

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Présenté par : GUEFAIFIA Lamia & BENRDJEM Hiba

---

---

# TRAITEMENT ET RENFORCEMENT D'UN SOL FIN PAR DIFFERENTES TECHNIQUES D'AMELIORATION : ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE

---

---

Sous la direction de : Dr. BOUTELDJA Fathe

---

Septembre 2020

---



## REMERCIEMENTS

---

*Nous exprimons toute notre gratitude et sincère dévouement à Dieu Le  
Tout puissant qui grâce à son aide nous avons terminé ce modeste  
travail*

*Nous tenons à remercier chaleureusement notre promoteur Dr  
BOUTELDJA FATHE son aide et son encadrement, ses  
encouragements et surtout sa compréhension durant toute la période de  
préparation de ce mémoire.*

*Nous remercions également l'honorable jury qui a bien voulu examiner  
notre travail*

*Nous adressons de chaleureux remerciements à tous les enseignants et  
les travailleurs d'université de 8 mai 1945 'Guelma', pour les moyens  
qui ont été mis à notre disposition durant toute la durée de la  
formation.*

*Nous remercions aussi le laboratoire de LNHC « Laboratoire National  
de l'Habitat et de la Construction, D'Annaba » de nous avoir  
accueillis pendant notre période de stage.*

*Je tiens à remercier particulièrement tous les membres du Département  
de Génie Civil Pour leurs soutiens et leurs aides*

*Nous tenons à exprimer nos reconnaissances et nos gratitude à toutes  
celles et tous ceux qui nous ont aidés dans la préparation de ce  
travail.*

## DEDICACE

---

*Je dédie ce mémoire a :*

*Ma très chère mère « MESSAOUDA »*

*Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encouragé et de prier pour moi.*

*Au meilleur papa « AMAR »*

*Aucune dédicace ne se saurait exprimer l'amour et le respect que j'ai toujours pour vous.*

*Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation, mon formation et mon bien être.*

*A mes frères « NABIL, ISSAM et HOUSSEM » je les remercie beaucoup*

*A mes sœurs « NOURA, RADIA et CHAIMA » les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.*

*Aux enfants de mon frère « OUMAIMA et RAHAF » et les enfants de ma sœur « MOUHAMED WAIL, CHOUAIB et ABD EL RAHIM » que Dieu les protège  
A toute ma famille*

*A tous mes amis*

*A toute les étudiants de Géotechnique*

*A toute personne m'ayant aidé à franchir un horizon dans ma vie et mes études*

*GUEFAIFIA Lamia*

## DEDICACE

---

*A Ma très chère mère « **Hamama** »*

*Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Allah, le tout puissant, te préserver, t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

*A mon père décédé « **Mohamed** »*

*Perdre son père, c'est perdre une partie de soi. Papa tu laisses un grand vide dans ma vie, mais sache qu'il y aura toujours une place pour toi dans mon cœur. Aucune dédicace ne se saurait exprimer l'amour et le respect que j'ai toujours pour vous. Que Dieu vous bénisse et fasse de vous dans le paradis le plus élevé.*

*À tous mes proches de la famille « **BENRDJEM** »*

*À tous mes chers amis et mes collègues de l'Université*

*Et à tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire*

*À tous mes chers*

*Amis.*

***BENRDJEM Hiba***

## RESUME

---

Le traitement des sols par les techniques de stabilisation chimique et mécanique est largement utilisé dans le domaine de la géotechnique routière. Dans notre travail, nous avons étudié le comportement d'une marne argileuse de la région de Guelma, après avoir subi un traitement avec de nouveaux agents d'amélioration (laitier de haut fourneau et poudre de verre) activés à la chaux. La marne peut ainsi être valorisée dans les constructions routières et résoudre ainsi les problèmes environnementaux liés aux énormes dépôts de marne sur site. Dans ce contexte nous sommes arrivés à montrer travers des essais de cisaillement rectiligne sur différents échantillons de marne traitée à différents pourcentages de stabilisants qu'il y a une amélioration des caractéristiques de cisaillement du sol. Nous avons également étudié le comportement d'un remblai de grande hauteur (> 15m) traité et renforcé par la technique de clouage à travers une étude numérique de stabilité sur le logiciel Plaxis. Cette analyse numérique a montré que le traitement et le renforcement de la marne a rendu le remblai marneux moins vulnérable au glissement de talus.

**Mots clés :** marne argileuse, traitement, verre, laitier, renforcement, clouage, Plaxis.

## ABSTRACT

---

The treatment of soils by chemical and mechanical stabilization techniques is widely used in the construction of road embankment. In this work, we have studied the behaviour of clayed marl from the region of Guelma. The marl was treated with new lime-activated improvers (blast furnace slag and glass powder). This solution makes possible the reuse of marl in road constructions and solves some environmental problems linked to the enormous deposits of marl on site. In this context, we have shown through the experimental study on different samples of marl treated with different percentages of stabilizers that there is an improvement in the shear characteristics of the soil. We also studied the behaviour of a very high embankment (> 15m) treated and reinforced by the nailing technique through a digital stability study using the Plaxis software. The results showed that the treatment and reinforcement of the soil made the embankment less vulnerable to slope stability.

**Key words:** clayed marl, treatment, glass, slag, reinforcement, nailing, Plaxis.

## ملخص

---

معالجه التربة بتقنيات التثبيت الكيميائي والميكانيكي متداولة بكثرة في مجال مشاريع الطرق، الهدف من قيامنا بدراسة طين من منطقة قالمة ومعالجته بمادة جديدة مكونة من مسحوق الزجاج وخبث الأفران منشطة بالجير لغرض استخدامه في مشاريع الطرق والمحافظة على البيئة وترك مساحة شاسعة من المكان.

من خلال التجارب التي قمنا بها على عدة عينات من الطين الممزوج بنسب مختلفة من الجير ومسحوق الزجاج وخبث الأفران العالية والمحفوطة لمدة 7 ايام توصلنا الى نتائج متمثلة في تحسين خصائص التحمل والقص.

كما قمنا بتدعيم التربة الغير مستقر بتقنية التعزيز (تسمير) في دراسة رقمية لعملية استقرار التربة بواسطة برنامج بلاكسيس، وقد اظهر التحليل الرقمي ان علاج الطين وتعزيزه يجعل الردم أقل عرضة لانزلاق المنحدر.

**الكلمات المفتاحية:** الطين، معالجة، الزجاج، خبث، التعزيز، تسمير، بلاكسيس.

# SOMMAIRE

---

<b>RESUME.....</b>	<b>II</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION DES SOLS.....</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
<b>2. DIFFERENTS TYPES DE SOLS.....</b>	<b>3</b>
2.1. Eléments constitutifs d'un sol .....	3
2.2. Les argiles .....	4
2.3. Les Limons .....	7
2.4. Les Marnes.....	7
2.5. Les vases.....	8
2.6. Les Tourbes .....	9
2.7. Les Sables.....	10
2.8. Les Gravillons .....	11
<b>3. IDENTIFICATION DES SOLS.....</b>	<b>11</b>
3.1. Techniques de reconnaissance géotechnique.....	11
3.2. Techniques d'échantillonnage .....	12
3.3. Essais d'identification au laboratoire .....	19
<b>4. CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS .....</b>	<b>24</b>
4.1. Classification élémentaire .....	24
4.2. Classification (USCS/LCPC).....	26
4.3. Classification GTR.....	28
4.4. Classification AASHTO.....	29
<b>5. PROBLEMES LIES AUX SOLS FINIS .....</b>	<b>30</b>
5.1. Retrait - gonflement.....	30
5.2. Tassements.....	31
5.3. Glissements.....	32
5.4. Erosion des sols .....	32
<b>6. CONCLUSION.....</b>	<b>33</b>
<b>CHAPITRE II : TRAITEMENT DES SOLS FINIS .....</b>	<b>34</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>34</b>
<b>2. PROBLEMATIQUE DU TRAITEMENT DES SOLS .....</b>	<b>34</b>
<b>3. TRAITEMENT DES SOLS PAR LES METHODES CHIMIQUES .....</b>	<b>35</b>
<b>4. LES GRANDES ETAPES DU TRAITEMENT DES SOLS .....</b>	<b>37</b>
4.1. Identification du sol .....	37
4.2. Etude de formulation.....	37
4.3. Mise en œuvre du sol traité .....	38
4.5. Contrôle de qualité des travaux.....	39
<b>5. AVANTAGES DU TRAITEMENT .....</b>	<b>40</b>
5.1. Avantages techniques .....	40
5.2. Avantages économiques .....	41

5.3 Avantages environnementaux .....	41
<b>6. MATERIELS DE TRAITEMENT.....</b>	<b>41</b>
6.1. Matériels de stockage des produits de traitement.....	42
6.2. Matériels d'épandage.....	43
6.3. Matériels de préparation des sols .....	44
6.4. Matériels de malaxage des sols en place.....	45
6.5. Matériels d'arrosage.....	45
6.6. Matériels de compactage .....	46
<b>7. DIFFERENTS CAS DE TRAITEMENT DES SOLS.....</b>	<b>49</b>
7.1. Traitement des sols pour remblais et fond de déblai .....	49
7.2. Traitement des sols pour PST .....	50
7.3. Traitement des sols pour couche de forme .....	50
7.4. Utilisation des sols fins traités en assise de chaussée .....	51
7.5. Retraitement pour assise de chaussée.....	52
<b>8. LES DIFFERENTS AGENTS D'AMELIORATION.....</b>	<b>52</b>
8.1. Agents classique .....	53
8.2. Agents nouveaux.....	60
<b>9. CONCLUSION.....</b>	<b>64</b>
<b><u>CHAPITRE III : RENFORCEMENT DES SOLS.....</u></b>	<b><u>65</u></b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>65</b>
<b>2. DEFINITION D'UN REMBLAI .....</b>	<b>65</b>
<b>3. RENFORCEMENT DES SOLS.....</b>	<b>66</b>
<b>4. TECHNIQUES DE RENFORCEMENT .....</b>	<b>68</b>
4.1. Colonnes ballastées.....	68
4.2. Inclusions rigides .....	69
4.3. Géosynthétiques.....	69
4.4. Tirants d'ancrages.....	72
4.5. Colonnes de pieux.....	73
4.6. Terre armée.....	74
4.7. Utilisation des fibres .....	74
4.8. Clouage du sol.....	76
<b>5. CONCLUSION .....</b>	<b>78</b>
<b><u>CHAPITRE IV : ESSAIS ET INTERPRETATIONS .....</u></b>	<b><u>79</u></b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>79</b>
<b>2. OBJECTIF DE L'ETUDE EXPERIMENTALE .....</b>	<b>79</b>
<b>3. CARACTERISTIQUES DU SOL ET DES PRODUITS DE TRAITEMENT .....</b>	<b>79</b>
3.1. Marne naturelle .....	79
3.2. Poudre verre.....	81
3.3. Laitier de haut fourneau granulé .....	81
3.4. La chaux .....	82
<b>4. ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE .....</b>	<b>82</b>
4.1. But de l'essai.....	82
4.2. Appareillage de l'essai.....	83
4.3. Mode opératoire.....	83

4.4. Expression des résultats .....	83
<b>5. PROCEDURE EXPERIMENTALE.....</b>	<b>84</b>
5.1. Choix des dosages.....	84
5.2. Préparation des éprouvettes.....	84
5.3. Cisaillement des éprouvettes.....	86
<b>6. PRESENTATION DES RESULTATS .....</b>	<b>87</b>
6.1. Sol naturel .....	87
6.2. Sol traité.....	89
<b>7. ANALYSE &amp; DISCUSSIONS .....</b>	<b>100</b>
7.1. L'effet des ajouts sur l'angle de frottement.....	100
7.2. L'effet des ajouts sur la cohésion.....	101
7.3. L'effet des ajouts sur la résistance au cisaillement maximale .....	101
<b>8. CONCLUSION .....</b>	<b>103</b>
<b><u>CHAPITRE V : ETUDE NUMERIQUE .....</u></b>	<b><u>103</u></b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>103</b>
<b>2. OBJECTIF.....</b>	<b>103</b>
<b>3. LE LOGICIEL PLAXIS 8.2 .....</b>	<b>103</b>
<b>4. DEFINITION DES DONNES.....</b>	<b>104</b>
4.1. Modèle de la modélisation (Mohr-Coulomb) .....	104
4.2. Paramètre de la modélisation .....	105
<b>5. MODELISATION NUMERIQUE DU GRAND REMBLAI.....</b>	<b>107</b>
5.1. Caractéristiques géométriques.....	107
5.2. Conditions aux limites .....	107
5.3. Génération du maillage .....	107
5.4. Procédure de calcul .....	108
<b>6. RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....</b>	<b>108</b>
6.1. Coefficients de sécurité .....	108
6.2. Analyse et discussions .....	109
<b>7. RENFORCEMENT DES REMBLAIS INSTABLES PAR LA TECHNIQUE DE CLOUAGE.....</b>	<b>112</b>
7.1. Hypothèses générales données.....	112
7.2. Procédure de calcul .....	115
7.3. Maillage et maillage déformé.....	115
7.4. Facteurs de sécurité.....	116
<b>8. CONCLUSION .....</b>	<b>117</b>
<b><u>CONCLUSION GENERALE.....</u></b>	<b><u>118</u></b>
<b><u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</u></b>	<b><u>120</u></b>

## LISTE DES FIGURES

---

FIGURE 1 : CONSTITUANTS D'UN SOL.....	3
FIGURE 2 : STRUCTURE ELEMENTAIRE TETRAEDRIQUE.....	4
FIGURE 3 : STRUCTURE ELEMENTAIRE OCTAEDRIQUE.....	5
FIGURE 4 : STRUCTURE DE LA KAOLINITE .....	5
FIGURE 5 : STRUCTURE DE LA MONTMORILLONITE .....	6
FIGURE 6 : STRUCTURE D'ILLITE .....	6
FIGURE 7 : SCHEMA REPRESENTANT DES COLONNES LITHOLOGIQUES SIMPLIFIEES (MARNO-CALCAIRE).....	8
FIGURE 8: PHOTO DE TOURBE BLONDE.....	10
FIGURE 9 : ASPECT VISUEL DES SABLES.....	10
FIGURE 10: PHOTOS DES GRAVILLONS ROULES (A GAUCHE) ET CONCASSES (A DROITE).....	11
FIGURE 11 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU TREPAN-BENNE (BENOTO).....	13
FIGURE 12 : PHOTOS D'UNE TARIERE SIMPLE .....	13
FIGURE 13: PHOTOS DES TARIERES CONTINUES .....	14
FIGURE 14 : LES TRICONES A DENTS.....	14
FIGURE 15 : PRINCIPE DU CAROTTIER MAZIER .....	16
FIGURE 16: PHOTO DE L'ETAT DES CAROTTES APRES EXTRACTION DU FORAGE.....	17
FIGURE 17 : UNE IMAGE DE L'EMBALLAGE DE CAROTTES.....	18
FIGURE 18: LES CAISSES DE STOCKAGE .....	19
FIGURE 19: ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE .....	19
FIGURE 20 : ETATS DE CONSISTANCE D'UN SOL FIN.....	21
FIGURE 21 : APPAREILLAGE DE L'ESSAI BLEU DE METHYLENE.....	22
FIGURE 22 : CLASSIFICATION DES SOLS SELON LA VALEUR DE BLEU DE METHYLENE.....	22
FIGURE 23 : ESSAI EQUIVALENT DE SABLE .....	23
FIGURE 24 : CLASSIFICATION TRIANGULAIRE DES SOLS (CONTENANT MOINS DE 30% D'ELEMENTS DE DIAMETRE SUPERIEUR A 2 MM).....	26
FIGURE 25 : CLASSIFICATION DES SOLS FINS SELON LE SYSTEME USCS/LCPC .....	27
FIGURE 26 : CLASSIFICATION ROUTIERE SELON LE GTR.....	29
FIGURE 27: LE RISQUE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES.....	31
FIGURE 28 : SCHEMA DU TASSEMENT ET DU DEPLACEMENT LATERAL DU SOL DE FONDATION .....	31
FIGURE 29 : GLISSEMENT DE TERRAIN .....	32
FIGURE 30: L'EROSION DE SOL.....	32
FIGURE 31 : TRAITEMENT DES SOLS AUX LIANTS HYDRAULIQUES.....	36
FIGURE 32 : DOMAINE D'UTILISATION DES SOLS TRAITES DANS LES COUCHES DE CHAUSSEE.....	36
FIGURE 33 : PHOTOS DE L'ESSAI A LA PLAQUE ET A LA DYNAPLAQUE.....	39
FIGURE 34 : PHOTOS DE L'ESSAI IPI IN SITU ET MESURE DE LA PROFONDEUR D'ORNIERAGE .....	39
FIGURE 35 : (A) SILO VERTICAL FIXE (B) SILO MOBILE.....	43
FIGURE 36 : EPANDEUR DE PREMIERE GENERATION.....	43

FIGURE 37 : EPANDEUR NOUVELLE GENERATION.....	44
FIGURE 38 : MALAXEUR A OUTILS ANIMES (PULVIMIXEUR) .....	45
FIGURE 39 : ARROSEUSE A PRECISION NON SUFFISANTE .....	46
FIGURE 40 : COMPACTEUR LOURD A PNEUS DE LA CLASSE .....	46
FIGURE 41 : COMPACTEUR VIBRANT MONOCYLINDRE LISSE .....	47
FIGURE 42 : COMPACTEUR TANDEM (OU DOUBLE BILLE) .....	47
FIGURE 43: COMPACTEUR MIXTE .....	47
FIGURE 44: COMPACTEUR VIBRANT A PIEDS DAMEURS DE LA CLASSE VP1 .....	48
FIGURE 45 : UN COMPACTEUR STATIQUE A PIEDS DAMEURS .....	48
FIGURE 46 : PLAQUE VIBRANTE PQ1.....	49
FIGURE 47 : COUPE TYPE D'UNE PLATE-FORME SUPPORT DE CHAUSSEE.....	50
FIGURE 48 : TRAITEMENT DE SOL A LA CHAUX.....	53
FIGURE 49 : CYCLE DE FABRICATION DE LA CHAUX.....	54
FIGURE 50 : INFLUENCE DE TRAITEMENT SUR LA CONSISTANCE DU SOL (GTS 2000).....	56
FIGURE 51 : INFLUENCE DU TRAITEMENT SUR LES CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE DU SOL (GTS).....	56
FIGURE 52 : INFLUENCE DU TRAITEMENT SUR LES CARACTERISTIQUES DE LA PORTANCE DU SOL (GTS).....	57
FIGURE 53 : LE LAITIER DE HAUT-FOURNEAU .....	61
FIGURE 54 : PHOTOS DE LA COQUILLE D'ŒUF .....	62
FIGURE 55 : PHOTO DES CENDRES VOLANTES .....	63
FIGURE 56 : PHOTO DE LA POUDRE DE VERRE .....	64
FIGURE 57 : SCHEMA PRESENTANT UN REMBLAI .....	65
FIGURE 58 : PRINCIPE DE REALISATION DE COLONNES BALLASTEES.....	68
FIGURE 59 : RENFORCEMENT PAR GEOSYNTHETIQUES .....	70
FIGURE 60 : GEOTEXTILE NON TISSE .....	70
FIGURE 61 : GEOTEXTILE TISSES.....	71
FIGURE 62 : GEOTEXTILE TRICOTE .....	71
FIGURE 63 : GEOGRILLES UNIAXIALE ET BIAXIALE .....	72
FIGURE 64 : GEOCOMPOSITES.....	72
FIGURE 65 : RENFORCEMENT PAR ANCRAGE .....	73
FIGURE 66 : RENFORCEMENT PAR PIEUX .....	73
FIGURE 67 : PRINCIPE DE LA TERRE ARMEE .....	74
FIGURE 68 : CLASSIFICATION GENERALE DES FIBRES TEXTILES.....	75
FIGURE 69 : SCHEMATISATION DE LA ZONE ACTIVE ET DE LA ZONE RESISTANTE .....	76
FIGURE 70 : STABILISATION D'UNE PENTE INSTABLE PAR CLOUAGE .....	77
FIGURE 71 : PHOTOS DE LA MARNE ARGILEUSE .....	80
FIGURE 72 : COURBE GRANULOMETRIQUE DE LA MARNE.....	80
FIGURE 73 : LE LAITIER GRANULE AVANT ET APRES BROYAGE .....	82
FIGURE 74 : PHOTO DU SAC DE CHAUX UTILISEE.....	82
FIGURE 75 : APPAREILLAGE DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT.....	83
FIGURE 76 : DROITE COULOMB DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE .....	84

FIGURE 77 : PREPARATION DES COMBINAISONS POUR LE COMPACTAGE .....	85
FIGURE 78 : PHOTO DE LA MACHINE CBR AU COURS DE COMPACTAGE .....	86
FIGURE 79 : CONFECTION DES EPROUVETTES PAR COMPACTAGE STATIQUE : (A) COMPACTAGE MANUELLE LEGER, (B) COMPACTAGE DE L'EPROUVETTE, (C) EXTRACTION, (D) CONSERVATION.....	86
FIGURE 80 : PROCEDURE DE CISAILLEMENT : (A) INSTALLATION DE L'EPROUVETTE DANS LA BOITE DE CISAILLEMENT, (B) EPROUVETTE AU COURS DE CISAILLEMENT, (C) APRES CISAILLEMENT.....	87
FIGURE 81 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT-DEPLACEMENT AVANT TRAITEMENT (ECH. N°1).....	89
FIGURE 82 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT-DEPLACEMENT AVANT TRAITEMENT (ECH. N°2).....	89
FIGURE 83 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT-DEPLACEMENT 5% (VERRE + CHAUX) (ECH. N°1).....	91
FIGURE 84 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT-DEPLACEMENT 5% (VERRE + CHAUX) (ECH. N°2).....	91
FIGURE 85 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT-DEPLACEMENT 10% (VERRE + CHAUX) (ECH. N°1).....	93
FIGURE 86 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT-DEPLACEMENT 10% (VERRE + CHAUX) (ECH. N°2).....	93
FIGURE 87 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT-DEPLACEMENT 5% (LHF + CHAUX) (ECH. N°1) .....	95
FIGURE 88 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT-DEPLACEMENT 5% (LHF + CHAUX) (ECH. N°2) .....	95
FIGURE 89 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT-DEPLACEMENT 10% (LHF + CHAUX) (ECH. N°1) .....	96
FIGURE 90 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT-DEPLACEMENT 10% (LHF + CHAUX) (ECH. N°2) .....	97
FIGURE 91 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT - CONTRAINTE NORMAL DE LA MARNE NATURELLE.....	98
FIGURE 92 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT - CONTRAINTE NORMAL VERRE+CHAUX A 5%.....	98
FIGURE 93 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT - CONTRAINTE NORMAL VERRE+CHAUX A 10% .....	98
FIGURE 94 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT - CONTRAINTE NORMAL LHF+CHAUX A 5%.....	99
FIGURE 95 : COURBE CONTRAINTE DE CISAILLEMENT - CONTRAINTE NORMAL LHF+CHAUX A 10% .....	99
FIGURE 96 : EVOLUTION DE L'ANGLE DE FROTTEMENT EN FONCTION DU DOSAGE .....	100
FIGURE 97 : EVOLUTION DE LA COHESION EN FONCTION DU DOSAGE .....	101
FIGURE 98 : RESISTANCES AU CISAILLEMENT MAXIMALES AVANT ET APRES TRAITEMENT ( $\sigma=100$ ).....	102
FIGURE 99 : RESISTANCES AU CISAILLEMENT MAXIMALES AVANT ET APRES TRAITEMENT ( $\sigma=200$ ).....	102
FIGURE 100 : RESISTANCES AU CISAILLEMENT MAXIMALES AVANT ET APRES TRAITEMENT ( $\sigma=300$ ).....	103
FIGURE 101 : COURBE INTRINSEQUE DU MODELE DE MOHR-COULOMB .....	104
FIGURE 102 : PYRAMIDE DE MOHR-COULOMB TRACEE POUR $c=0$ .....	105
FIGURE 103 : FENETRE DES PARAMETRES DE MOHR-COULOMB .....	105
FIGURE 104 : MAILLAGE DU REMBLAI (ELEMENT TRIANGULAIRE A 15 NŒUDS) .....	108
FIGURE 105 : FACTEURS DE SECURITE EN FONCTION DE LA PENTE AVANT ET APRES TRAITEMENT (H=20M) .	110
FIGURE 106 : FACTEURS DE SECURITE EN FONCTION DE LA PENTE AVANT ET APRES TRAITEMENT (H=25M) .	111
FIGURE 107 : FACTEURS DE SECURITE EN FONCTION DE LA PENTE AVANT ET APRES TRAITEMENT (H=30M) .	111
FIGURE 108 : REPRESENTATION DU MAILLAGE DEFORME APRES LA CONSTRUCTION DU REMBLAI DE SOL NATUREL (45°/ 20M). .....	112
FIGURE 109 : SURFACE DE RUPTURE .....	113
FIGURE 110 : (A) MAILLAGE, (B) MAILLAGE DEFORME APRES LA CONSTRUCTION DU REMBLAI DE SOL NATUREL (60°/20 M) .....	115
FIGURE 111 : (A) MAILLAGE, (B) MAILLAGE DEFORME APRES LA CONSTRUCTION DU REMBLAI DE SOL NATUREL (45°/ 20M) .....	115
FIGURE 112 : (A) MAILLAGE, (B) MAILLAGE DEFORME APRES LA CONSTRUCTION DU REMBLAI DE SOL NATUREL (60°/30 M) .....	116

## LISTE DES TABLEAUX

---

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DE CERTAINES FAMILLES D'ARGILE .....	7
TABLEAU 2 : PARAMETRES D'ETAT DE QUELQUES SOLS FINS (FRANCE) .....	24
TABLEAU 3 : DENOMINATION DES FRACTIONS GRANULAIRES DES PARTICULES DE SOLS.....	25
TABLEAU 4 : DENOMINATION DES SOLS FINS CALCAIRES .....	27
TABLEAU 5 : DEFINITION DES CLASSES DE SOLS SELON LE SYSTEME AASHTO .....	29
TABLEAU 6 : TABLEAU DE CLASSIFICATION AASHTO.....	30
TABLEAU 7 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DE MODULE A OBTENIR APRES TRAITEMENT.....	40
TABLEAU 8 : VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DE L'IPI. ....	40
TABLEAU 9 : OBJECTIF IPI A ATTEINDRE APRES TRAITEMENT (NF P 94-102-1).....	49
TABLEAU 10 : APTITUDE AU TRAITEMENT NF P94-100 .....	51
TABLEAU 11 : MODE DE CONSERVATION DES EPROUVETTES POUR L'ETUDE DE L'APTITUDE DE TRAITEMENT DU SOL (NF P94-100).....	51
TABLEAU 12 : AMELIORATION DE LA COUCHE DE FORME [GUIDE SETRA/LCPC, 1981].....	52
TABLEAU 13 : LES DEFERENTES CARACTERISTIQUES DE LA CHAUX .....	55
TABLEAU 14 : COMPOSITION CHIMIQUE DU LAITIER DE HAUT FOURNEAU .....	61
TABLEAU 15 : PRINCIPALES METHODES DE RENFORCEMENT DE SOL DE FONDATION POUR L'EDIFICATION DES REMBLAIS.....	67
TABLEAU 16 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET CLASSIFICATION DE LA MARNE NATURELLE .....	80
TABLEAU 17 : GRANULOMETRIE PAR TAMISAGE DU VERRE .....	81
TABLEAU 18 : QUANTITES DE CHAQUE COMPOSANT DES MELANGES SOL - LIANT.....	84
TABLEAU 19 : RESULTATS DES ESSAIS DE CISAILLEMENT AVANT TRAITEMENT (SOL NATUREL).....	88
TABLEAU 20 : RESULTATS DES ESSAIS DE CISAILLEMENT APRES TRAITEMENT 5% (VERRE + CHAUX) .....	90
TABLEAU 21 : RESULTATS DES ESSAIS DE CISAILLEMENT APRES TRAITEMENT 10% (VERRE + CHAUX) .....	92
TABLEAU 22 : RESULTATS DES ESSAIS DE CISAILLEMENT APRES TRAITEMENT 5% (LHF + CHAUX) .....	94
TABLEAU 23 : RESULTATS DES ESSAIS DE CISAILLEMENT APRES TRAITEMENT 10% (LHF + CHAUX) .....	96
TABLEAU 24 : RESISTANCES AU CISAILLEMENT MAXIMALES ( $\tau_{MAX}$ ) AVANT ET APRES TRAITEMENT.....	97
TABLEAU 25 : VALEURS DES ANGLES DE FROTTEMENT INTERNE ET COHESION (AVANT ET APRES TRAITEMENT) .....	99
TABLEAU 26 : PARAMETRE DE LA MODELISATION.....	107
TABLEAU 27 : RESULTATS DE FACTEUR DE SECURITE POUR LA HAUTEUR 20 M.....	109
TABLEAU 28 : RESULTATS DE FACTEUR DE SECURITE POUR LA HAUTEUR 25 M.....	109
TABLEAU 29 : RESULTATS DE FACTEUR DE SECURITE POUR LA HAUTEUR 30 M.....	109
TABLEAU 30 : LES LIGNES DE RUPTURE DES REMBLAIS INSTABLES.....	114
TABLEAU 31 : PROPRIETES DES ANCRAGES (ELEMENTS NODE-TO-NODE ANCHOR) .....	114
TABLEAU 32 : FACTEURS DE SECURITE DES REMBLAIS INSTABLES APRES RENFORCEMENT .....	116

# INTRODUCTION GENERALE

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

A travers la géologie des terrains de notre pays, des sols peu convenables présentant des limitations en termes de résistance au cisaillement et au glissement sont fréquemment rencontrés. Il est donc nécessaire d'améliorer ces sols pour les rendre utilisables pour la construction. Ces limitations pourraient être surmontées par l'amélioration des propriétés géotechniques des sols en employant différentes méthodes chimiques et/ou mécaniques d'où l'intérêt de la stabilisation des sols. Le choix de l'une de ces méthodes dépendent de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à améliorer et la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux utilisés ainsi que les conditions d'environnement.

La technique de stabilisation chimique des sols par l'usage des ajouts minéraux est largement utilisée dans de nombreuses applications de génie civil et elle est encore en plein essor. Ces ajouts ont été longtemps employés comme stabilisants de sol tels que la chaux, le ciment, les liants hydrauliques routiers, ...

D'autre part, les techniques de renforcement des sols sont les plus utilisées dans notre pays pour stabiliser les talus naturels ou artificiels. Ces techniques se développent très rapidement à travers le monde, le renforcement des sols consiste à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique ou par l'inclusion dans le sol.

Dans le cadre de notre travail de fin d'étude, il a été choisi de travailler sur un sol fin (marne argileuse) présentant de caractéristiques mécaniques médiocres. Ce type de sol est très souvent rencontré sur les chantiers de terrassement des infrastructures de base (routes, chemins de fer...). Nous avons mené une étude expérimentale de traitement de sol au laboratoire en utilisant deux agents non-conventionnels à savoir le laitier de haut fourneau (LHF) et le déchet de verre sous forme de poudre fine. Ces deux agents ont été activés par une faible quantité de chaux éteinte pour déclencher leur réactivité. En deuxième partie, nous avons réalisé une étude numérique de stabilité d'un talus de grand remblai constitué de sol traité et traité-renforcé par la technique de clouage, afin de mieux comprendre l'effet du couplage des deux techniques sur la stabilité des talus de grands remblais.

Notre mémoire contient cinq chapitres :

Le premier chapitre décrit les caractéristiques physiques et minéralogiques des différents sols et consacre une partie pour les sols argileux. Il contient aussi les systèmes de classification des sols (GTR et USCS...). Il présente également les principaux problèmes des sols argileux (tassement, gonflement, glissement...).

Le deuxième chapitre est consacré au traitement de sols. Il parle des produits de traitement, et la technique et le matériel nécessaire pour réaliser un traitement de sol.

Dans le troisième chapitre, nous avons fait le point des techniques de renforcement des sols en particulier la méthode de renforcement de sol par clouage.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus par l'étude expérimentale menée au laboratoire. Il contient une étude du comportement mécanique et géotechnique d'un sol fin ayant subi un traitement chimique.

Enfin, le dernier chapitre est consacré à l'étude numérique réalisée à l'aide du logiciel Plaxis d'un grand remblai en marne naturelle et traitée, traitée et renforcée avec la technique de clouage.

**CHAPITRE I :**  
**Identification et**  
**classification des sols**

---

**CHAPITRE I : IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION DES SOLS**

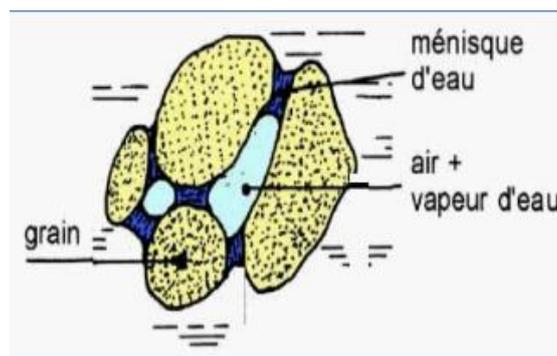
---

**1. INTRODUCTION**

Dans leur état naturel, les sols sont des matériaux hétérogènes avec des caractéristiques très variables. Les principaux problèmes liés à l'utilisation des sols dans les terrassements des infrastructures de transport (routes, chemins de fer, aérodromes, ports,...) se manifestent en général par une capacité portante faible, des déformations (tassements) et des glissements de talus. Le développement de la mécanique des sols, et la recherche dans le domaine de la géotechnique, ont permis de mieux connaître les sols à travers des essais de caractérisation afin de mettre au point des techniques permettant l'amélioration des sols présentant de médiocres propriétés mécaniques. Dans ce chapitre on va décrire les différents types de sols et leurs caractéristiques, la procédure d'identification des sols, les systèmes de classification USCS/LCPC, GTR et AASHTO ainsi que les problèmes liés aux sols fins.

**2. DIFFERENTS TYPES DE SOLS****2.1. Eléments constitutifs d'un sol**

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau libre ou liée et d'air ou de gaz. Il est donc, en général, constitué de trois phases : **phase solide**, **phase liquide** et **phase gazeuse** (Fig. 1).



*Figure 1 : Constituants d'un sol*

Entre les grains du squelette, les vides peuvent être remplis par l'eau, par un gaz ou les deux à la fois. Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de

l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide (cas le plus fréquent).

L'eau peut remplir plus ou moins tous les vides entre les grains et être mobile (écoulement plus ou moins rapide). Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé. Dans les régions tempérées, la plupart des sols en place, à quelques mètres de profondeur sont saturés. Lorsqu'il n'y a pas d'eau, le sol est dit sec. L'étude complète des sols non saturés, qui constituent un milieu à trois phases, est très complexe.

## 2.2. Les argiles

L'argile est une roche sédimentaire composée pour une large part de minéraux argileux, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllo silicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leurs qualités d'absorption.

### 2.2.1. Structure élémentaire des minéraux argileux

Tous les minéraux argileux sont composés par l'assemblage, d'eau ( $H_2O$ ), de silice, sous forme de silicates ( $SiO_3$ ) et d'aluminium, sous forme d'alumine ( $Al_2O_3$ ). Leur structure élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicates et alumines. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillets. Ce dernier a un nombre variable de couches pouvant être regroupées en deux types :

➤ **Le Tétraèdre de silice  $SiO_4$**  : Quatre atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrant un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (Fig. 2).

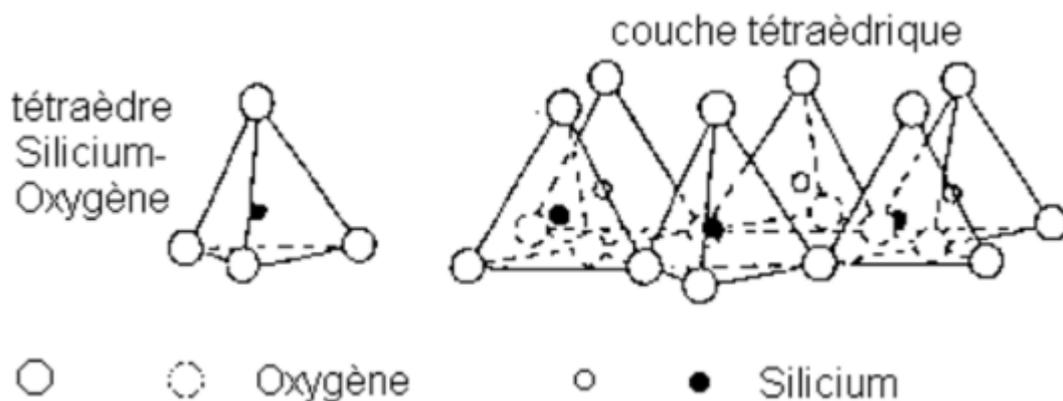


Figure 2 : Structure Élémentaire Tétraédrique

➤ **L'octaèdre d'alumine  $Al_2(OH)_6$  ou de magnésium  $Mg_3(OH)_6$**  : Six ions hydroxydes enserrant un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se

combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques (Fig. 3).

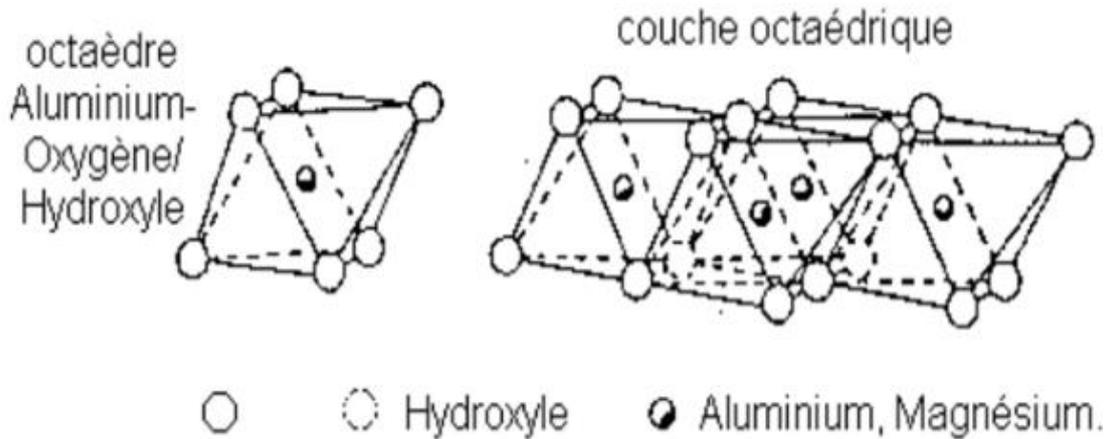


Figure 3 : Structure élémentaire Octaédrique

### 2.2.2. Les différents types d'argiles

Les types d'argiles les plus fréquents sont :

#### a) Kaolinite

La kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche (Fig.4).

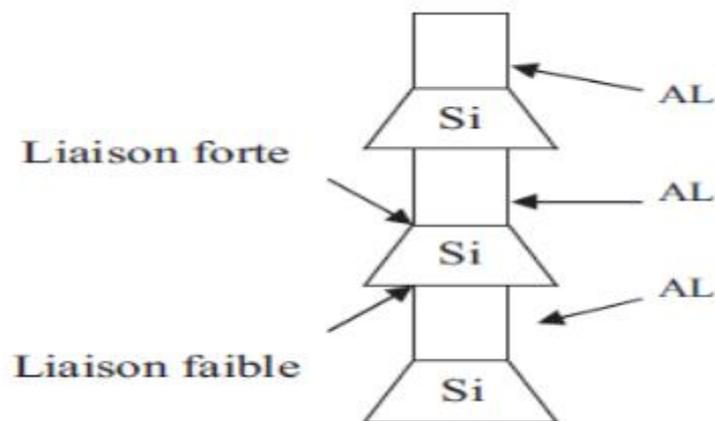


Figure 4 : Structure de la kaolinite

#### b) Montmorillonite

La montmorillonite, parfois appelée Smaltite, est un minéral argileux important composé de deux feuillets de Silice et d'un feuillet d'Alumine (Gibbsite). Les feuillets

en octaèdres se trouvent entre deux feuillets de Silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions de gonflements qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et pavages (Fig. 5).

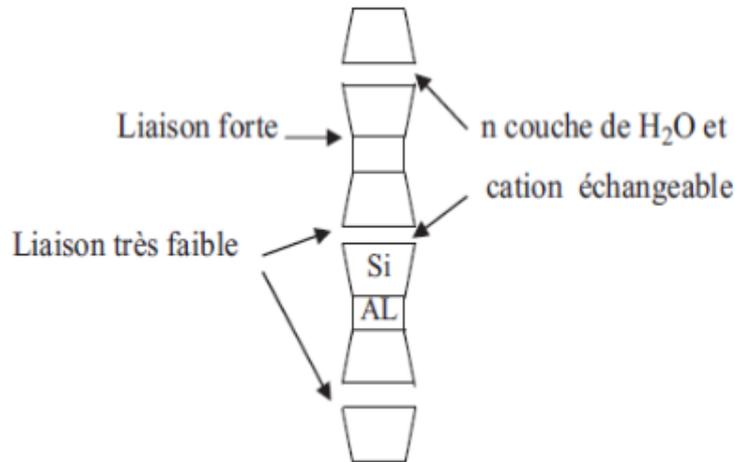


Figure 5 : Structure de la montmorillonite

*c) Illite*

L'illite est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il ya des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles (Fig.6).

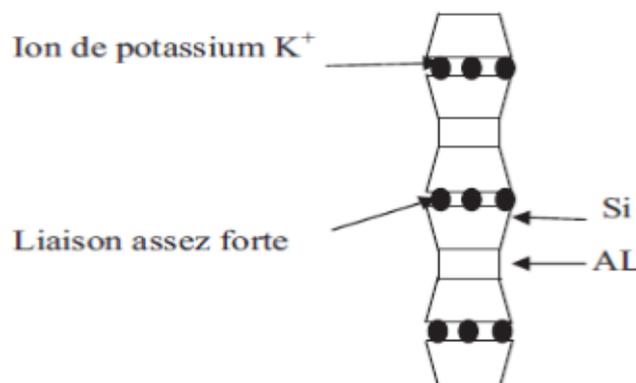


Figure 6 : Structure d'illite

*d) caractéristiques physiques des argiles*

Nom	Nombre feuillets par particule	Diamètre particule (µm)	Epaisseur particule (µm)	Surface spécifique m <sup>2</sup> /g
Kaolinite	100 - 200	0,1 - 4	1 - 10	10 - 20
Illite	1 - 10	0,1 - 1	0,003 - 0.01	65 - 100
Montmorillonite (smectite)	1	0,1	0,001	700 - 840

*Tableau 1 : Caractéristiques de certaines familles d'argile*

**2.3. Les Limons**

Les limons possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles (la teneur en argile est variable). Ils sont constitués par des éléments de dimensions comprises entre 2 et 20 µm. Le principal minérale constitutifs est le quartz associé le plus souvent l'argile, la calcite, les feldspaths, les oxydes des hydroxydes de fer, le mica ou les minéraux lourds.

L'origine du limon peut être fluviale ou éolienne ; dans ce dernier cas, on lui donne souvent le nom de lœss. Le lœss, habituellement de couleur jaunâtre ou brun, est un sol caractérise par un très bon tri granulométrique dû à son origine éolienne, avec essentiellement des grains compris entre 10 et 50 µm. Il contient, en proportion moindre des sables et des argiles (ces dernières pouvant être agglomérées et former des grains de limon fin). Les limons peuvent contenir des graviers des galets, des concrétions.

**2.4. Les Marnes**

Roche tendre composée en proportions variables d'argile et de calcaire mêlés à du sable, qui a la propriété de se déliter et qui est utilisée selon sa composition pour l'amendement des terres, la fabrication de ciments, de tuiles, de céramiques. On considère, selon leur composition, trois grandes catégories :

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonatent de calcium.
- les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95 %.

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis.

Le caractère évolutif des marnes est dû à la présence des minéraux argileux qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couches de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristique mécaniques).

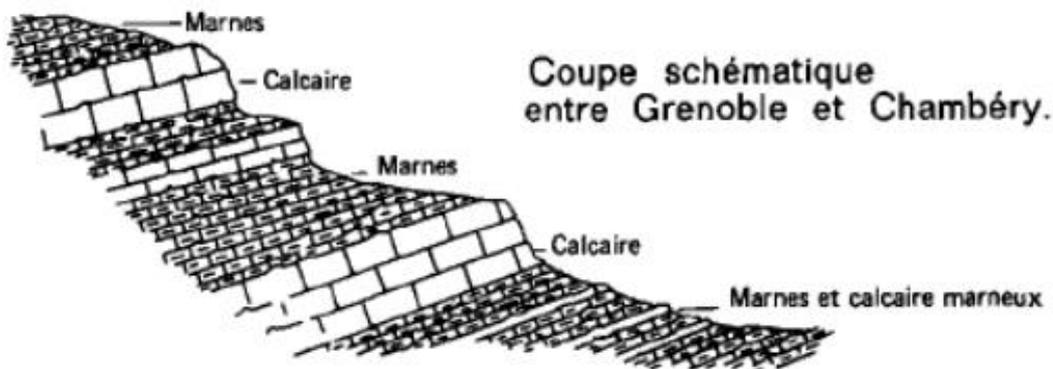


Figure 7 : Schéma représentant des colonnes lithologiques simplifiées (marno-calcaire)

## 2.5. Les vases

Les vases sont des dépôts formés par les marées ou que l'on rencontre dans les lits des lacs et des rivières. Leur composition est extrêmement variable et dépend plus ou moins de leur mode de formation. Elles se composent en grande partie de roche broyée, d'argile et de sable, avec de coquillages (en partie rompus) et des débris organiques (restes végétaux et animaux) en quantités variables. Il existe plusieurs types de vases à savoir :

**Vases marines** : les vases marines ou de marée ; aussi connues sous les noms de tange, vases marais, vases salines et parfois de vases rivières sont déposées par la marée à l'embouchure des rivières et des ruisseaux qui se jettent dans la mer et sur les bords peu élevés des baies et des anses. Elles se composent principalement de particules rocheuses broyées, sous forme d'un sable très fin, et de limon et d'argile en différentes proportions.

**Vases de moules et de coquillage d'huitres** : les vases de coquillages sont importantes en raison du carbonate de chaux qu'elles renferment.

**Vases d'étangs, de lacs et de rivières** : ces catégories de vases sont généralement formées par le dépôt des fines substances portées par les eaux des rivières et des ruisseaux. Ce sédiment, qui se compose surtout de particules rocheuses finement broyées, contient souvent une quantité considérable de débris organiques, aussi ces vases sont généralement plus riches en matières organiques que les vases de marées ou d'eau salée.

## 2.6. Les Tourbes

La tourbe se définit comme le produit de la fossilisation de débris végétaux par des microorganismes (bactéries, anthropodes, champignons, microfaune) dans des milieux humides et pauvres en oxygène que l'on appelle tourbière sur un intervalle de temps compris entre 1 000 et 7 000 ans. Les tourbes se présentent comme un matériau de texture fibreuse et elles se forment dans le fond des vallées humides et les dépressions marécageuses. Elles peuvent contenir des éléments détritiques : Sables, graviers, vases. Elles contiennent une très forte proportion d'eau. Si la tourbe est soumise à des conditions particulières de pression et de température causées par son enfouissement, elle se transforme, au bout d'une période de l'ordre du million d'années, en charbon.

Il existe plusieurs types de la tourbe à savoir :

**La tourbe blonde** : qui provient de la transformation des sphaignes. Elle est riche en fibre de cellulose et en carbone. Sa texture est fibrique. Ses autres traits essentiels sont sa faible densité, sa forte teneur en eau et sa pauvre teneur en cendre minérale car elle est souvent jeune (2 000 ans).

**La tourbe brune** : qui provient de la transformation de débris végétaux ligneux (arbres) et d'éricacées. Elle est composée de fibres mélangées à des éléments plus fins, provenant d'une dégradation plus poussée des végétaux, lui donnant une texture mésique. Elle est plus âgée (5 000 ans) que la précédente.

**La tourbe noire** : qui provient de la transformation des cypréracées. Elle est riche en particules minérales et organiques fines. Sa texture est saprique, c'est-à-dire que la tourbe est plastique et moins fibreuse. Visuellement, la tourbe noire se distingue facilement de la tourbe blonde par sa couleur foncée. Une tourbe blonde très ancienne tend à se rapprocher, par certains caractères, de la tourbe noire.



*Figure 8: Photo de tourbe blonde*

## 2.7. Les Sables

On entend par sable la fraction des granulats dont les grains ont des dimensions comprises entre 0,08 mm et 5 mm. Il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30%.

Selon leurs provenances, les sables peuvent être classés comme suit :

***Sable de rivière*** : il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons.

***Sable de mer*** : il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.

***Sable de carrière (artificiel)*** : il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, grés...) dans les carrières de granulats. Il est souvent plein de filler (fines).

***Sable de dune*** : Il se trouve dans les régions présahariennes du sud du pays. Il est similaire à un sable de mer.



*Figure 9 : Aspect visuel des sables*

## 2.8. Les Gravillons

Les gravillons sont un ensemble de petits cailloux ni trop gros ni trop petits de dimension homogène que l'on utilise avec du sable dans la fabrication du béton et dans les différents domaines des bâtiments et les travaux publics (routes, ouvrages en terre,...). Leur dimension commence de 3 à 4 mm pour les plus petits à 20 mm pour les plus gros. Il existe deux grands types de gravillons :

**Les gravillons roulés** : ce sont principalement les matériaux alluvionnaires, ils sont extraits directement dans le lit des rivières, ou dans des zones qui l'étaient auparavant et qui sont devenues des zones agricoles depuis, dans ces cas-là les terres végétales sont enlevées par l'exploitant pour atteindre les gisements anciens. Les éléments arrachés aux roches environnantes ont été usés et arrondis par l'action de l'eau et du courant.

**Les gravillons concassés** : lorsque la roche est massive comme le calcaire, elle est extraite dans des carrières à l'explosif. Les bancs de pierre peuvent faire plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, la roche est alors explosée en blocs de plusieurs mètres cubes qui sont ensuite concassés dans des grosses mâchoires métalliques avant d'être criblés. Les arêtes sont alors vives sans toutefois être coupantes : ce sont les gravillons concassés.



*Figure 10: Photos des gravillons roulés (à gauche) et concassés (à droite)*

## 3. IDENTIFICATION DES SOLS

### 3.1. Techniques de reconnaissance géotechnique

La reconnaissance géotechnique a pour objectifs de :

- Connaître les matériaux en présence (sols, remblais divers...) et leurs caractéristiques physico-chimiques (classification) et mécaniques (résistance, déformabilité...).
- Estimer la variabilité du sous-sol dans son volume : Elle résulte de condition de formation et d'évolution des sols en présence (transport gravitaire, glaciaire, fluvial, éolien, sédimentation...).

- Connaître les conditions hydrogéologiques (nature et profondeur de la nappe, sens des écoulements souterrains...).

### 3.1.2. Paramètres à identifier

Les paramètres nécessaires pour décrire les propriétés physiques et mécaniques d'un sol sont :

- Paramètres d'identification et d'état : dimensions des particules, masse volumique, argilosité, porosité, indices des vides, ...
- Paramètres hydrogéologiques : perméabilité, profondeur de la nappe, ...
- Paramètres de déformabilité : indice de compression, gonflement, modules œdométrique et préssiométrique, ...
- Paramètres de résistance : cohésion, angle de frottement, pression limite, résistance de pointe, ...

### 3.1.3. Outils de reconnaissance

On dispose de plusieurs outils de reconnaissance géotechnique à savoir :

*Les essais de laboratoire* qui présentent l'avantage d'être précis, bien maîtrisés, et simple à réaliser. En revanche, ils présentent l'inconvénient d'être effectués sur des échantillons peu représentatif de l'ensemble du sol.

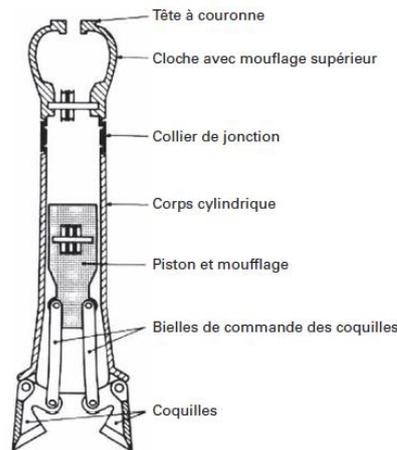
*Les essais in situ (en place)* qui permettent d'avoir des informations ponctuelles, globales ou partielles. Ils ont l'avantage d'être effectué dans l'état naturel du le milieu et les conditions de sollicitations sont proches de celles induites par des ouvrages. La multiplication et le couplage des résultats des différents essais permettent d'accéder à la variabilité du terrain.

## 3.2. Techniques d'échantillonnage

### 3.2.1. Méthodes d'échantillonnage et leurs matériels

#### a) Forage par fonçage

Technique très ancienne utilisée pour la recherche d'eau. Le principe de la méthode **par fonçage** consiste à enfoncer par percussion, battage, vibro-fonçage ou simplement par pression continue un tube carottier à paroi mince muni d'une trousse coupante raccordé à un train de tiges. Le principe de la méthode à **percussion** consiste à effectuer le forage à l'aide d'un trépan-benne ou hammergrab (système Benoto et Casagrande). Le forage peut être exécuté avec ou sans tubage à l'avancement selon la dureté du terrain.



*Figure 11 : Principe de fonctionnement du trépan-benne (Benoto)*

***b) Forage à rotation***

Le principe consiste à transmettre à l'outil de pénétration une rotation avec une poussée par l'intermédiaire d'un système de tiges ou de tubages.

Selon l'objectif visé, nous envisagerons le forage :

❖ Tarière simple

Il existe des tarières léger, portatif (tarière à main et petites moto-tarières) et du matériel lourd (tarières mécaniques lourdes). Les tarières à main et petites moto-tarières permettent d'exécuter des forages de diamètres 60 à 350 mm en terrain meuble en absence de blocs jusqu'à des profondeurs limitées (quelques mètres).

Les tarières mécaniques lourdes sont généralement destinées à la reconnaissance superficielle ou au forage de pieux dans un terrain meuble ou dans la roche tendre.



*Figure 12 : Photos d'une tarière simple*

❖ Tarière continu

Les tarières continues sont des vis sans fin assemblées bout à bout, travaillant généralement à sec. Elles ont des diamètres variables, les sédiments sont remontés en continu le long des spires. La tarière continue n'est pas adaptée à des terrains durs ou en présence de la nappe aquifère et en terrain bouillant.



*Figure 13: Photos des tarières continues*

❖ Tricône

Issu de la recherche pétrolière, le tricône est largement appliqué en géotechnique. Il permet de réaliser des forages plus rapidement par rapport au système de percussion ou battage. Le tricône est entraîné en rotation et poussé par des tiges.

Il existe deux catégories de tricône :

**Tricônes à dents** : adaptés pour une perforation de sol dite « à la lame » (sol tendre, moyennement dures et dures)

**Tricônes à picots** : adaptés pour une perforation de sol dite « à l'éclatement » (sol moyennement dures, dures et très dures)



*Figure 14 : les tricônes à dents*

❖ Carottier à rotation

Le carottier permet de découper un échantillon de sol et le remonter dans le meilleur état naturel que possible. Ceci afin de permettre une identification visuelle et aussi procéder à différents tests en laboratoire.

Il existe plusieurs versions du carottier à rotation, on trouve principalement :

**Le carottier simple** : l'eau de refroidissement et d'évacuation des débris de coupe arrive directement sur l'échantillon qui détruit en totalité ou en partie la carotte découpé surtout dans le cas d'un sol meuble.

**Le carottier double** : permet d'éviter ou diminuer cette érosion par l'intermédiaire d'un deuxième tube positionné à l'intérieur. La rotation fait tourner uniquement le carottier sans entraîner en rotation le tube intérieur. L'eau d'injection circule entre les deux tubes ce qui minimise l'altération des carottes surtout dans les sols meubles.

**Le carottier triple enveloppe** : c'est un carottier double dans lequel une gaine plastique, parfois transparente, est positionnée à l'intérieur du tube intérieur afin de faciliter l'extraction de la carotte et la protéger dans l'attente de son envoi en laboratoire.

**Le carottier à câble** : c'est un carottier double avec la possibilité de manoeuvrer le tube intérieur (descente ou remontée), chose qui n'est pas possible en utilisant les précédents carottiers (remonter l'ensemble des tubes en surface pour récupérer la carotte).

**Le carottier Mazier** : Ce carottier est utilisé pour les sols très meubles, il possède une extension du tube intérieur dépassant de l'extrémité de la couronne ce qui permet de prélever aussi loin que possible de la sortie de l'injection et donc avoir des carottes intacts.

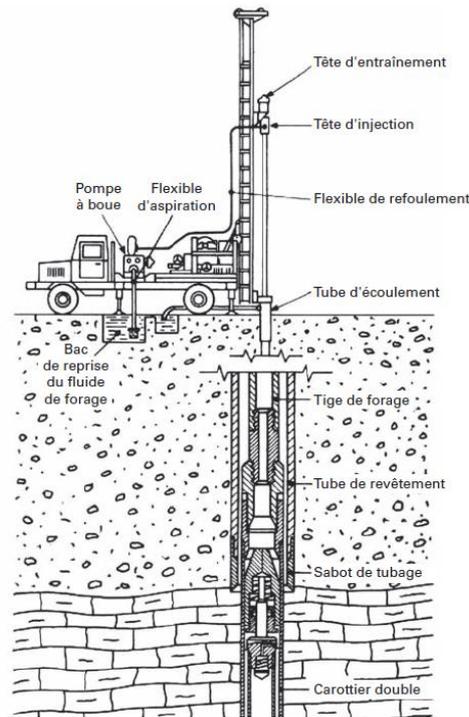


Figure 15 : Principe du carottier Mazier

### c) Forage à roto-percussion

Le forage à roto-percussion est réalisé en appliquant à l'outil de forage un couple de rotation et une énergie de frappe (1200 à 1500 coups/min). Cette méthode est particulièrement adaptée aux roches dures. Il existe plusieurs catégories de cette méthode, nous pouvons citer principalement :

**Le marteau perforateur sur glissière** : Perforation des roches dures en carrière ou en tunnel.

**Le marteau fond du trou** : Le marteau perforateur est descendu au bas du forage pour éviter le flambement et le frottement des tiges/tubes.

**Le système de tubage auto-foreur (STAF)** : Sol difficiles (alternance blocs), forage utilisé pour réaliser des essais pressiométriques.

**Le vibro-carottage** : Adapté pour les sols cohérents noyés sous nappe.

**Le système VPRH (vibration, percussion, rotation hydrauliques)** : Tous types de sols, rapidité d'exécution.

### 3.2.2. Etats des échantillons extraits du forage

La représentativité des échantillons prélevés en forage en utilisant les diverses méthodes citées précédemment est importante, car elle conditionne la fiabilité des résultats d'essais en laboratoire.

Les essais d'identification peuvent être effectués sur des échantillons remaniés mais intégralement récupérés. Par contre, les essais destinés à déterminer les propriétés mécaniques des sols testés réclament des échantillons intacts, ou aussi peu remaniés que possible. Les diverses méthodes de sondage et de forage fournissent à cet égard des échantillons : intact, intégral plus au moins remanié ou incomplet plus au moins remanié.



*Figure 16: Photo de l'état des carottes après extraction du forage*

#### **a) Echantillon intact**

On appelle « *intact* » un prélèvement qui aura conservé, autant qu'on puisse l'apprécier, l'intégralité de ses constituants, de sa structure, de ses caractéristiques et sur lequel on pourra effectuer :

- Essais d'identification : granulométrie, sédimentométrie, plasticité, etc.
- Essais mécaniques : triaxial, odomètre, cisaillement, CBR, etc.

Ce genre d'échantillon (intact) est à prélever avec :

- Carottier à rotation (carottier triple enveloppe).
- Battage (trousse coupante).
- Tarière simple (carottier à hélice type Laboratoire des Ponts et Chaussées ou Bonne Espérance).

#### **b) Echantillon intégral plus au moins remanié**

La structure de l'échantillon est plus ou moins altérée à complètement détruite par l'outil de forage. En revanche, la totalité des constituants sont présents.

On pourra effectuer des essais d'identification sur ce genre d'échantillon (teneur en eau, plasticité, compacité Proctor, etc). Ces essais sont particulièrement intéressants pour les études de terrassement.

Ce genre d'échantillonnage est typique de :

- la tarière simple.
- le Carottier simple à sec.
- le système VPRH.

***c) Echantillon incomplet plus au moins remanié***

Une partie de l'échantillon reste dans le trou, celle qui remonte à la surface est déstructurée. Les cas de figures sont nombreux, et cette situation peut se présenter avec la plupart des moyens de forage. Ce genre de prélèvement est fréquent pour les matériaux peu cohérents (sable et/ou gravier peu argileux ou peu limoneux).

Parmi les divers cas de figures on peut citer :

- le lavage de fines lors du forage.
- lors du carottage, au carottier simple ou double, dans des alternances de terrains durs et tendres, un élément dur poussé par la couronne du carottier détruit le reste de la carotte constituée de matériaux tendres ou peu cohérents qui se perdent alors avec le fluide de forage.
- les débris produits par le forage au tricône ou au marteau perforateur, représentent d'une certaine manière l'échantillonnage le plus remanié et déstructuré.

**3.2.3. Conditionnement, transport et conservation des carotte**

Les carottes prélevées sur le terrain doivent être conditionnées et transportées jusqu'au laboratoire d'essai et conservées jusqu'à la réalisation des essais, qui se déroule parfois sur de longues périodes, afin de fournir des renseignements représentatifs.

Le conditionnement des carottes permet le maintien de la teneur en eau et l'absence de déformations et de chocs. Il est habituellement assuré en enfermant les carottes dans un emballage étanche (tube scellé aux extrémités, emballage de l'éprouvette dans des feuilles de papier spécial paraffiné, etc.)



*Figure 17 : une image de l'emballage de carottes*

Les échantillons sont transportés dans des caisses spéciales, en position verticale ou horizontale où elles reposent sur des plaques de mousse synthétique servant d'amortisseur contre les vibrations et les chocs éventuels. Il ne faut pas oublier de numérotées et étiquetées les carottes (référence des sondages et informations générales).

Une fois arrivées au laboratoire, les carottes sont stockées dans une chambre réglée à une température et un degré d'humidité spécifiques (étuve universelle). Les manipulations précédant les essais sont limitées au minimum.



*Figure 18: les caisses de stockage*

### **3.3. Essais d'identification au laboratoire**

#### **3.3.1. Granulométrie par tamisage**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution relative des diamètres des grains d'un sol. L'analyse granulométrique des échantillons sont testés selon la norme NF P 94-057. L'essai consiste à séparer par brassage sous l'eau, les grains agglomérés puis une fois séchée, à classer au moyen d'une série de tamis et à peser le refus cumulé sur chaque tamis, la masse cumulée.



*Figure 19: Analyse granulométrique par tamisage*

### 3.3.2. Consistance (limites d'Atterberg)

La consistance est définie comme un état de fermeté, est liée aux forces de cohésion entre les particules et ne concerne donc que les sols cohérents. Elle a une influence sur la résistance aux déformations. La consistance dépend principalement de la distance qui sépare les particules d'un sol (plus l'indice des vides est élevé, plus la distance est grande). En effet, les vides étant remplis d'eau, la mesure de la teneur en eau permet d'évaluer l'indice des vides et, par conséquent, la distance entre les particules.

On distingue quatre états de consistance (Fig. 20) :

#### *L'état solide*

Lorsque le sol est à l'état solide, ses particules sont en contact les unes avec les autres, et les films d'eau adsorbée sont très minces et se touchent : il n'y a pas d'eau libre entre les particules. L'assèchement du sol ne produit aucun retrait. Le sol manifeste une très grande résistance au cisaillement et, sous l'effet d'une charge, les déformations sont faibles avant qu'il ait rupture. En génie civil, on parle de sol ayant un comportement fragile, similaire à celui de la brique.

#### *L'état semi-solide*

Un sol à l'état semi-solide, a une faible teneur en eau, et les liens de cohésion entre ses particules sont très forts. Les films d'eau adsorbée, quoiqu'encore minces, séparent légèrement les particules, de telle sorte qu'un assèchement du sol causerait un retrait. Il s'ensuit que les déformations du sol provoquées par des charges sont toujours accompagnées de fissures

#### *L'état plastique*

Lorsque le sol est à l'état plastique, sa teneur en eau est plus grande et ses particules sont plus éloignées les unes des autres. Les films d'eau adsorbée sont beaucoup plus épais, mais ils se touchent encore ; la cohésion du sol est plus faible qu'à l'état semi-solide. Sous de petites charges, le sol se déforme sans fissures. Sa consistance varie de celle du beurre mou à celle du massif ferme : c'est un sol qu'on peut façonner à la main.

#### *L'état liquide*

Lorsque le sol est à l'état liquide, sa teneur en eau est si élevée qu'il n'existe pratiquement plus aucune cohésion entre les particules, qui sont entourées de leur film d'eau adsorbée et isolées les unes des autres par l'eau libre. Le sol peut alors se comporter comme un liquide visqueux d'une consistance variant de celle de la soupe aux pois à celle du beurre mou.

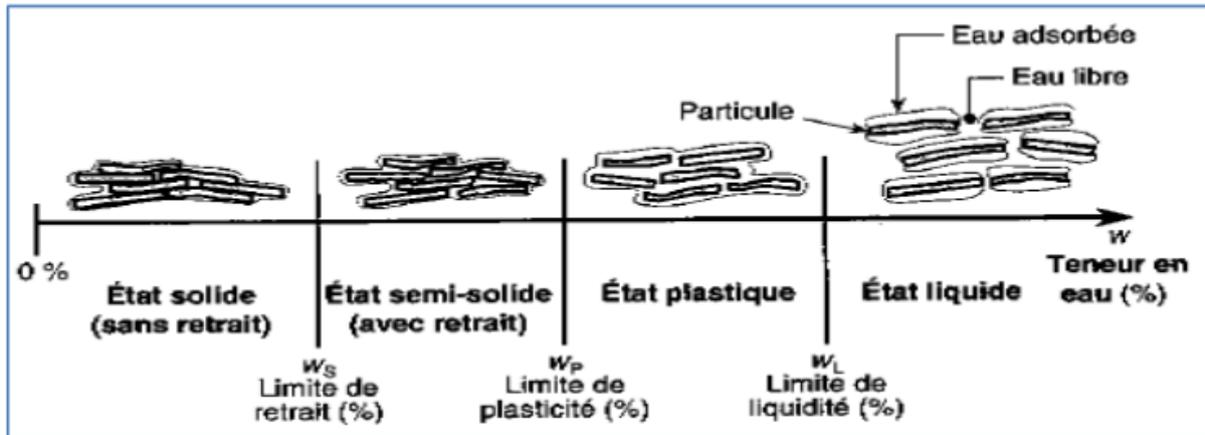


Figure 20 : Etats de consistance d'un sol fin

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

**La limite de retrait ( $w_s$ ) :** est la teneur en eau maximale que le sol peut avoir sans changer de volume. Cette limite sépare l'état solide de l'état semi-solide.

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

**La limite de liquidité ( $w_L$ ) :** est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique. Elle peut atteindre 1000% dans le cas de certaines argiles, mais dans la plupart des cas elle ne dépasse pas 100%. Les limites de plasticité et de liquidité servent à identifier et à classer les sols à grains fins. Quant à la limite de retrait, elle sert à l'étude de certains sols dont le volume varie fortement à cause des changements de la teneur en eau. C'est surtout dans les régions arides, où se trouvent des dépôts de la montmorillonite (problème de retrait-gonflement).

### 3.3.3. Valeur de bleu méthylène

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu », est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les différents types d'argiles présentes dans un échantillon donné et qui sont fortement sensible à ce dernier.

L'essai consiste à introduire dans un échantillon des quantités croissantes de bleu de méthylène, par doses successives jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées.

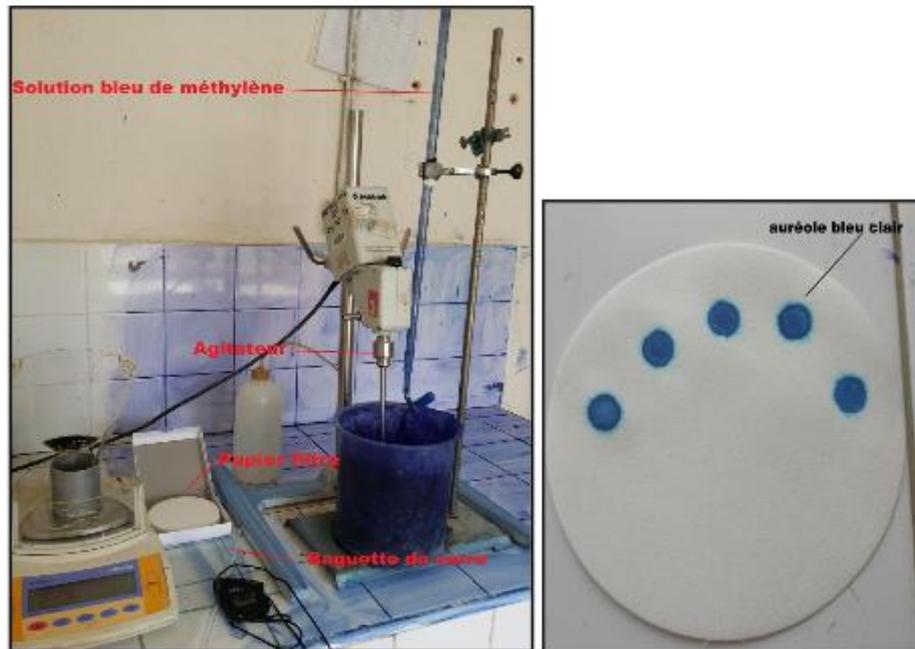


Figure 21 : Appareillage de l'essai bleu de Méthylène.

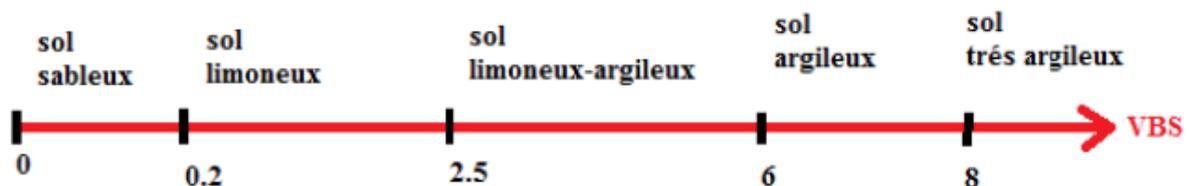


Figure 22 : classification des sols selon la valeur de bleu de méthylène

### 3.3.4. Equivalent de sable

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculant dans un cylindre gradué et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution flocculant afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 min, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport hauteur du sable sur hauteur totale.

L'équivalent de sable est donné par la formule :

$ES = \frac{\text{lecture du niveau supérieur du sédiment (h2)}}{\text{lecture du niveau supérieur du flocculat (h1)}} \times 100$



*Figure 23 : Essai équivalent de sable*

### 3.3.5. Masses volumiques et teneur en eau

#### *a) Teneur en eau*

La teneur en eau d'un matériau notée « w » est le rapport de la masse de l'eau contenue dans ce matériau à la masse du même matériau à l'état sec après passage à l'étuve, et s'exprime en pourcentage :

$$W = W_w / W_s \times 100$$

#### *b) Masse volumique apparente*

La masse volumique apparente est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, y compris les vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté,  $\rho_{app}$  ( $\text{g/cm}^3$ ) =  $M / V$

#### *c) Masse volumique absolue*

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

La méthode pour déterminer la masse volumique absolue est celle de la Méthode de pycnomètre. C'est une méthode est très simple et très rapide. Toutefois sa précision est faible.

### 3.3.6. Paramètres d'état

Le tableau ci-dessous donné quelques paramètres d'état des sols fins (porosité, indice des vides et teneur en eau, masse volumique apparente, masse volumique sèche, degré de saturation...).

Sol	n	e	w	$\rho$	$\rho_d$	$\rho_s$	$S_r$
	-	-	(%)	(t/m <sup>3</sup> )	(t/m <sup>3</sup> )	(t/m <sup>3</sup> )	(%)
Argile molle de cubzac	0,686	2,18	85	1,492	0,807	2,56	100
Argile des Flanders	0,44	0,786	28,6	1,98	1,45	2,75	100
Argile verte (romainville)	0,495	0,98	37	1,83	1,34	2,65	
Vase de Caen	0,741	2,86	120	1,36	0,617	2,38	
Tourbe de Cean	0,873	6,88	320	1,146	0,273	2,15	
Tourbe de bourgoin	0,89	8,1	570	1,046	0,156	1,42	
Limon d'Orly	0,545	1,20	22	2			

*Tableau 2 : Paramètres d'état de quelques sols fins (France)*

## 4. CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS

Les systèmes de classification des sols sont nés du besoin des ingénieurs civils de disposer de renseignements suffisamment fiables sur le comportement des sols pour pouvoir prendre des décisions rapides et efficaces, surtout dans les domaines de construction routière et des infrastructures des pistes d'atterrissage ou des barrages. Les systèmes de classification des sols ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent de grouper de très nombreux échantillons recueillis au cours d'une campagne de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain.

### 4.1. Classification élémentaire

#### 4.1.1. Classification basée sur la granulométrie

Les courbes granulométriques couvrent de large variation des dimensions des particules des sols. Les sols peuvent être classés selon les différentes parties de l'échelle des dimensions des particules appelés « classes granulaires ». Ces intervalles ont des noms différents selon les classifications et les pays. Le tableau ci-dessous compare trois de ces classifications. La classification de la Société Internationale de Mécanique des sols et des Travaux de Fondations (SIMSTF, 1977), utilisée par les normes Britanniques et Allemandes et dans certaines normes Américaines, est progressivement adoptée par de nombreux pays.

SIMSTF (1977)		France (traditionnelle)	
Dimensions	Nom	Dimensions	Nom
> 200 mm	Blocs	> 200 mm	Blocs
60 à 200 mm	Galets, cailloux	20 à 200 mm	Galets, cailloux
20 à 60 mm	Gravier grossier	2 à 20 mm	Gravier
6 à 20 mm	Gravier moyen		
2 à 6 mm	Gravier fin		
0,6 à 2 mm	Sable grossier	0,2 à 2 mm	Sable grossier
0,2 à 0,6 mm	Sable moyen	20 à 200 µm	Sable fin
0,06 à 0,2 mm	Sable fin		
20 à 60 µm	Limon grossier	2 à 20 µm	Limon
6 à 20 µm	Limon moyen		
2 à 6 µm	Limon fin		
< 2 µm	Argile	< 2 µm	Argile

*Tableau 3 : Dénomination des fractions granulaires des particules de sols*

#### 4.1.2. Classification triangulaire

Les systèmes de classification triangulaire prennent la forme de triangles dont les côtés portent des échelles représentant les proportions de sable, de silt et d'argile mesurées sur un échantillon de sol. (Fig. 24). Ces triangles sont divisés en zones portant une appellation conventionnelle selon les proportions relatives des types de sols. Seules les échelles des proportions d'argile, de sable et de silts (limon) figurent sur le triangle. Utilisons le diagramme de la figure 24 pour classer un sol comportant 41% d'argile, 42% de sable et 17% de silt, c'est-à-dire un sable argileux avec un peu de silt. C'est le point sur le diagramme qui correspond à ces proportions, mais il est situé dans la zone des argiles ; on attribue donc à ce sol l'appellation d'argile, malgré sa fraction argileuse ne soit pas la plus grande. La classification triangulaire reconnaît ainsi l'importance de la matrice argileuse dans le comportement des sols.

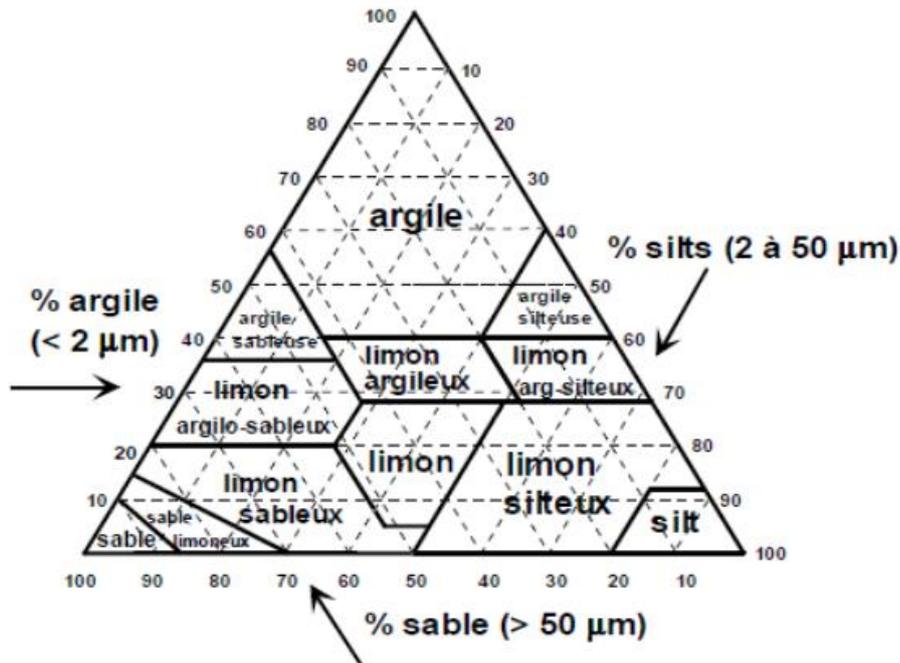


Figure 24 : Classification triangulaire des sols (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm)

#### 4.2. Classification (USCS/LCPC)

C'est la classification est la plus utilisée en mécanique des sols. Elle a été développée aux Etats-Unis dans les années 1950 sous le nom **United Soil Classification System (USCS)** puis francisée au début des années 1960 sous le nom de **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)**.

La classification USCS/LCPC est basée sur les dimensions des particules (granulométrie) et leur comportement à l'eau (plasticité). Elle prend en compte également la teneur de la fraction organique dans le cas des sols fins en mesurant la teneur en matières organiques par la méthode de la perte au feu.

D'après cette classification, on peut distinguer :

- **Les sols grenus** : plus de 50 % des éléments > 0,08 mm
- **Les sols fins** : plus de 50 % des éléments < 0,08 mm

Pour les sols fins, la méthode de classification est basée sur les limites d'Atterberg .

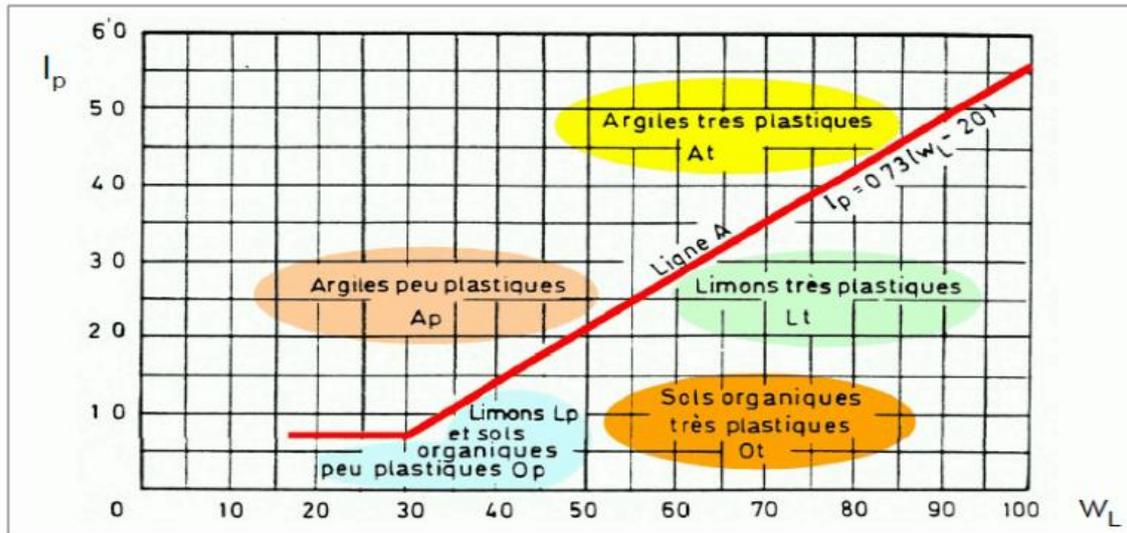


Figure 25 : Classification des sols fins selon le système USCS/LCPC

Cette classification ne traite pas deux problèmes importants, qui sont celui des carbonates et celui des particules de nature argileuse, qui peuvent avoir une influence décisive dans certaines circonstances (géotechnique routière notamment).

**Pour les sols fins carbonatés**, on utilise en complément de la classification à base granulométrique, un vocabulaire exprimant la proportion des carbonates de calcium ( $\text{Ca CO}_3$ ) dans le sol (ou la roche), défini dans le tableau suivant.

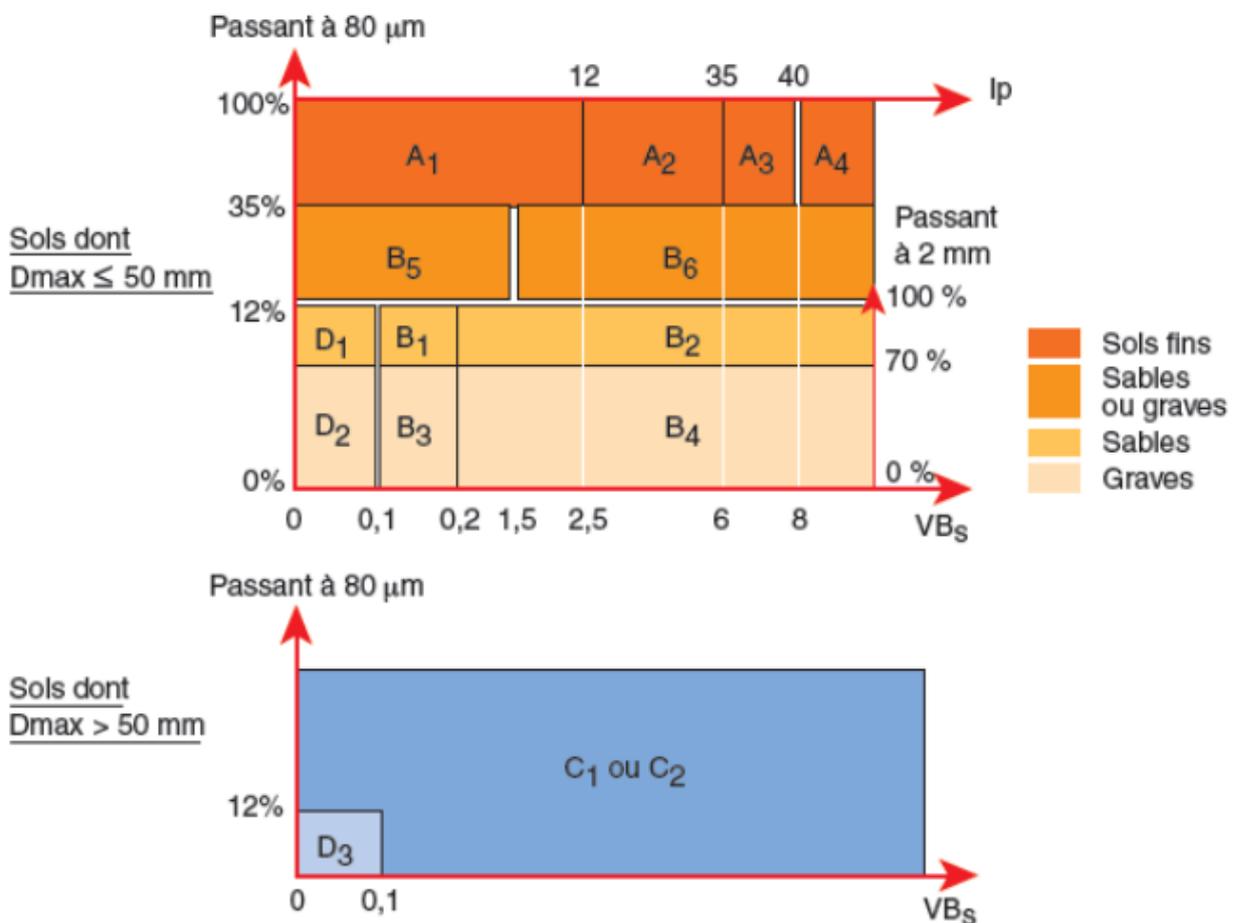
Pourcentage de $\text{Ca CO}_3$	Dénomination
0 à 10	Argile
10 à 30	Argile marneuse
30 à 70	Marne
70 à 90	Calcaire marneux
90 à 100	Calcaire

Tableau 4 : Dénomination des sols fins calcaires

**Pour les particules argileuses**, qui ne sont pas décrites quantitativement par les courbes granulométriques (poudre de roche par exemple), on peut utiliser la notion de sensibilité à l'eau selon l'essai bleu de méthylène pour préciser l'argilosité minéralogique du sol.

### 4.3. Classification GTR

Une classification particulière des sols est utilisée en France pour les travaux de terrassements routiers. Cette classification, dite classification du Guide de Terrassements Routiers (GTR), définit des classes de sols corrélées avec l'aptitude au compactage des matériaux en fonction des conditions de chantiers et leur comportement mécanique ultérieur. Elle tient compte des mêmes caractéristiques de base que la classification LCPC/USCS, mais elle est beaucoup plus précise pour les particules argileuses, qui ont une grande influence sur la conduite des terrassements, et tient compte de l'altérabilité des matériaux au cours du temps. Les principes généraux de cette classification sont présentés sur les figures ci-dessous.



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

Figure 26 : Classification routière selon le GTR

#### 4.4. Classification AASHTO

La classification AASHTO (Américain Association of States Highway and Transportation Official) est une version plus élaborée de la classification de Terzaghi (1929). Elle trouve son application essentiellement en géotechnique routière.

Le tableau suivant indique les fractions de sol reconnues par l'AASHTO. Bien que les blocs doivent être exclus des échantillons à classer, il faut néanmoins noter leur pourcentage relatif. Les particules fines sont siliceuses si la valeur de  $I_p$  est inférieure à 10, et argileuses si elle est supérieure à 10.

Fraction de sol	Echelle de grandeur
Bloc	Plus de 75 mm
Gravier	De 75 mm à 2.0 mm (tamis n°10)
Sable grossier	De 2.0 mm (tamis n°40) à 0.425 mm (tamis n°40)
Sable fin	De 0.425 mm (tamis n°40) à 0.075 mm (tamis n°200)
Silt et/ou argile	Moins de 0.075 mm (tamis n°200)

Tableau 5 : Définition des classes de sols selon le système AASHTO

Dans le système de classification AASHTO, on trouve huit groupes de sol (A-1 à A-8) et quelque sous-groupe. Les seuls essais qu'il est nécessaire d'effectuer sont l'analyse granulométrique et les essais de limites de consistance. Le tableau ci-dessous fourni la classification de l'AASHTO utilisée de nos jours.

Les sols grenus sont classés dans catégories A-1 à A-3 de la catégorie A-1 sont bien étalés alors que ceux de la catégorie A-3 sont des sables propres et à granulométrie uniforme. Quant à ceux de la catégorie A-2, ils contiennent un pourcentage significatif de particules fines (jusqu'à 35 % de particules passant le tamis n° 200). Dans les

catégories A-4 à A-7, On trouve des limons et des argiles ; leur classification repose sur les limites d'Atterberg. Les zones contenant les valeurs de  $w_L$  et de  $I_p$  propose à chacun des groupes A-4 à A-7 et des sous-groupes de A-2. On classe généralement les sols fortement organiques (les tourbes, par exemple) dans le groupe A-8. Comme dans système USCS, les sols A-8 sont classés d'après un examen visuel.

General Classification	Granular materials (35% or less passing No. 200 Sieve (0.075 mm))							Silt-clay Materials More than 35% passing No. 200 Sieve (0.075 mm)			
Group Classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
(a) Sieve Analysis: Percent Passing											
(i) 2.00 mm (No. 10)	50 max		51 min								
(ii) 0.425 mm (No. 40)	30 max	50 max									
(iii) 0.075 mm (No. 200)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
(b) Characteristics of fraction passing 0.425 mm (No. 40)											
(i) Liquid limit				40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
(ii) Plasticity index	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min*
(c) Usual types of significant Constituent materials	Stone Fragments Gravel and sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
(d) General rating as subgrade.	Excellent to Good							Fair to Poor			

\* If plasticity index is equal to or less than (Liquid Limit-30), the soil is A-7-5 (i.e. PL > 30%)  
If plasticity index is greater than (Liquid Limit-30), the soil is A-7-6 (i.e. PL < 30%)

Tableau 6 : Tableau de classification AASHTO

## 5. PROBLEMES LIES AUX SOLS FINS

### 5.1. Retrait - gonflement

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse. Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau), la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

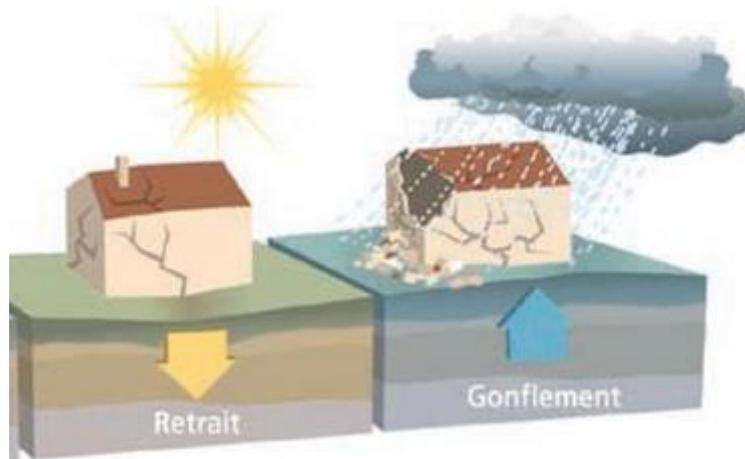


Figure 27: le risque retrait-gonflement des argiles

## 5.2. Tassements

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.

Les exemples les plus courants des conséquences des ruptures des sols sur des ouvrages avoisinants sont des ruptures de pieux de fondations des ouvrages d'art, des déversements de culées ou de murs de soutènement, des dégradations d'ouvrages enterrés, etc. Les conséquences des effets dus aux tassements sont surtout sensibles aux abords des ouvrages d'art, notamment dans le cas de remblais d'accès après la réalisation de pieux de fondations des appuis, surtout s'il y a des chargements successifs. Les surcharges verticales proches de zones de pieux peuvent entraîner le phénomène bien connu de frottement négatif opéré par le sol qui se tasse le long du pieu en l'entraînant vers le bas.

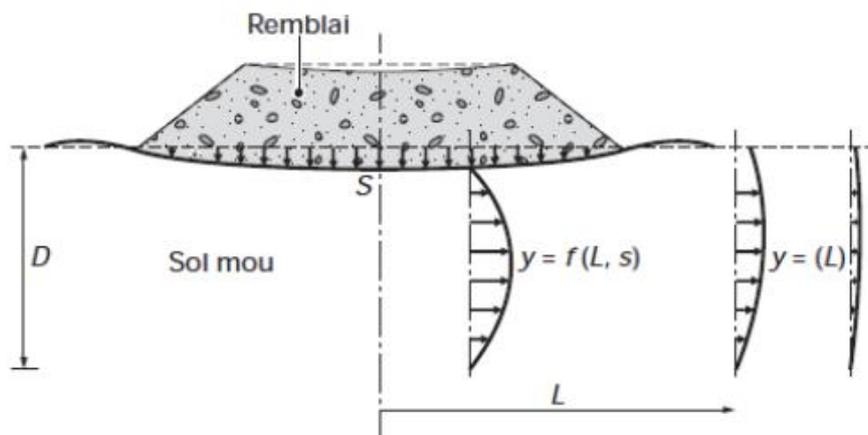
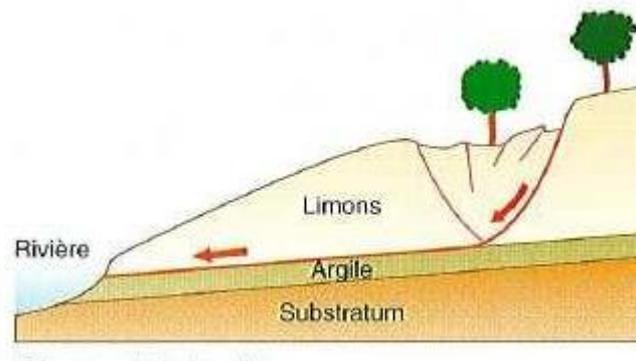


Figure 28 : Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation

### 5.3. Glissements

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites. La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses.



*Figure 29 : Glissement de terrain*

### 5.4. Erosion des sols

L'érosion est un domaine important en génie civil qui prend en compte l'érosion des remblais d'infrastructures linéaires de transport comme les routes et les chemins de fer. Ce phénomène de dégradation et de transport des matériaux solides sont causés par l'eau. L'érosion se définit comme un déplacement de sol attribuable à l'action érosive de l'eau, qui entraîne un apport récurrent de sédiments, même en faible quantité, dans le réseau hydrographique situé sur ou en bordure immédiate des parterres de coupe ou du tronçon de route faisant l'objet de l'évaluation. Il doit être récurrent, c'est-à-dire qu'il doit se répéter dans le temps lors des averses de pluie ou de la fonte des neiges. Il peut être direct ou indirect, via le réseau routier ou le drainage naturel.



*Figure 30: l'érosion de sol*

## 6. CONCLUSION

Les sols fins et l'argile en particulier présentent une faible capacité portante en plus des problèmes qu'ils engendrent tels que le gonflement et le tassement ce qui ne convient pas pour certains ouvrages de génie civil qui exigent une haute portance et une stabilité à long terme.

Pour remédier à ces problèmes des solutions existent, telles que :

- le remplacement du sol par un matériau adéquat.
- le changement du site de l'ouvrage.
- l'amélioration de la qualité du sol par traitement chimique ou par renforcement.

Les deux premières solutions présentent des inconvénients à la fois économique et environnemental. L'amélioration est donc la solution la plus adéquate car les répercussions sur l'environnement et l'économie du projet sont limitées. Ces deux solutions seront présentées en détail dans les chapitres qui suivent.

# CHAPITRE II :

## Traitement des sols fins

---

## CHAPITRE II : TRAITEMENT DES SOLS FINS

---

### 1. INTRODUCTION

Le traitement de sol ou la stabilisation chimique des sols est une technique économique qui permet de rendre apte à l'usage des matériaux qui ne l'étaient pas. Cette technique s'inscrit ainsi dans la démarche environnementale du développement durable en préservant les ressources naturelles des produits de carrières, et en valorisant les matériaux du site par leur réutilisation. Utilisation des matériaux de voisinage, réduite les volumes de dépôt de matériaux, donc diminution du coût. En effet la technique du traitement est une solution aux problèmes de dépôts et d'emprunts, et participe à l'optimisation du mouvement des terres. Le traitement de sol permet d'améliorer les performances mécaniques (portance), baisser la sensibilité à l'eau et au gel (protection), homogénéiser et valoriser les matériaux de voisinage du chantier.

Nous présentons dans ce chapitre une bibliographie sur les traitements chimiques des sols par différents agents d'amélioration. Les techniques

### 2. PROBLEMATIQUE DU TRAITEMENT DES SOLS

Les sols fins de faible argilosité sont en général faciles à traiter et leur réutilisation n'est pas exempte d'échec. Sur les chantiers lors de la stabilisation, plusieurs types de problèmes peuvent apparaître qui ne permettent pas d'obtenir un compromis technico-économique satisfaisant. Les principales manifestations sont les suivantes :

- les sols traités présentent des caractéristiques mécaniques insuffisantes (portance, résistance au cisaillement,...)
- des gonflements importants affectent tout ou une partie du remblai. Une fissuration importante se développe sur plusieurs mètres ou est associée aux gonflements ponctuels.
- un orniérage apparaît après une pluie, rendant difficile la circulation sur la couche de forme. Il y a donc sensibilité à l'eau.

Ces échecs surviennent bien que l'étude géotechnique au laboratoire habituellement réalisée comme décrite dans le Guide technique du Traitement des Sols (GTS), ait permis de conclure à l'aptitude de ces sols au traitement.

En général, des études complémentaires sont effectuées afin d'essayer de comprendre l'origine des problèmes. Ainsi, le GTS mentionne des dysfonctionnements liés à la nature du sol et à la présence de certains composés.

La classification GTR est basée sur des critères de granulométrie, de plasticité, de teneur en eau et de dureté mais ne tient pas compte de l'origine géologique, pédologique et chimique des constituants des sols. Ainsi un sol de type A2 peut correspondre à :

- des lœss
- des limons
- des arènes granitiques
- des altérites de schistes et de gneiss
- des sables argileux
- des argiles
- des marnes.

Certaines substances susceptibles de réagir avec les liants peuvent affecter la stabilisation. C'est le cas à des substances chimiques naturelles telles que les matières organiques de l'humus et des composés soufrés (pyrite, gypse) à des substances chimiques introduites dans les sols par l'activité humaine telles que les engrais (sulfates, nitrates, phosphates).

Pour expliquer les problèmes rencontrés lors de la stabilisation des sols lors des chantiers ou lors des études géotechniques, différentes causes possibles sont régulièrement envisagées. Cependant, les mécanismes de perturbations ne sont pas clairement établis pour chaque matériau.

### **3. TRAITEMENT DES SOLS PAR LES METHODES CHIMIQUES**

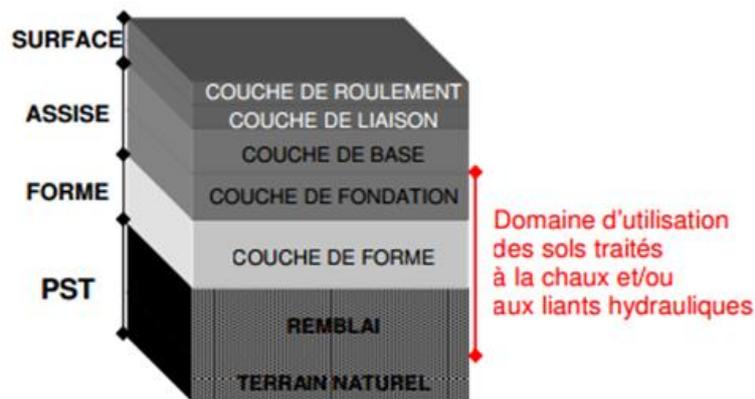
La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale. Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts est due principalement aux facteurs suivants tels que la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles, le souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les ressources naturelles existantes et de limiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme. Les ajouts cimentaires et les produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux, les cendres volantes, L'objectif

principal du malaxage des ajouts cimentaires avec le sol est l'amélioration de ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité.



*Figure 31 : Traitement des sols aux liants hydrauliques*

Les différentes propriétés qui peuvent être améliorées sont la résistance à la compression, la plasticité, la compressibilité, la perméabilité, le potentiel de gonflement et le potentiel de glissement. L'amélioration de ces propriétés s'effectue soit par l'augmentation de certaines d'entre elles telle que la résistance, soit par la réduction d'autres telles que la plasticité, la perméabilité et l'érosion. Un bon malaxage des ajouts cimentaires avec le sol à traiter est un facteur important affectant d'une façon significative la qualité des résultats.



*Figure 32 : Domaine d'utilisation des sols traités dans les couches de chaussée*

## 4. LES GRANDES ETAPES DU TRAITEMENT DES SOLS

### 4.1. Identification du sol

Les études géotechniques permettant la classification des matériaux et leur réutilisation s'appuient sur une reconnaissance générale des sols destinés à être traités et sur la formulation des mélanges. Elle comprend :

- l'identification à partir des paramètres de sol,
- leur localisation dans le profil géotechnique,
- l'estimation de leur quantité.

Les éléments considérés pour définir le contenu d'une étude de traitement sont :

- la collecte des données (cartes géologiques, sondages de reconnaissance.),
- le recueil d'expertise locale (notamment la présence d'éléments perturbateurs),
- la caractérisation du gisement et la constitution d'échantillons représentatifs (mélanges),
- l'identification du produit de traitement,
- l'organisation et la conduite d'un chantier expérimental si nécessaire.

La caractérisation du gisement permet de fournir un échantillon représentatif du matériau. Un zonage (repérage) de chaque formation est défini sur le profil géotechnique ainsi que les plages de variation des paramètres de nature et d'état des sols. La dispersion des caractéristiques du matériau de chaque zone donne une indication de l'hétérogénéité des sols de la zone. Des valeurs limites de dispersion de la masse volumique sèche  $\rho_{dOPN}$  sont fixées par le GTS. L'homogénéité du matériau est ainsi définie par son pourcentage de dispersion (%). La plage de dispersion de la  $\rho_{dOPN}$  observée doit être inférieure à ces valeurs pour considérer l'homogénéité du gisement comme satisfaisante. Le mélange des prélèvements réalisés sur l'ensemble du gisement constitue alors un échantillon représentatif.

### 4.2. Etude de formulation

Ce sont les études qui déterminent la nature du produit de traitement et son dosage. Le dosage se calcule notamment en fonction des performances visées selon la formule :

$$d = \frac{Q}{M_{sol} + Q + M_{cg}} \times 100$$

d : dosage (en %).

Q : masse produit de traitement.

$M_{sol}$  : masse sol à traité.

$M_{cg}$  : masse correcteur granulométrique (éventuellement).

Le calcul du besoin en liant (en tonnes de liant) se fait selon la formule :

$$Q = e \times S \times \rho_d \cdot \frac{d}{d - 100}$$

$e$  : épaisseur du sol traité.

$S$  : surface du sol traité.

$\rho_d$  : masse volumique sèche du sol

$d$  : dosage du liant.

Les études comprennent l'essai d'aptitude du sol au traitement :

- Gonflement volumique  $G_v$ .
- Résistance en compression diamétrale  $R_{tb}$ .

Selon le résultat et les valeurs de référence, le produit est dit : adapté, douteux, inadapté.

Dans le cas de grand chantier, lorsqu'il subsiste des incertitudes quant au choix de la solution, des planches d'essai et chantiers expérimentaux sont réalisés pour confirmer les performances mécaniques, étudier la faisabilité du malaxage, définir les conditions de mise en œuvre, moyens, ... Cependant, un chantier expérimental est coûteux.

### 4.3. Mise en œuvre du sol traité

Les opérations courantes principales concernent la préparation du sol (scarification, humidification), l'épandage du produit, le malaxage, l'ajustement de l'état hydrique (arrosage), le réglage, et enfin le compactage.

- Préparation du sol :
  - décohéation du matériau par foisonnement.
  - élimination de la fraction grossière : scarification, criblage, concassage.
  - homogénéisation du matériau par tri (chargement et dépôt).
  - humidification (changement état hydrique).
- Epandage produit (épandeur pondéral ou volumétrique asservi à la vitesse).
- Malaxage : mélange sol et produit pour obtention mouture.
- Ajustement de l'état hydrique : arrosage si après malaxage le mélange est trop sec pour être compacté de manière conforme. En effet, cet état à une incidence sur les exigences de compacité et de prise du liant. L'augmentation de teneur en eau doit cependant rester limitée, en général de 1 à 2%.
- Réglage : il s'agit du nivellement du matériau traité à l'épaisseur conforme.

- **Compactage** : opération visant à atteindre l'objectif de densification exprimé par la masse volumique sèche à obtenir pour une teneur en eau à l'optimum OPN.

#### 4.5. Contrôle de qualité des travaux

Le contrôle de qualité des travaux de traitement des sols appliqué à la réutilisation en remblai des sols très humides, a pour objet de vérifier les seuils minimales et maximales des paramètres fixés pour atteindre la qualité visée, toute en garantissant un aspect économique des opérations de traitement. Après la mise en œuvre, le matériau doit respecter des caractéristiques de portance minimales et maximales. Ces valeurs de portance peuvent être exprimées :

- soit de préférence par des valeurs de module à la plaque ou à la dynaplaque mesurées sur le matériau.
- soit par des valeurs d'IPI mesurées directement in situ ou au laboratoire sur des échantillons de sol traité prélevés avant compactage.
- soit par une valeur maximale de la profondeur d'ornièrisme observée sous le passage des engins de transport chargés (décapeuses, tombereaux, etc.) roulant sur le matériau.



*Figure 33 : Photos de l'essai à la plaque et à la dynaplaque*



*Figure 34 : Photos de l'essai IPI in situ et mesure de la profondeur d'ornièrage*

Les valeurs minimales et maximale de module à la plaque ou à la dynaplaque sont présentées dans le les tableaux suivants.

<b>Classes de matériaux</b>	A <sub>1</sub> C <sub>1</sub> A <sub>1</sub> C <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> ; B <sub>6</sub> C <sub>1</sub> A <sub>2</sub> C <sub>2</sub> A <sub>2</sub> C <sub>1</sub> B <sub>6</sub> C <sub>2</sub> B <sub>6</sub> R <sub>34</sub>	A <sub>3</sub> C <sub>1</sub> A <sub>3</sub> C <sub>2</sub> A <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> ; C <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> B <sub>2</sub> ; B <sub>4</sub> C <sub>1</sub> B <sub>4</sub> ; C <sub>2</sub> B <sub>4</sub> B <sub>5</sub> ; C <sub>1</sub> B <sub>5</sub> C <sub>2</sub> B <sub>5</sub> ; R <sub>12</sub> R <sub>13</sub> ; F <sub>2</sub>
Valeurs minimale du module (MPa)	<b>35</b>	<b>30</b>	<b>25</b>	<b>40</b>
Valeurs maximales du module (MPa)	<b>50</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>60</b>

**Tableau 7 : Valeurs minimales et maximales de module à obtenir après traitement.**

Les valeurs minimales et maximales de l’IPI sont fournies dans le tableau suivant.

IPI	Classes de matériaux (selon classification GTR 92)							
	A <sub>1</sub> , C <sub>1</sub> A <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> A <sub>1</sub> (1)	A <sub>2</sub> , B <sub>6</sub> , C <sub>1</sub> A <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> A <sub>2</sub> (1), C <sub>1</sub> B <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> B <sub>6</sub> , R <sub>34</sub>	A <sub>3</sub> , C <sub>1</sub> A <sub>3</sub> , C <sub>2</sub> A <sub>3</sub> (1)	B <sub>4</sub> , C <sub>1</sub> B <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> B <sub>4</sub> (1)	B <sub>2</sub> , B <sub>5</sub> , C <sub>1</sub> B <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> B <sub>2</sub> (1), C <sub>1</sub> B <sub>5</sub> , C <sub>2</sub> B <sub>5</sub> (1)	R <sub>12</sub> (2)	R <sub>13</sub> (2)	F <sub>2</sub>
Valeurs au-dessous desquelles un traitement peut être envisagé (cf. GTR)	8	5	3	15	12	15	10	15
Valeurs à obtenir sur le matériau traité(3)	10 à 20	7 à 15	5 à 10	20 à 40	15 à 30	15 à 30	10 à 20	15 à 20
Valeurs au-delà desquelles le traitement peut être arrêté (ou poursuivi avec réduction du dosage)	15 à 25	10 à 20	8 à 15	30 à 50	20 à 40	25 à 35	15 à 25	25 à 30

**Tableau 8 : Valeurs minimales et maximales de l’IPI.**

Enfin, les valeurs de la profondeur d'ornièrè sont :

- Seuil *minimale* pour traitement : une valeur de l'ordre de **7 à 10 cm** (5 à 7 cm pour les PST) est retenue pour *l'ensemble des sols sensibles à l'eau*.
- Seuil *maximale* pour *éviter un surdosage* : une valeur de profondeur d'ornièrè de l'ordre de **1 à 3 cm**.

## 5. AVANTAGES DU TRAITEMENT

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au ciment ou au liant hydraulique routier (LHR) est une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques et environnementaux.

### 5.1. Avantages techniques

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, durable et stable, présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles

d'une grave-ciment ou grave hydraulique. En outre, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure.

Cette technique assure un bon comportement par temps chaud sans déformation, niorniérage et un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit. Enfin, le traitement des sols en place est une technique possédant une facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation.

## **5.2. Avantages économiques**

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique est une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport. L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier.

Enfin, le traitement des sols en place est une technique très économique, notamment du fait de la durée plus courte des travaux par rapport à une solution avec décaissement.

## **5.3 Avantages environnementaux**

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale et donc une réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'usager et aux riverains et une réduction de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier.

La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserver l'environnement.

## **6. MATÉRIELS DE TRAITEMENT**

Selon les chantiers, les travaux de traitement des sols peuvent nécessiter des ateliers comprenant tout ou une partie des matériels suivants :

- Matériels de stockage des produits de traitement,
- Matériels d'épandage,
- Matériels de préparation des sols,
- Matériels de malaxage des sols en place,
- Matériels d'arrosage,

- Centrales de fabrication,
- Matériels de compactage,
- Matériels de réglage et de protection superficielle

### **6.1. Matériels de stockage des produits de traitement**

Les produits de traitement utilisés se présentent quasi exclusivement sous forme pulvérulente et sont livrés en vrac. Exceptionnellement, l'utilisation de chaux ou de ciment, conditionné en sacs de 40 ou 50 kg palettisés, peut être envisagée dans le cas de petits chantiers (inférieurs à 2 000 m<sup>2</sup>, en général). Leur stockage doit alors être réalisé à l'abri des eaux pluviales et de ruissellement. Dans les autres cas, le stockage, dans des silos, des produits de traitement livrés en vrac s'impose pour les deux raisons suivantes :

- nécessité de disposer d'une réserve suffisante de produit de traitement pour absorber les aléas normaux d'approvisionnement du chantier.
- laisser aux produits de traitement, très souvent livrés chauds, un temps de repos permettant leur refroidissement et la neutralisation des charges d'électricité statique, conditions nécessaires à un écoulement stable (non fusant) permettant la réalisation d'un épandage précis.

Exceptionnellement, le stockage peut être évité dans certains contextes de chantiers répondant à des conditions d'organisation particulières, prévoyant, par exemple, une consommation de produit de traitement ajustée au débit de livraison. Dans ces cas, le transporteur peut livrer sur le chantier un conteneur plein et repartir avec un vide. Les aspects à considérer dans le choix et l'organisation du stockage des produits de traitement sont :

- La capacité de stockage : Il est souhaitable en général, notamment dans le cas des gros chantiers, de disposer d'une capacité de stockage correspondant à au moins un jour d'activité moyenne de l'atelier de traitement. Les silos habituels ont une capacité variant suivant les modèles entre 25 et 100 tonnes. Dans le cas de traitement mixte, des silos réservés à chaque produit sont évidemment à prévoir.
- La qualité de conservation des produits stockés : Il faut que les silos conservent les produits de traitement à l'abri de l'eau et d'une ventilation permanente pour les protéger de l'hydratation et, dans le cas de la chaux, de la décarbonatation.

La mobilité : Cet aspect concerne surtout le traitement en place réalisé sur des chantiers linéaires (routes, voies ferrées, etc.), pour lesquels il est impératif de réduire les distances de remplissage des épandeurs



(a)

(b)

*Figure 35 : (a) Silo vertical fixe (b) Silo mobile*

## 6.2. Matériels d'épandage

Épandeur à doseur volumétrique « horaire » : ce sont les types d'épandeur les plus anciens. Ils délivrent, au moyen d'une trappe ou autre système comparable, une quantité de produit proportionnelle au temps. C'est le conducteur qui règle la masse épandue sur le sol en modifiant la vitesse de l'engin. Ils présentent l'intérêt de pouvoir épandre des masses de produit dans une gamme de valeurs aussi large que voulue (en jouant sur la vitesse d'avancement), ce qui peut s'avérer utile pour traiter des zones ponctuellement très humides, par exemple.

Toutefois, en raison de leur faible précision, ces épandeurs ne devraient être admis que sur les chantiers pour lesquels le traitement ne représente qu'un enjeu secondaire ou lorsque le marché a prévu que l'entrepreneur proposerait un prix de matériau mis en œuvre, toutes sujétions comprises.



*Figure 36 : Épandeur de première génération*

Les épandeurs à doseurs volumétriques asservis à la vitesse de déplacement sont actuellement les engins les plus répandus. Leurs doseurs sont constitués généralement d'un tambour alvéolaire ou d'un tapis extracteur, dont le débit est asservi à la vitesse

de l'engin, ce qui permet l'épandage d'une masse surfacique de produit indépendante de cette vitesse. Leur plage de débit, notamment pour les tambours alvéolaires, est assez limitée, ce qui, dans le cas de traitement à fort dosage, présente l'inconvénient d'imposer la réalisation de l'épandage par superposition de plusieurs passes.



*Figure 37 : Epandeur nouvelle génération*

### 6.3. Matériels de préparation des sols

Certains sols ou matériaux rocheux peuvent nécessiter une préparation avant de procéder à leur traitement, principalement pour les applications autres que la réutilisation en remblai de sols trop humides. Celle-ci peut nécessiter tout ou partie des opérations qui sont présentées ci-dessous.

#### 6.3.1. Décohésion des matériaux en place

Elle est destinée à faciliter l'action des engins de malaxage ou la pénétration de l'eau dans le cas où une humidification s'impose. Dans l'application à la réalisation des remblais, elle peut également s'avérer nécessaire pour des matériaux particuliers comme les craies peu denses, humides voire très humides (R12 et R13 dans les états « h » voire « th »).

Les engins adaptés sont des défonceuses multi-dents (trois au minimum), appelés scarificateurs, décohésionneurs ou décompacteurs de sols, portés par des tracteurs ou des niveleuses. Leur profondeur d'action varie suivant les équipements entre 30 et 70 centimètres.

#### 6.3.2. Elimination des éléments blocailleux

Cette opération concerne essentiellement les applications du traitement en couche de forme qui exigent un malaxage dans une centrale ou à l'aide de pulvérisateurs de sols à arbre horizontal n'admettant pas de blocs dont le  $D_{max}$  est supérieur ou égal à 100 mm en général. Dans le cas de l'application à la réutilisation en remblai des sols trop

humides, c'est davantage la méthode de malaxage qui doit être adaptée à la granularité du matériau.

#### 6.4. Matériels de malaxage des sols en place

Ils sont constitués principalement par deux familles d'engins.

- Les malaxeurs à outils fixes, représentés par les charrues et, éventuellement, les engins à lame (niveleuses, boteurs équipés de lames traditionnelles ou de lames spécialement conçues pour cet usage, etc.) ;
- Les malaxeurs à outils animés, représentés par les pulvérisateurs de sols (dénommés pulvi-mixeur dans le passé) et les bêches mécaniques et, dans une certaine mesure, les décapeuses élévatrices (ou auto-chargeuses).



*Figure 38 : Malaxeur à outils animés (Pulvimixeur)*

#### 6.5. Matériels d'arrosage

Ces matériels ne sont concernés que par les applications du traitement autres que la réutilisation en remblai des sols trop humides, mais, pour ces applications, leur action est souvent déterminante pour le succès de la technique. Ils sont constitués par des engins de conception très variable, souvent issus du machinisme agricole ou fabriqués dans les ateliers des entreprises, mais qui, le plus souvent, ne permettent pas de réaliser la maîtrise des ajustements de l'état hydrique avec la précision souhaitable (ou du moins cohérente avec celle déjà atteinte par les épandeurs et les pulvérisateurs de sols).

Par ailleurs, il faut insister sur la nécessité, pour chaque chantier, de vérifier l'ajustement des moyens d'arrosage aux besoins prévisibles, car l'expérience a montré que l'importance de cette opération n'était souvent pas comprise et qu'elle avait tendance à être négligée.



*Figure 39 : Arroseuse à précision non suffisante*

## 6.6. Matériels de compactage

Le compactage des sols traités ne fait pas appel à des engins spécialisés. Les différentes familles d'engins considérées ici sont :

- ✓ les compacteurs à pneus : Pi
- ✓ les compacteurs vibrants à cylindres lisses : Vi
- ✓ les compacteurs vibrants à pieds dameurs : VPi
- ✓ les compacteurs statiques à pieds dameurs : SPi
- ✓ les plaques vibrantes : PQi

### 6.6.1. - Les compacteurs à pneus (Pi).

Le classement est fait selon la charge par roue CR :

P1 : CR entre 25 et 40 kN

P2 : CR entre 40 et 60 kN

P3 : CR supérieure à 60 kN



*Figure 40 : Compacteur lourd à pneus de la classe*

### 6.6.2. Les compacteurs vibrants à cylindres lisses (Vi)

- **Monocylindre**



*Figure 41 : Compacteur vibrant monocylindre lisse*

- **Tandem**



*Figure 42 : Compacteur tandem (ou double bille)*

### 6.6.3. Les compacteurs mixtes

Ils sont constitués d'un cylindre vibrant et d'un train de pneus dont le nombre peut être considéré comme suffisant pour contribuer au compactage en recouvrant l'ensemble de la largeur de génératrice du cylindre (intervalle entre surfaces de contact  $\leq$  largeur d'un pneu).



*Figure 43: compacteur mixte*

#### 6.6.4. Les compacteurs vibrants à pieds dameurs (VPi)

Ce sont généralement des versions dérivées des compacteurs vibrants à cylindres lisses. On distingue : les VP1, VP2, VP3, VP4, VP5.



*Figure 44: compacteur vibrant à pieds dameurs de la classe VP1*

#### 6.6.5. Les compacteurs statiques à pieds dameurs (SPi)

Le classement est fait selon la charge statique moyenne par unité de largeur du ou des cylindres à pieds (M1/L).

SP1 : M1/L entre 30 et 60 kg/cm

SP2 : M1/L supérieur à 60 kg/cm et inférieur à 90 kg/cm

La vitesse maximale possible est à utiliser : en particulier, la fin du compactage doit pouvoir être effectuée à une vitesse de 10 à 12 km/h. Les premières passes ont généralement une vitesse nettement plus réduite, sans devenir inférieure à 2 à 3 km/h.

Pour les compacteurs équipés d'une lame, la part de temps consacrée au poussage et au réglage des sols n'est pas prise en compte dans le compactage.



*Figure 45 : Un compacteur statique à pieds dameurs*

### 6.6.6 - Les plaques vibrantes (PQi)

L'ensemble des plaques est classé PQ1 à PQ4 dans la Note Technique pour le compactage des remblais de tranchées (SETRA-LCPC). Elles sont classées à partir de la pression statique sous la semelle Mg/S exprimée en kPa (Mg représente le poids de la plaque). Les plus petites plaques (PQ1 - PQ2) ne sont pas prises en compte. Celles considérées ici sont

- ✓ PQ3 : Mg/S entre 10 et 15 kPa
- ✓ PQ4 : Mg/S supérieur à 15 kPa

S est la surface de contact plaque/sol et non la surface hors tout.



Figure 46 : Plaque vibrante PQ1

## 7. DIFFERENTS CAS DE TRAITEMENT DES SOLS

### 7.1. Traitement des sols pour remblais et fond de déblai

Le critère déterminant est IPI indice Portland Immédiat (essai Proctor Normal) avec teneur en eau naturel à partir de cette IPI on doit atteindre un IPI objectif suivant la classification du sol NF P 94-102-1 (voir Tableau 9).

L'aptitude au traitement doit être vérifiée (voir Tableau 9). On doit aussi avoir la résistance à la compression à 28 jours  $R_c > 0,5$  à 1 MPa sur éprouvettes d'épandages égale à 2 et compactée à 95% de OPN valeur après 14 j de cure plus 14 j d'immersion.

Type de matériau	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
Valeur de l'IPI au-dessous de laquelle un traitement est envisagé	8	5
Valeur de l'IPI à obtenir après traitement	10 à 20	7 à 15

Tableau 9 : Objectif IPI à atteindre après traitement (NF P 94-102-1)

## 7.2. Traitement des sols pour PST

A court terme, il faut obtenir un IPI d'environ 10 à 20 % de plus de ce qui est visé pour les remblais est un CBR, à 4 jours d'imbibition, pour lequel on exige :  $CBR_{4j} \geq IPI$ . Le fait de satisfaire à cette condition constitue une garantie de tenue à l'eau correcte du sol traité formant la PST. En déblai après excavation le sol est testé à la plaque on devra obtenir plus de 17 MPa pour le module de déformation élastique in situ. Sinon il faut une étude de traitement en laboratoire pour obtenir un  $CBR > 20$  et Tenue à l'eau  $\frac{CBR_{Aj}}{IPI} \geq 1$ .

A long terme, on mesure in situ à la plaque ou à la Dynaplaque le module de déformation, ou on le déduit de mesures de déflexions. Sinon, il faut se référer à des résultats d'essais de laboratoire. En laboratoire, le module peut être évalué, au moins approximativement, à partir de divers essais (CBR ou compression simple, ce dernier sur matériau traité uniquement)  $E_{statique} \text{ (MPa)} \approx 5 \text{ CBR}$  pour les sols fins.

Pour la classe de portance de la plate-forme, il faut que le module de déformation élastique in situ soit supérieur à 20 MPa.

## 7.3. Traitement des sols pour couche de forme

Pour une couche de forme, le potentiel d'utilisation du matériau est lié à l'indice portant immédiat (IPI), alors que pour les couches de fondation et de base, la connaissance du comportement mécanique en traction, associé à sa capacité à se déformer sous les chargements (module élastique) est aussi nécessaire. Les résistances en traction demandées à 360 jours sont de l'ordre de quelques MPa, pour un module élastique de 2 à 40 GPa, ce qui par rapport à d'autres matériaux utilisés dans les domaines du Génie Civil (ouvrages d'art par exemple), est faible. La résistance en compression est utilisée comme un indicateur de traficabilité, puisqu'il est admis qu'avec des matériaux traités aux liants hydrauliques, l'ouverture au trafic se fait à une résistance à la compression supérieure à 1 MPa. La durabilité de ces matériaux doit être contrôlée aussi sur le plan mécanique, vis à vis de leur sensibilité à l'eau et au gel.



Figure 47 : coupe type d'une plate-forme support de chaussée

Le Tableau 10 représente les critères retenus pour l'interprétation de l'essai d'aptitude d'un sol au traitement en remblai ou en couche de forme et assise [NF P 94-100 ,1999 et GTS, 2000].

Critères		Gonflement volumétrique (Gv)	Résistance en compression diamétrale R <sub>tb</sub> (MPa)
Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	adapté	≤ 5	≥ 0.2
	douteux	5 ≤ Gv ≤ 10	a.1 R <sub>tb</sub> ≤ 0.2
	inadapté	≥ 10	≤ 0.1
Traitement à la chaux seul	adapté	≤ 5	Paramètre non considéré pour ce type de traitement du fait de la lenteur de la prise pouzzolanique
	douteux	5 ≤ Gv ≤ 10	
	inadapté	≥ 10	
<b>NB</b> : les éprouvettes de dimensions 5x5 cm sont conservées 7j à 40°C en immersion pour l'essai de gonflement et de traction indirect.			

**Tableau 10 : Aptitude au traitement NF P94-100**

#### 7.4. Utilisation des sols fins traités en assise de chaussée

Les principaux paramètres jugeant l'adéquation d'un matériau pour une utilisation en assise de chaussée sont l'indice portant immédiat (IPI), la résistance en traction (R<sub>t</sub>) ou (R<sub>tb</sub>) et le module d'élasticité (E) selon la norme française, l'essai Proctor (Normal et modifié) (NF P 94-093, 1997) et l'essai de traction (NF P 98-113, 1994). En effet, le passage d'un véhicule sur les couches de matériaux entraînent une sollicitation de type charge -décharge. Le matériau doit donc avoir une résistance minimale en traction, et être capable de se déformer sans se casser.

Dans la catégorie des sols fins traitable pour assise de chaussée seul les sols A1, A2 sont concernés avec un VBS inférieure à 5 ; G<sub>v</sub> < 5% et R<sub>tb</sub> > 0.2 MPa à 7 jours à 40°C en immersion et l'IPI du sol traité doit être au minimum 20 lors de sa mise en œuvre. Ce critère est valable aussi pour couche de forme [GTS, LCPC-SETRA, 2007].

Type de traitement	Mode de conservation
Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	4h ± 15 minutes à 20 ± 20C puis immersion pendant 7 jours ± 4 heures dans de l'eau à 40 ± 20C
Traitement à la chaux seul	3 jours ± 4 heure à 20 ± 2°C puis immersion pendant 7 jours ± 4 heures dans dz l'eau à 40 ± 2°C

**Tableau 11 : Mode de conservation des éprouvettes pour l'étude de l'aptitude de traitement du sol (NF P94-100)**

La conception des chaussées à faible trafic en limons traités à la chaux et au ciment est définie dans le Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic (SETRA-LCPC, 1981).

La classe mécanique selon la norme NF P 98 114-3 et l'épaisseur de la couche de forme du sol traité définissent la catégorie de la plateforme (arase). Le catalogue fourni des types de structure suivant le trafic, la catégorie de la plateforme est la classe mécanique du limon traité en couche de chaussée (LTCC). Le manuel prévoit une amélioration de la couche de forme selon le tableau 12 qui va supporter le corps de chaussée.

Portance	Amélioration nécessaire	
Portance prévisible de la plateforme à court terme	Epaisseur de la couche de limon traité en place	Nouvelle portance
P=P0 CBR ≤ 3	35 cm	P2
P=P1 3 ≤ CBR ≤ 6	20 cm	P2

*Tableau 12 : Amélioration de la couche de forme [Guide SETRA/LCPC, 1981]*

### 7.5. Retraitement pour assise de chaussée

Dans le cas du retraitement des couches de chaussée on doit vérifier la faisabilité du retraitement par la détermination des caractéristiques du matériau à retraiter ; et vérification de la granulométrie si la courbe est discontinue (apport de correcteur).

Le dimensionnement se fait comme pour une chaussée neuve ; on reprenant les critères suivant :

- détermination du trafic.
- définition de la portance de la plateforme.
- définition de la classe du matériau traité fonction de  $R_t$  et  $E_{tb}$ .
- détermination de l'épaisseur de la couche retraitée suivant l'abaque de dimensionnement du manuel de conception.

## 8. LES DIFFERENTS AGENTS D'AMELIORATION

Différents agents de traitement peuvent être utilisés pour améliorer le comportement ou les propriétés des sols. Ces agents peuvent être regroupés en deux catégories.

## 8.1. Agents classique

### 8.1.1. La chaux

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 bâtiment et dans les matériaux de construction. La chaux intervient à différents stades 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.



*Figure 48 : traitement de sol à la chaux*

#### *a) Basicité*

La chaux est fortement basique ; les solutions présentent un PH supérieur à 12 (réduire le degré d'acidité du sol).

#### *b) Fabrication*

La fabrication de la chaux consiste à cuire des carbonates de calcium et/ou de magnésium pour libérer le dioxyde de carbone et obtenir l'oxyde dérivé



L'oxyde de calcium produit par le four est habituellement concassé, broyé et/ou tamisé avant d'être transporté vers le stockage en silo. Du silo, la chaux cuite est soit livrée au client final pour utilisation sous forme de chaux vive, soit transférée dans une installation d'hydratation où elle est mise à réagir avec de l'eau pour produire la chaux éteinte.

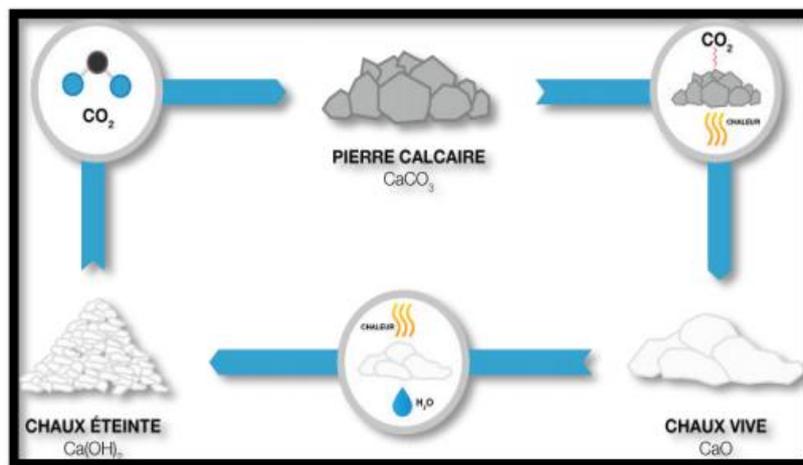
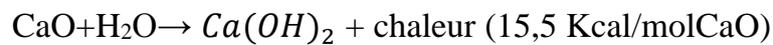
La chaux aérienne peut durcir lentement (décarbonatation) sous l'action du CO<sub>2</sub> atmosphérique (cette qualité de prise à l'air est à la base de la qualification de chaux aérienne).

*c) Les différents types de chaux aériennes*

La chaux aérienne peut exister sous les trois formes suivantes :

**Chaux vive** : Elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO (en général à plus de 90%).

**Chaux éteinte (ou hydratée)** : Elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub>. Elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique.



*Figure 49 : Cycle de fabrication de la chaux*

**Lait de chaux** : Le lait de chaux est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait. Le lait de chaux peut également être préparé à partir de chaux vive, mais des précautions particulières sont à prendre en raison de l'exothermicité de la réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium.

Son emploi en traitement de sols présente l'avantage de supprimer la poussière et d'humidifier les sols secs (alors que la chaux vive achevée au contraire de les dessécher).

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes. Elles se présentent sous deux formes : Chaux vive et Chaux éteinte.

Caractéristiques	Vive	éteinte
Teneur en chaux libre	> 80%	> 50%
Finesse (passant à 0.08mm)	> 50%	> 90%
Réactivité	T > 60° en 25°	

*Tableau 13 : Les différentes caractéristiques de la chaux*

**d) Domaines d'application**

Le développement des techniques de réalisation des traitements s'applique aux ouvrages en remblais (corps de remblai et parties d'ouvrages particulières), aux plates-formes supérieures de terrassement(PST), aux couches de forme, voire à d'autres couches de chaussées (couches de fondation notamment).

Le domaine d'activité le plus concerné est celui des infrastructures routières et autoroutières. Les techniques de traitement se sont développées également dans le domaine ferroviaire.

D'autres applications sur des plates-formes portuaires, sur des plates-formes industrielles ou logistiques

**e) Actions de chaux sur les sols**

La chaux modifie de façon sensible le comportement des sols fins argileux ou limoneux, grâce à trois actions distinctes :

❖ Actions immédiates (produites au moment du malaxage) :

➤ **Diminution de la teneur en eau naturelle**

L'abaissement de  $W_{nat}$  est dû la combinaison de trois actions à savoir :

- l'hydratation de la chaux vive qui se traduit par la réaction
 
$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 64,8kJ.$$
- la chaleur dégagée par cette réaction (64,8 kJ/mole) provoque la vaporisation d'une certaine quantité d'eau.
- la production de chaux éteinte augmente la masse de solide du mélange.

➤ **Modification de la fraction argileuse du matériau**

La chaux vive modifie certaines caractéristiques géotechniques du matériau à savoir :

- la réduction de l'indice de plasticité ( $I_p$ ) par une élévation importante de la limite de plasticité ( $w_p$ ) du sol sans modification significative de sa limite de liquidité ( $w_L$ ). Le comportement du sol passe brutalement de l'état plastique (déformable, collant) à l'état solide (rigide, frottant et fragile). Cela permet de

faciliter le travail des engins de chantier (extraire, charger, décharger, circuler, régaler, compacter, etc.)

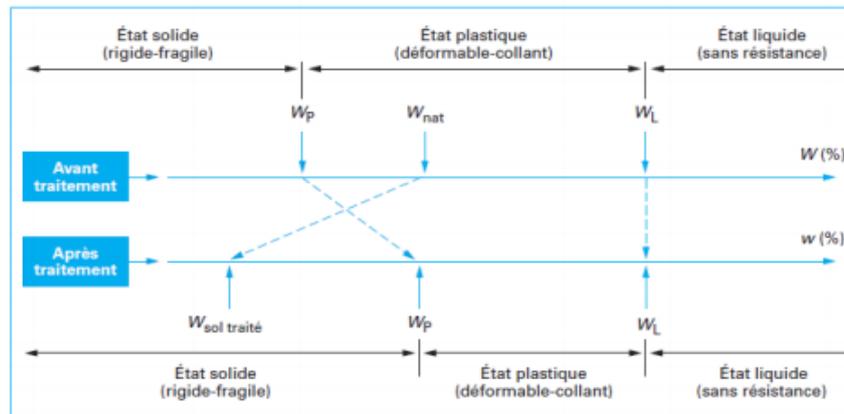


Figure 50 : Influence de traitement sur la consistance du sol (GTS 2000)

- La modification des caractéristiques de compactage du matériau traité à la chaux. Cette modification se traduit par la réduction de la valeur maximale de la masse volumique sèche maximale ( $\rho_d$ ) et l'augmentation de la valeur de la teneur en eau optimale  $w_{OPN}$  (voir figure ci-dessous). Cela se traduit dans la pratique par une facilité de compactage.

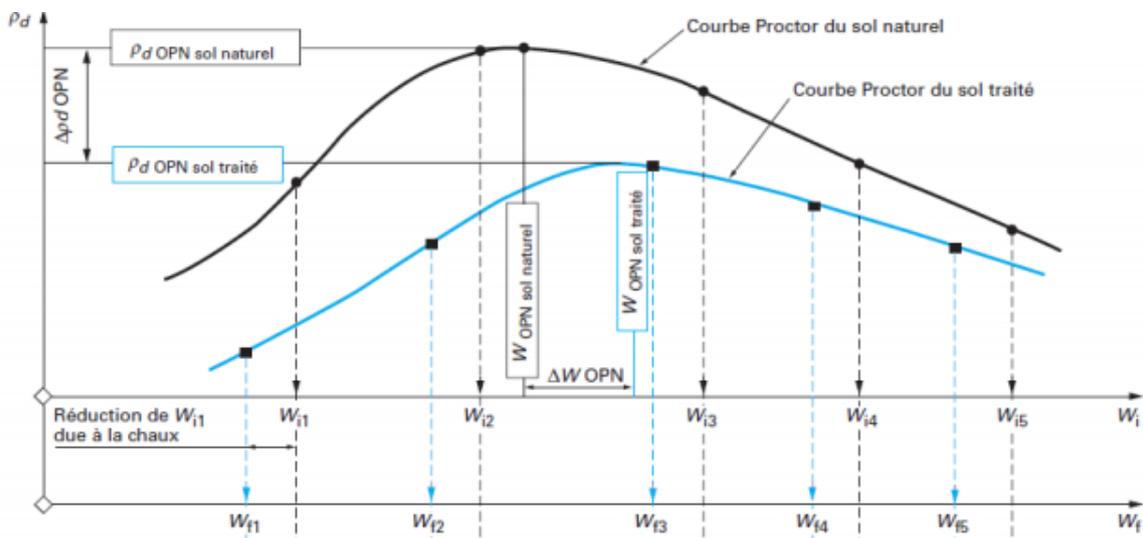


Figure 51 : Influence du traitement sur les caractéristiques de compactage du sol (GTS)

- l'augmentation de la résistance au cisaillement par l'augmentation de l'indice portant immédiat (IPI) qui se traduit par un accroissement de la rigidité du matériau après traitement (voir figure ci-dessous).

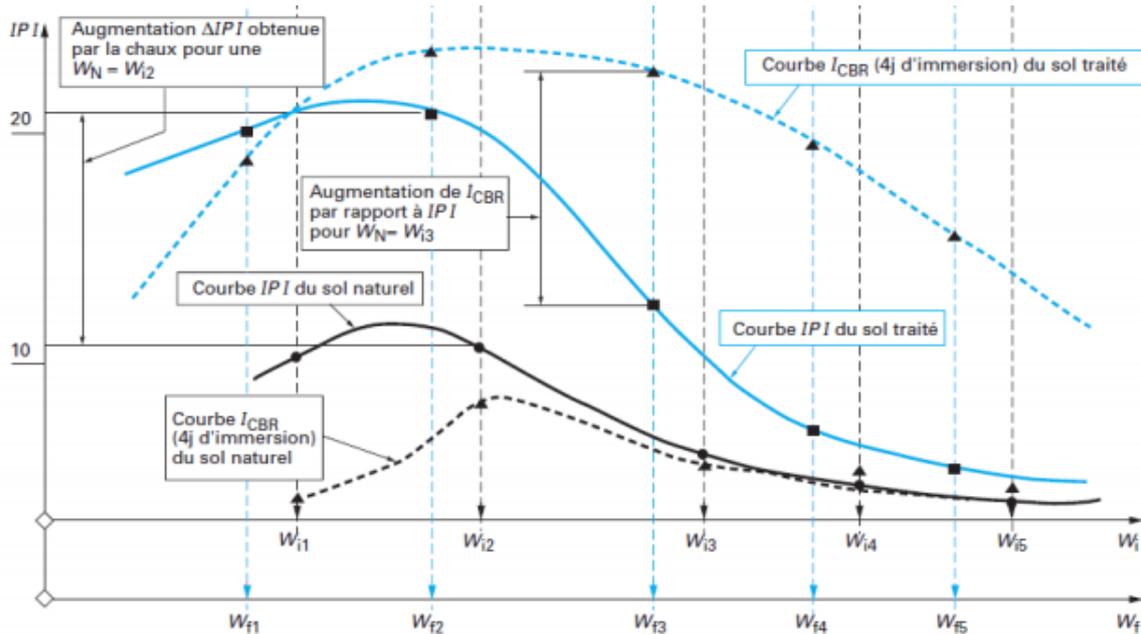


Figure 52 : Influence du traitement sur les caractéristiques de la portance du sol (GTS)

❖ Actions à long terme (poursuivies sur plusieurs mois) :

➤ **Action pouzzolanique**

L'action pouzzolanique se produit entre la chaux et les minéraux argileux présents dans le sol en milieu de pH élevé  $> 12$ , lorsque leur proportion est significative ( $I_p$  mesurable ou  $VBS > 0,5$ ). Le principe de cette action repose sur la possibilité 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.

L'action pouzzolanique améliore sensiblement les caractéristiques mécaniques des matériaux traités, notamment leur insensibilité à l'eau caractérisée par la vérification de  $I_{CBR} / IPI \geq 1$ .

Cette action se développe, en général, très lentement (plusieurs mois, voire des années, selon les conditions climatiques locales).

**Les facteurs** intervenant dans le déroulement de la prise hydraulique des mélanges sol-chaux sont :

- la température du milieu : Les résistances atteintes au bout d'un an de conservation à  $20\text{ °C}$  peuvent souvent être obtenues en moins de 30 jours si la température est de l'ordre de  $40\text{ °C}$  et qu'inversement, la prise s'arrête lorsque la température descend en dessous de  $5\text{ °C}$ .

- la quantité et la nature de la fraction argileuse : Plus cette quantité est élevée plus la mise en solution de la silice et de l'alumine est rapide et les cristallisations importantes (dans la mesure où les quantités de chaux et d'eau libre nécessaires sont disponibles). Pour certains sols considérés comme argileux par la valeur de  $I_p$  ou VBS, ne donnent pas naissance à des réactions pouzzolanique c'est le cas par exemple des argiles d'origine schisteuses à forte teneur en mica.
- L'état hydrique du sol : La présence dans le sol d'une quantité d'eau libre suffisante est indispensable pour assurer tout d'abord l'ionisation à pH élevé du milieu nécessaire à la solubilisation, puis l'hydratation de ces composés conduisant à la cimentation des particules granulaires. L'état humide du sol avant traitement est le meilleur état pour le développement de l'action pouzzolanique du mélange sol-chaux.

#### ➤ Action de syntaxe

Cette action concerne uniquement la chaux et les liants hydrauliques routiers. Elle 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.

- le maintien du milieu à un pH élevé, du fait de la chaux de pralinage en excès, garantit l'insolubilité des bouchons de calcite ainsi formés et donc la pérennité de la résistance des grains,
- la chaux de pralinage en se recarbonatant sous l'action du gaz carbonique forme une sorte de prise « aérienne » qui agglomère durablement les granulats dans la partie superficielle de la couche en contact avec l'atmosphère (ce dernier aspect est, cependant, négligeable dans l'application au traitement des sols pour remblai ou couche de forme).

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.

### **8.1.2. Les liants hydrauliques**

Des liants spéciaux routiers (LHR) ont été étudiés et mis au point depuis plusieurs années pour le traitement des sols en place ou en centrale et pour la fabrication de matériaux d'assises de chaussées, le LHR concerné présente, pour un type de sol et une nature d'ouvrage donnés, un comportement satisfaisant, mais toute extrapolation à d'autres paramètres de chantier comporte une part de risque qu'il convient d'évaluer pour chaque nouveau chantier.

#### ***a) Actions Les liants hydrauliques***

Le rôle des liants hydrauliques est d'améliorer les caractéristiques mécaniques des mélanges de sols traités de manière pérenne. Les ciments et les liants hydrauliques routiers attribuent aux matériaux traités, en présence d'eau, une cohésion permanente (prise hydraulique) qui dépende :

- de la nature du matériau traité.
- du type de liant utilisé.
- de la quantité de liant introduite dans le mélange.
- de la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du liant.
- de la qualité de la mouture du matériau après traitement.
- de la compacité atteinte lors de la mise en œuvre.
- de la température du milieu et de l'âge du mélange.

On recherche principalement, à travers l'utilisation des liants hydrauliques en traitement des sols, des actions à moyen et long terme. Les actions immédiates sont plutôt secondaires.

#### **Actions immédiates**

Ces actions peuvent se résumer en deux points :

- Modifications de l'état hydrique : assèchement du sol traité du fait de l'ajout d'une certaine quantité de matière sèche (liant hydraulique).
- Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol : cette action est valable uniquement lorsqu'on utilise certains LHR comportant une forte proportion de chaux mais cette action reste très limitée.

#### **Actions à moyen et long terme**

La prise hydraulique donne aux matériaux traités une résistance en traction qui est prédominante dans leur comportement. Elle se développe en trois étapes, la durée de chacune d'elles dépend de la nature du liant et de la température du mélange.

### **Étape 1 : démarrage de la prise (phase dormante)**

C'est le temps nécessaire de la mise en solution et à la précipitation sous forme de gel des silico-ferro-aluminates de calcium dans l'eau libre du sol (entre 2 et 48 h après fabrication du mélange). Ce délai, qui est appelé délai de maniabilité, est très important car il fixe la durée possible des opérations de mise en œuvre.

### **Étape 2 : développement de la cristallisation du gel**

Elle correspond à la rigidification du mélange sous l'effet de la prise hydraulique. Elle s'étend de quelques jours comme dans le cas des ciments à forte proportion de clinker (CPA-CEM I) à quelques semaines pour les liants à prise lente comme certains LHR.

### **Étape 3 : période de durcissement**

Elle se manifeste une fois la prise terminée (après formation de la quasi-totalité des Ferro-silico-aluminates hydratés). Dans cette période, il y a 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 permettent d'évaluer notamment la possibilité d'être circulé par les engins de chantier (le temps nécessaire pour solliciter mécaniquement le matériau traité).

La prise des liants hydrauliques s'arrête lorsque la température du mélange descend en dessous de 5 °C. de plus, la dépendance aux variations climatiques est moins contraignante comparativement à l'utilisation de la chaux car la cinétique de prise est beaucoup plus rapide.

## **8.2. Agents nouveaux**

### **8.2.1. Le laitier de haut-fourneau**

Le laitier de haut-fourneau est un sous-produit formé lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer, des combustibles (cendres du coke) et de divers fondants (acide ou basiques). La fonte ruisselle en continu en bas du haut fourneau sous forme de liquide. Les éléments résiduels qui parviennent à la gangue du minerai, des cendres du combustible et des fondants se rassemblent sous forme liquide et constituent le laitier. Etant donné la différence de masse volumique entre la fonte et le laitier (2.7 à 2.9), ils sont donc séparés par décantation.



Figure 53 : Le laitier de haut-fourneau

➤ *Caractéristiques chimiques*

Les composantes principales du laitier de hauts fourneaux sont la chaux (CaO), la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et la magnésie (MgO) qui représentent presque 95 % à 97 % des constituants du laitier. Le laitier de haut fourneau est un produit dont la composition chimique est variée d'un pays à l'autre, le tableau montre l'analyse chimique de quelques pays.

Oxydes	Teneur en %						
	Algérie	Australie	Allemagne	Afrique/sud	Canada	France	Japon
SiO <sub>2</sub>	40.1	35.8	31.5	34.2	35.6	33.5	31.2
CaO	40.2	41.1	36.6	39.4	38.8	42.2	37.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.0	16.2	16.0	10.4	07.8	13.3	16.2
MgO	4.7	2.65	10.1	11.6	11.5	6.0	8.46
SO <sub>3</sub> , S*	0.15*	1.52	2.36	2.09	4.36	0.94	3.03
FeO	2.0	-	-	-	0.11	12.4	0.05
MnO	2.64	1.63	0.47	1.26	0.60	2.64	0.65
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	0.01	-	0.01
TiO <sub>2</sub>	1.16	-	1.08	0.39	0.27	0.55	1.95
Na <sub>2</sub> O	-	-	0.90	0.25	0.27	0.39	0.64
K <sub>2</sub> O	0.70	1.43	0.77	0.50	0.43	0.70	0.47
Total	97.6	100.3	98.9	100.0	99.6	100.1	100.2

Tableau 14 : Composition chimique du laitier de haut fourneau

➤ *Activation du laitier granulé*

L'activation du laitier vitrifié peut être obtenue par trois modes : l'activation alcaline par la soude ou la chaux, l'activation sulfatique par les sulfates, ou l'activation sulfato-calcique (ou sodosulfatique) qui est une combinaison des deux premières activations. L'activant peut jouer le rôle de catalyseur ou de réactif : l'activant catalyseur active la réaction de dissolution/précipitation et n'entre pas dans la structure de l'hydrate, tandis

que l'activant réactif active la réaction de dissolution/précipitation, et est consommé lors de la réaction d'hydratation et rentre donc dans la structure de l'hydrate. La soude agit comme un catalyseur tandis que la chaux et les sulfates agissent comme des réactifs.

### ➤ *Utilisation*

Le laitier de haut fourneau granulé est principalement utilisé comme addition pour liants hydrauliques, dans la production de ciment ou la fabrication de bétons. Le laitier granulé peut être valorisé comme addition minérale dans la stabilisation des sols. Il est utilisé aussi comme sable.

Différents chercheurs ont rapporté sur la formulation des nouveaux matériaux stabilisés en remplaçant la chaux avec les différents pourcentages de laitier de haut fourneau pour stabiliser le sol, avec les avantages de la réduction du gonflement, amélioration des résistances mécaniques et durabilité, la gestion des déchets et conservation des ressources.

### **8.2.2. La coquille d'œuf calcinée**

La coquille d'œuf est un biominéral naturel composé d'un réseau de fibres protéiques associé à des cristaux de carbonate de calcium (96% du poids de la coquille) de carbonate de magnésium (1%) et de phosphate de calcium (1%), ainsi que de les substances organiques et l'eau. Le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), le constituant majeur de la coquille, est un cristal amorphe qui se produit naturellement sous forme de calcite (cristal hexagonal). En 2008, la production mondiale d'œufs est près de 62 millions de tonnes, la Chine étant le leader avec 37,6%. La production avicole aussi entraîne des déchets de la coquille d'œuf avec des quantités considérables et considérées comme n'ayant aucune valeur économique. La coque représente environ 11% du poids total des œufs, donc les déchets générés peuvent être estimés à environ 6,82 millions de tonnes par an dans le monde.



*Figure 54 : Photos de la coquille d'œuf*

Les coquilles d'œufs ont largement été utilisées comme catalyseur efficace dans la conversion de l'huile de soja et alcool méthylique dans la production de biodiesel. En

analysant différentes conditions de processus, la CaO était la phase active de la coquille d'œuf dérivée.

L'utilisation de la coquille comme source alternative de  $\text{CaCO}_3$  (carbonate de calcium) peuvent réduire l'impact sur les réserves naturelles de calcaire, une source naturelle non renouvelable. Une étude comparative entre l'effet de chaux et la poudre d'œuf sur le gonflement d'une argile, la quantité de chaux était remplacée partiellement par la poudre d'œuf, a montré que la chaux reste la plus efficace mais la poudre a réussi à réduire le gonflement et augmenter la résistance au cisaillement.

### 8.2.3. Les cendres volantes

Les cendres volantes de charbon sont extraites par séparation électrostatique ou précipitation mécanique de poussières de combustion issues des chaudières à charbon de centrales thermiques. Elles sont décrites comme une poudre fine dont les compositions sont minérales et organiques provenant du charbon. Les cendres provenant de la combustion des charbons bitumineux sont caractérisées par une faible teneur en oxyde de calcium (CaO) et de fortes teneurs en silice et alumine. Elles ont pour origine principale les centrales thermiques avec chaudière à flamme (classe F), elles sont appelées aussi cendres volantes siliceuses. En revanche, La proportion de CaO doit être au minimum égale à 10% pour que la cendre soit considérée comme calcique. Elles sont issues des centrales thermiques avec chaudières dites à Lit Fluidisé (Classe C).

Il faut noter que la phase vitreuse des cendres volantes est très liée à leur réactivité. La vitrification des cendres volantes est due à leur refroidissement rapide au contact de l'air à la sortie des chaudières. Les cendres à haute teneur en calcium (Classe C) présentent quant à elles une composition chimique de la phase vitreuse assez différente de celle des cendres de classe F, ce qui expliquerait leur plus forte réactivité.



*Figure 55 : Photo des cendres volantes*

En dehors des utilisations classiques comme les ajouts dans le ciment Portland pour permettre la formulation de certains bétons, les cendres volantes trouvent aussi des applications dans d'autres domaines de la construction. Elles peuvent être employées pour la réaction de liants hydrauliques routiers, en terrassement pour la création de

remblais, de couches de formes ou de couches de chaussées (fondation et bases). A ce niveau, les cendres permettent en particulier d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols en place. Enfin, les cendres permettent la formulation de coulis d'injection destinés à la stabilisation des sols.

#### 8.2.4. Poudre de verre

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible, à base d'oxyde de silicium (silice  $\text{SiO}_2$ , le constituant principal du sable) et de fondants. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse. En dessous de sa température de transition vitreuse, qui varie fortement avec la composition du verre (plus de  $1000^\circ\text{C}$  pour la silice vitreuse, moins de  $40^\circ\text{C}$  pour le sélénium amorphe), le verre se présente à l'état vitreux.

La poudre de verre peut être considérée en tant que source alternative de matière pouzzolanique car elle dispose de propriétés chimiques (oxyde de silice  $\text{SiO}_2$ ) et physiques (structure amorphe) compatibles pour l'activation alcaline en stabilisation des sols.



*Figure 56 : Photo de la poudre de verre*

## 9. CONCLUSION

Dans ce chapitre, une revue générale de l'état de connaissance dans le domaine de traitements des sols a été présentée. Nous avons essayé de définir d'abord la présentation des différentes méthodes de traitement suivi par leurs avantages, puis nous avons passé en revue les grandes étapes et les différents cas de traitement. Nous avons terminé ce chapitre par les différents agents d'amélioration.

# CHAPITRE III :

## Renforcement des sols

## CHAPITRE III : RENFORCEMENT DES SOLS

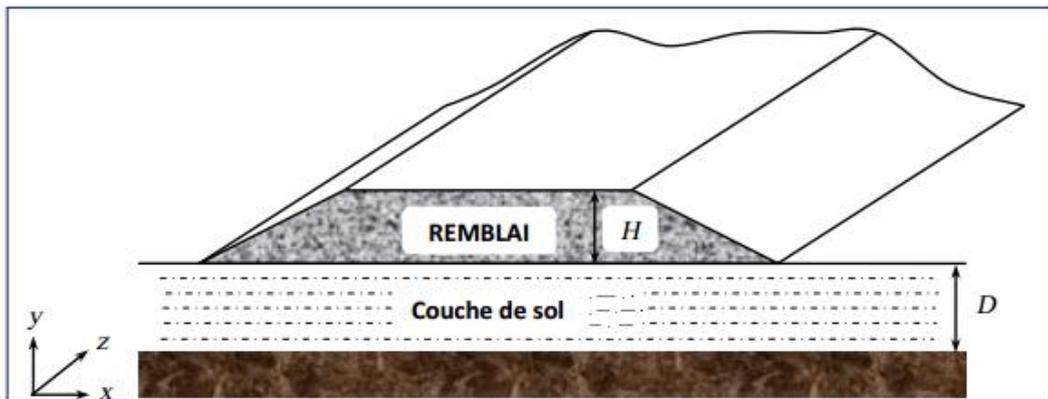
### 1. INTRODUCTION

Le passage parfois par des sols possèdent des faibles caractéristiques physico-mécanique (les sols compressibles) pose un problème de stabilité ou déformation des ouvrages en terre. Pour résoudre ces problèmes les ingénieurs géotechniciens disposent et développent de nombreuses techniques de renforcement de sol. Il existe différentes méthodes de renforcement des sols, plus ou moins anciennes (le battage...) et plus ou moins développées (pilonnage...).

Dans ce présent chapitre, nous présentons en générale les techniques de renforcement de sol les plus utilisées à l'heure actuelle, on particulier la méthode de renforcement de sol par clouage.

### 2. DEFINITION D'UN REMLAI

Le remblai est une opération qui consiste à apporter un ensemble de terre ou de matériaux inertes sur un terrain pour créer une plate-forme où combler un vide. Le remblai est donc nécessaire pour la mise en place d'un terrassement.



*Figure 57 : Schéma présentant un remblai*

Les matériaux utilisés pour les corps de remblai se répartissent en trois catégories : les sols, les matériaux rocheux et les sous-produits industriels.

Les possibilités d'emploi d'un sol pour la construction des remblais sont contrôlées par deux éléments essentiels : la nature et l'état hydrique, qui constituent le support de base de la classification des sols utilisée en France (Guide GTR).

La classe des matériaux rocheux utilisée pour les corps de remblais (GTR), s'appuie en premier lieu sur des paramètres tels que la nature pétrographique de la roche (roches sédimentaires, magmatiques ou métamorphiques) et en second lieu, sur l'état de la roche et ses caractéristiques mécaniques (fragmentabilité, dégradabilité, coefficients Los Angeles et Micro Deval). On distingue deux types de matériaux rocheux : les matériaux sains (non évolutifs), qui se caractérisent par le fait que leur granularité peut être considérée comme définitive une fois l'extraction réalisée (granite, basalte...), et les matériaux rocheux évolutifs. Le caractère évolutif du matériau est caractérisé par le changement de structure sous l'effet des engins au cours des travaux de mise en œuvre ou au cours de la vie de l'ouvrage. On peut citer à titre d'exemple les marnes et la craie qui sont considérées comme matériaux évolutifs. Ce type de matériau n'est pas recommandé pour utilisation dans les remblais routiers.

Les sous-produits industriels sont des matériaux particuliers dont l'emploi en remblai peut dans certains cas se révéler intéressant du point de vue technique et économique, à condition de ne pas nuire à l'environnement. Toutefois, les critères au travers desquels il convient d'examiner chaque famille de matériaux entrant dans cette catégorie pour en déduire ses possibilités d'emploi en remblai sont à la fois divers et spécifiques à la famille de matériaux considérée. Les principaux sous-produits industriels utilisés dans la construction des remblais routiers (selon le GTR) sont les cendres volantes, les schistes houillers, les mâchefers d'incinération des ordures ménagères. Les matériaux de démolition : les débris et matériaux issues d'une démolition peuvent être réutilisés dans le remblai. On peut citer entre autre, les briques, les parpaings, les blocs de ciment, les mortiers

### **3. RENFORCEMENT DES SOLS**

La forme moderne du renforcement du sol est basée sur l'interaction entre le sol et l'élément horizontal de renforcement par friction générée par la gravité. Aujourd'hui, l'application du concept de murs de soutènement est largement utilisée dans le monde. Le sol renforcé est quelque peu analogue au béton armé. Le mode d'action du renforcement dans le sol consiste à réduire l'anisotropie du taux de déformation normale.

Le renforcement des sols est un domaine récent et particulier de l'amélioration des sols. Au-delà de l'extrême

Il existe diverses techniques utilisées dans le renforcement des sols, qui tient autant à leurs mode d'exécution, qu'à la nature de l'ouvrage à renforcer (massif de fondation, mur de soutènement...), le principe de la méthode d'amélioration de sol par renforcement repose sur l'introduction dans le sol d'éléments de structures destinés à

permettre à l'ouvrage de résister à des charges qu'il n'était pas en mesure de supporter auparavant. La construction d'ouvrage sur de tels sols fait appel à des techniques relativement récentes pour traiter les sols afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Une comparaison des principales méthodes de renforcement de sol de fondation pour l'édification des remblais est présentée dans le tableau 15.

<b>Technique</b>	<b>Donnés Nécessaires</b>	<b>Contrainte</b>	<b>Fiabilité</b>	<b>Commentaires</b>
<b>Pré chargement</b>	Compressibilité Perméabilité Verticales et Horizontales	Plus rapide	Plus flexible	Rapide relativement cher
<b>Remplacement du sol</b>	Epaisseur de la Couche	Mise en dépôt du Sol Nouveau matériau	Bonne en cas De remplacement total	Rapide cher
<b>Colonnes Ballastées, colonnes de sable compacté</b>	Résistance et déformabilité du sol	Equipements Plot expérimental	Bonne après analyse de plots expérimentaux	cher Rapide
<b>Dalle sur pieux</b>	Résistance du Sol	Bonne		très cher
<b>Electro-osmose et injection</b>	Propriétés chimicophysiques compressibilité perméabilité	Destruction des électrodes Alimentation électrique	Incertaine	très cher
<b>Remblai léger</b>	compressibilité perméabilité	Protection du matériau léger	Peu faible pour obtenir de faibles déplacements	Cher
<b>Remblai sur inclusion rigides</b>	Résistance et déformabilité du sol		bonne	Cher rapide
<b>Colonnes de jet grouting</b>	Résistance et déformabilité du sol		bonne	Cher rapide

*Tableau 15 : Principales méthodes de renforcement de sol de fondation pour l'édification des remblais*

## 4. TECHNIQUES DE RENFORCEMENT

Il existe une multitude de méthodes de renforcement et d'amélioration des propriétés des sols fins et des sols grenus. La plupart de ces méthodes permettent de régler les problèmes de **glissement**, de **tassement** et de **déformation**.

### 4.1. Colonnes ballastées

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives. Ces colonnes ne comportent en particulier aucun liant sur leur hauteur. Elles peuvent être réalisées en maillages réguliers ou variables, en lignes, en groupes ou même de manière isolée. Leur dimensionnement tient compte du type d'ouvrage, de la nature des charges, des tassements absolus et différentiels ainsi que de la nature du sol à traiter.

Le but de toute réalisation de colonnes ballastées est de conférer au sol de nouvelles caractéristiques mécaniques sous l'ouvrage à construire, afin que les différents éléments d'infrastructure de celui-ci (semelles isolées ou filantes, radier, dallages, ouvrage en terre...) aient un comportement prévisible, justifiable et compatible avec les règlements et tolérances s'appliquant à la structure de l'ouvrage et à son exploitation.



*Figure 58 : Principe de réalisation de colonnes ballastées*

Le renforcement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes, dans une seule ou plusieurs peuvent être recherchées :

- Amélioration de la portance.
- Réduction des tassements.
- Homogénéisation des caractéristiques géotechniques.
- Augmentation de la vitesse de consolidation par la création d'éléments drainants.

- Augmentation des caractéristiques équivalentes du massif de sol traité (la résistance au cisaillement horizontal, l'angle de frottement interne et les paramètres de déformation).

Il est également possible d'utiliser les colonnes en zones sismiques ou elles peuvent contribuer à la diminution du potentiel de liquéfaction des sols.

## 4.2. Inclusions rigides

Le principe du renforcement par les inclusions rigides est illustré par la figure ci-dessous. La charge appliquée en surface est transmise à un substratum rigide par l'intermédiaire de la combinaison d'un réseau d'inclusions rigides et d'un matelas de transfert de charge.



*Figure 58 : Principe de fonctionnement des inclusions rigides*

Utilisable pour fonder tous types d'ouvrage sur sols compressibles de toute nature, ce procédé permet de réduire fortement les tassements. Les inclusions sont généralement verticales et disposées suivant un maillage régulier. Elles doivent présenter des caractéristiques intrinsèques de déformation et de raideur, compatibles avec les terrains encaissants et les structures à porter.

Différents modes de mise en œuvre (forage avec ou sans refoulement, battage, vibration) et différents types de matériaux (ballast, gravier, mélange sol-ciment et tous types de mortier ou béton) sont utilisables pour permettre de réaliser à moindre coût un système de fondations superficielles au lieu d'un système de fondations profondes.

## 4.3. Géosynthétiques

Les géosynthétiques ont connu un essor considérable dans les domaines de la géotechnique et du génie civil durant ces trente dernières années. De nos jours, ils sont présents dans la plupart des ouvrages géotechniques et leurs domaines d'application ne cessent de s'accroître.



*Figure 59 : Renforcement par géosynthétiques*

#### 4.3.1. Classification des géosynthétiques

Les géosynthétiques peuvent être généralement classés en catégories selon le mode de fabrication.

##### *a. Géotextiles*

Les géotextiles sont des nappes continues de fibres ou filaments tissés, non-tissés, tricotés ou thermo-soudés. Les nappes sont souples et perméables et ressemblent en général à des textiles. Les géotextiles sont utilisés pour des applications en séparation, filtration, drainage, renforcement et contrôle de l'érosion.

- **Un non tissé** est un géotextile se présentant sous forme d'une feuille manufacturée, constituée d'un voile ou d'une nappe de fibres, orientées selon une direction ou distribuées aléatoirement (Fig.)



*Figure 60 : Géotextile non tissé*

- **Un tissé** est constitué de séries de fils perpendiculaires combinés de façon systématique (exemple : des tissus utilisés pour des chemises, des voiles de bateaux, les bâches).



*Figure 61 : Géotextile tissés*

- **Un tricoté** est un géotextile produit par assemblage de deux nappes de fils parallèles au moyen d'un fil de liaison, de façon à obtenir la répartition géométrique désirée.



*Figure 62 : Géotextile tricoté*

### *b. Géogrilles*

Les géogrilles sont des géosynthétiques dont la fonction est le renforcement des sols.

Une géogrille est une structure plane à base de polymère, constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction et pouvant être assemblés par extrusion, par collage ou par entrelacement, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants et permettant le confinement du sol.

La grandeur des mailles varie généralement de 1 et 10 cm pour permettre la pénétration des gros éléments du sol, et la création d'un effet d'imbrication de ces constituants dans la géogrille. Pour obtenir l'effet de renforcement il est nécessaire que les gros éléments s'imbriquent de la moitié de leur volume dans la maille.

Les géogrilles sont le plus souvent utilisées pour le renforcement de sols peu cohérents avec un squelette de granulométrie élevés. On distingue des géogrilles mono-axiales et bi-axiales.

- **Mono-axiale** la résistance à la traction est plus importante dans un sens longitudinal ou transversal que dans l'autre.
- **Bi-axiale** la résistance à la traction est sensiblement équivalente dans le sens longitudinal et transversal.

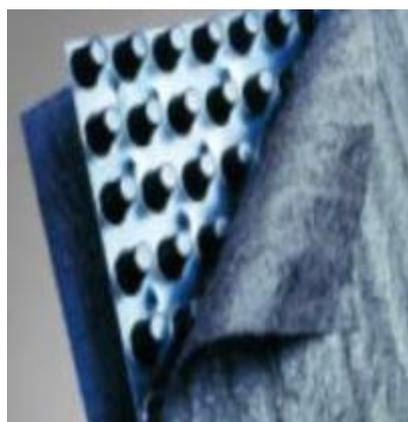


*Figure 63 : Géogrilles uniaxiale et biaxiale*

### *c. Géocomposites*

Un géocomposite est un assemblage manufacturé de matériaux dont au moins l'un des composants est un produit géosynthétique, par exemple une géogridde complexée avec un géotextile non-tissé. Il peut être utilisé, soit en géotechnique (fonctions de séparation et renforcement), soit pour les couches de roulement (fonction de renforcement, particulièrement en réfection).

Un géocomposite de renforcement apporte en une pose, les avantages du géotextile non-tissé et ceux d'un géosynthétique de renforcement, géotextile tissé, tricoté ou géogridde. Les différents composants peuvent être assemblés liés par couture ou soudure thermique.



*Figure 64 : Géocomposites*

## **4.4. Tirants d'ancrages**

Le principe consiste à réduire les forces actives du glissement et à accroître les contraintes normales effectives sur la surface de rupture. Pour ce faire, on ancre des

tirants constitués de câbles d'acier multi torons dans le terrain stable situé sous la surface de rupture, et on applique en tête un effort de traction. Cet effort peut être réparti sur la surface du terrain par l'intermédiaire de plaques ou de petits massifs en béton armé. Dans de nombreux cas, les tirants sont combinés à un mur ou à des longrines.

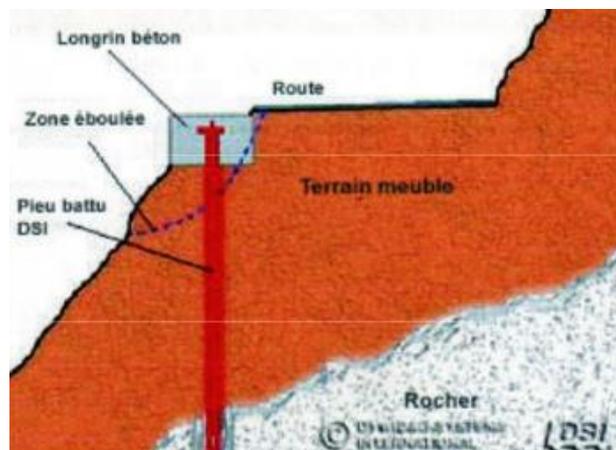


*Figure 65 : Renforcement par ancrage*

#### 4.5. Colonnes de pieux

Les colonnes de pieux peuvent être utilisées pour stabiliser ou prévenir les glissements de terrain. Cette technique d'amélioration des sols augmente la résistance au cisaillement moyenne du sol le long d'une surface de glissement potentiel par le remplacement ou le déplacement du sol avec une série très rapprochées des colonnes de grand diamètre compactée.

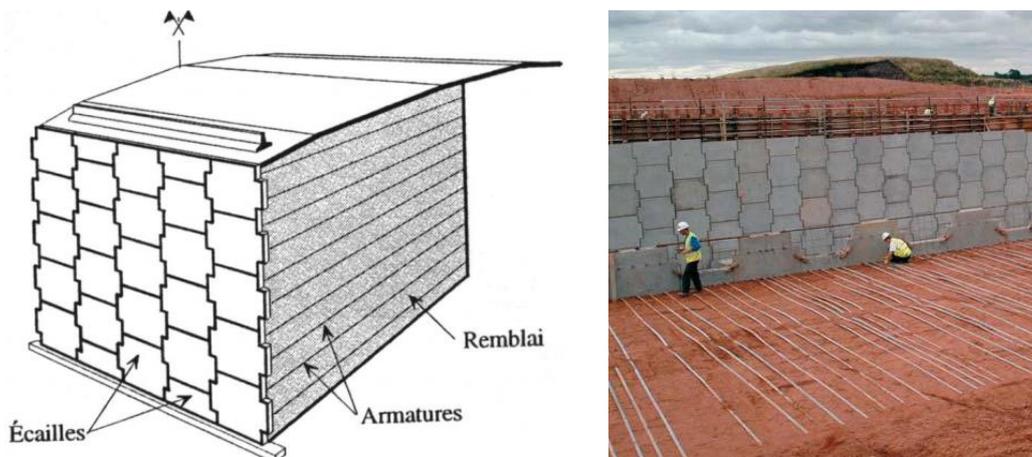
En outre, les colonnes de pieux fonctionnent comme des drains de gravier efficace en fournissant un chemin pour le soulagement des pressions interstitielles, augmentant ainsi la résistance des sols.



*Figure 66 : Renforcement par pieux*

## 4.6. Terre armée

La terre armée résulte de l'association d'un sol pulvérulent de type sable, et de lits d'armatures métalliques, travaillant en traction dû au frottement entre le sol et les armatures ce qui permet la formation d'un massif mécaniquement plus performant. Le parement de ce type de massif est constitué d'un parement béton modulaire dont l'élément de base est appelé écaille. Les écailles sont reliées aux armatures constituées, elles, en lanières métalliques. Les qualités techniques et économiques de la terre armée, ainsi que sa facilité de mise en œuvre en font un matériau qui prend naturellement sa place dans les domaines de géotechnique.



*Figure 67 : Principe de la terre armée*

La terre armée est un matériau en plein expansion et devrait rester pour nombreuses années grâce aux avantages suivants :

- dès que la hauteur de soutènement dépasse trois mètres, les murs en terre armée sont moins chers que les ouvrages en béton.
- elle permet de réaliser des ouvrages souples, déformables donc peu sensibles aux tassements du sol de fondation.
- construire des murs de terre armée sur des sols de faible portance (argiles, limons) en remplaçant les fondations profondes.
- les massifs en terre armée sont auto-drainants.
- l'exécution est simple, rapide, à partir d'éléments préfabriqués en usine.
- les parements (écailles en béton ou en acier) peuvent présenter une esthétique.

## 4.7. Utilisation des fibres

Le terme fibre se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le

constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu. Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine en deux grande familles :

- Fibres naturelles : minérales, animales et végétales.
- Fibres chimiques : d'origine synthétique ou artificielle.

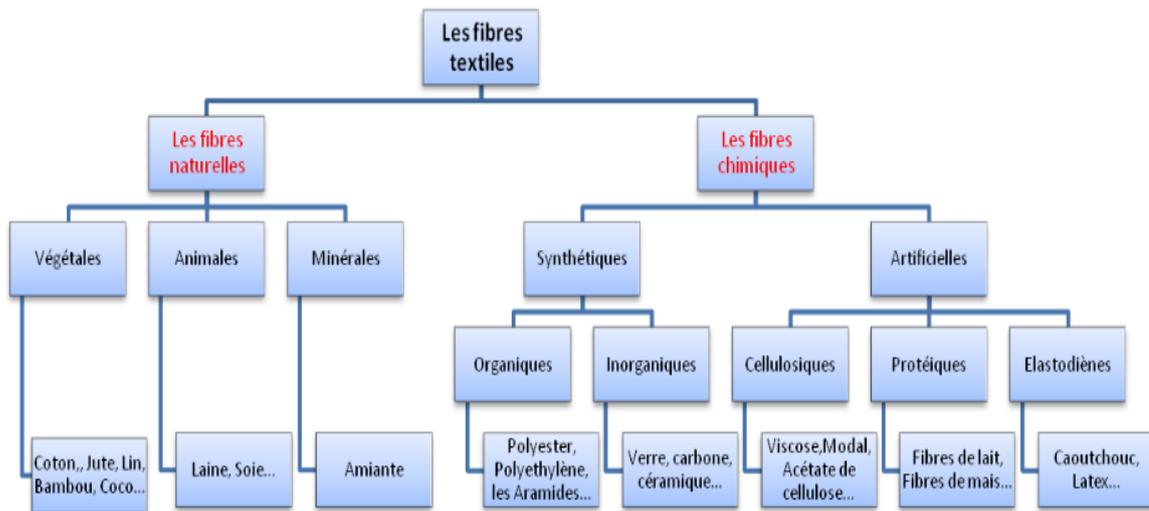


Figure 68 : Classification générale des fibres textiles

L'inclusion du renforcement des fibres dans les sols cimentés ou non cimentés s'est également révélée être une technique fiable pour augmenter la résistance à la compression et au cisaillement, l'indice CBR et réduire la perte de tension, de rigidité, de retrait et de fissuration post-pic. Cependant, il convient de noter que dans certains cas, l'inclusion d'un renforcement de fibres peut affecter négativement les propriétés techniques (par exemple, la résistance à la compression) des sols.

Une grande variété de fibres naturelles et synthétiques a été utilisée pour le renforcement des sols. Quelques exemples de fibres synthétiques sont : fibres de polypropylène (PP), fibres de polyester (PET), fibres de polyéthylène (PE), fibres d'acier, fibres de basalte, fibres de verre, fibres de nylon et fibres de Polyvinyle alcool (PVA). Quelques exemples de fibres naturelles sont : fibres d'arecaunt (coco), fibres de sisal, fibres de palmier, fibres de jute, fibres de lin, fibres de paille à peine, déchets de fibres de caoutchouc, fibres de Pinus Roxburghii, fibres de Grewia Optivia, fibres de bambou et fibres de canne ou de canne à sucre. La teneur en fibres et la taille des fibres (c'est-à-dire la longueur, la largeur et l'épaisseur de la fibre) affectent de manière significative les propriétés de résistance, la ductilité et le potentiel de gonflement des sols renforcés de fibres

## 4.8. Clouage du sol

### 4.8.1. Définition

Le clouage des sols. C'est une technique de renforcement des sols in situ, en y installant dans le terrain à l'aide des inclusions (appelées aussi clous ou armatures), rigides et passives, éléments linéaires travaillant à la traction et au cisaillement, qui ont pour effet de limiter les déformations du sol, Ces éléments (barres, cornières, tubes, etc.) peuvent être soit mis en place par fonçage ou battage, soit mis en place dans des forages et scellés par un coulis.

Lorsque cette technique est utilisée pour des ouvrages de soutènement, les barres sont généralement horizontales et l'effort principal est la traction. Au contraire, quand cette technique est utilisée pour la stabilisation des pentes, les barres sont généralement verticales et les efforts principaux sont la flexion et le cisaillement.

Dans un massif renforcé, on qualifie d'active la zone qui se déforme et de résistante, la partie rigide. Les mouvements du sol peuvent très faible ou étendus, la zone active peut rester stable ou, au contraire, s'effondrer suivant la nature et la qualité du renforcement. Les clous augmentent la cohésion du sol, ainsi que sa résistance à la traction et au cisaillement, et mis en place (par frottement) dans la zone résistante.

La surface qui sépare les deux parties est la surface de rupture potentielle. Le lieu géométrique des points de traction maximale  $T_{max}$  permet de séparer le massif soutenu en deux zones (Fig.) :

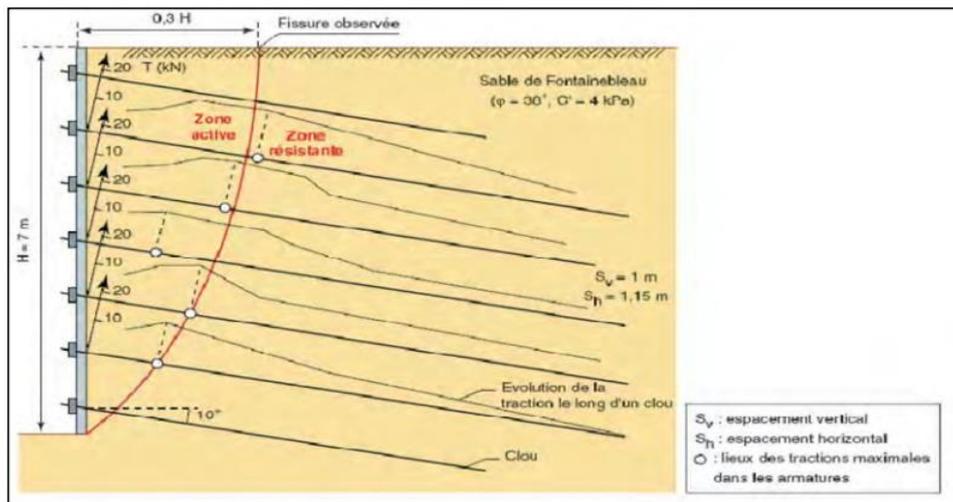


Figure 69 : Schématisation de la zone active et de la zone résistante

1 - une zone active située derrière le parement et où les contraintes de frottement latéral exercées par le sol sur les clous sont dirigées vers l'extérieur.

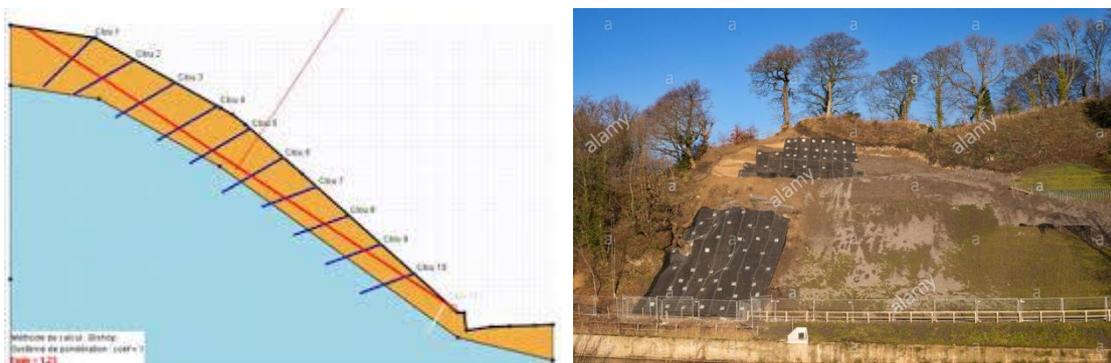
2 - une zone résistante où les contraintes de frottement latéral sont dirigées vers l'intérieur et s'opposent ainsi au déplacement latéral de la zone active.

#### 4.8.2. Différentes type d'utilisations

La technique de clouage s'emploie dans deux domaines (fig.) :

##### *a. La stabilisation des pentes naturelles*

Le clouage consiste à solidariser par l'intermédiaire des clous la stabilité des pentes de terrains naturelles. Les inclusions sont souvent simplement battues et placées le plus perpendiculairement possible par rapport à la surface de glissement potentielle. Elles travaillent essentiellement par cisaillement généralisé.



*Figure 70 : Stabilisation d'une pente instable par clouage*

##### *b. Le soutènement des excavations ou de remblais (pentes artificielles)*

La technique de clouage peut également être utilisée pour soutenir les parois d'une fouille, les éléments linéaires (barres, cornières, tubes.) sont mis en place horizontalement au fur et à mesure que l'on terrasse l'excavation et sont sollicités par la déformation progressive du massif. Ils travaillent essentiellement en traction ainsi qu'au cisaillement.



*Figure 71 : Soutènement réalisé par clouage (excavation, remblai)*

### 4.8.3. Les principaux avantages du clouage

- Un matériel réduit pour la construction : la construction ne nécessite qu'un matériel limité et léger : un engin de terrassement pour l'excavation, un engin de forage et une centrale d'injection ou un engin de battage pour la mise en place des barres, une machine à projeter le béton.
- Une rapidité d'exécution puisque la construction se fait en même temps que les terrassements.
- Le clouage est bien adapté aux sites délicats, il permet de réaliser des ouvrages dans des pentes difficiles. Il peut être réalisé par plots, en courbe ou avec un parement incliné ;
- Une bonne adaptation aux sols hétérogène : dans la mesure où la densité des clous peut être adaptée à la nature et à la résistance des sols rencontrés.
- Un coût très compétitif dans la mesure où elle conjugue rapidité et simplicité d'exécution avec l'utilisation de matériels légers.

## 5. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre différents techniques de renforcement des sols. La technique de clouage est parmi les techniques des renforcements les plus utilisée en géotechnique à cause de leur simplicité et rapidité de réalisation ainsi que son cout relativement modéré. Cette technique permet d'améliorer des propriétés mécaniques des sols par la mise en place d'inclusions résistants travaillant à la traction, à la compression ou à la flexion et qui peut être utilisé soit pour la réalisation de massifs de soutènement, en déblai, soit pour le renforcement de talus existants. Cette technique est choisie pour l'étude numérique de notre travail de mémoire.

# CHAPITRE IV :

## Essais et interprétations

---

**CHAPITRE IV : ESSAIS ET INTERPRETATIONS**

---

**1. INTRODUCTION**

Nous présentons dans ce chapitre l'étude de traitement de la marne argileuse. Nous examinons l'effet de l'ajout des produits de traitement, sur certaines propriétés mécaniques de la marne (résistance au cisaillement).

D'abord, nous rappelons les objectifs de cette étude, puis nous présentons les caractéristiques des matériaux utilisés. Ensuite, nous faisons une brève présentation de l'appareil de cisaillement à la boîte de Casagrande. La procédure et les résultats des essais de cisaillement effectués au Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction de d'Annaba (LNHC) sont ainsi présentés. Enfin, nous terminons ce chapitre par l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

**2. OBJECTIF DE L'ETUDE EXPERIMENTALE**

Les principaux problèmes liés aux sols de manière générale se manifestent par une faible résistance au cisaillement et à la compression. Ces sols ont donc besoin d'une amélioration pour augmenter leur stabilité mécanique et améliorer leur performance.

Notre étude expérimentale a pour objectif principal d'évaluer les effets des ajouts de laitier de haut fourneau broyé et de la poudre de verre, activé tous les deux par de la chaux éteinte, sur les caractéristiques de cisaillement du sol traité (résistance max, angle de frottement, cohésion). Les essais ont été réalisés à l'aide de l'appareil de cisaillement rectiligne. Les paramètres obtenus seront utilisés pour l'étude numérique.

**3. CARACTERISTIQUES DU SOL ET DES PRODUITS DE TRAITEMENT****3.1. Marne naturelle**

Nous avons utilisé la marne argileuse disponible au niveau de notre laboratoire. Cette marne a fait l'objet de plusieurs travaux dans les années précédentes. Pour rappel, cette marne a été prélevée dans la commune de Nechmaya (Guelma) sur le chantier de la réalisation de la pénétrante Guelma – Annaba. Les caractéristiques du sol à l'état naturel sont synthétisées dans la figure et le tableau suivants.



Figure 71 : Photos de la marne argileuse

La courbe granulométrique est présentée dans la figure ci-dessous :

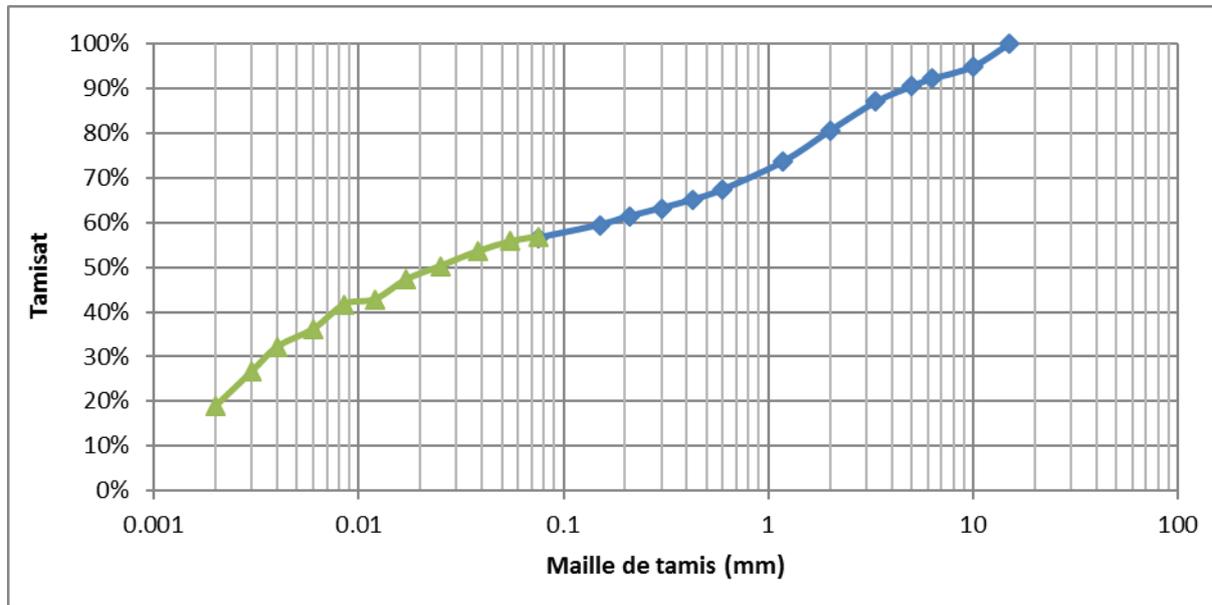


Figure 72 : Courbe granulométrique de la marne

Les caractéristiques de la marne sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

$D_{max}$	15 mm
Passant à 80 $\mu$ m	58%
$W_L$	57%
$W_P$	28%
$I_p$	29%
VBS	1.33
$W_{OPN}$	15%
$\rho_{d\ max}$	1.833 t/m <sup>3</sup>
Classification GTR	A3
Classification LCPC	AT
Classification AASHTO	A7

Tableau 16 : Caractéristiques physiques et classification de la marne naturelle

### 3.2. Poudre verre

Nous avons utilisé des résidus de fenêtres en verre disponibles à l’extérieur de notre laboratoire. Par la suite, le verre a subi les opérations suivantes :

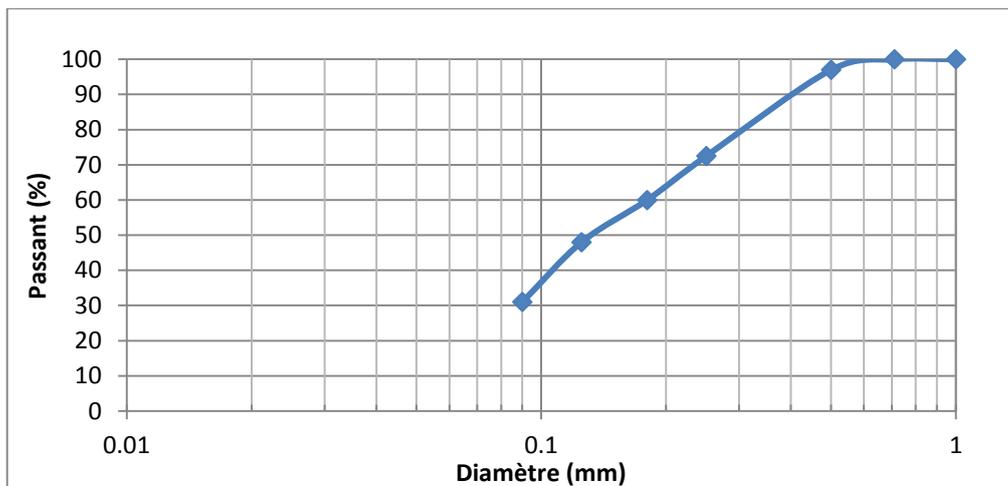
- lavage pour éliminer au maximum la poussière.
- broyage avec la machine Micro Deval pour être le fine possible pour qu’il réagit avec les particules de sol.

Le tableau suivant, résume l’ensemble des caractéristiques granulométrique du verre :

Diamètre (mm)	1	0.71	0.5	0.25	0.18	0.125	0.09	fond
Poids Tamis (g)	388	324	300	281	272	264	259	249
Poids total (g)	388	324	306	330	297	288	293	311
Rufus cumulés (%)	100	100	97	72.5	60	48	31	0

*Tableau 17 : Granulométrie par tamisage du verre*

La courbe granulométrique est présentée dans la figure ci-dessous :



*Figure 73 : courbe granulométrique du verre*

### 3.3. Laitier de haut fourneau granulé

Le laitier vitrifié d’EL Hadjar appelé aussi laitier granulé a été utilisé pour notre étude. Il est obtenu par refroidissement par un jet d’eau (trempe à l’eau) et chute dans un grand bassin. Il se présente sous forme de sable de couleur grise.

Après avoir sécher le laitier dans l’étuve, un broyage a été réalisé avec la machine du Micro Deval. Nous avons mis 2 kg de laitier avec 4 kg de billes dans chacun des 4 moules de l’appareil Micro Deval. Le broyage a duré 12 heures pour atteindre une finesse autour de 4000 cm<sup>2</sup>/g.

Le broyage lui permet d'augmenter la teneur en fines autour de 10 à 12 % et une réactivité plus élevée.



*Figure 74 : Le laitier granulé avant et après broyage*

### **3.4. La chaux**

La chaux utilisée dans cette étude est la chaux éteinte produite par l'entreprise HYDROSID située dans la ville d'Annaba (Fig. 74). L'aspect de la chaux est une poudre fine inodore.



*Figure 75 : Photo du sac de chaux utilisée*

## **4. ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE**

### **4.1. But de l'essai**

Les essais de cisaillement rectiligne réalisés à la boîte fournissent les paramètres de cisaillement du sol qui sont la cohésion (C) et l'angle de frottement interne  $\phi$ . La cohésion est la résistance au cisaillement sous contrainte normale nulle appelée aussi résistance propre du sol (due aux liaisons physico-chimiques). L'angle de frottement est l'angle de glissement grain sur grain qui dépend de l'état de compacité du sol pour les sols grenus et de la nature minéralogique des grains pour les sols fins.

## 4.2. Appareillage de l'essai

L'appareillage spécifique de l'essai comprend (figure ci-dessous) : le bâti, la boîte de cisaillement, le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette, le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes, le système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps.

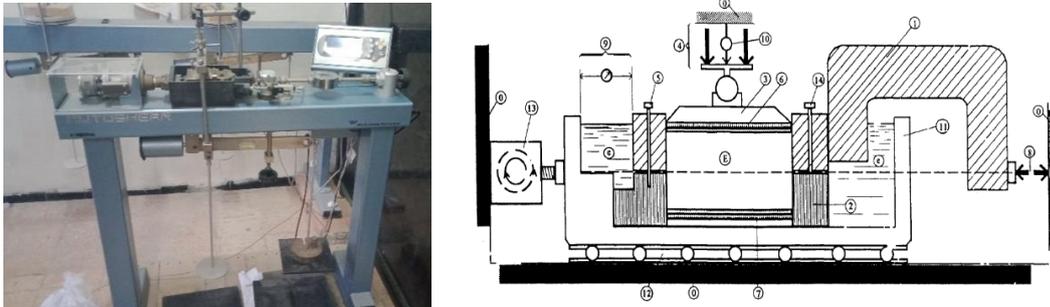


Figure 76 : Appareillage de l'essai de cisaillement

## 4.3. Mode opératoire

On place l'échantillon de sol dans les deux demi-boîtes puis on positionne le piston au-dessus de l'échantillon de sol. On applique sur le piston une force verticale constante.

Le démarrage de l'essai commence par le déplacement de la demi-boîte inférieure à vitesse constante. On enregistre sur la boîte supérieure à l'aide d'un anneau dynamométrique la force  $F$  dans le plan de cisaillement. On place sur le piston un comparateur qui permet de mesurer les déplacements verticaux de l'échantillon de sol. La résistance au cisaillement est déterminée en trois procédures d'essai différentes : Consolidé Drainé (CD), Consolidé Non Drainé (CU), Non Consolidé et Non drainé (UU). L'essai UU s'intéresse à la stabilité à court terme du sol. Il y a ni consolidation avant le cisaillement, ni drainage de l'eau des vides pendant le cisaillement. La vitesse d'essai est très rapide. La résistance au cisaillement du sol est due également à la pression interstitielle.

## 4.4. Expression des résultats

La détermination des paramètres mécaniques des sols s'obtient en traçant les droites dite de Coulomb (courbes intrinsèques) dans un repère orthonormé qui présente, en abscisses les contraintes verticales ( $\sigma_i$ ) et en ordonnées les contraintes de cisaillements maximales ( $\tau_{\max}$ ), sachant que :

$$\sigma = N/A \text{ et } \tau = T/A$$

**N** : effort de compression normale (vertical)

**T** : effort horizontal de cisaillement.

A : surface de l'échantillon.

D'une part, les pentes de ces droites représentent les tangentes des angles de frottements internes  $\varphi$ , et d'autre part, les cohésions  $C$  obtiennent par l'intersection de ces droites avec l'axe des ordonnées (Fig. 77). La courbe de résistance au cisaillement est ainsi décrite par deux paramètres ; l'angle de frottement  $\varphi$  et la cohésion  $C$ .

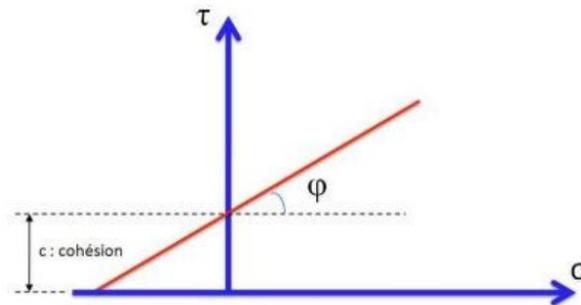


Figure 77 : Droite Coulomb de l'essai de cisaillement rectiligne

## 5. PROCEDURE EXPERIMENTALE

### 5.1. Choix des dosages

Le travail a permis de confectionner 30 éprouvettes préparées pour les deux dosages 5% et 10%. Ces deux dosages se situent dans la limite des dosages économiquement rentable pour un traitement de sol.

Les essais de cisaillement rectiligne ont été réalisés pour deux mélanges à savoir :

- **Mélange 1** : Marne+ verre + chaux
- **Mélange 2** : Marne +LHF + chaux

Il faut préciser qu'on a choisi de mettre **90%** de laitier de haut fourneau ou de verre comme produit latent et **10%** de chaux comme un activant dans les mélanges 1 & 2. Ce pourcentage optimal a été confirmé dans plusieurs études.

Ajout	0%	5%	10%
Marne (g)	161.1	153.05	144.99
LHF/ verre (g)	0	7.25	14.5
Chaux (g)	0	0.81	1.61
Eau (g)	29		

Tableau 18 : Quantités de chaque composant des mélanges sol - liant

### 5.2. Préparation des éprouvettes

Les échantillons non traités et traités sont préparés avec une teneur en eau optimale  $w=18\%$  et compactés à la masse volumique sèche maximale  $\rho_d = 1790 \text{ kg/m}^3$ . Les

mélanges sol-liant ont été directement mélangés avec la quantité d'eau désirée et ils ont été bien mélangés manuellement jusqu'à ce que le mélange devienne homogène.

La figure 78 montre les étapes de la préparation du sol avant d'entamer la phase de compactage :



*Figure 78 : Préparation des mélanges pour le compactage*

La hauteur de l'échantillon ( $h$ ) de sol dans la boîte de cisaillement doit tenir compte du ( $D_{\max}$ ) qui est tel que :

$$6 D_{\max} \leq h \leq L/2$$

Pour que les échantillons soient compactés à la masse volumique maximale désirée, les mélanges ont été confectionnés par compression statique et reconstitués sous forme d'éprouvettes de 2 cm de hauteur et de section (6×6) cm en utilisant **la machine de compression CBR** (Figure 79). Le compactage consiste à appliquer par l'intermédiaire d'un piston, un effort vertical exercé sur le mélange. Les parois intérieures de la boîte doivent être couvertes d'une couche de graisse afin de réduire les frottements mélange-moule et d'éviter la fracture de l'éprouvette lors de son extraction de la boîte de cisaillement. Cette dernière peut se faire manuellement après compactage. On utilise un piston ayant le même diamètre que le diamètre intérieur du moule pour faire glisser l'éprouvette vers l'extérieur. On détermine ensuite son poids et ses dimensions.

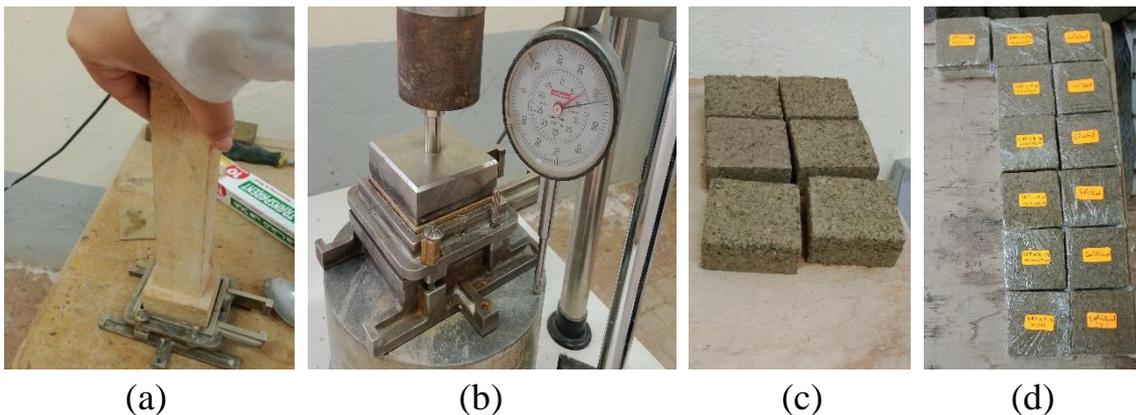


*Figure 79 : Photo de la machine CBR au cours de compactage*

Après démoulage, les échantillons ont été immédiatement sellés avec un film plastique pour prévenir d'éventuelles pertes d'humidité et de les éloigner de tout contact avec l'air ambiant. La maturation à 20°C est assurée au laboratoire à température contrôlée dans une enceinte thermique.

Il faut noter que les éprouvettes sont confectionnées pour une période de cure de 7 jours. Nous avons préparé deux éprouvettes pour chaque dosage afin de prendre en considération l'incertitude de mesure.

Le mode opératoire de confection des éprouvettes est illustré dans la Figure 80.

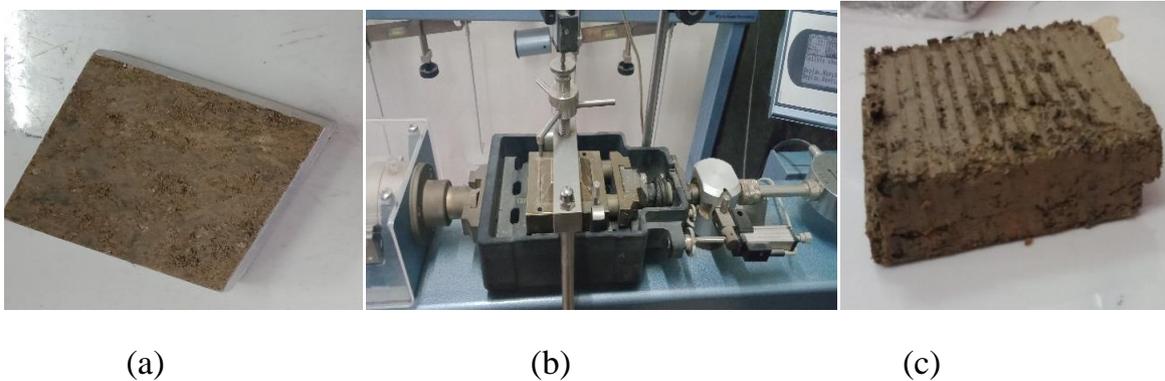


*Figure 80 : Confection des éprouvettes par compactage statique : (a) compactage manuelle léger, (b) compactage de l'éprouvette, (c) Extraction, (d) conservation*

### 5.3. Cisaillement des éprouvettes

A la fin de la période de cure (7 jours), des essais de résistance au cisaillement non consolidé, non drainé (UU) sont effectués. L'éprouvette est introduite dans la boîte de

cisaillement rectiligne qui comprend deux parties : la partie inférieure fixe (immobile) et la partie supérieure mobile. Un effort normal vertical est appliqué tout le long de l'essai sur l'éprouvette en utilisant des masses et un bras de levier. Les masses de 3,6kg, 7,2kg et 10.8kg permettent respectivement d'appliquer un effort normal vertical de 1, 2 et 3 Bar. La machine de cisaillement à vitesse constante crée un mouvement uniforme de la boîte de cisaillement qui occasionne un effort tranchant horizontal. Le cisaillement étant du type UU, donc très rapide, la vitesse de cisaillement est donc de 1mm/min. L'éprouvette développe alors une force en s'opposant au mouvement. Cette force, en fonction de son intensité, induit le déplacement d'un anneau métallique. Ce déplacement est appelé lecture de l'anneau et mesuré à l'aide d'un dispositif de mesure. Les lectures se font chaque déplacement de 0,25 mm. L'essai est arrêté lorsque la valeur de la lecture se répète trois fois ou lorsque le déplacement horizontal atteint au moins 5 mm.



*Figure 81 : Procédure de cisaillement : (a) installation de l'éprouvette dans la boîte de cisaillement, (b) éprouvette au cours de cisaillement, (c) après cisaillement*

## 6. PRESENTATION DES RESULTATS

### 6.1. Sol naturel

A partir des mesures d'effort de cisaillement effectuées sur des échantillons de marne naturelle (non traitée), nous avons calculé les contraintes de cisaillement selon le tableau ci-dessous. Les courbes contraintes –déplacement sont présentées sur la figure ci-dessous. A partir des Figure 82 & 83 les résultats montrent un comportement contractant de la marne naturelle pour les différentes contraintes normales.

Déplacement Horizontal	Echantillon N°1			Echantillon N°2		
	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=300$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=300$
0	0	0	0	0	0	0
0.252	51	65.4	82.4	45	60.3	78
0.501	62.1	86.7	106.3	59.5	78.8	99.75
0.751	68.6	98.6	122.8	68.5	93.2	115.6
1.002	73.8	108	134.7	75.3	104.4	127.5
1.25	77.8	115.6	144.8	80.7	111.9	139.3
1.502	80.9	121.1	152.3	84.8	117.5	148.3
1.753	83.3	125.8	160.1	88	122.5	156.5
2.001	85.5	129.8	166.9	90.7	125.8	163.9
2.252	87.4	133	172.6	92.8	129.2	170.6
2.502	88.6	135.5	177.25	94.3	132	175.16
2.75	89.7	137.8	181.1	95.8	134.9	179.6
3	90.6	139.9	184.9	96.9	137	183.7
3.251	91.2	141.9	188.1	97.4	139.1	186.8
3.501	91.7	143.1	190.5	97.6	140.6	189.13
3.752	92.2	144.3	192.6	97.6	142.6	190.8
4.002	92.7	145.3	194.1	97.6	144.2	191.9
4.252	92.8	146.1	195	97.6	146	192.8
4.5	93	146.8	195.8	97.4	147.7	193.2
4.753	93.1	147.9	196.1	96.8	149.3	193.2
5	93.1	148.3	196.7	96.6	150.6	193.2
5.252	93.1	149.1	197.4	96.44	151.8	193.3
5.501				96.2	152.9	193.1

*Tableau 19 : Résultats des essais de cisaillement avant traitement (sol naturel)*

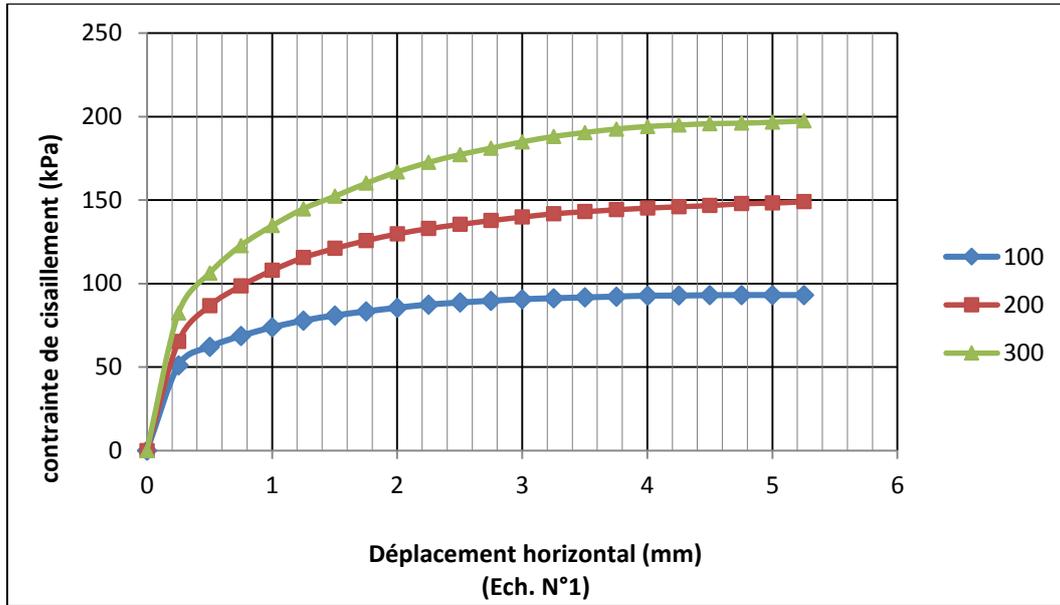


Figure 82 : Courbe contrainte de cisaillement-déplacement avant traitement (Ech. N°1)

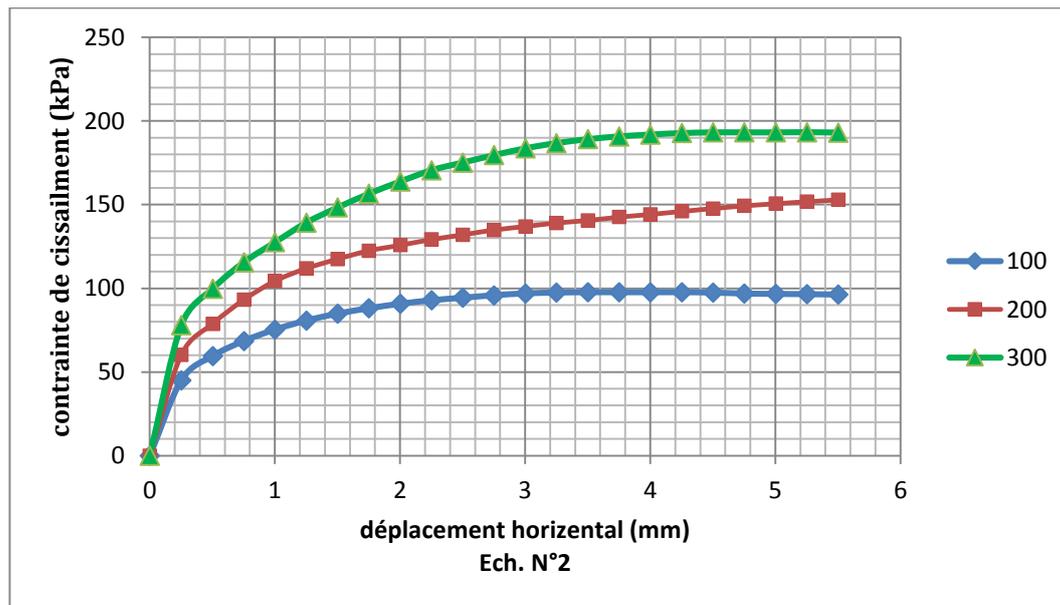


Figure 83 : Courbe contrainte de cisaillement-déplacement avant traitement (Ech. N°2)

## 6.2. Sol traité

### 6.2.1. Traitement Verre + Chaux

Les tableaux et les figures suivantes synthétisent les résultats des essais de cisaillement réalisés sur des échantillons du mélange (Marne+ verre + chaux) avec **5 et 10%** de dosage.

➤ *Sol traité à 5%*

Déplacement Horizontal	ECH1			ECH2		
	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=300$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=300$
0	0	0	0	0	0	0
0.25	67.7	66.9	104.4	77.9	82.8	93.1
0.501	85.5	84.7	139.7	97.7	114.5	121.5
0.751	99.7	97.5	156.9	107.4	135.3	141.3
1.001	111.3	106	174.8	114.6	151.7	158.8
1.252	120.6	116.8	188.7	120.6	164.2	171.72
1.501	126.9	125.4	199.2	125	174.1	181.6
1.754	132.8	132.6	208.4	126	182.2	190.1
2	138.2	139.6	216.9	118.2	189.8	197.4
2.252	142.1	145.7	224.3	109.1	195.5	203.2
2.501	144.5	150.8	230.2	103.4	199.6	208.3
2.753	145.4	156.3	236	99.6	202	213.1
3.001	144.2	161.1	241	95.6	202.2	217.3
3.252	140.8	165.3	245.2	92.8	200.2	220.8
3.503	135.6	169	248.7	91.9	197.3	224.1
3.753	129.6	172	251.6	90.8	193.8	227
4.001	124	174.9	253.6	/	/	229.7
4.251	120	176.8	254.5	/	/	232
4.5	116.2	178.2	254.4	/	/	234.2
4.751	113.4	178.6	253.2	/	/	236.1
5.002	111.3	178.5	250.6	/	/	237.3
5.251	/	/	/	/	/	238.47
5.5	/	/	/	/	/	239.1

**Tableau 20 : Résultats des essais de cisaillement après traitement 5% (Verre + chaux)**

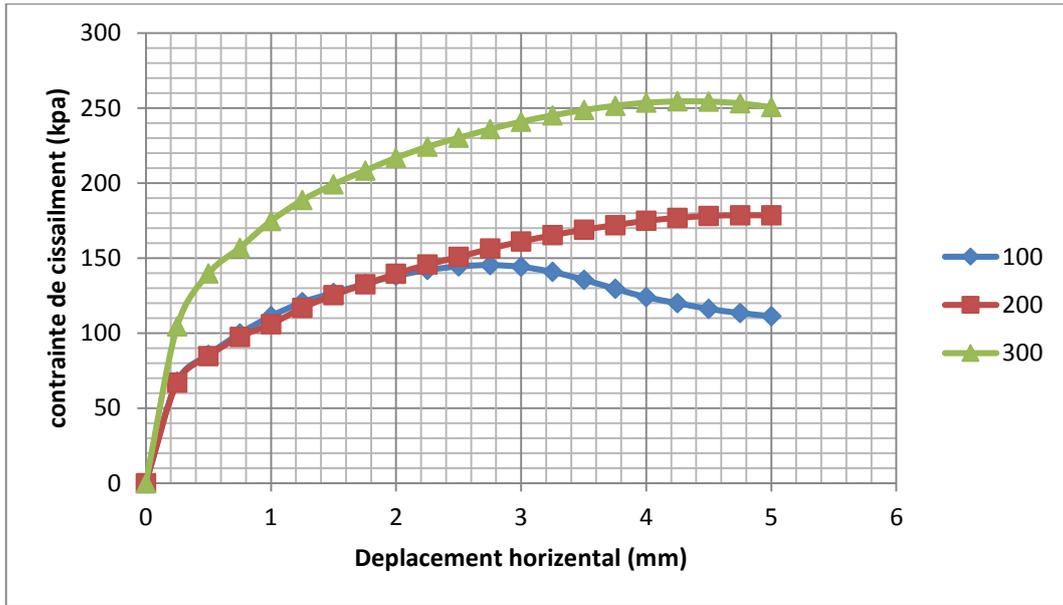


Figure 84 : Courbe contrainte de cisailment-déplacement 5% (verre + chaux) (Ech. N°1)

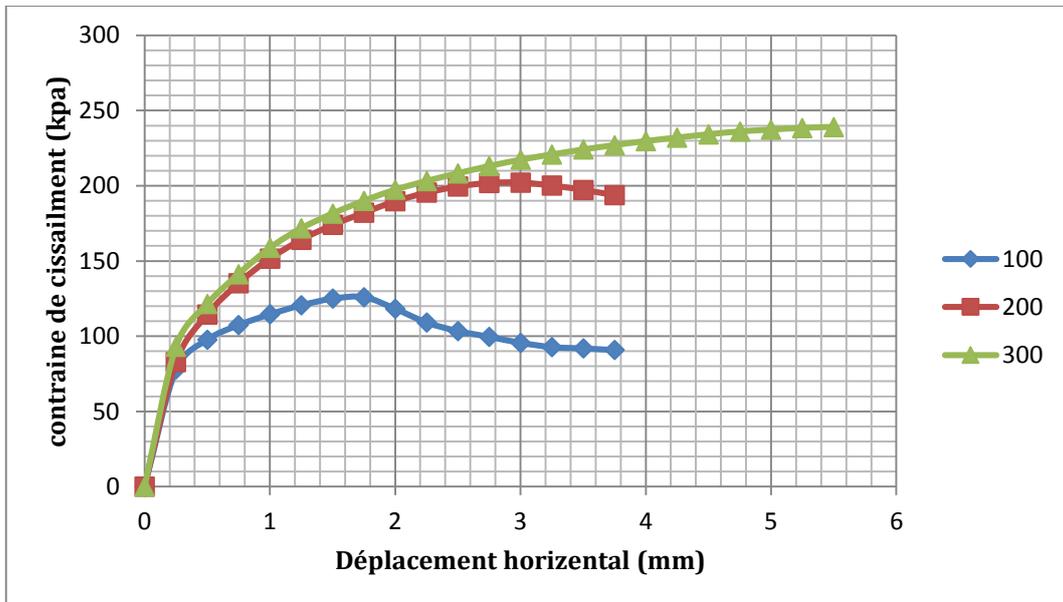


Figure 85 : Courbe contrainte de cisailment-déplacement 5% (verre + chaux) (Ech. N°2)

➤ *Sol traité à 10%*

Déplacement Horizontal	ECH1			ECH2		
	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=100$	$\sigma=200$	$\sigma=100$	$\sigma=200$
0	0	0	0	0	0	0
0.25	69.9	88.2	114.8	53.2	73.1	97.8
0.501	92.7	117.3	151.4	71.6	99.3	133.2
0.751	106.3	135.7	172.6	83.6	114.8	154.6
1.001	117.5	151.4	189.7	92.6	125.9	172.1
1.252	125.9	165.4	204.5	100.6	136.5	188.5
1.501	131.9	175.8	218.2	106.7	145.2	200.6
1.754	136.4	183.8	226.4	111	151.4	210.6
2	140.4	189.8	233.1	114.6	155.5	220.4
2.252	143.3	192.9	238.8	115	159	229.1
2.501	144.9	192.6	243.3	111.2	161.6	235.5
2.753	143.8	189.5	247.2	106	163.6	241.8
3.001	138.2	185.4	249.7	101.1	165.4	247.3
3.252			251		165.8	251.5
3.503			250.3			254.7
3.751						257.1
4						258.8
4.251						259.5
4.5						259.6

*Tableau 21 : Résultats des essais de cisaillement après traitement 10% (Verre + chaux)*

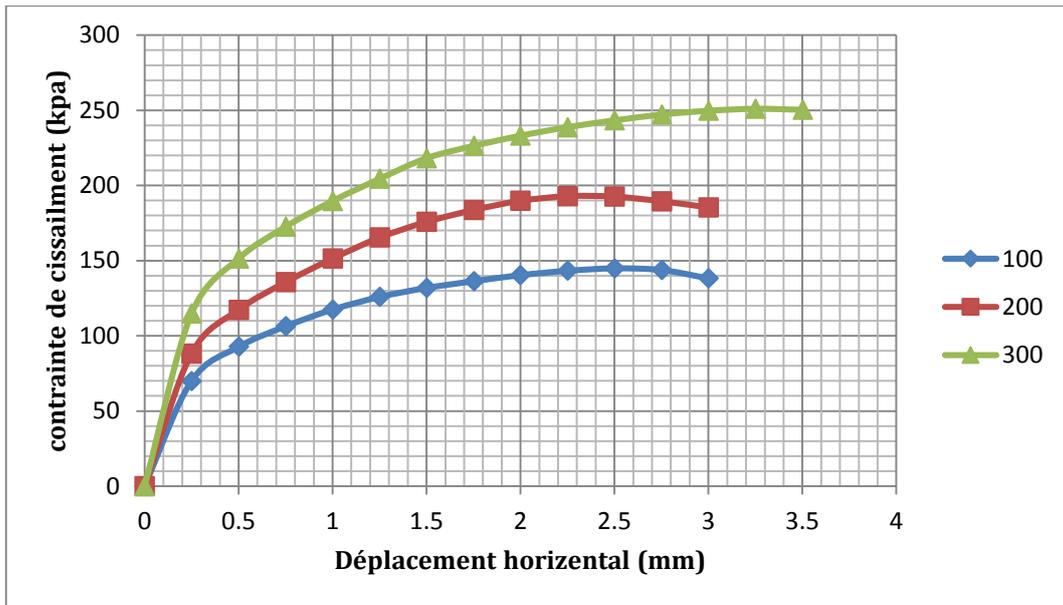


Figure 86 : Courbe contrainte de cisailment-déplacement 10% (verre + chaux) (Ech. N°1)

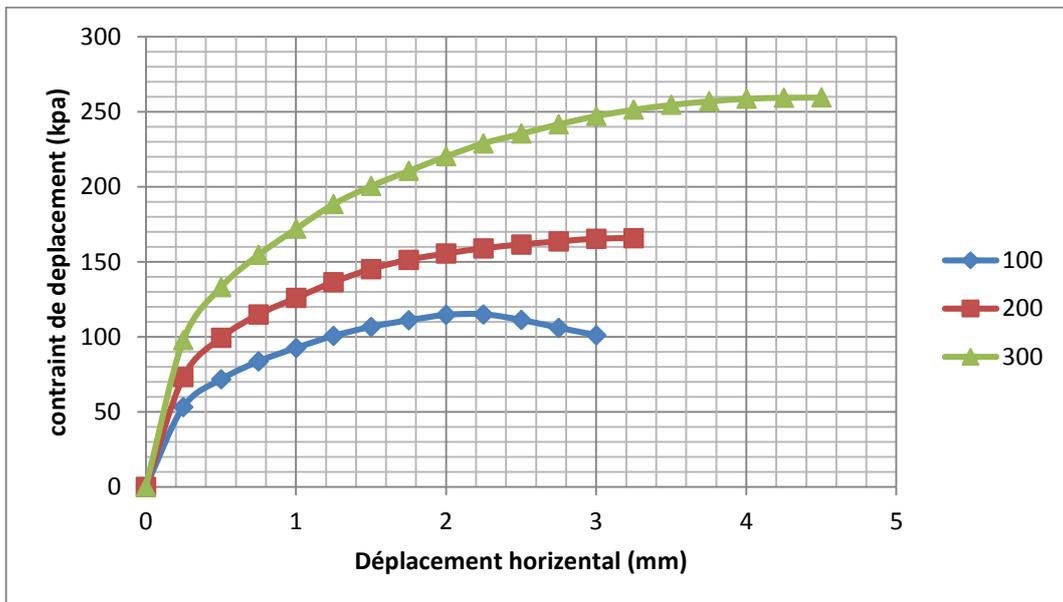


Figure 87 : Courbe contrainte de cisailment-déplacement 10% (verre + chaux) (Ech. N°2)

### 6.2.2. Traitement LHF + Chaux

Les tableaux et les figures suivantes synthétisent les résultats des essais de cisailment réalisés sur des échantillons du mélange (Marne+ LHF + chaux) avec 5 et 10% de dosage.

➤ *Sol traité à 5%*

Déplacement Horizontal (mm)	LHF+CH 5 % ech1			LHF+CH 5 % ech2		
	100	200	300	100	200	300
0	0	0	0	0	0	0
0.252	67.1	71.7	115	56.6	74	109.6
0.5	87.5	98	154.1	73.1	97.5	138
0.751	101.9	116.8	186.6	83.6	113.3	165.3
1.002	111.4	133.8	207.6	92	125.1	182.4
1.251	120.6	147.3	226.5	98.8	133.5	197.1
1.501	126.4	156.9	239.4	104	139.2	206.6
1.75	129.7	165.2	248.7	109.2	144.7	215.3
2.002	128.8	171.2	258.3	112.5	148.8	222.9
2.252	124.4	176.1	265.5	113.8	152	229
2.504	119.9	179.4	271.9	113.4	154.9	233.5
2.751	115.5	181.5	277.3	111.9	157.3	237.2
3.001	112.2	182.1	279	110	159.5	239.9
3.251	109.7	181.6	277.1	108.4	160.9	241.2
3.5				107	162.1	241.4
3.75				105.5	162.9	241.7
4				104.3	164	241.1
4.25				103.2	164.1	240.2
4.5					164.3	
4.75					164.4	

**Tableau 22 : Résultats des essais de cisaillement après traitement 5% (LHF + chaux)**

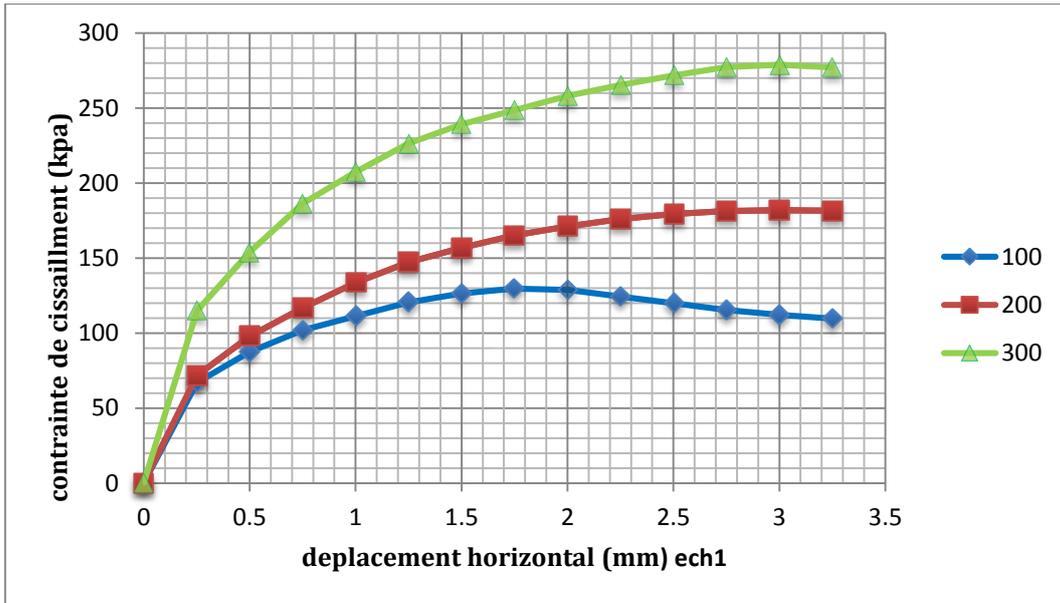


Figure 88 : Courbe contrainte de cisaillement-déplacement 5% (LHF + chaux) (Ech. N°1)

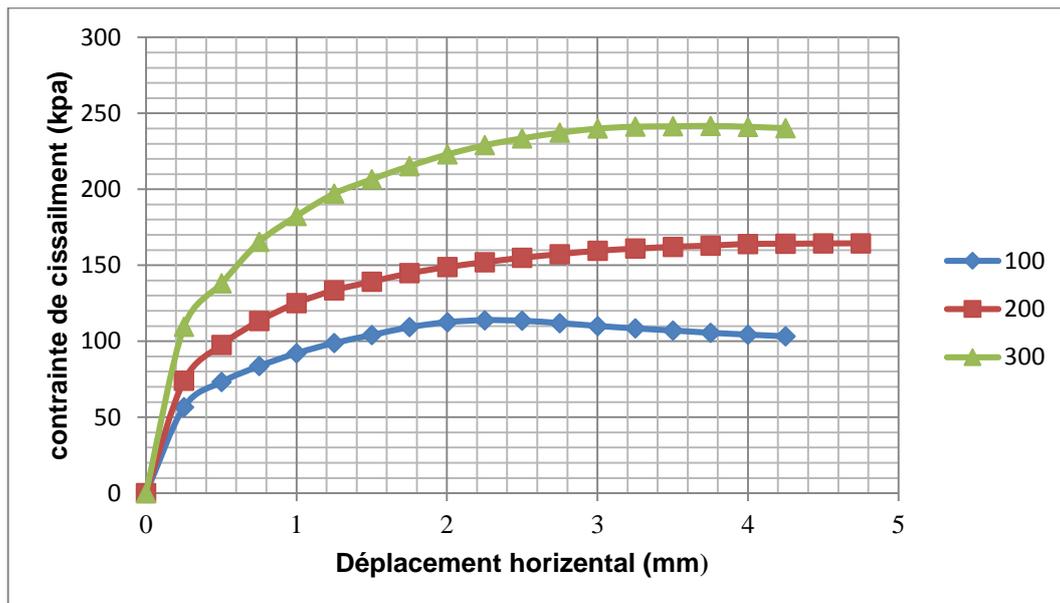


Figure 89 : Courbe contrainte de cisaillement-déplacement 5% (LHF + chaux) (Ech. N°2)

➤ *Sol traité à 10%*

Déplacement Horizontal	LHF+CH 10 %			LHF+CH 10 %		
	100	200	300	100	200	300
0	0	0	0	0	0	0
0.25	56.5	119.4	133.3	79.8	86.6	106.5
0.5	83.1	163	173.2	106.7	116.7	147.5
0.75	104.3	187.9	193.7	122.2	137	171.6
1	121.3	207.6	209.6	134.6	152.4	191.3
1.25	138.9	221.4	223.3	143.7	165.9	207.5
1.5	150.4	230.9	234.4	147.2	175.3	220.4
1.75	160	239.7	242.4	137.9	183.7	230.3
2	169.3	246.5	250.3	124.1	190.9	239.5
2.25	176.1	251.8	256.3	112.2	195.9	247.9
2.5	180.6	254.7	260.1	104.4	199.5	253.8
2.75	183.1	251	261.1		201.5	259.6
3	177.4	240.8	258.6		201.1	263.6
3.25					200.3	266
3.5					199.6	266.4

Tableau 23 : Résultats des essais de cisaillement après traitement 10% (LHF + chaux)

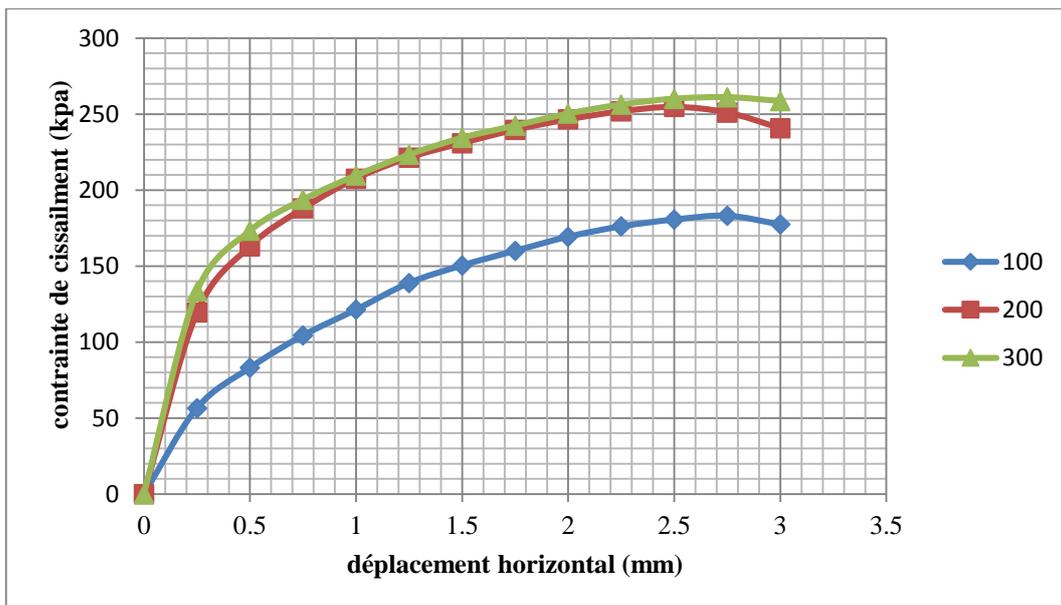


Figure 90 : Courbe contrainte de cisaillement-déplacement 10% (LHF + chaux) (Ech. N°1)

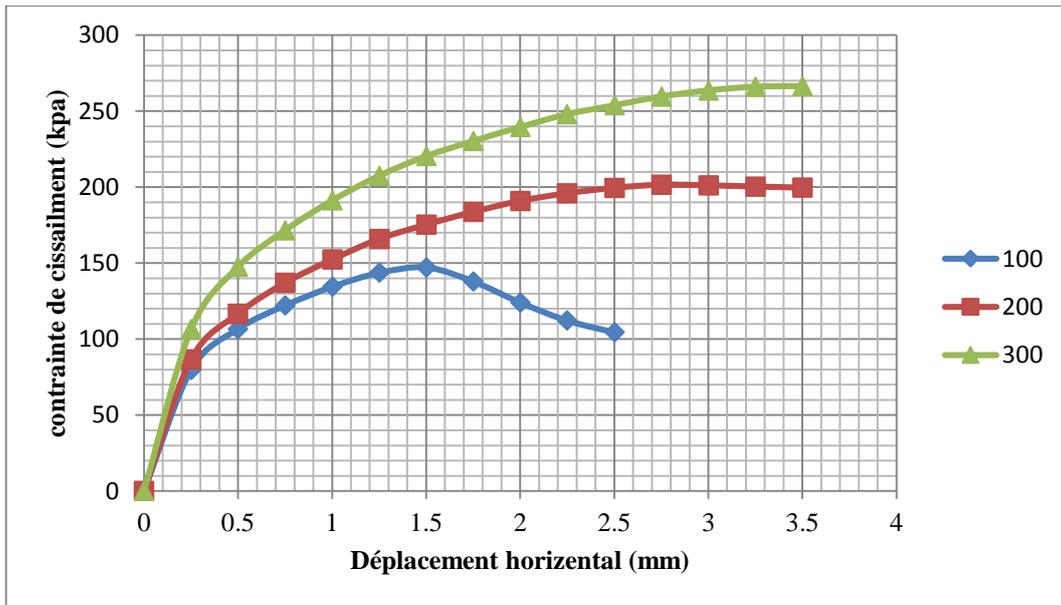


Figure 91 : Courbe contrainte de cisaillement-déplacement 10% (LHF + chaux) (Ech. N°2)

Pour la contrainte de 100 kPa, le sol a montré un comportement dilatant. En revanche, les deux autres courbes montrent un comportement contractant de la marne traitée.

### 6.2.3. Détermination des propriétés de cisaillement

Nous avons synthétisé les contraintes de cisaillement maximales pour l'ensemble des essais dans le tableau suivant. Il faut préciser que nous avons pris la moyenne des deux valeurs obtenus pour chaque mélange.

$\sigma$ (kPa)	100	200	300
Sol naturel	95.4	151.4	195.47
V5	135.7	190.4	246.85
V10	129.9	179.3	255.3
Lhf5	121.8	173.3	260.4
Lhf10	165.2	228.1	263.7

Tableau 24 : Résistances au cisaillement maximales ( $\tau_{max}$ ) avant et après traitement

Par la suite, nous avons tracé les courbes des contraintes de cisaillement maximales en fonction des trois contraintes normales (100, 200, 300 kPa). Les courbes sont fournies ci-dessous.

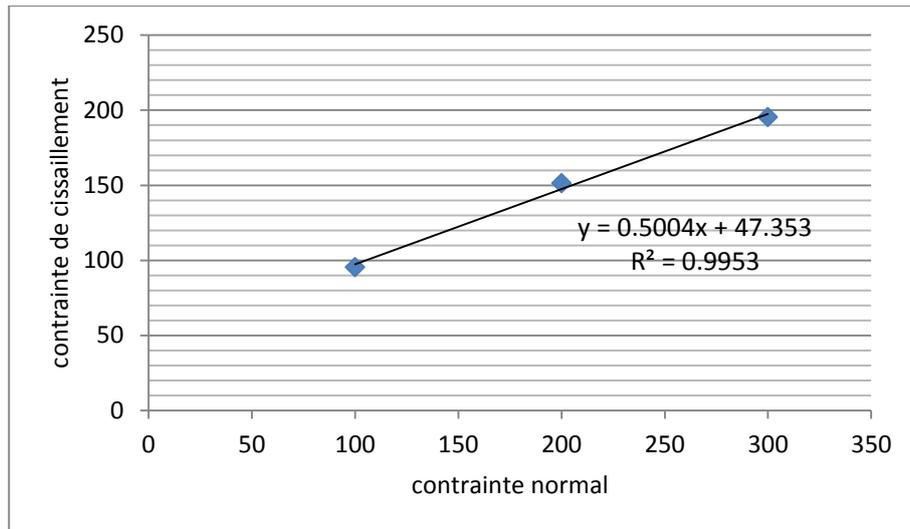


Figure 92 : Courbe contrainte de cisaillement - contrainte normal de la marne naturelle

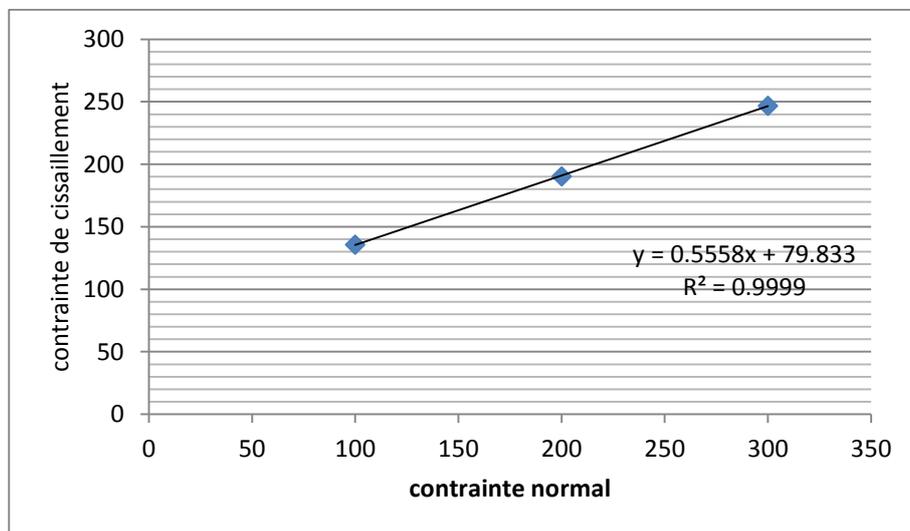


Figure 93 : Courbe contrainte de cisaillement - contrainte normal Verre+Chaux à 5%

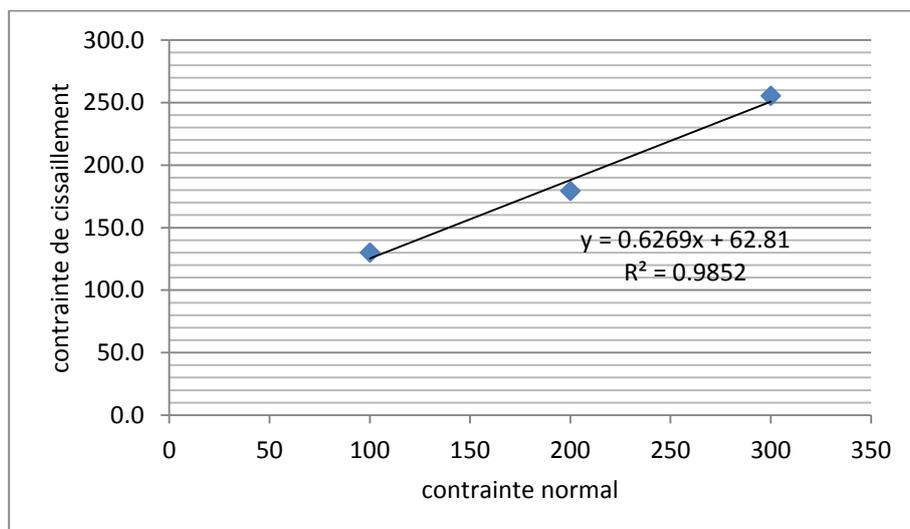


Figure 94 : Courbe contrainte de cisaillement - contrainte normal Verre+Chaux à 10%

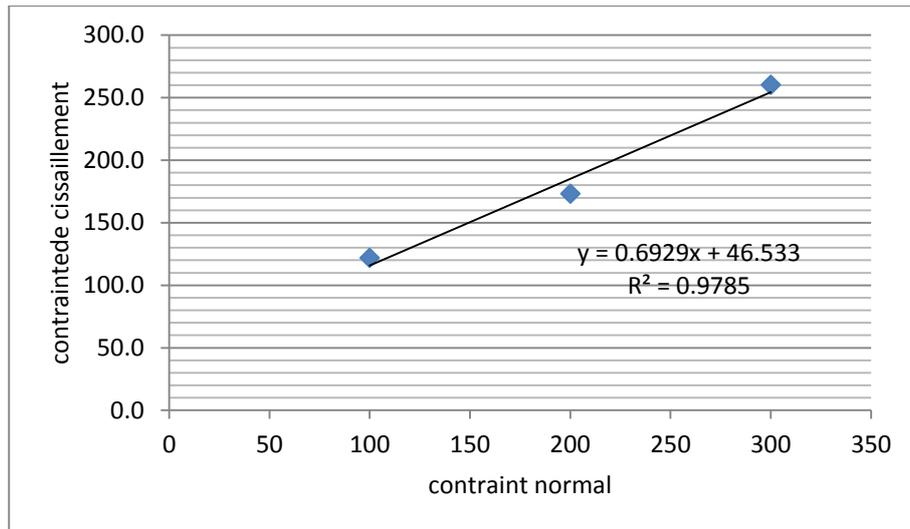


Figure 95 : Courbe contrainte de cisaillement - contrainte normal LHF+Chaux à 5%

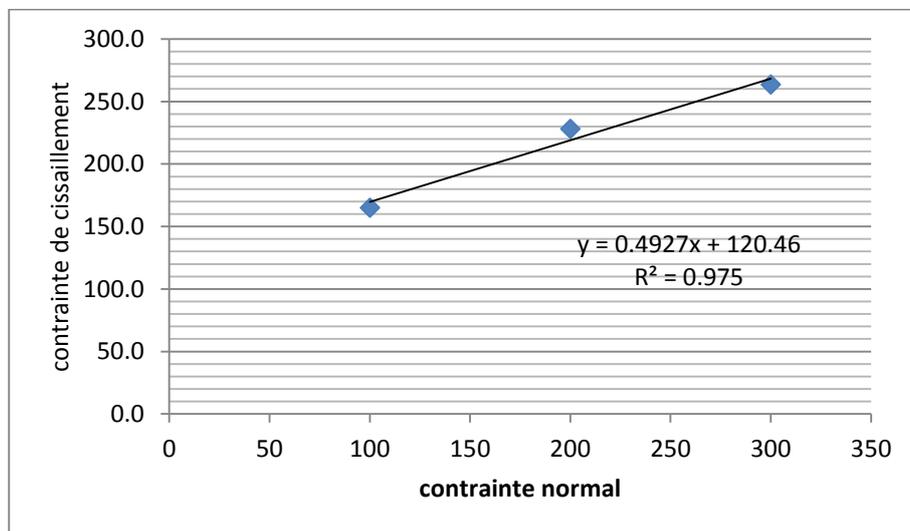


Figure 96 : Courbe contrainte de cisaillement - contrainte normal LHF+Chaux à 10%

Le tableau 25 donne les valeurs finales déterminées des angles de frottement et les cohésions.

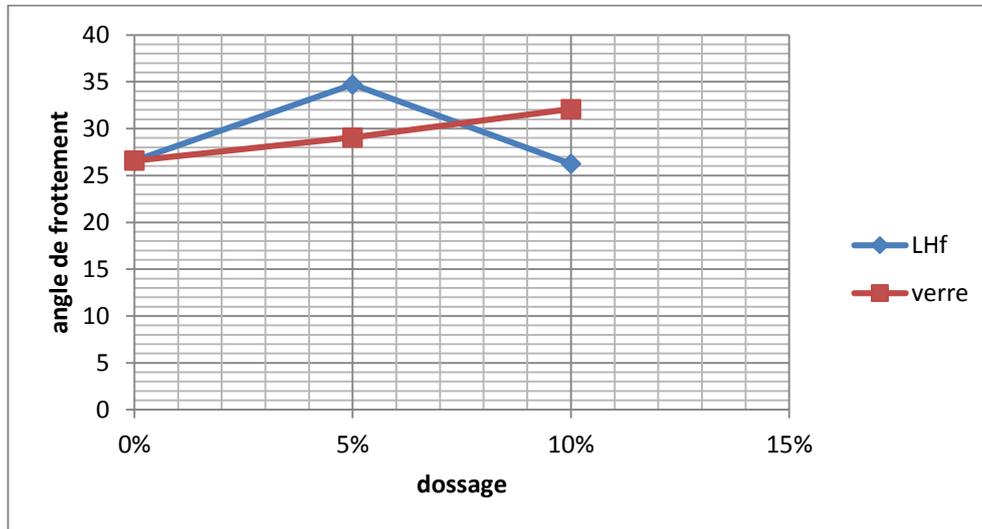
	$\Phi$	C (kPa)
sol naturel	26.6°	47.4
LHF+Chaux 5%	34.7°	46.5
LHF+Chaux 10%	26.2°	120.5
Verre+Chaux 5%	29.1°	79.8
Verre+Chaux 10%	32.1°	62.8

Tableau 25 : Valeurs des angles de frottement interne et cohésion (avant et après traitement)

## 7. ANALYSE & DISCUSSIONS

Pour une meilleure compréhension et lecture des résultats, nous avons choisi de présenter les valeurs sous forme de courbes et d'histogrammes.

### 7.1. L'effet des ajouts sur l'angle de frottement

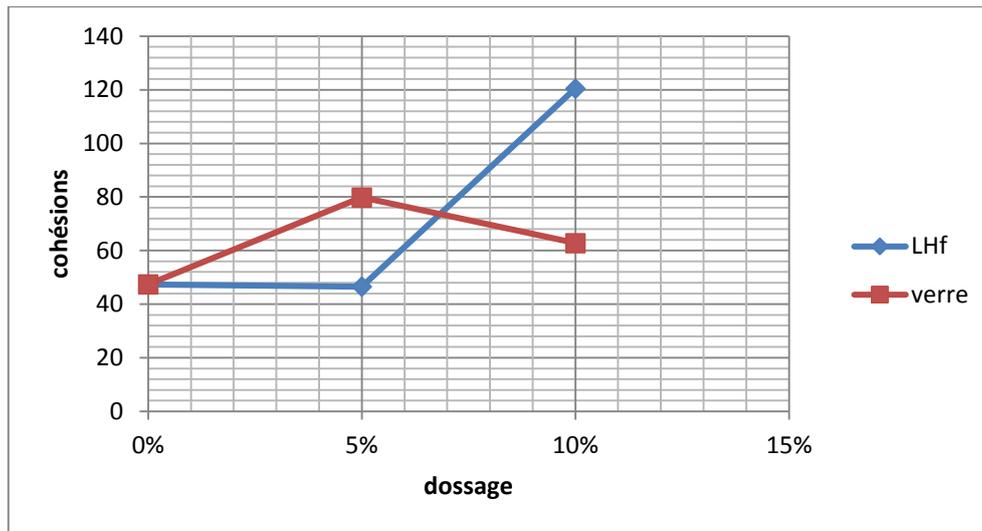


*Figure 97 : Evolution de l'angle de frottement en fonction du dosage*

Pour le traitement verre+chaux, l'angle de frottement suit une tendance croissante en fonction de l'augmentation du dosage. En revanche, il y a une augmentation à 5% puis une diminution à 10% de  $\phi$  pour le traitement LHF+chaux. Cela peut être expliqué par l'effet inverse du surdosage en laitier de haut fourneau (LHF) sur la prise et le durcissement du mélange avec le sol.

En comparant les deux types de traitement (verre et LHF), on voit que le traitement LHF+chaux à 5% de dosage a donné la valeur maximale de  $34,7^\circ$ . Cette valeur dépasse la valeur obtenue pour le traitement verre+chaux d'environ **19%**. Cet écart est inversé à 10% au profit du traitement verre+chaux pour atteindre la valeur d'environ **22,5%**.

## 7.2. L'effet des ajouts sur la cohésion



*Figure 98 : Evolution de la cohésion en fonction du dosage*

Pour le mélange verre+chaux, la cohésion augmente jusqu'à la valeur maximale 79,8kPa pour le dosage 5% puis elle diminue jusqu'à la valeur de 62,8kPa pour le dosage 10%.

Par contre pour le mélange LHF+chaux, la cohésion reste quasi-stable à 5% puis elle augmente jusqu'à la valeur maximale de 120,5kPa pour le dosage 10%. L'augmentation est due, à priori, à la réaction pouzzolanique du laitier qui a été activé avec la chaux ce qui augmente la liaison entre les particules de sol et augmenter en conséquence sa cohésion.

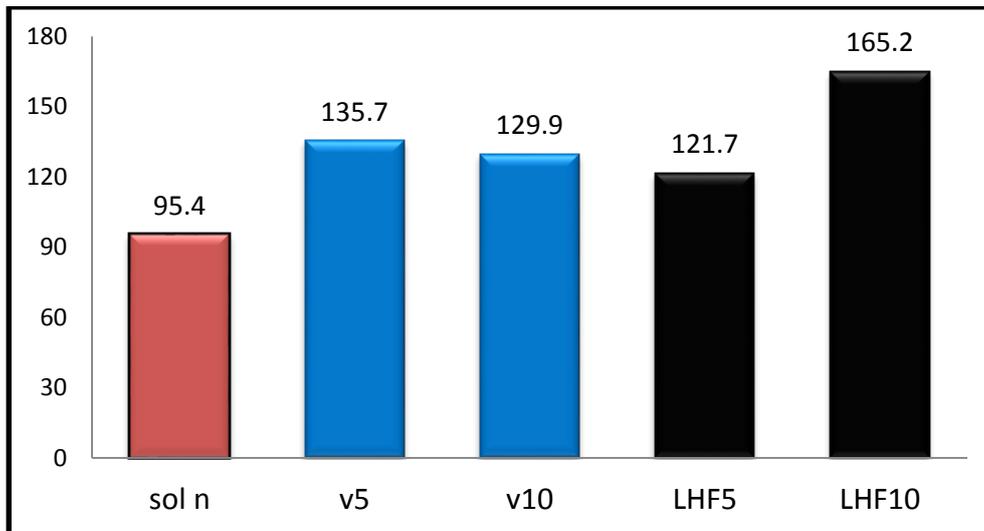
A partir de la figure précédent, la comparaison entre les deux produits de traitement pour de dosage de 5% montre qu'il y a un écart important de **71.6 %** entre la cohésion obtenue par traitement au LHF comparativement à celle obtenue par traitement à la poudre de verre.

D'autre part et pour le dosage de 10%, l'activation du laitier avec la chaux a donné des valeurs plus élevées qu'avec l'addition du verre activé par la chaux. On remarque qu'il y'a un écart de **92%** entre le verre et le laitier donc l'amélioration par le LHF est mieux pour ce dosage.

## 7.3. L'effet des ajouts sur la résistance au cisaillement maximale

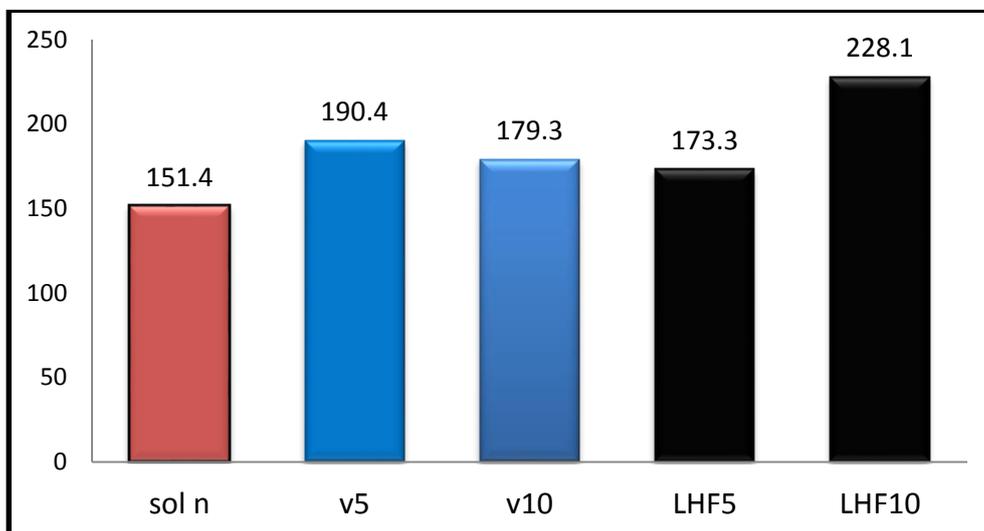
Tout d'abord, pour une contrainte normal ( $\sigma=100$  kPa), il y a un écart d'environ **11%** entre le verre et le laitier dans la résistance au cisaillement pour le dosage **5%** pour lequel l'ajout de laitier présente des valeurs plus faibles par rapport au verre. Par

contre pour le dosage **10%**, on constate que les valeurs du laitier sont plus élevées par rapport au verre avec un écart d'environ **27%**.



*Figure 99 : Résistances au cisaillement maximales avant et après traitement ( $\sigma=100$ )*

Ensuite, pour la contrainte normale ( $\sigma=200$  kPa) et pour dosage de **5%**, on a noté que la valeur de la résistance au cisaillement de verre est plus élevée par rapport à celle du laitier où l'écarte est d'environ 10% entre les deux produits. Pour le dosage de **10%**, les résultats montrent que l'amélioration due à l'ajout de LHF est meilleure avec un écart d'environ **27%**.



*Figure 100 : Résistances au cisaillement maximales avant et après traitement ( $\sigma=200$ )*

Finalement, pour une contrainte normal ( $\sigma=300$  kPa) on remarque que les valeurs de la résistance après le traitement sont très proche pour les différentes dosages et cela

pour les deux produits des traitements. Seulement celle la valeur de laitier semble être plus élevée que la valeur de verre.

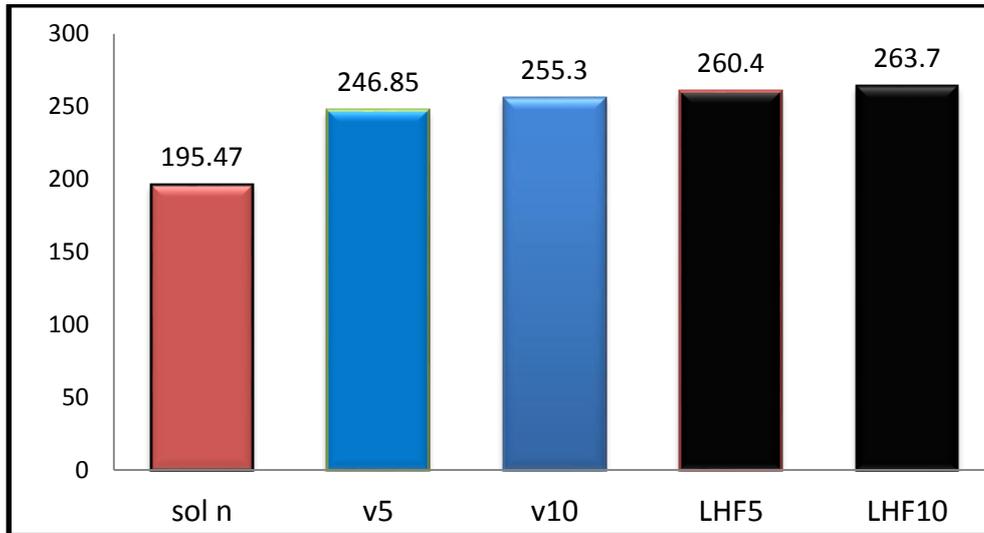


Figure 101 : Résistances au cisaillement maximales avant et après traitement ( $\sigma=300$ )

A partir des résultats présentés et illustrés par les histogrammes nous pouvons dire qu'il y a une tendance à l'augmentation de la résistance de cisaillement pour les trois contraintes appliquées dans le traitement pour **le laitier**. On remarque aussi une augmentation de la résistance en fonction de l'augmentation du dosage de 0% à 10%. Les résultats montrent également l'effet positif de l'augmentation du dosage sur la résistance du cisaillement.

On observe pour les différentes contraintes appliquées une augmentation des résistances au cisaillement maximales après le traitement par **le verre** en fonction de l'augmentation du dosage jusqu'à 5% et puis une diminution pour les contraintes normales  $\sigma=100\text{kPa}$  et  $\sigma=200\text{kPa}$  et une augmentation pour la contrainte  $\sigma=300\text{kPa}$  pour le dosage de 10%.

## 8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des essais réalisés au laboratoire afin d'évaluer l'efficacité de l'ajout des produits de traitement sur les propriétés mécaniques de cisaillement de la marne traitée.

Les résultats ont montré que l'ajout des produits de traitement au sol conduit à une amélioration des caractéristiques mécaniques du sol, c'est-à-dire la cohésion, l'angle de frottement et la résistance au cisaillement au moment de rupture. Cette amélioration est due à la réaction pouzzolanique des produits de traitement qui est en relation direct avec leur quantité (dosage) dans la marne.

# CHAPITRE V :

## Etude numérique

---

## CHAPITRE V : ETUDE NUMERIQUE

---

### 1. INTRODUCTION

Après l'étude de l'effet des produits de traitement sur les propriétés mécaniques de la marne, nous avons fait une étude numérique par le logiciel PLAXIS 8.2 sur la stabilité d'un grand remblai (hauteur > 15m). Ce dernier est construit par notre marne naturelle et traitée. Il sera question de montrer l'effet des différents paramètres sur la stabilité de ce grand remblai. Enfin, l'étude numérique est consacrée à l'étude du couplage entre la technique de clouage et le traitement de sol pour la stabilité du grand remblai.

### 2. OBJECTIF

Les grands remblais permettent de replacer les ouvrages d'art tel que les ponts sur des sections de tronçons routiers ou ferroviaires. Le recours à cette solution est pour des raisons purement économiques car elle permet de réduire les coûts du projet. Cependant, la conception et la réalisation des grands remblais doivent être faites selon les règles de l'art avec un contrôle au cours des travaux et après la mise en service de l'ouvrage. Les matériaux utilisés ont aussi une place importante dans l'étude et l'exécution des grands remblais. Dans ce contexte, le but de ce travail est d'étudier, par modélisation numérique en calcul à l'équilibre limite (coefficient de sécurité  $F_s$ ), un grand remblai marneux traité et non traité avec ou sans renforcement (clouage). Pour ce faire, un talus est modélisé grâce aux logiciels Plaxis.

### 3. LE LOGICIEL PLAXIS 8.2

PLAXIS 8.2 est un programme informatique à éléments finis bidimensionnel à usage spécial. Il est utilisé pour effectuer des analyses de déformation et de stabilité pour de nombreux types d'ouvrages géotechniques. Des situations réelles peuvent être modélisées soit par une déformation plane, soit par un modèle axisymétrique.

L'interface d'utilisateur se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves) qui sont exécutés pour être utilisés successivement dans une modélisation géotechnique. Ces sous-programmes peuvent être traités un par un, formant une méthodologie logique.

Le comportement du sol est représenté par une loi qui l'assimile à un milieu continu. Cette loi souvent appelée «loi de comportement » décrit la relation entre les contraintes et les déformations provoquées par ces contraintes. Elle traduit, lorsqu'on

passer d'un matériau à un autre, les différences de comportement constatées expérimentalement sous l'effet d'actions extérieures de comportement d'un sol.

PLAXIS 8.2 propose différents modèles, qui permettent de simuler le comportement de sol :

- Modèle élastique linéaire
- Modèle de Mohr-Coulomb
- Modèle pour les roches fracturées (Jointed Rock Model)
- Modèle de sol avec écoulement (Hardening Soil Model)
- Modèle pour les sols mous (Soft Soil Model)
- Modèle pour les sols mous avec fluage (Soft Soil Creep Model)

Toutes les modélisations réalisées dans ce qui suit supposent qu'on travaille en comportement élasto-plastique, répondant au modèle à critère de rupture de Mohr-Coulomb, qui est le modèle le plus couramment utilisé en mécanique des sols.

#### 4. DEFINITION DES DONNES

Pour que le logiciel PLAXIS puisse faire les calculs correctement et complètement, on doit lui saisir toutes les données suivantes :

##### 4.1. Modèle de la modélisation (Mohr-Coulomb)

Le comportement de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écoulement. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs. Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan\phi + c$$

Où  $\sigma_n$  et  $\tau$  sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement.  $c$  et  $\phi$  sont respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (figure 102).

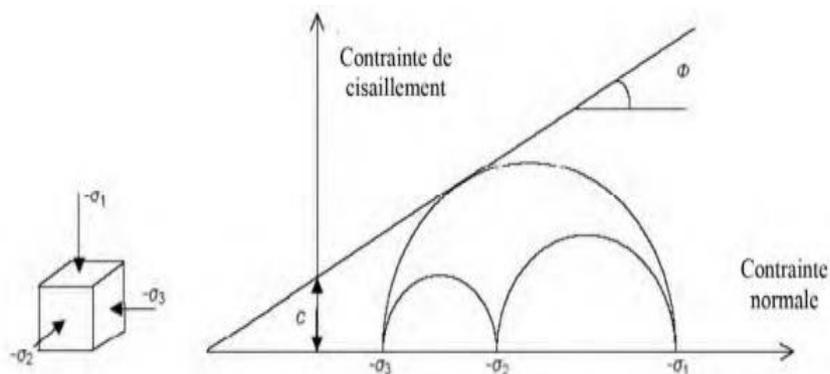


Figure 102 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb

Le critère de Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice (figure 103) sur l'hexagone irrégulier de Mohr-Coulomb.

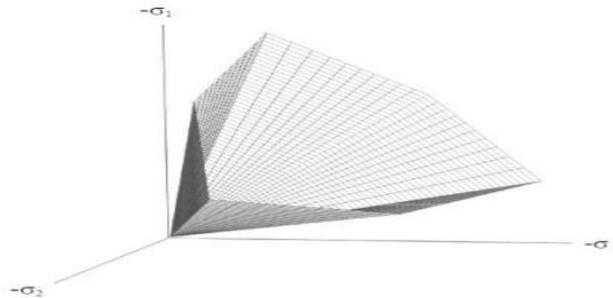


Figure 103 : Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour  $c=0$

## 4.2. Paramètres de la modélisation

Le modèle Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres. Les deux premiers sont  $E$  et  $\mu$  (paramètres d'élasticité), les deux autres sont  $c$  et  $\varphi$ . Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoire, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.

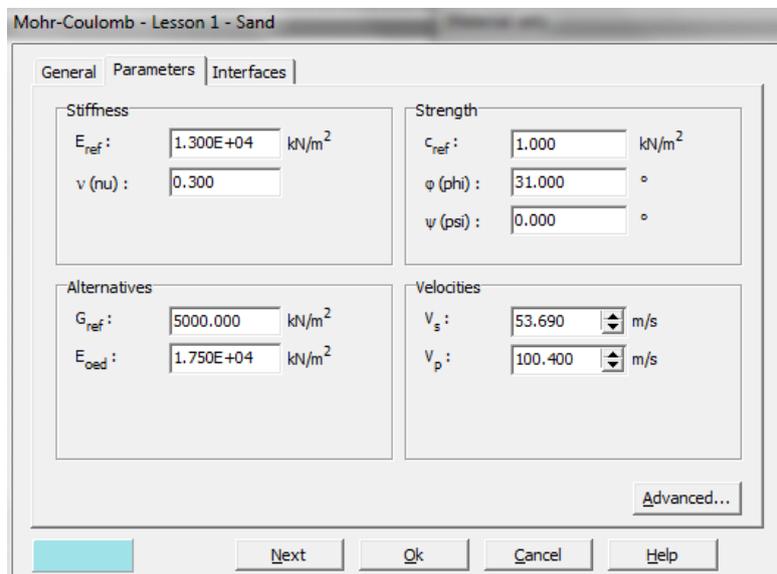


Figure 104 : Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb

### 4.2.1. Module d'Young

Le choix d'un module de déformation est l'un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en

fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il paraît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au  $G_{\max}$  mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux.

#### 4.2.2. Coefficient de poisson

On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de Poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure  $K_0$  ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de poisson s'approche de 0,5 sans que cette valeur soit utilisable.

#### 4.2.3. Angle de frottement

Les angles de frottement ( $\varphi$ ) à introduire sont les angles qui sont déterminées dans le chapitre précédent.

#### 4.2.4. Cohésion

De même pour les cohésions, on utilise les résultats obtenus dans le chapitre précédent.

#### 4.2.5. Angle de dilatance

L'angle de dilatance noté  $\psi$  est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\psi = \varphi - 30^\circ \text{ pour } \varphi > 30^\circ.$$

$$\psi = 0^\circ \text{ pour } \varphi < 30^\circ.$$

Le cas où  $\psi < 0^\circ$  correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique). La valeur  $\psi = 0^\circ$  correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes.

#### 4.2.6. Coefficient de pression

Jacky (1944) a proposé une formulation de  $K_0$  pour les sables et argiles normalement consolidés, en fonction de l'angle de frottement. La formule simplifiée de Jacky s'écrit :

$$K_0 = 1 - \sin\varphi$$

Puisque le coefficient de poisson varie entre 0 et 0,5,  $K_0$  varie entre 0 et 1.

Matériaux Paramètres	sol naturel	Ch+Lhf 5%	Ch +Lhf 10%	Ch+verre 5%	Ch+verre 10%
Module d'Young E (kN/m)	2000				
Coefficient de poisson ( $\nu$ )	0.35				
Angle de frottement $\varphi$ °	26.6	34.7	26.2	29.1	32.1
Cohésion C (kPa)	47.4	46.5	120.46	79.83	62.81
Angle de dilatance $\psi$	0	4.7	0	0	2.1
Coefficient de pression $K_0$	0.55	0.43	0.56	0.51	0.46
Chargement vertical (kN/m <sup>2</sup> )	-1500				

Tableau 26 : Paramètres de la modélisation

## 5. MODELISATION NUMERIQUE DU GRAND REMBLAI

### 5.1. Caractéristiques géométriques

Le remblai est symétrique, donc il est modélisé par un modèle géométrique plan (2D). On test trois hauteurs différentes 20m, 25m et 30m et deux pentes des talus du remblai 45°, 60°. Une seule couche est considérée pour la marne naturelle et traitée.

### 5.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont prises en compte en bloquant les déplacements horizontaux et verticaux du modèle en utilisant l'option par défaut (Standard Fixistes).

En sélectionnant cette option, PLAXIS impose automatiquement un réglage standard des conditions aux limites générales du modèle géométrique. Ces conditions aux limites sont générées suivant les règles suivantes :

- la limite horizontale inférieure comporte des blocages horizontaux et verticaux ( $u_x = u_y = 0$ ).
- la limite verticale comporte seulement des blocages horizontaux ( $u_x = 0$ ).

### 5.3. Génération du maillage

Le maillage utilisé dans les calculs représente la moitié du remblai car le problème est symétrique.

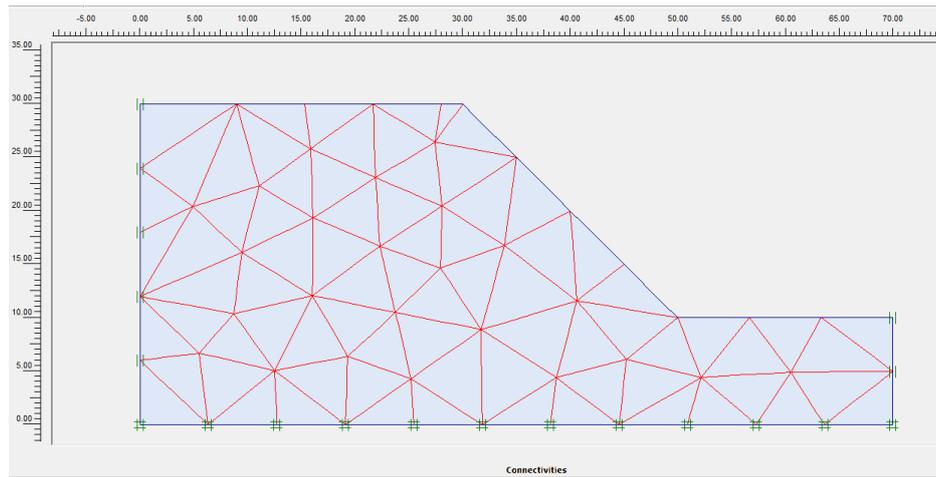


Figure 105 : Maillage du remblai (élément triangulaire à 15 nœuds)

## 5.4. Procédure de calcul

Le calcul du modèle de référence se fait en quatre phases :

**Phase 0** : Initiale des contraintes (procédure  $K_0$ ), on détermine les contraintes effectives initiales.

**Phase 1** : Application de la gravité.

**Phase 2** : Activation de la charge.

**Phase 3** : Calcul du coefficient de sécurité dans les conditions initiales.

## 6. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 6.1. Coefficients de sécurité

Seuls l'allure du champ des incréments de déplacements est significative dans un calcul  $\phi - C$ . Celle-ci fournit une indication du mécanisme de rupture qui serait obtenu par un calcul traditionnel de type équilibre limite pour des surfaces de rupture circulaires.

Le coefficient de sécurité est obtenu en examinant la valeur finale du facteur  $\sum M_{sf}$  après sélection de la phase de calcul appropriée (module Calculation, Multipliers, Reached valus ou bien dans le module Output, view, Calculation Info.)

Le coefficient de sécurité calculé par :

$$F_s = \frac{\text{résistance disponible}}{\text{résistancé à la rupture}}$$

En condition normale, le facteur de sécurité minimal  $F_s$  adopté est assez rarement inférieur à 1,5. Ça signifie :  $\sum M_{sf} > 1.5$ , donc le remblai est jugé stable.

Un résumé des résultats, en fonction des différentes hauteurs du remblai et pentes du talus, est reporté dans les tableaux suivants.

➤ **Pour la hauteur 20 m**

Pentes	Sol naturel	Ch + Lhf 5%	Ch +Lhf 10%	Ch + verre 5%	Ch+verre 10%
45°	1.78	2.06	3.17	2.58	2.31
60°	<b>1.44</b>	1.67	2.64	2.28	1.87

*Tableau 27 : Résultats de facteur de sécurité pour la hauteur 20 m*

➤ **Pour la hauteur 25 m**

Pentes	Sol naturel	Ch + Lhf 5%	Ch +Lhf 10%	Ch + verre 5%	Ch+verre 10%
45°	1.59	1.86	2.71	2.19	2.05
60°	<b>1.23</b>	<b>1.41</b>	2.17	1.95	1.54

*Tableau 28 : Résultats de facteur de sécurité pour la hauteur 25 m*

➤ **Pour la hauteur 30 m**

Pentes	Sol naturel	Ch + Lhf 5%	Ch +Lhf 10%	Ch + verre 5%	Ch+verre 10%
45°	<b>1.44</b>	1.75	2.40	1.99	1.87
60°	<b>1.13</b>	<b>1.34</b>	1.95	1.58	<b>1.46</b>

*Tableau 29 : Résultats de facteur de sécurité pour la hauteur 30 m*

On remarque que la stabilité du talus du remblai est critique pour les valeurs mentionnées en gras car le  $F_s < 1,5$ . Par contre, pour les autres valeurs le talus est stable  $F_s > 1,5$ .

## 6.2. Analyse et discussions

Six configurations géométriques ont été adoptées pour l'évaluation de l'effet du traitement sur le comportement global de remblai. Elles supposent un comportement

en état de déformations planes permettant le recours à des moyens de calcul numérique bidimensionnel.

Les figures suivantes montrent une comparaison entre les six configurations de remblai en fonction de la hauteur et la pente.

### 6.2.1. L'effet de traitement sur la marne

#### a) Pour la hauteur 20 m

A partir de la figure 106, la valeur de facteur de sécurité de sol naturel pour l'angle  $60^\circ$  est la plus faible par rapport aux autres cas (**1,44**). Elle est inférieure à **1,5** et donc le talus n'est pas stable dans ce cas.

Le facteur de sécurité suit une tendance croissante en fonction de l'augmentation du dosage en LHF et sa valeur maximale de **3,17** a été obtenue pour le dosage 10%. En revanche pour le traitement en verre on remarque que Fs augmente pour le dosage de 5% puis il diminue pour le dosage 10% (l'effet inverse).

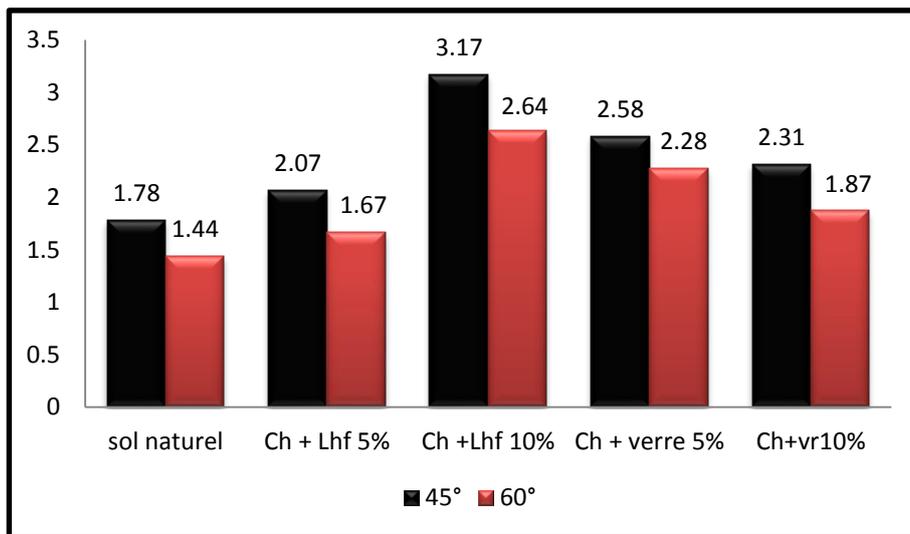


Figure 106 : facteurs de sécurité en fonction de la pente avant et après traitement (H=20m)

#### b) Pour la hauteur 25 m

Les mêmes remarques précédentes sont valables pour la hauteur **25m**, où la valeur maximale égale de **2.71** a été obtenue pour le LHF pour le dosage 10% et la pente  $45^\circ$ . La valeur la plus faible est obtenue pour le sol naturel **1,21**. Aussi la valeur de LHF pour le dosage 5% est inférieure à la valeur limite (1,5) et donc le talus est instable pour la pente de  $60^\circ$ .

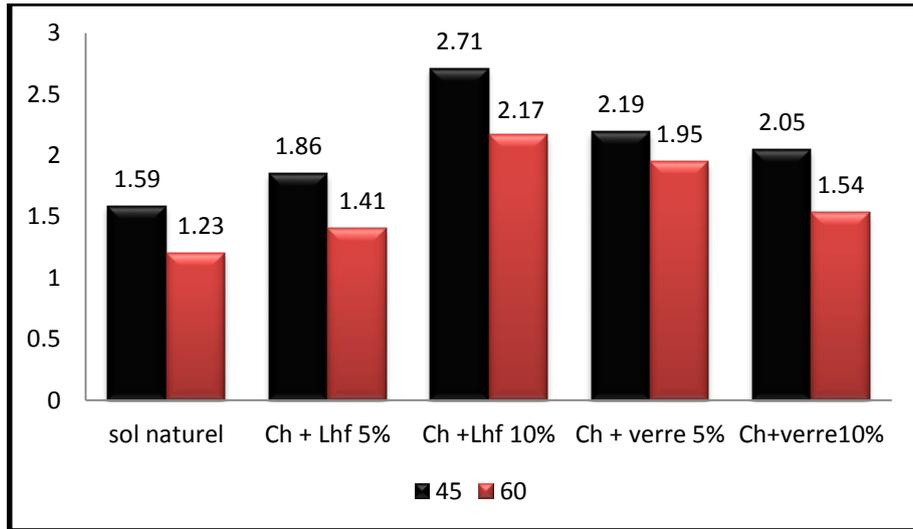


Figure 107 : facteurs de sécurité en fonction de la pente avant et après traitement (H=25m)

**c) Pour la hauteur 30 m**

Pour cette hauteur, les valeurs de Fs diminuent encore plus comparativement aux deux premières hauteurs. Nous avons quatre valeurs inférieures à 1.5 donc le remblai n'est pas stable. La hauteur joue un rôle important dans la stabilité des sols.

Pour les pentes 60° et 45°, les tendances des dégradations de Fs sont presque similaires. On remarque que le coefficient de sécurité Fs diminue en fonction de l'augmentation de la pente ce qui est normal car l'augmentation de la pente contribue au facteur de sécurité.

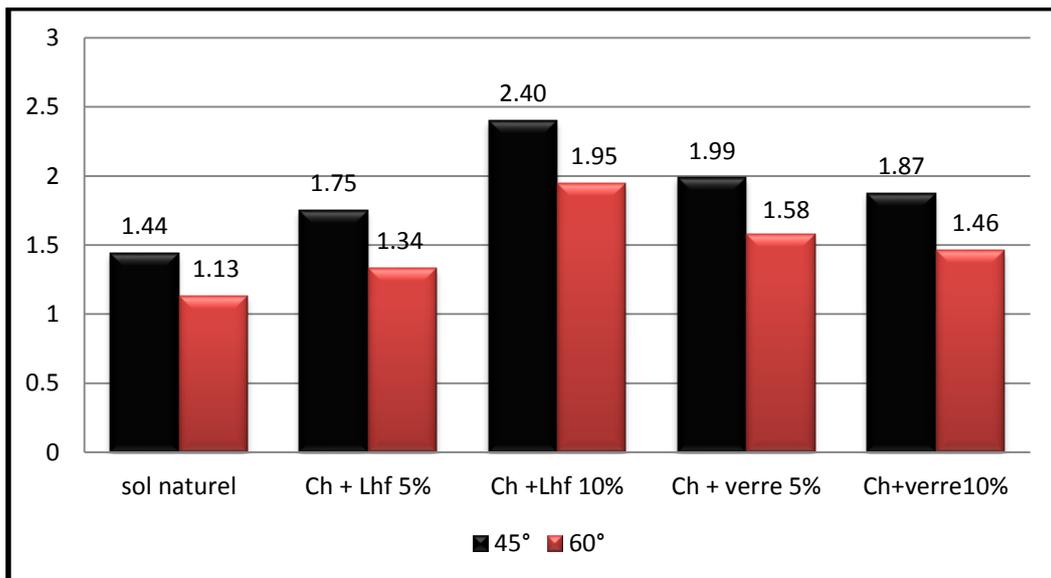


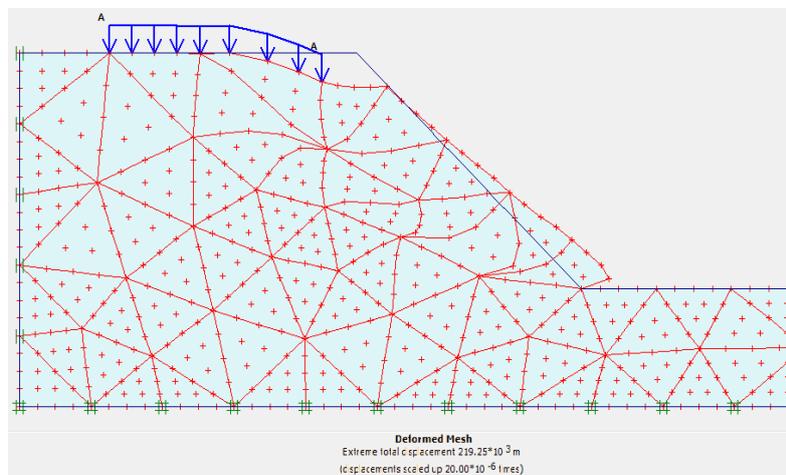
Figure 108 : facteurs de sécurité en fonction de la pente avant et après traitement (H=30m)

On peut conclure que le traitement améliore la stabilité du remblai en particulier pour le LHF. Nous observons que le coefficient de sécurité de la marne traitée par le LHF est le plus élevé (augmentation du coefficient de sécurité pour les deux pourcentages).

Lorsqu'on augmente les dosages en poudre de verre de 5% à 10%, une diminution de facteur de sécurité du remblai se produit pour toutes les pentes et les hauteurs. Cela est dû probablement à la diminution de la cohésion dans le dosage 10%. La diminution de la cohésion entraîne une diminution de la force de liaison entre les particules de sol et cela affaiblit la résistance au glissement de terrain.

### 6.2.1. La déformation de maillage

Un exemple de la déformation de maillage est représenté sur la figure suivante.



*Figure 109 : Représentation du maillage déformé après la construction du remblai de sol naturel (45°/20m).*

## 7. RENFORCEMENT DES REMBLAIS INSTABLES PAR LA TECHNIQUE DE CLOUAGE

Les résultats de facteur de sécurité de sol non traité et sol traité obtenus précédemment ont montré qu'il y a des talus de remblais instables. Pour cela on a utilisé la technique de clouage pour renforcer ces talus afin de les rendre stables.

### 7.1. Hypothèses générales données

- Les déformations sont considérées planes.
- L'influence de la construction des ouvrages est négligeable (la masse volumique des ouvrages est différente de celle du sol).
- Les ouvrages sont modélisés comme des poutres ou des éléments continus.
- Définition d'une interface entre les ouvrages et le sol.

### 7.1.1. Surface de rupture

Les méthodes de calcul de stabilité des terrains sont basées sur la constatation suivante : lorsqu'il y a glissement de terrain, il y a séparation d'une masse du sol du reste du massif et son glissement se fait suivant une surface de rupture. Ayant défini une surface de rupture « S », on étudie la stabilité de la masse (1) mobile par rapport au massif (2) qui est fixe (Figure 110).

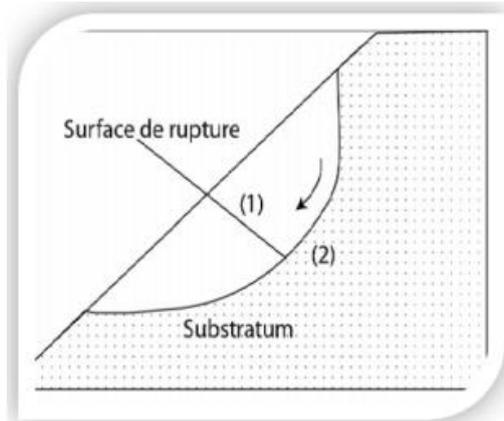
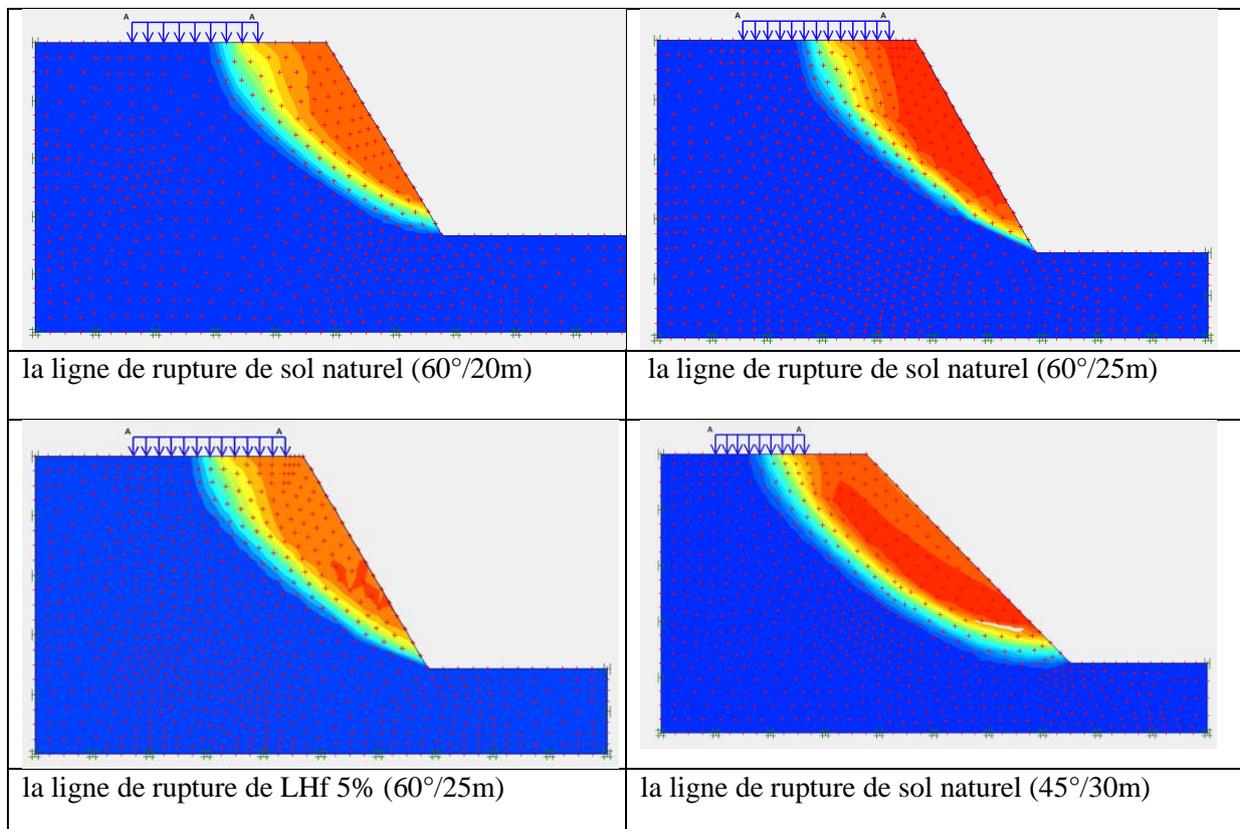
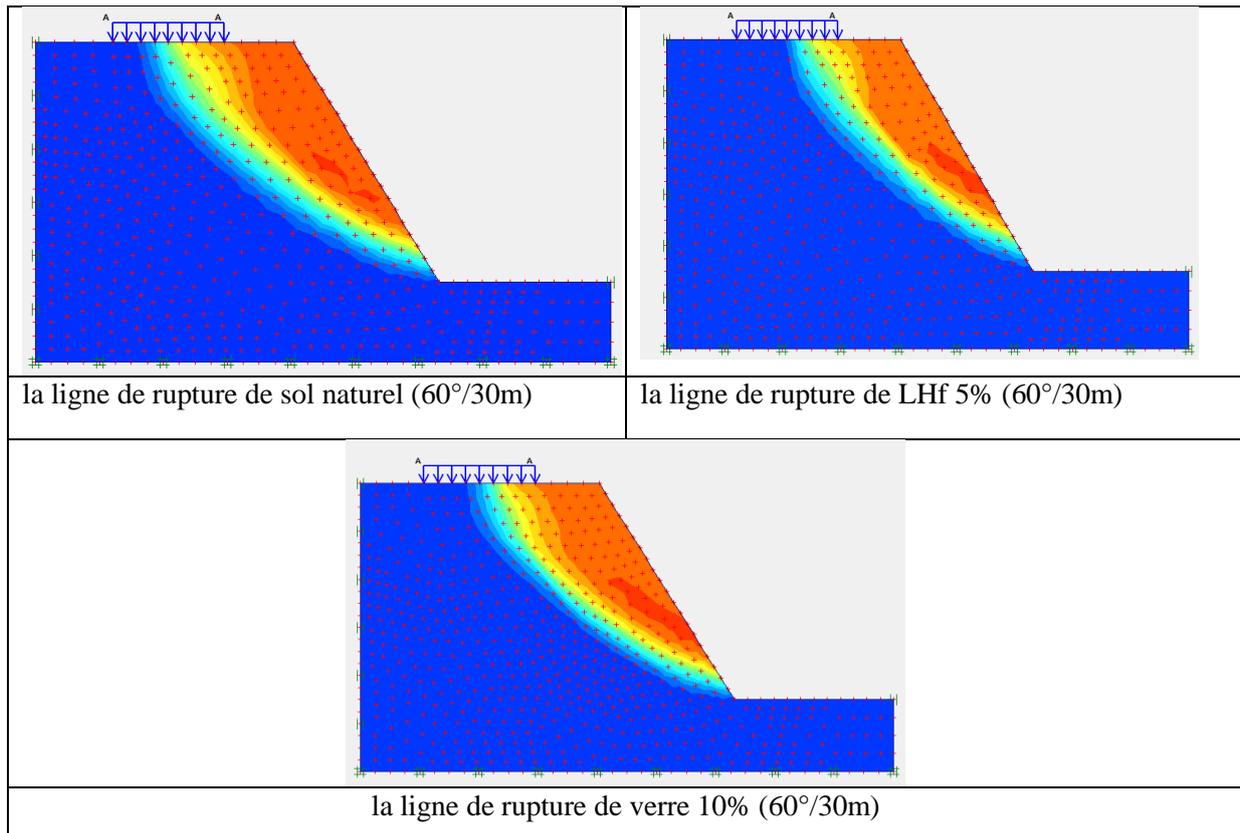


Figure 110 : Surface de rupture

### 7.1.2. Lignes de rupture pour les remblais instables

Pour le dimensionnement des clous on doit saisir toutes les lignes de ruptures suivantes :





**Tableau 30 : Les lignes de rupture des remblais instables**

On remarque que l'augmentation de la hauteur du remblai et de la pente augmente d'avantage la surface de rupture du sol. Par contre l'ajoute de produit de traitement diminue la surface de rupture.

### 7.1.2. Caractéristiques de clouage (éléments anchor)

Les clous doivent traverser la surface de glissement et posséder un ancrage suffisant. Pour les propriétés des ancrages au sol, l'option de données **anchor** contient les propriétés du **anchor rod**.

Paramètre	Valeur
Type de comportement	Elastique
Rigidité normale	$EA=2*10^5$ kN
Force maximale	$F_{max}= 1.10^{15}$ kN
Inclinaison	15°
Nombre des clous	1 / 3 / 11

**Tableau 31 : Propriétés des ancrages (éléments node-to-node anchor)**

## 7.2. Procédure de calcul

Le calcul du modèle de référence se fait en 5 phases :

Phase 0 : Initiale des contraintes (procédure  $K_0$ ) ; on détermine les contraintes effectives initiales.

Phase 1 : Application de la gravité.

Phase 2 : Activation de la charge.

Phase 3 : Activation des clous.

Phase 4 : Calcul du coefficient de sécurité dans les conditions initiales.

## 7.3. Maillage et maillage déformé

### 7.3.1. Cas de un clou

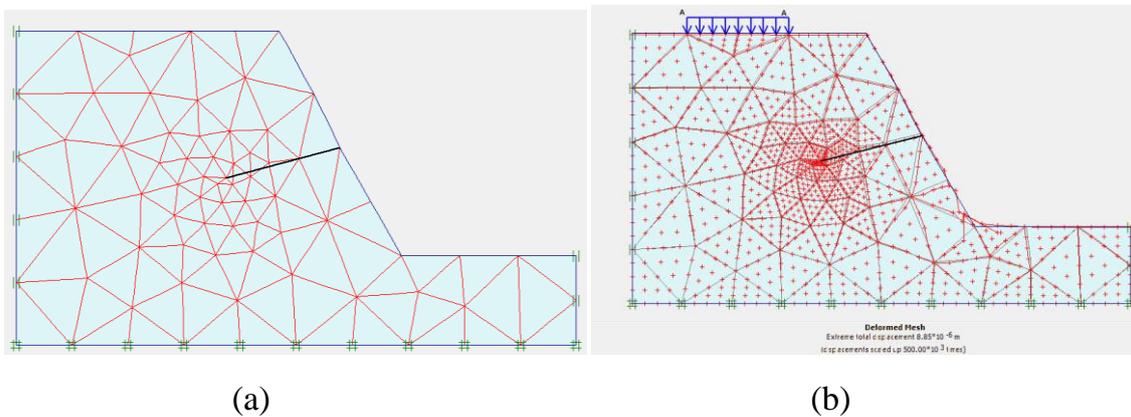


Figure 111 : (a) maillage, (b) maillage déformé après la construction du remblai de sol naturel (60°/20 m)

### 7.3.2. Cas de trois clous

Un exemple de maillage et maillage déformé est représenté sur la figure suivante.

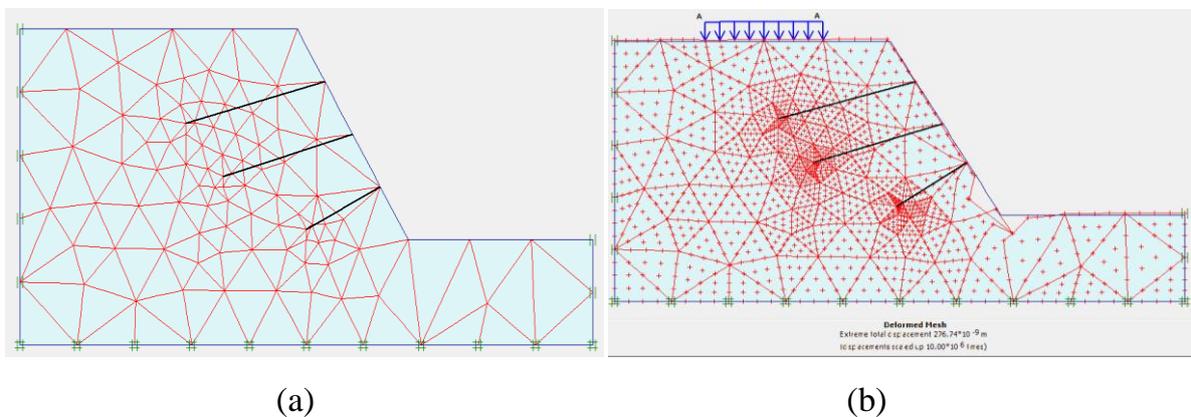


Figure 112 : (a) maillage, (b) maillage déformé après la construction du remblai de sol naturel (45°/20m)

### 7.3.2. Cas de 11 clous

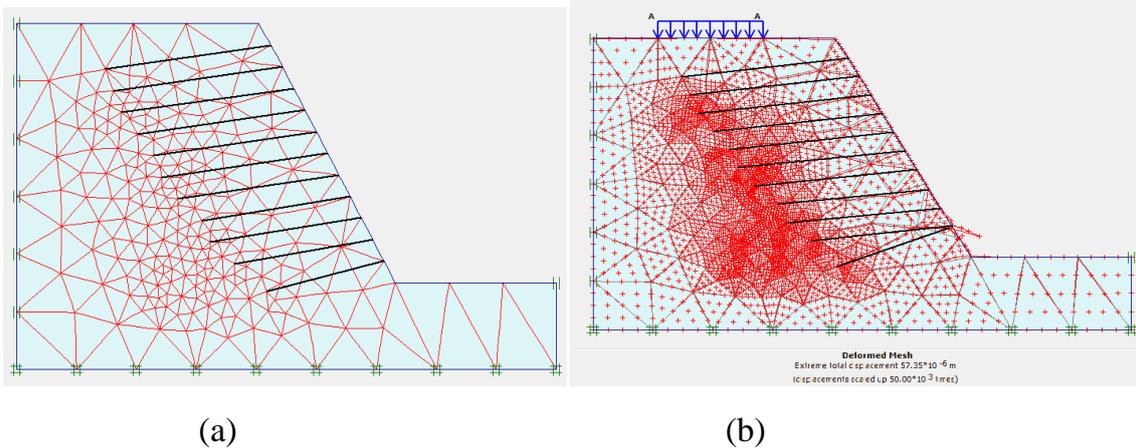


Figure 113 : (a) maillage, (b) maillage déformé après la construction du remblai de sol naturel (60°/30 m)

### 7.4. Facteurs de sécurité

Le tableau suivant donne les valeurs des facteurs de sécurité des talus de remblais après renforcement.

	Sol naturel				LHF + chaux 5%		Verre+chaux 10%
	45°	60°			60°		60°
Angles	45°	60°			60°		60°
Hauteurs	30m	20m	25m	30m	25m	30m	30m
Nombre des clous	3	1	3	11	1	3	1
Facteur de sécurité	1.53	1.55	1.51	1.54	1.60	1.53	1.52

Tableau 32 : Facteurs de sécurité des remblais instables après renforcement

A partir de ce tableau, on remarque que le nombre de clous diffère d'un cas à l'autre pour obtenir des valeurs admissibles de facteur de sécurité (> 1,5). Pour le sol naturel à 60° de pente, seulement un clou est suffisant pour stabiliser un remblai de 20m de hauteur alors qu'on a besoin de 11 clous pour stabiliser un remblai de 30m de hauteur. Cependant, à 45° de pente le sol naturel nécessite seulement 3 au lieu de 11 clous pour être stabilisé à 30m de hauteur.

Pour le sol traité à 30m de hauteur pour 60° de pente, il est nécessaire de mettre 3 clous au lieu de 11 clous comparativement au sol naturel pour la même configuration. Cela montre l'intérêt économique de l'utilisation du couplage des deux techniques

(traitement + renforcement). Un grand remblai avec une pente de  $60^\circ$  est construit avec moins de volume de matériau mis en œuvre comparativement à un remblai avec une pente de  $45^\circ$  (réduire considérablement la largeur de la base du remblai). Cela réduit le temps de travail sur chantier et fait des économies de coût de mise en œuvre. Raidir la pente des remblais est une pratique courante dans le cas des emprises limitées à cause de présence d'obstacles tels que les voies routières ou ferroviaires, présences des courts d'eau, topographie inadaptés,...

## **8. CONCLUSION**

Nous avons étudié dans ce chapitre la stabilité d'un grand remblai construit avec la marne naturelle et traitée et avec ou sans renforcement par clouage. Nous avons utilisé le logiciel Plaxis pour modéliser un modèle de talus de remblai avec trois hauteurs différentes (20m, 25m, 30m) et deux pentes ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ).

Pour le sol naturel, 4/6 des talus de remblai ont été instables alors que seulement 2/12 ont été instables pour le sol traité avec LHF+chaux et 1/12 a été instable pour le sol traité avec verre+chaux.

La technique de coulage a permis de stabiliser les talus de remblai instable après traitement. Le nombre de clouage n'a pas dépassé 3 pour l'ensemble des sols traités alors qu'il est nécessaire de mettre 11 clous pour stabiliser le sol naturel. Ces résultats montrent que le couplage des deux techniques (traitement et clouage) est très intéressant pour la stabilité des grands remblais.

# CONCLUSION GENERALE

---

## CONCLUSION GENERALE

---

Nous avons présenté dans ce mémoire une étude expérimentale et numérique. L'objectif est d'étudier l'influence du traitement chimique et le renforcement sur la stabilité d'un grand remblai construit avec une marne argileuse de caractéristiques mécaniques médiocres à l'état naturelle. Cette marne a été traitée par de nouveaux co-produits à savoir le laitier de haut fourneau et la pour de déchet de verre activés tous les deux par la chaux. Des essais de cisaillements ont été réalisés sur la marne compactée pour comprendre l'évolution des paramètres de stabilité (cohésion, l'angle de frottement). L'étude numérique basée sur un modèle de grand remblai a permis de mieux comprendre le comportement de la marne traitée et traitée-renforcée par la technique de clouage.

Sur la base des résultats obtenus lors de l'étude expérimentale et numérique, les conclusions suivantes ont pu être tirées :

- ✎ le dosage de 5% de LHF+chaux est optimal pour le traitement de la marne afin d'obtenir l'angle de frottement maximal. En revanche, la valeur maximale de  $\phi$  a été obtenue pour le dosage de 10% pour le traitement verre+chaux. Un écart d'environ 19% est obtenu entre les deux traitements avec l'avantage au LHF+chaux.
- ✎ Pour le mélange verre+chaux, la cohésion maximale a été obtenue pour le dosage 5%. Par contre pour le mélange LHF+chaux, la cohésion sa valeur maximale de a été obtenue pour le dosage 10%. On a enregistré un écart important entre la cohésion obtenue par traitement au LHF+chaux comparativement à celle obtenue par traitement verre+chaux. Cela est due, à priori, à la réaction pouzzolanique du laitier qui a été activé avec la chaux ce qui augmente la liaison entre les particules de sol et augmenter en conséquence sa cohésion.
- ✎ Il y a une tendance à l'augmentation de la résistance de cisaillement maximale pour les trois contraintes appliquées pour le traitement LHF+chaux. En revanche, il y a une augmentation de la résistance au cisaillement en fonction du dosage pour la contrainte normale de 300 kPa seulement, une diminution de la résistance est obtenue pour les contraintes normales 100 kPa et 200 kPa.
- ✎ les résultats obtenus par l'étude numérique montrent que la stabilité du talus est critique pour les remblais de grandes hauteurs constitués par le sol naturel (30m, 25m et 20m), le sol traité au LHF+chaux pour le dosage 5% et le sol traité au verre+chaux pour le dosage 10%.

- ✎ les facteurs de sécurité sont les plus élevés pour le remblai traité au LHF+chaux à 10% de dosage et les plus élevés pour le remblai traité au verre+chaux pour 5% de dosage.
- ✎ le couplage du traitement de sol avec la technique de clouage a augmenté le coefficient de sécurité ce qui signifie que le renforcement a rendu le remblai moins vulnérable au phénomène de glissement de terrain.

Enfin, ce travail nous a permis de mieux comprendre les rôles spécifiques de traitement et renforcement de sol fin.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

### Chapitre 1

- Dr. Guettouche Amar, Cours Mécanique des sols 1. Université Ferhat Abbas-Sétif-1
- Barka Zeineb et Ait Brahim Nehla.2017. Etude du comportement d'une marne argileuse traitée pour valorisation dans les projets routiers, Mémoire Master, l'Université 8 Mai 1945 de Guelma.
- Aissaoui Nesrine, Bencheikh Mohammed et Ouadja Gbati Malick. 2015. Traitement des sols fins en vue de leur utilisation dans les remblais routiers. Mémoire Master. Université 8 mai 1945 de Guelma.
- Boumzaout Nada et Benamara Meryem et Nouredine Khaoula.2019. Amélioration d'un sol argileux par le laitier de haut fourneau activé par la poudre de dolomie. Université 08 mai 1945 de Guelma.
- Rouabhia El Houssayne et Zedadra Hanane. 2017.Amélioration des sols. Université 08 mai 1945 de Guelma.
- J-P. Robert, « Forages et sondages ». Techniques de l'ingénieur (2011).
- G. Philipponnat, « Fondation et ouvrages en terre ». Livres L/624.077
- J-P. Magnan (2000), « Cours de mécanique des sols et des roches ». Ecole nationale des ponts et chaussées.
- NF P 94-057/1992. Analyse granulométrique par tamisage.
- NF P 94-068. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.
- NF P 18-598. Equivalent de sable.
- NF P 94-051. Détermination des limites d'Atterberg.
- Guide des terrassement routiers Français (GTR), 2000. Guide technique SETRA.
- Américain Association of States Highway and Transportation Official (AASHT). Terzaghi (1929).

### Chapitre 2

- Traitement des sols à la chaux et/ou liants hydrauliques, (GTS). Guide technique SETRA.
- Oudni selma. 2017. Effet du traitement des sols limoneux par la chaux sur les caractéristiques de compactage, Mémoire Master. Université Larbi ben M'hidi Oum el Bouaghi.

- Isis Brabet. 2012. Le traitement des sols pour la couche de forme, plateforme de chaussée Application à des projets de terrassement dans le département de l'Hérault. Mémoire D'ingénieur CNAM, Conservation National de arts et métiers Paris.
- Nour-Said Ikhlef. 2015. Comportement d'un matériau routier traité aux liants hydrauliques Application aux Autoroutes, Thèse de Doctorat en Génie Civil, Université Djillali Liabes de SBA.
- Aissaoui Nesrine, Bencheikh Mohammed et Ouadja Gbati Malick. 2015. Traitement des sols fins en vue de leur utilisation dans les remblais routiers. Mémoire Master. Université 8 mai 1945 de Guelma.
- Abidat Wafa. 2019. Effet de traitement des sols argileux par la chaux et le sable sur les propriétés déportance, Mémoire Master. Université Badji Mokhtar – Annaba.
- Izemmouren Ouarda. 2016. l'Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée, Thèse de Doctorat, Université Mohamed – Biskra.

### Chapitre 3

- Jouini Mahmoud et Siad Nceur. 2016, 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, Université Larbi Tébessi – Tébessa.
- kiyyour Sami. 2014. Le Clouage dans les ouvrages des soutènements : conception et dimensionnement, Mémoire Magister, Université Constantine 1.
- CHAFI Samir. 2012. Contribution a l'étude du renforcement des talus instables par les geosynthetiques.

### Chapitre 4

- Aouati Youssef et Rahim Mohamed Raouf. 2015. Modélisation des essais géotechnique par le logiciel PLAXIS, Mémoire Master, Université 08 mai 1945 de Guelma.
- RAINI Imane. 2017. Etude géotechnique de la stabilité des sols pour la mise en place d'une chaussée : cas d'étude Jbel Bou Rdim (NE-Fès), Mémoire Master, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah.
- Marwana Aminou et Muangongo Ivanete. 2014. Influence de la présence de sulfates sur le traitement du sol argileux par des ajouts minéraux, Mémoire Master, Université Djilali Bouanaama de Khemis Miliana.
- Boumzaout Nada et Benamara Meryem et Nouredine Khaoula. 2019. Amélioration d'un sol argileux par le laitier de haut fourneau activé par la poudre de dolomie. Université 08 mai 1945 de Guelma.

## Chapitre 5

- kiyyour Sami.2014. Le Clouage dans les ouvrages des soutènements : conception et dimensionnement, Mémoire Magister, Université Constantine 1.
- Benamara Fatima Zohra. 2019. Analyse de la stabilité des écrans de soutènement ancrés, Thèse de Doctorat, Université 8 mai 1945 de Guelma.
- Jouini Mahmoud et Siad Nceur.2016, 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, Université Larbi Tébessi – Tébessa.