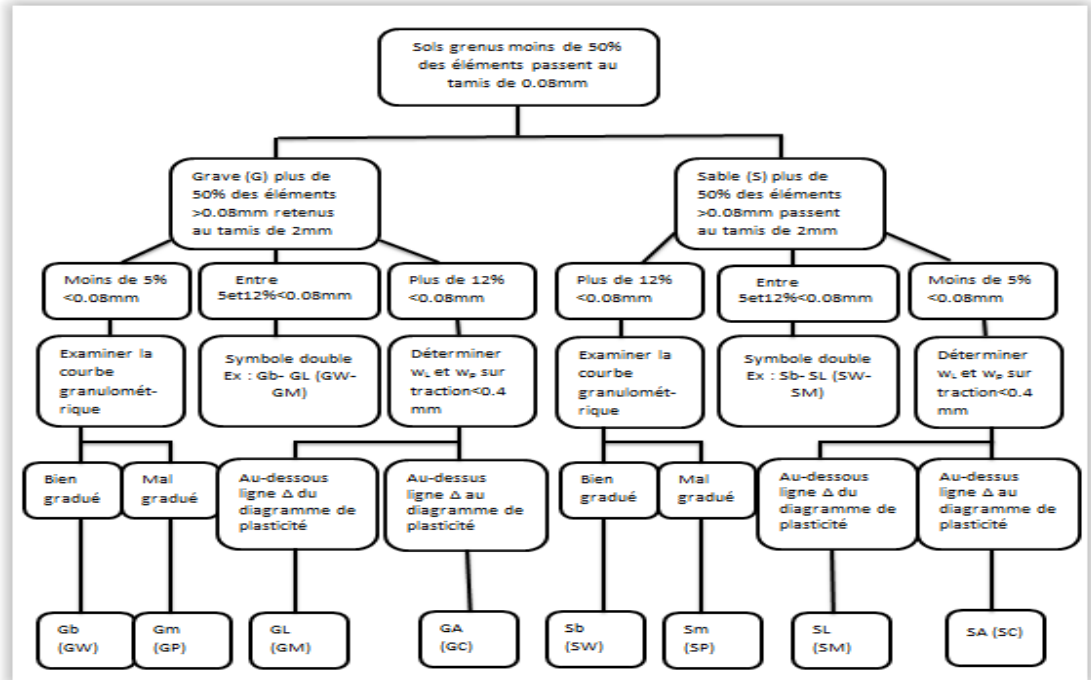
C2 : matériaux anguleux très charpentés (0/50 \leq 60 à 80 %)

- LA : paramètre Los Angeles
- MDE : paramètre de Micro Deval
- FS : module de friabilité de sable

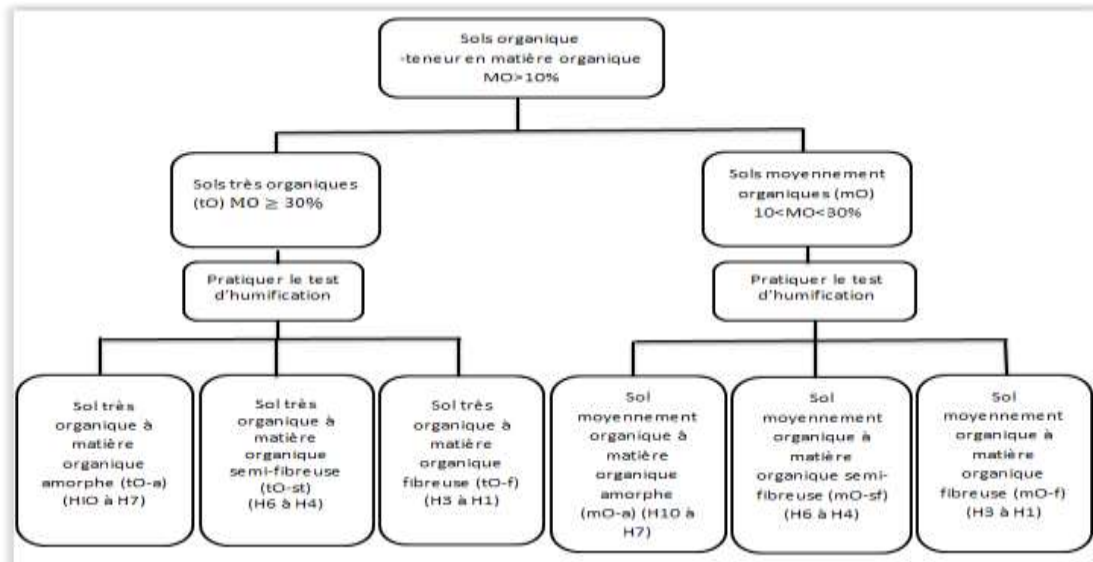
Annexe

- *th* : très humide
- *h* : humide

2) Classification d'après LCPC :

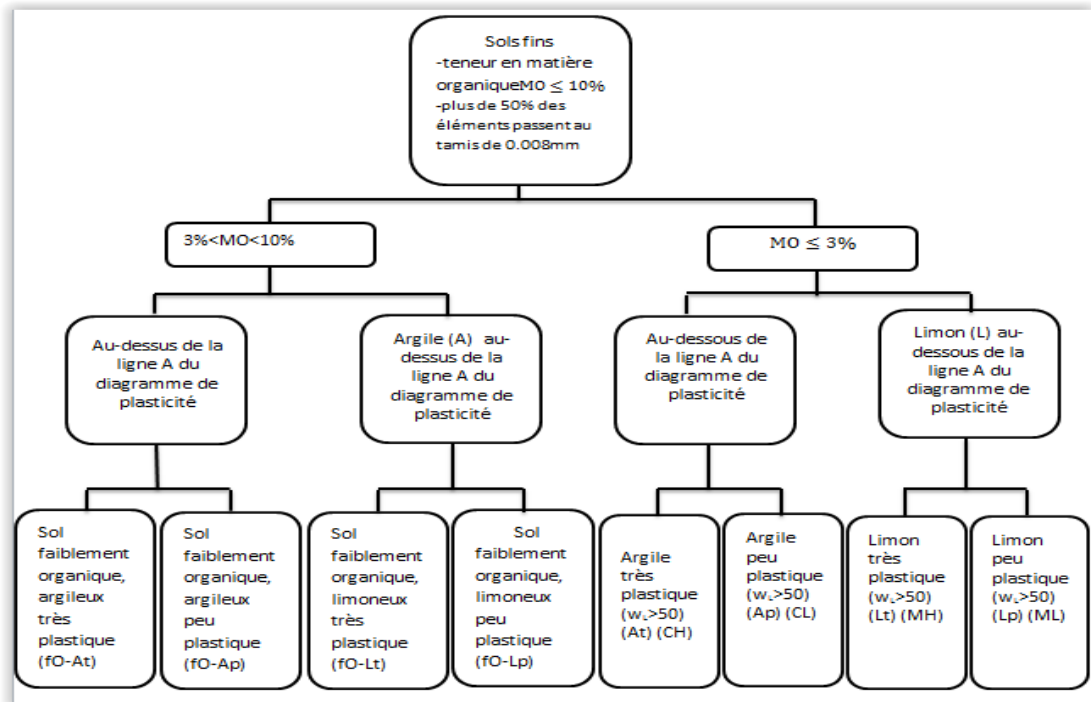


Sols grenus



Sols organiques

Annexe



Sols fins