

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**



**PROJET DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE CIVIL.**

THEME

**STABILISATION PHYSICO CHIMIQUE
DES SOLS SAHARIENS
AUX LIGNOSULFONATES**

Réalisé par

LAAKEL ALI

Proposé et Dirigé par

M^{me} MITICHE-KETTAB RATIBA

M^{me} MORSLI MERIEM

Promotion Juin 2007/2008

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach
16200 Alger (Algérie)

Tel : 213 21 52 53 01/03 – Fax : 213 21 59 29 73

ملخص

الهدف من هذا العمل هو التجربة الى دراسة تأثير "lignosulfonate" على ارض الواقع وتحديد أمثل مضمون هذا الاستقرار مع مراعاة المواصفات المستخدمة لاستخدام المواد والتقنيه لمقاومه على الطريق الصحراوي ضغط الجافه . النتائج التي تم الحصول عليها تظهر ان اعمال lignosulfonate يستخدم كماده تشحيم ، حيث يقلل كمية المياه التي تحتويها الدمج الامثل ، وتبلغ كثافه جافه جدا لا تتأثر. وهو يحسن مقاومه ضغط التربة للاراضي الجافه ، لانه يزيد الرقم القياسي النسب الماءويه لانخفاض مرونة ، فإنه يقلل من التأخير في رفع الشعر وجفاف التربة . هو عمل مشروع والتي مكنتنا من ان نخلص الى ان فعالية lignosulfonate عن تحسين تماسك غرامة المواد .

الكلمات الرئيسية : تحديد الهوية ، دمج ، التربة الدقيقة ، وتثبيت الاستقرار .

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement l'influence du « lignosulfonate » sur le sol et de déterminer la teneur optimale de ce stabilisant en tenant compte des spécifications retenues pour l'utilisation des matériaux fins en Technique Routière Saharienne concernant la résistance à la compression à sec.

Les résultats obtenues montrent que le lignosulfonate agit comme lubrifiant, permettant de réduire la teneur en eau optimale de compactage, la densité sèche n'est pas très influencée. Il améliore considérablement la résistance à la compression du sol à sec, il augmente l'indice de plasticité pour des faibles pourcentages, il diminue les remontées capillaires et il retarde le séchage du sol.

Le travail effectué est une ébauche qui nous a permis de conclure à l'efficacité du lignosulfonate quant à l'amélioration de la cohésion des matériaux fins.

Mots clés : identification, compactage, sol fin, stabilisation.

Absract :

The objective of this work is to study experimentally the influence of "lignosulfonate" on the ground and determine the optimal content of this stabilizing taking into account the specifications used for the use of materials for a Technical Saharan Road on resistance the compression dry.

The results obtained show that the lignosulfonate acts as a lubricant, reducing the water content optimum compaction, dry density is not very influenced. It improves resistance to compression of dry soil, it increases the index plasticity for low percentages, it reduces lift hair and delays the drying soil.

The work is a draft which has enabled us to conclude that the effectiveness of lignosulfonate about improving the cohesion of fine materials.

Keywords: identification, compaction, fine materials, stabilization.

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier notre seigneur Dieu tout puissant

Je tiens à remercier mes promotrices Mme KETTAB et Mme MORSLI de leurs efforts conjugués et leurs précieux conseils tout au long de ce travail.

Je remercie aussi tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'aux études universitaires pour leur contribution à ma formation.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury de s'être donnés la peine d'examiner ce modeste travail.

Toute ma reconnaissance à Mlle LAZOUNI pour sa complaisance et collaboration et également à toute l'équipe du laboratoire LCTP.

Sommaire

| | |
|--|----|
| INTITULE DES FIGURES | |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| CHAPITRE 1 STABILISATIONS DES SOLS | |
| 1.1 Généralités..... | 3 |
| 1.2 Traitements des sols a la chaux..... | 3 |
| 1.2.1 le principe..... | 4 |
| 1.2.2 L'action de la chaux..... | 6 |
| 1.2.3 Épandage de la chaux..... | 6 |
| 1.2.4 Malaxage de la chaux..... | 6 |
| 1.3 Traitement au ciment..... | 7 |
| 1.3.1 Conseils de mise en œuvre..... | 7 |
| 1.4 Traitement mixte (à la chaux et au ciment)..... | 8 |
| 1.4.1. Limites d'utilisation..... | 8 |
| 1.4.2. Méthodes de traitement et précautions d'emploi..... | 9 |
| 1.4.3. Les principaux essais à réaliser..... | 9 |
| 1.5 Traitement des sols à la chaux et aux cendres volantes..... | 10 |
| 1.5.1. Types de chaux..... | 11 |
| 1.5.2. Types de cendres volantes..... | 12 |
| 1.5.3. Types de sols..... | 12 |
| 1.5.4. Propriétés et quantités de chaux et de cendres volantes..... | 12 |
| 1.5.5. Relation humidité –densité- résistance..... | 12 |
| 1.5.6. Effet de la puissance de compactage..... | 13 |
| 1.5.7. Effet de la température de traitement..... | 13 |
| 1.5.8. Effet de délai de compactage après l'addition de l'eau dans les mélanges | 13 |
| 1.5.9. Effet de l'addition de produits chimiques..... | 13 |
| 1.5.10. Evaluation comparative..... | 14 |
| 1.6 Stabilisation par ajout de sable..... | 14 |
| 1.6.1 Stabilisation d'argiles gonflantes..... | 14 |
| 1.6.2 Amélioration des performances mécaniques de matériaux fins présentant une certaine argilosité | 15 |
| 1.7 Stabilisation par solutions salines..... | 17 |
| 1.7.1. Action de différents types des sels sur les caractéristiques des sols..... | 17 |
| 1.8 Stabilisation par des produits organiques..... | 19 |
| 1.9 Conclusions..... | 19 |

Chapitre 2 STABILISATION DES SOLS AU LIGNOSULFONATE

| | |
|---|----|
| 2.1 Introduction..... | 20 |
| 2.2 La chaussée saharienne | 20 |
| 2.3 Exemples de réalisations | 21 |
| 2.3.1 Cas de Tessalit | 21 |
| 2.3.2 Cas de Gassi- Touil : la route des sables | 22 |
| 2.4 Etudes réalisées au laboratoire..... | 23 |
| 2.4.1.Courbes Proctor modifié, sol naturel, sol+lignosulfite..... | 24 |
| 2.4.2. Courbes Proctor modifié, sol naturel, sol + chromolignine... .. | 25 |
| 2.4.3. Résistance à la compression simple du sol stabilisé par les deux méthodes | 25 |
| 2.4.4. Essais de remontée capillaire : sol naturel et sol stabilisé selon les deux méthodes | 26 |
| 2.5 Proposition de mise en place sur chantier | 26 |
| 2.5.1 Le lignosulfite | 26 |
| 2.5.2 Le chromolignine..... | 26 |
| 2.6 Conclusions et recommandations..... | 27 |

Chapitre 3 LIGNOSULFONATES ET LEURS UTILISATIONS

| | |
|--|----|
| 3.1 Introduction..... | 29 |
| 3.2 Origine des lignosulfonates..... | 29 |
| 3.3 Méthode de délignification..... | 30 |
| 3.4 Utilisation de lignosulfonates comme superplastifiant | 31 |
| 3.5 Les lignosulfonates comme abat-poussières et autres usages | 33 |
| 3.5.1 Dépoussiérage des routes non revêtues..... | 33 |
| 3.5.2 Conditions d'application | 34 |
| 3.6 Conclusion..... | 34 |

Chapitre 4 ETUDE EXPERIMENTALE

| | |
|---|----|
| 4.1 Introduction..... | 35 |
| 4.2 Plan du travail..... | 35 |
| 4.3 Etude d'identification | 36 |
| 4.3.1 Présentation des échantillons | 36 |
| 4.3.2 Analyses chimiques | 36 |
| 4.3.3 Analyse granulométrique | 37 |
| 4.3.4 Limites d'ATTERBERG | 40 |
| 4.3.5 Equivalent de sable | 43 |

| | |
|--|----|
| 4.3.6 Essai au bleu de méthylène | 45 |
| 4.3.7 Présentation du stabilisant | 45 |
| 4.4 Détermination du taux optimal du lignosulfonate | 46 |
| 4.4.1 L'influence du lignosulfonate sur les caractéristiques de compactage | 46 |
| 4.4.2 L'influence de lignosulfonate sur la résistance à la compression ... | 49 |
| 4.4.3 Conclusions..... | 56 |
| 4.5. Influence du lignosulfonate sur d'autres sols | 56 |
| 4.5.1 Résultats des essais..... | 57 |
| 4.6. Etude de la sensibilité à l'eau des sols traités au lignosulfonate..... | 60 |
| 4.7 Conclusion et perspectives..... | 72 |
| Références bibliographiques..... | 73 |

LISTE DES FIGURES

- Figure.1.1** Variation d'indice de plasticité par ajout de la chaux
- Figure1.2** Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage
- Figure.1.3** Procédé d'Incorporation de la chaux
- Figure1.4** procédé d'Epanchage du ciment
- Figure1.5** La variation du potentiel du gonflement en fonction des pourcentages des cendres volcanique et du temps, pour de deux sols.
- Figure1.6** Effet des cendres volantes et du temps traitant sur les valeurs de pression de gonflement de deux sols.
- Figure 1.7** : Potentiel maximum du gonflement et le nombre des cycles pour le retrait total.
- Figure1.8** Courbes granulométriques du tuf de Bechar (Boulekhout, 2002)
- Figure1.9** Courbes granulométriques du sable de dune (Boulekhout, 2002)
- Figure 1.10** Courbes de compactage des différents mélanges à l'énergie Proctor modifié (Morsli, 2007).
- Figure 1.11** Diminution de la limite de liquidité de la bentonite en fonction de la concentration des cations monovalents
- Figure 1.12** Gonflement et pH pour l'eau du robinet
- Figure 1.13** Influence de la valence des cations sur le gonflement
- Figure 1.14** l'effet de sel sur la limite de liquidité
- Figure 2.1** Coupe transversale type d'une chaussée saharienne (A) Les terrassements. (B) La couche de fondation. (C)La couche de base. (D)L'imprégnation. (E) Le revêtement
- Figure 2.2.** Résistance à la compression simple, obtenues après compactage et séchage, sur un sable peu cohérent de Gassi – Touil (13 % < 0.1 mm) à différents taux de lignosulfites
- Figure 2.3** Courbes Proctor modifié du sol naturel, et du sol stabilisé respectivement avec 1% et 1.5% de lignosulfite
- Figure 2.4** Courbes Proctor modifié du sol naturel, sol stabilisé respectivement avec 1% ; 1.25% et 1.50 de Chromolignine
- Figure 2.5** Résistance à la compression simple, obtenues après compactage et séchage, sur un sable type Gassi- Touil, stabilisé par ajout 1) de lignosulfite ; 2) lignosulfite +bichromate
- Figure 2.6** Quantité d'eau absorbée en fonction du temps par des éprouvettes :
1) de sol naturel ; 2) sol+ 1% de lignosulfite ; 3) sol + 1% de lignosulfite +0.1% bichromate
- Figure 3.1** Localisation de la Lignine dans le tissu végétal
- Figure 4.1** Courbe granulométrique de l'échantillon N1
- Figure 4.2** Courbe granulométrique de l'échantillon N2
- Figure 4.3** Courbe granulométrique de l'échantillon N3

Figure.4.4 Les différents états physiques d'un sol en fonction de la teneur en eau.

Figure.4.5 L'appareil de Casagrande

Figure.4.6 Outil à rainurer

Figure.4.7 Limites d'Atterberg de l'échantillon N1

Figure.4.8 Limites d'Atterberg de l'échantillon N2.

Figure.4.9 Eléments d'équivalent de sable

Figure.4.10 Le moule et la dame PROCTOR

Figure.4.11 Courbes Proctor modifié du sol naturel, et du sol stabilisé respectivement avec 0.5%,1% et 2% de lignosulfonate

Figure.4.12 Teneur optimum de PROCTOR modifié en fonction de la teneur en lignosulfonate.

Figure.4.13 courbe contraintes/déformation du sol N1 naturel à 2 jours

Figure.4.14 courbe contraintes/déformations du sol naturel à 4 jours

Figure.4.14 courbe contraintes/déformations du sol naturel à 4 jours

Figure.4.15 courbe contraintes/déformations du sol avec 0.5% ligno à 2 jours

Figure.4.16 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 0.5% ligno à 4 jours

Figure.4.17 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 1% ligno immédiatement

Figure.4.18 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 1 % ligno à 2 jours

Figure.4.19 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 1% ligno à 4 jours

Figure.4.20 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 2% ligno immédiatement

Figure.4.21 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 2 % ligno à 2 jours

Figure.4.22 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 2% ligno à 4 jours

Figure 4.23 évolution de la résistance à la compression du sol naturel et des sols traité à 0.5%,1% et 2% à des durés de 2 et 4 jours

Figure.4.24 courbe contraintes/déformations du sol N2 naturel à 2 jours

Figure.4.25 courbe contraintes/déformations du sol N2 avec 1% ligno à 2 jours

Figure.4.26 courbe contraintes/déformations du sol N3 naturel à 2 jours

Figure.4.27 courbe contraintes/déformations du sol N3 avec 1% ligno à 2 jours

Figure.4.28 Absorption d'eau du sol naturel et des sols traités à 1% et 2% du lignosulfonate

Figure.4.29 La quantité d'eau dégagée (grammes) en fonction du temps (heures).

Figure 4.30 La quantité d'eau dégagée (grammes) en fonction du temps (minutes).

Figure.4.31 Représentation de la limite de retrait en fonction de la teneur en lignosulfonate.

Figure.4.32 Limites d'Atterberg de l'échantillon N2 avec 0.5% du lignosulfonate

Figure.4.33 Limites d'Atterberg de l'échantillon N2 avec 1% du lignosulfonate

Figure.4.34 Limites d'Atterberg de l'échantillon N2 ave2c% du lignosulfonate

Figure.4.35 Graphe de limite de liquidité en fonction de la teneur en lignosulfonate.

Figure.4.36 Graphe de limites de plasticité en fonction de la teneur en lignosulfonate.

Figure.4.37 Graphe des indices de plasticité en fonction de la teneur en lignosulfonate.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Composition chimique des trois sols

Tableau4.2 Tamis utilisés et pourcentage de chaque dimension des grains de l'échantillon N1

Tableau4.3 Tamis utilisés et pourcentage de chaque dimension des grains de l'échantillon N2

Tableau 4.4 Tamis utilisés et pourcentage de chaque dimension des grains de l'échantillon N

Tableau 4.5 Limites d'Atterberg des trois échantillons

Tableau 4.6 L'équivalent de sable des trois sols

Tableau 4.7 Valeurs de VBs des trois sols

Tableau4.8 Caractéristiques de Proctor modifié du sol naturel, et du sol stabilisé respectivement avec 0.5%,1% et 2% de lignosulfonate

Tableau 4.9 l'effet du lignosulfonate sur les teneurs en eau optimales de Proctor modifié (sol N1)

Tableau 4.10 L'effet de la teneur lignosulfonate sur la densité sèche.

Tableau.4.11 influence du lignosulfonate sur la résistance à la compression en fonction du temps

Tableau .4.12 Caractéristiques de compactage des sols N2, N3

Tableau.4.13 tableau récapitulatif des résistances à la compression en fonction des trois sols1) sans stabilisation ; 2) sol + 1% de lignosulfonate

Tableau.4.14 l'effet du lignosulfonate sur l'évaporation de l'eau

Tableau 4.15 L'effet de la teneur en lignosulfonate sur la limite de retrait

Tableau 4.16 L'effet de la teneur en lignosulfonate sur les limites d'Atterberg

Tableau 4.17 L'effet de la teneur en lignosulfonate sur la limite de liquidité

Tableau 4.18 L'effet de la teneur en lignosulfonate sur la limite de plasticité

Tableau 4.19 L'effet de la teneur en lignosulfonate sur l'indice de plasticité

LISTE DES IMAGES

Image.1.1.Routes en cours de stabilisation

Image 3.1 Effet des plastifiants sur la fluidité de la pâte de ciment (rapport eau/ciment:0.3)

Image 3.2 Traitement d'une chaussée forestière.

Image 4.1 Les sols utilisés dans l'étude

Image 4.2 Séparation des grains de l'échantillon N1 par voie humide

Image 4.3 Equivalent du sable de l'échantillon N1

Image 4.4 Lignosulfonate utilisé

Image4.5 matériel d'essais de Proctor et CBR

Image4.6 Préparation des éprouvettes

Image4.7 Eprouvette du sol naturel étuvé à 48 h

Image4.8 Le matériel de l'essai de compression simple (la cellule et la presse de triaxial, le moule de confection des éprouvettes)

Image4.9 Eprouvette écrasée du sol N1 naturel à 2 jours

Image4.10 Eprouvette écrasée du sol N1 naturel à 4 jours

Image4.11 Eprouvette écrasée du sol N1 avec 0.5%ligno à 2 jours
avec0.5%ligno à 4 jours

Image4.12 Eprouvette écrasée du sol N1 avec0.5%ligno à 4 jours

Image4.13 Eprouvette écrasée du sol N1 avec 1%ligno immédiatement

Image4.14 Eprouvette écrasée du sol N1 avec 1%ligno à 2 jours

Image4.15 Eprouvette écrasée du sol N1 avec1%ligno à 4 jours

Image4.16Eprouvette écrasée du sol N1 avec 2%ligno immédiatement

Image4.17 Eprouvette écrasée du sol N1 avec 2%ligno à 2 jours

Image4.18 Eprouvette écrasée du sol N1 avec2%ligno à 4 jours

Image 4.19 éprouvette du sol naturel en cours
d'essai de remontées capillaires

Image 4.20 l'effet du CaCO_3 sur la tenue à l'eau des échantillons stabilisés au lignosulfonate

Image.4.21Quatre tares contiennent respectivement ;
sol naturel, sol+0.5% ligno, sol+1% lignosulfonate et sol+2% lignosulfonate

Image.22 L'immigration du lignosulfonate vers la surface.

Image.4.23 Deux récipients contiennent respectivement; eau naturel et eau+1%lignosulfonate

Image 4.24 Echantillons de l'essai de limite de retrait

INTRODUCTION

L'utilisation des matériaux fins en corps de chaussée est relativement récente. Les pionniers de la construction routière au Sahara ont été parmi les premiers utilisateurs ; tirant profit des avantages qu'offre l'extrême sécheresse du désert, ces bâtisseurs ont réalisé des milliers de Km de routes en matériaux locaux dès les années 60 et misent au point une technique adaptée à l'environnement, nommée « La Technique Routière Saharienne » (Fenzy, 1966). Le traitement de ces matériaux n'a pas été systématique car les risques d'imbibition du corps de chaussée ne sont pas importants (ils sont généralement pris en charge par des mesures constructives). Toute fois, lorsque les matériaux fins ne répondaient pas aux exigences de la Technique Routière Saharienne, on procédait à une stabilisation (cas de la « route des sables » du Grand Erg Oriental [(Fenzy, 1970) ; (Fumet, 1959) ; (Sierra R, 1959)]. Cependant, malgré des résultats estimés satisfaisants [(Domec et AllouL, 1980) ; (Fenzy, 1970)], la stabilisation des matériaux fins a pris fin avec les premières réalisations.

Aujourd'hui, compte tenu de l'expansion du réseau routier, de la raréfaction des matériaux fins répondant aux spécifications et de l'augmentation du trafic, la stabilisation tend à devenir incontournable. Les techniciens de la route ont souvent exprimé, dans différents séminaires et congrès, le besoin d'élaborer des techniques de traitement de matériaux fins adaptées aux sols et climat des zones arides et de relancer les techniques mises en œuvre antérieurement [(Bouzerara, 2006) ; (Bouzerara, 1998) ; (CAR, 2005)].

Par ailleurs, l'utilisation des matériaux fins en technique routière, après avoir été circonscrite aux zones arides tend à se développer en zones humides. Pour de nombreuses raisons liées à l'environnement et au cadre de vie, il est vraisemblable que dans un avenir proche, la production de granulats routiers sera limitée. Certaines régions sont dépourvues de roches massives et de cailloux : on y trouve que des sols fins peu adaptés à la construction et aux travaux publics. Ces régions cherchent des solutions alternatives pour y faire face, notamment en utilisant en corps de remblai ou en assise de chaussées, des sols fins traités. A titre d'exemple, en France, une étude de faisabilité menée et achevée fin 1995, a fait l'objet d'un rapport qui, après enquête détaillée, a défini les enjeux économiques d'environnement et à l'exportation, et conclu à la nécessité de lancer un Projet National sur les SOLS FINS (IREX, 1997).

Ainsi le traitement des matériaux fins est un sujet d'actualité qui intéresse les techniciens de la route aussi bien dans les zones arides que dans les zones humides.

Cette étude se veut une modeste contribution à la question de stabilisation des sols fins en zone aride pour chaussées à trafic moyen (moins de 300 véhicules poids lourds par jour).

L'étude s'articule autour de deux parties :

Une partie bibliographique avec :

- Un chapitre consacré aux principaux stabilisants utilisés pour le traitement des sols fins.
- Un deuxième chapitre à la stabilisation des sols sahariens.
- Le troisième est consacré aux lignosulfonates, stabilisant déjà utilisé dans la construction routière au Sahara.

La partie expérimentale se déroule en trois étapes :

Première étape : identifications et caractéristiques de compactage de trois sols et présentation du stabilisant (lignosulfonate).

Deuxième partie : détermination du taux optimal de lignosulfonate sur un des trois sols retenus pour l'étude.

Troisième partie : étude de l'influence du lignosulfonate, incorporé au taux retenu en deuxième partie, sur les caractéristiques des sols.

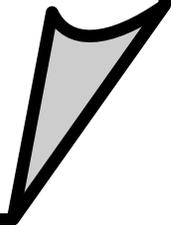
L'analyse porte sur les paramètres suivants :

1. Les caractéristiques de compactage (Proctor Modifié).
2. La Résistance à la compression simple.
3. La sensibilité à l'eau des échantillons traités.

Les essais ont été réalisés au Laboratoire Central de Travaux Publics (LCTP) et au laboratoire de Mécanique Des Sols (MDS) de l'Ecole Nationale Polytechnique.

CHAPITRE 01

STABILISATIONS DES SOLS



1.1 Generalites

Le terme « stabilisation » désigne un ensemble de procédés visant à améliorer les caractéristiques d'un sol, en particulier sa résistance mécanique, à diminuer la sensibilité à l'eau, à réduire le gonflement et à augmenter la résistance à l'usure (Taibi, 1985).

La stabilisation chimique est le résultat de l'incorporation, à un faible taux, d'un agent stabilisant à un sol donné. Il reste entendu que la stabilisation chimique pure est théorique, dans la mesure où le matériau mis en œuvre subit un compactage par damage ou par vibration. Ceci nous amène à parler de stabilisation d'ordre physico-chimique. La dessiccation, la correction granulaire, l'adjonction de fibres végétales, ou d'armatures sont d'autres procédés de stabilisation.



Image.1.1.Routes en cours de stabilisation

Les stabilisants sont issus de plusieurs secteurs de la production industrielle, comme ils peuvent être d'origine végétale ou animale.

On peut citer :

- Les liants classiques : les liants hydrauliques, la chaux, les bitumes et émulsions...
- Les sels et silicates ; ce sont surtout des silico- aluminates, des sels de calcium, de sodium et potassium.
- Les produits synthétiques industriels : dérivées d'amines, les silicones, les aldéhydes, les composés fluorés, les époxydes, les polymères.
- Les fibres : les fibres industrielles ou synthétiques, les fibres végétales (paille, sisal), les fibres animales.
- Les sous-produits et déchets industriels : constitués essentiellement des produits organiques (pâte à papier, cendres, huiles de vidange).

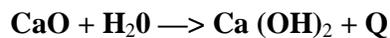
1. 2 Traitement des sols à la chaux

L'utilisation de la chaux est un moyen efficace pour modifier les sols, pour en améliorer à la fois la maniabilité et les capacités portantes tout en augmentant la stabilité et l'imperméabilité. La chaux vive et les poussières de four à chaux peuvent aussi être utilisées pour assécher les sols humides dans les sites de construction afin de réduire les temps d'arrêt et de fournir une meilleure surface de travail.

L'application de la chaux entraîne deux formes d'amélioration : la modification et la stabilisation. L'application de la chaux peut modifier presque tous les sols à grain fin, mais l'amélioration la plus importante se produit dans les sols argileux de plasticité modérée à élevée.

1.2.1 Le principe

L'hydratation de la chaux vive au contact de l'eau du sol provoque une consommation d'eau et une évaporation importante. Cette propriété est mise à profit pour l'assèchement des sols fins argileux et humides.



Chaux vive + eau = Chaux éteinte + Chaleur

Cette réaction exothermique entraîne une évaporation.

Par ailleurs, l'adjonction de chaux au sol provoque une modification de la qualité des argiles par échange des cations alcalins (Na^+ , K^+ ...) par des cations Ca^{++} apportés par la chaux; ceci développe des forces électriques conduisant à une agglomération des fines particules argileuses en particules grossières et friables.

Un sol argileux et humide passe d'un état plastique à un état solide, friable, maniable et perd une partie de sa sensibilité à l'eau. (**figure.1.1**)

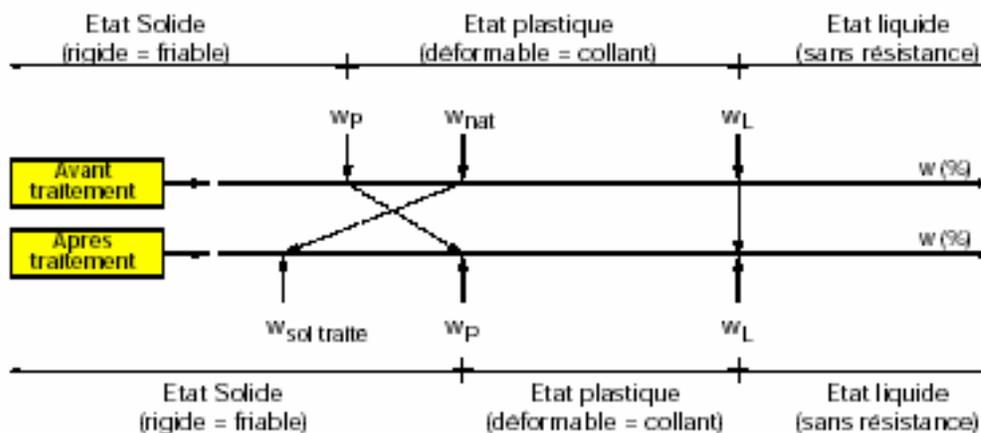


Figure.1.1 Variation d'indice de plasticité par ajout de la chaux (Site Web WWW. Wikipedia.com)

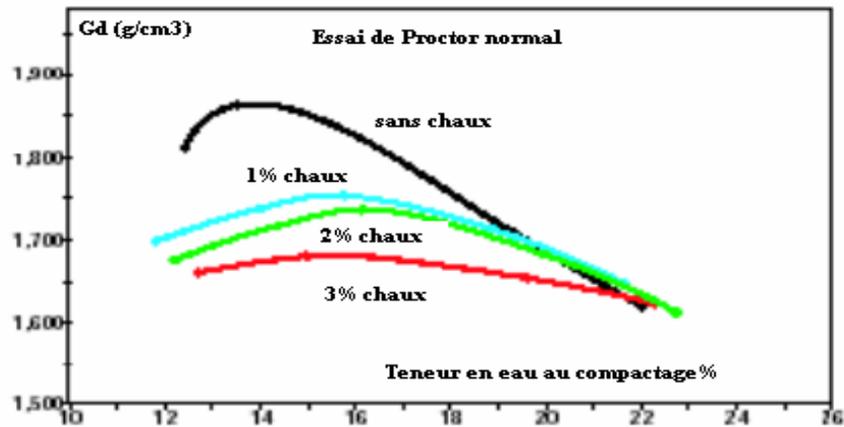


Figure1.2 Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage

La figure.1.2 montre que la courbe Proctor d'un sol traité est déplacée vers la droite et vers le bas par rapport à la courbe du sol naturel. Ce déplacement est d'autant plus marqué que le sol réagit bien avec la chaux.

On utilise la chaux aérienne sous forme de chaux éteinte ou de chaux vive, qui produit un abaissement plus important de la teneur en eau mais qui est plus délicate à manipuler (3% de chaux vive ont les mêmes effets que 4% de chaux éteinte) ; on utilise :

- **La chaux vive** en cas de problème de teneur en eau.
- **La chaux éteinte** en cas de problème de portance et teneur en eau convenable.

La stabilisation survient lorsqu'on ajoute une quantité adéquate de chaux à un sol réactif. La stabilisation diffère de la modification par le fait qu'un niveau important du gain de solidité à long terme se développe grâce à la réaction pouzzolanique. Cette réaction est la formation d'hydrates de silicate de calcium et d'aluminates de calcium lorsque le calcium de la chaux réagit avec les aluminates et les silicates solubilisés de la surface d'argile. Cette réaction peut commencer rapidement et est responsable d'une partie des effets de modification.

L'addition de chaux a des effets à long terme (plus d'un an) par combinaison avec les constituants des argiles.

On observe :

- L'augmentation de la cohésion, de la résistance au poinçonnement (l'indice CBR peut être multiplié par 4 ou 10 au bout de deux heures) CBR = Californian Bearing Ratio ; estimation de la portance d'un sol en mesurant sa résistance au poinçonnement ;
- L'augmentation des résistances mécaniques ;
- Une meilleure perméabilité de l'argile ;
- Dans le cas d'argiles gonflantes : diminution des variations volumiques ;
- Un gain de solidité qui se poursuit avec le temps ;
- Une augmentation substantielle des valeurs des modules de résilience.

1.2.2 L'action de la chaux

Elle dépend de :

- La finesse qui augmente la surface de contact,
- La teneur en chaux libre (élément actif),
- La durée du traitement,
- Compactage qui doit suivre rapidement le malaxage (dans la journée),
- La teneur en eau

1.2.3 Épandage de la chaux

Indiqué par le laboratoire en poids au m², le pourcentage de chaux à épandre se situe entre 2 et 4% du poids du sol sec.

Le débit de l'épandeur doit être correctement réglé. La vérification du dosage est possible avec une méthode simple : faire passer l'épandeur sur une toile de 1 m² posée sur le sol et peser la quantité de chaux étendue sur celle-ci. Le résultat doit correspondre, à plus ou moins 10 %, aux normes du laboratoire.

Lorsque le sol est trop sec, il peut être nécessaire de répandre de l'eau afin de permettre à la chaux de réagir convenablement (ou arrosage au lait de chaux).

1.2.4 Malaxage de la chaux

Le nombre de passages du malaxeur à déterminer sur chantier, dépend à la fois de la nature du sol et de la puissance de l'engin.

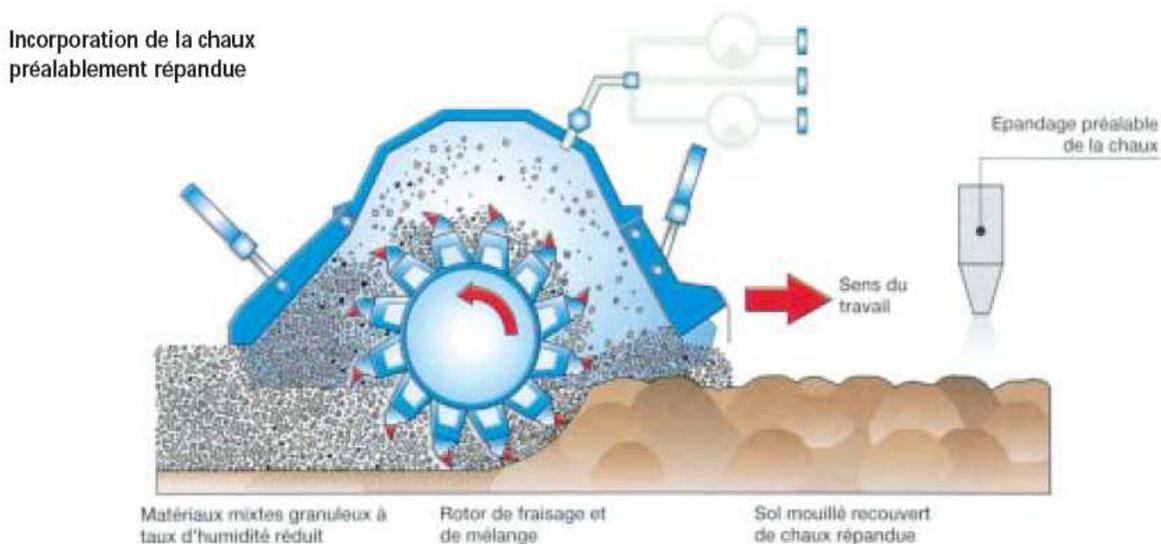


Figure.1.3 Procédé d'Incorporation de la chaux

1.3 Traitement au ciment

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont a priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique, stabilité à l'eau et au gel.

Le ciment rigidifie rapidement le sol de manière irréversible mais s'il y a rupture de l'horizon traité (action mécanique) il n'y a pas de nouvelle prise.

La prise au ciment est plus rapide que celle à la chaux (qui évolue encore au bout d'un an) ; mais elle est stoppée par le gel.

Les constituants hydratés du ciment relient les grains de sable entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, d'où l'augmentation de la portance, des résistances mécaniques et de la résistance au gel.

On utilise des ciments de classe 45 ; Les doses varient de 3,5 à 5 % du poids de sol sec à traiter.

La réussite des opérations suivantes exige un mélange de sol et d'eau idéal pour la bonne prise du ciment

1.3.1 Conseils de mise en œuvre

➤ Conditions climatiques

- Réaliser les travaux de préférence par temps sec.
- Contrôler la teneur en eau par temps chaud et/ou venteux. Les faibles températures (< 5°C) empêchent la prise du ciment et les fortes températures (>25°C) accélèrent la prise du ciment ; le délai de mise en œuvre est donc plus court.

➤ Malaxage

Deux familles d'engins peuvent être utilisées :

Engins à outils fixes :

- La charrue à disques avec 5 à 10 passes, accepte les blocs jusqu'à 250 mm avec une efficacité moyenne sur 10 à 20 cm de profondeur.
- Le soc peut être utilisé mais la qualité du malaxage est souvent trop faible.

Engins à outils animés : (préférable)

- Les bêches mécaniques avec 1 à 3 passes donnent la meilleure qualité de malaxage ;
- Le rotavator sous cloche malaxe une profondeur de 10 à 15 cm ;
- La rotobêche permet de travailler sur environ 15 à 25 cm ; son utilisation est limitée par les blocs rocheux ;
- Les herses rotatives,
- Les malaxeurs spécialisés tractés, pouvant travailler sur des profondeurs de 10 à 40 cm, sont de loin les plus adaptés.

➤ **Délai de mise en œuvre**

Le malaxage doit être terminé dans les trois heures, à compter du démarrage de l'opération. Ce délai est fonction des conditions climatiques, il est plus long par temps froid (4 à 6 heures) et plus court par temps chaud et sec (2 heures).

➤ **Compactage**

Le compactage est réalisé grâce à un rouleau vibrant ou/et à l'aide de plaques vibrantes en 5 à 10 passes suivant les profondeurs traitées et l'engin utilisé.

➤ **Réglage et compactage final**

Cette opération permet d'éliminer les irrégularités de surface et améliore la planéité du sol traité (Régler les derniers défauts de surface et passer le compacteur sans vibration)

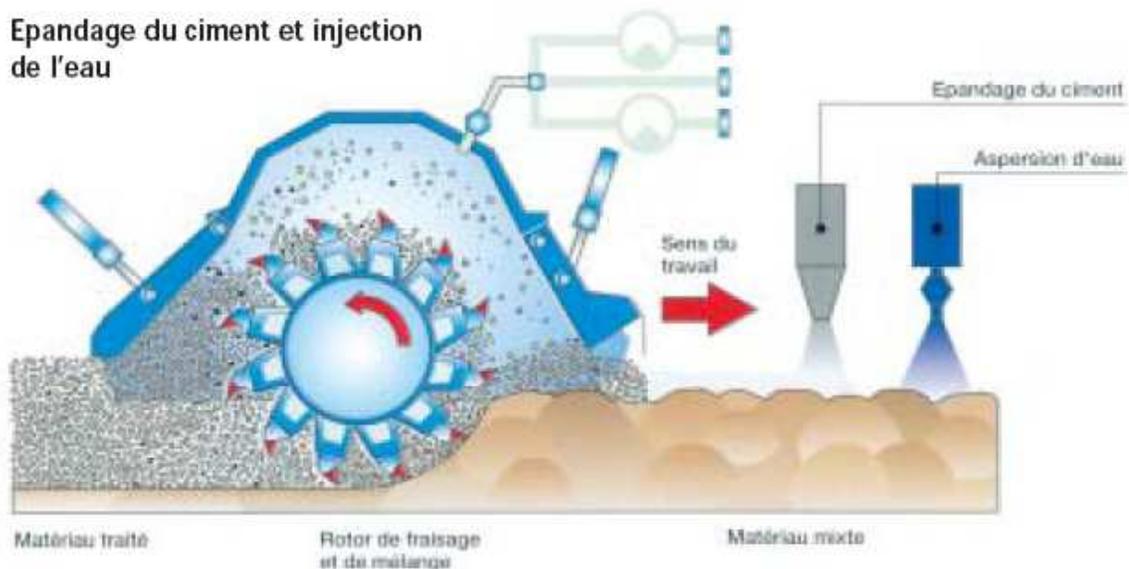


Figure 1.4 procédé d'Épandage du ciment

1.4 Traitement mixte (à la chaux et au ciment)

Dans le cas où le sol est humide (on préconise la chaux) et peu argileux (on préconise le ciment), on utilise d'abord la chaux à faible dose (0,5 à 2 %) et ensuite le ciment, ces liants ayant une action complémentaire.

Le traitement préalable à la chaux par son action immédiate amène le sol à un état optimal pour le traitement au ciment.

1.4.1. Limites d'utilisation

D'une part, il convient que le sol :

- Ne soit pas trop plastique (les sols à indice de plasticité supérieur à 30 peuvent poser des problèmes) car le malaxage est difficile

- Ne contienne pas de "cailloux " trop gros (maximum 40 à 50 mm) qui gênent le malaxage avec pulvi-mixer ou petits girobroyeurs.

D'autre part, il convient que :

- La teneur en eau ne soit ni excessivement élevée, ni trop basse pour que le traitement soit efficace, d'où l'importance des conditions climatiques durant le chantier.
- Le sol ait une bonne réactivité : certains micaschistes ne réagissent ni à la chaux ni au ciment; les sols organiques ne sont pas traitables au ciment sauf s'il y a destruction préalable à la chaux vive de la matière organique; les sulfures de fer inhibent le traitement à la chaux (cas des marnes pyriteuses).
- Le liant soit adapté au sol : la chaux est en général utilisée pour les sols " argileux " ou pour les sols limoneux à faible indice de plasticité. Le ciment est utilisé pour des sols non plastiques ou pour des sols préalablement traités à la chaux à faible dosage (traitement mixte).
- Le liant soit adapté au sol : "la résistance au gel est nettement meilleure avec le ciment qu'avec la chaux, aussi, pour les sols argileux, un traitement mixte chaux-ciment est préférable dans des régions soumises aux phénomènes de gel-dégel".

1.4.2. Méthodes de traitement et précautions d'emploi

Les sols relèvent essentiellement du traitement "en place". On incorpore le liant avec des engins agricoles ou mieux avec du matériel de travaux publics :

- Rotovator (profondeur de travail 12 à 15 cm)
- En cas de présence d'éléments grossiers : charrue à disques (profondeur 20 à 25 cm)
- Pulvimixer (30 à 35 cm)

Et on procède à un **compactage**, fondamental pour diminuer les vides et augmenter la durée de vie du matériau. Le traitement peut se faire en plusieurs couches si nécessaire.

Le traitement doit être précédé d'une étude en laboratoire pour définir si le sol a une bonne réactivité et déterminer les dosages de liant (après mesure de l'indice CBR immédiat et au bout de quatre jours qui donne des informations sur l'amélioration de la " portance ").

1.4.3. Les principaux essais à réaliser

Les principaux essais à réaliser sont :

- **La teneur en matière organique.** Si elle est supérieure à 2 %, on ne traite pas le sol, dans le cas contraire, on poursuit les essais par :
 - L'analyse granulométrique pouvant s'effectuer sur trois tamis (80 microns 0,5mm et 2 mm)
 - La teneur en eau
 - La densité apparente sèche (calculée à partir de la mesure de la densité humide et de la teneur en eau).
- **Les limites d'ATTERBERG**, ou, lorsqu'elles ne sont pas mesurables (sols très peu ou non plastiques), on procède aux mesures d'équivalent de sable (E.S.) qui donnent une indication sur la qualité des éléments fins.

Un sable pur a un E.S. = 100 et une argile pure a un E.S. = 0.

Limites d'ATTERBERG : mesure de la plasticité d'un sol.

- **Les essais PROCTOR** qui permettent le tracé de la courbe densité sèche/teneur en eau à la mise en oeuvre et la détermination de la teneur en eau correspondant à la densité maximale, appelée coordonnée de l'optimum PROCTOR. En cas de traitement au ciment, cet essai inadapté est remplacé par des mesures d'écrasement simple sur éprouvettes cylindriques à sept jours.

- **L'essai CBR** caractérisant la portance du sol (avant et après traitement).

Le chantier doit être surveillé pour s'assurer, en fonction du matériel utilisé, de la profondeur effective du malaxage, qui doit concerner au moins 20 cm d'épaisseur, et des conditions météorologiques : absence de vent, de gel et surtout de pluie. Des essais en cours de chantier sont également souhaitables, notamment, sur la teneur en eau et l'homogénéité de l'épandage et du mélange.

Dans le cas d'une route, une protection de la voie contre l'eau d'infiltration, sera assurée par un drainage latéral, à l'amont ou dans l'axe de la piste si elle a une largeur inférieure à trois mètres.

La protection, du sol traité à la chaux contre l'infiltration, est nécessaire si la couche de surface n'est pas mise en oeuvre immédiatement. De même, lorsqu'il y a une forte évaporation, le sol traité au ciment doit être protégé soit par la mise en oeuvre rapide de la couche de travail, soit par un produit de cure (émulsion de bitume en mono ou bicouche ou géotextile humidifié) pour les voies de circulation recevant une simple couche d'usure.

1.5 Traitement des sols à la chaux et aux cendres volantes

Mis à part le ciment et la chaux, d'autres produits tels que la chaux additionnée de cendres volantes, semblent être des stabilisateurs satisfaisants mais ils n'ont pas été très employés parce que leurs caractéristiques et leurs réactions, quand on les mélange avec des sols ne sont pas bien connues.

Les cendres volantes avec la chaux peuvent être une méthode compétitive du point de vue économique dans la stabilisation du sol si les cendres volantes sont bon marché et de bonne qualité. On peut obtenir des résistances à 28 jours, comparables à celles obtenues avec du sol-ciment.

Les cendres volantes sont un sous-produit des centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre. Elles sont considérées comme une pouzzolane artificielle et s'emploient comme telle, avec du ciment pour faire du béton ou dans le sol-ciment. Les cendres volantes ont été employées aussi avec de la chaux dans la stabilisation des sols.

L'intérêt de l'emploi des cendres volantes est dû au fait que la production atteint aux Etats-Unis 10 millions de tonnes par an, en Angleterre 4 millions et en France 3 millions. A mesure que d'autres pays s'industrialisent, on estime que la production des cendres volantes atteindra des chiffres semblables à ceux mentionnés plus haut.

Les cendres volantes sont efficaces à l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités (Bourokba, 2001). Elles permettent de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement. La réduction en valeurs de la pression de gonflement de deux sols indique que le gonflement des sols est empêché pour de petites valeurs de pression.

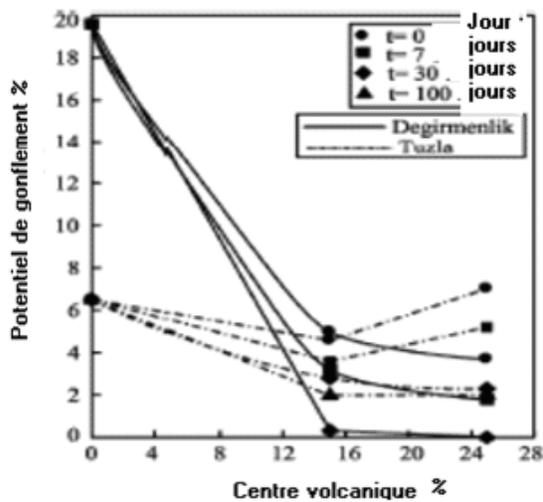


Figure 1.5 La variation du potentiel du gonflement en fonction des pourcentages des cendres volcanique et du temps, pour de deux sols.

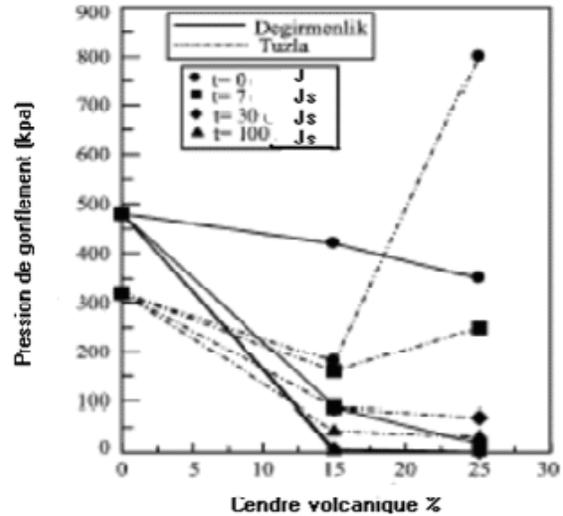


Figure 1.6 Effet des cendres volantes et du temps traitant sur les valeurs de pression de gonflement de deux sols.

Les facteurs influençant les résultats de ce traitement sont : type de chaux ; type de cendres volantes ; type de sol ; proportion et quantité de chaux et de cendres volantes ; relation humidité-densité-résistance ; effet de la puissance de compactage, effet de la température de traitement, effet de délai de compactage après addition d'eau dans le mélange ; effet de l'addition de produits chimiques ; étude de la modification des cendres volantes; effet de gel et de dégel ; comparaison avec d'autres méthodes de stabilisation des sols.

1.5.1. Types de chaux

Dans les études faites pour déterminer quelle est la chaux la plus efficace quand elle se combine avec des cendres volantes, on n'a employé que des chaux hydratées, parce que les chaux non hydratées sont très dangereuses à employer sur le chantier.

Parmi les chaux hydratées, on n'a employé que des chaux calcaires- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - et dolomitiques monohydratées - $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{MgO}$. La chaux dolomitique hydratée - $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$ - n'a pas été employée parce que, dans les études faites, on a prouvé qu'elle était très inférieure à la dolomitique monohydratée .

On ne peut tirer aucune conclusion sur le choix de la meilleure chaux. Dans une étude faite employant de la chaux et des cendres volantes sans sol, la chaux dolomitique monohydratée a produit en général des résistances 30% plus grandes que la chaux calcaire hydratée. Cependant, avec certaines cendres volantes, la chaux calcaire a produit des résistances plus grandes que la dolomitique. Dans des expériences faites avec des sols, la chaux dolomitique monohydratée donne en général des résistances plus grandes que le calcaire.

Les conclusions que l'on peut tirer de ces études sont que les cendres volantes que l'on veut stabiliser avec de la chaux doivent être essayées avec des chaux dolomitiques et calcaires si on les trouve dans la région. La période de traitement doit être de trois mois et la température doit être semblable à la température du chantier sur lequel on traitera le sol.

1.5.2. Types de cendres volantes

Les résultats obtenus de l'étude faite pour déterminer les caractéristiques d'une cendre volante de bonne qualité indiquent que :

- 1) La surface spécifique des cendres volantes est fonction de leur finesse et de la teneur en imbrûlés et par conséquent n'est pas un bon critère des qualités qui produisent la résistance ou la réactivité avec la chaux.
- 2) Les cendres volantes obtenues dans des centrales thermiques par les méthodes de précipitation sont plus fines et contiennent moins d'imbrûlés que les cendres obtenues par les méthodes mécaniques.
- 3) Le pourcentage en poids des cendres volantes qui passent à travers le tamis No. 325 donne une indication générale de la teneur des imbrûlés et de la quantité de matériel réactif.
- 4) La concentration moléculaire du contenu en $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ est en relation directe avec la résistance. On n'a pas trouvé de relations plus grandes entre la composition chimique ou physique des cendres volantes et leur réaction avec la chaux.

1.5.3. Types de sols

Les sols qui bénéficient le plus quand on les stabilise avec de la chaux et des cendres volantes sont les sols friables : sables ou les graviers de grains uniformes. Ces sols ne peuvent se stabiliser avec d'autres agents que si on améliore leur granulométrie. Cependant l'addition de chaux et de cendres volantes élimine la nécessité de changer la granulométrie.

Les sols limoneux et argileux répondent bien à la stabilisation avec la chaux et les cendres volantes. Cependant, les sols limoneux se stabilisent en général à meilleur marché avec du ciment et les sols argileux avec seulement de la chaux.

1.5.4. Propriétés et quantités de chaux et de cendres volantes

On n'a pas trouvé de relation générale entre le contenu de la chaux plus cendres volantes et la résistance des sols stabilisés. Les proportions dépendent du type de sol et des cendres qu'on emploie. Pour des sols friables, la quantité de chaux devrait être entre 3 et 6 pour cent et la quantité de cendres volantes entre le 10 et le 25 pour cent ; pour les sols argileux, la quantité de chaux devrait être entre 5 et 9 pour cent et la quantité de cendres volantes, entre 10 et 25 pour cent.

1.5.5. Relation humidité –densité- résistance

Les résistances maximales des mélanges sol-chaux-cendres volantes sont produites pour un contenu d'humidité pendant le compactage qui n'est pas nécessairement le contenu d'humidité optimale pour une densité maximale. L'humidité pendant le compactage pour la résistance maximale d'échantillons avec des sols sableux est du côté sec de l'humidité optimale. Dans des sols ayant une grande teneur en argile, l'humidité pendant le compactage est du côté humide.

Avec d'autres sols, tels que le sol friable, la résistance maximale et la densité maximale peuvent correspondre à la même humidité de compactage. Si on n'ajoute pas d'eau pendant le traitement, le contenu d'humidité pendant le compactage requis pour produire une résistance maximale change selon la période de traitement : plus la période de traitement est longue, plus grande est l'humidité.

1.5.6. Effet de la puissance de compactage

L'influence de la puissance de compactage est très importante. Par exemple, le fait de passer de la Standard Proctor à la Proctor modifiée augmente les résistances des mélanges sol-chaux-cendres volantes. L'augmentation de résistance obtenue est variable, mais est habituellement de 50 à 160 pour cent.

1.5.7. Effet de la température de traitement

La réaction entre la chaux et les cendres volantes est très sensible à la température de traitement. Avec des températures atteignant jusqu'à 22°C approximativement, la réaction se développe très lentement, et à des températures plus élevées, la réaction est rapide et proportionnelle à l'augmentation de la température.

La stabilisation du sol avec de la chaux et des cendres volantes devrait se faire au début de l'été pour profiter de la température élevée pendant le traitement.

Un haut contenu d'imbrûlés semble être un retardateur de la réaction chaux cendres volantes pour des températures de traitement à plus de 60°C.

1.5.8. Effet de délai de compactage après l'addition de l'eau dans les mélanges

Le compactage devrait se faire aussitôt que possible, après avoir mélangé et humidifié les mélanges de sol-chaux-cendres volantes ; sinon, la densité et la résistance peuvent être substantiellement abaissées. Avec des sols argileux, le compactage devrait se terminer au plus tard quatre heures après que le mélange ait été humidifié tandis qu'avec des sols sableux, le compactage peut être retardé jusqu'au lendemain du jour où on a humidifié le mélange sans perte appréciable de résistance.

1.5.9. Effet de l'addition de produits chimiques

47 produits chimiques ont été comme additifs dans des mélanges de sable-chaux-cendres volantes [(Mateos, 1958) ; (Davidson et al, 1959)] et postérieurement 12 autres produits chimiques [(Mateos, 1961 ; Mateos et Davidson, 1961)]. Dans ce travail, sont compris les produits qui avaient été prometteurs dans la première étude. Les résultats auxquels les travaux ont abouti permettent de conclure :

➤ La résistance immergée des mélanges peut être augmentée plusieurs fois au moyen de petites quantités de quelques produits chimiques. Le carbonate de soude, le métasilicate de soude et l'hydroxyde de soude semblent être les plus prometteurs parmi ceux qui ont été étudiés.

➤ La résistance immergée de sols friables stabilisés avec de la chaux et des cendres volantes peut-être aussi augmentée par l'addition de petites quantités de carbonate de soude, de soude et dans quelques cas, de chlorure de soude. L'augmentation de résistance apportée par l'addition de produits chimiques est très critique à des températures voisines de 0 C parce qu'elle peut permettre la stabilisation des sol-chaux-cendres volantes dans des conditions climatiques froides, ce qui permet de travailler plus tard dans l'année.

➤ Le gypse peut avec certains mélanges être un additif bénéfique.

Il faut utiliser avec prudence ces produits chimiques parce que leurs effets changent selon les types de sol, chaux et cendres volantes. Avant de les utiliser, on recommande de les étudier en laboratoire avec les sols, chaux et cendres volantes que l'on va employer.

1.5.10. Evaluation comparative

Quelques mélanges sélectionnés de sol, chaux et cendres volantes, ont été comparé leur résistance avec celle des mêmes sols stabilisés avec du ciment. Dans cette étude, sont comprises des épreuves de durabilité au gel et au dégel.

Les sols peuvent être stabilisés avec des cendres de bonne qualité et de la chaux. L'emploi de cette méthode de stabilisation est recommandé quand le prix de la chaux plus cendres volantes est inférieur au prix du ciment pour des résistances comparativement semblables au bout de 28 jours de traitement.

1.6 Stabilisation par ajout de sable

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'ajout de sable sur l'amélioration des performances des sols. Les sols concernés sont les argiles gonflantes et les matériaux fins présentant une certaine argilosité.

1.6.1 Stabilisation d'argiles gonflantes

L'étude sur comportement de l'argile de Black Cotton au sud de l'Inde sous forme de mélange avec le sable, et sous forme de couches a permis de constater que la pression du gonflement est réduite par le simple ajout de faibles pourcentages de sable. Plus le pourcentage de sable augmente, plus la réduction de la pression diminue (différence marquée à partir 50% de sable).

Par ailleurs, Mouraux (1969), a montré dans sa thèse que, si la couche gonflante est d'une grande épaisseur, de manière à ne pas pouvoir l'excaver complètement alors, il faut excaver jusqu'à une certaine profondeur puis, remblayer pour rétablir les conditions de pression initiale. Pour cela, souvent c'est le sable qui est utilisé. Le bas du remblai est faiblement compacté et ce pour deux raisons :

- Le haut du sol gonflant serait très compact, et par conséquent son potentiel de gonflement est élevé.
- Le bas du remblai peut alors « encaisser » un gonflement éventuel.

Une étude sur l'effet du compactage et la résistance au cisaillement de deux argiles de composition minéralogique différente mélangées avec le sable grossier à différents pourcentages a donné les résultats suivants :

- La granularité et la minéralogie influent sur la compactibilité des sols.
- La mise en évidence d'une limite granulométrique à 30% d'argile (70% de sable) correspondant à la meilleure compacité obtenue sous l'effet de l'énergie de compactage Proctor modifié.

Les résultats des essais de cisaillement ont montré que :

- La cohésion augmente avec le pourcentage d'argile.
- Le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de la quantité des fines dans les mélanges argile-sable et la variation est presque linéaire.

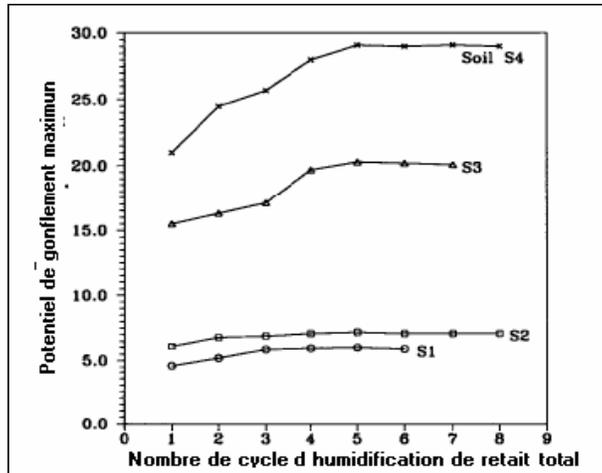


Figure 1.7 : Potentiel maximum du gonflement et le nombre des cycles pour le retrait total.

1.6.2 Amélioration des performances mécaniques de matériaux fins présentant une certaine argilosité

L'étude porte sur l'amélioration, par ajout de sable de dune, des performances d'un tuf calcaire ne remplissant pas les critères d'utilisation en assise de chaussée, en zone aride, pour un trafic moyen.

Le tuf

Le matériau est prélevé dans la région de Bechar (Sud Algérien). C'est un tuf calcaire friable (coefficient Los Angeles > 45%). La courbe granulométrique est à l'extérieur du fuseau de spécification relatif aux *encroûtements calcaires à ossature*. La fraction des fines ($\phi < 0.08$ mm) est supérieure à 40 %.

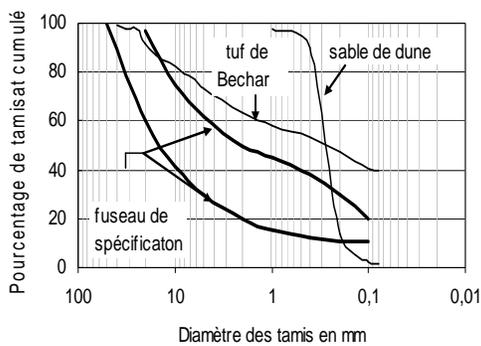


Figure 1.8 Courbes granulométriques du tuf de Bechar (Bouleghiout, 2002)

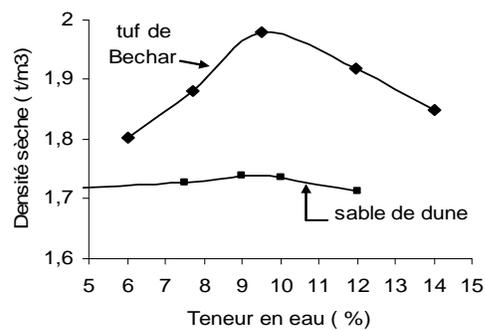


Figure 1.9 Courbes granulométriques du sable de dune (Bouleghiout, 2002)

Le sable de dune

C'est un matériau bien trié, mal gradué, dit « homométrique ». Le diamètre de ses plus gros éléments est de l'ordre de 1 mm. La fraction des fines est pratiquement nulle. Le coefficient d'uniformité $C_u = d_{60}/d_{10} = 1,5$. L'équivalent de sable est égal à 81,20 %, la valeur au bleu est de 0,1 et l'indice de plasticité est non mesurable. La courbe de compactage présente un optimum de $1,73 \text{ t/m}^3$ pour une teneur en eau optimale de 9,75 %.

Tout se passe comme si on compactait le tuf sans ajout à des énergies de plus en plus élevées.

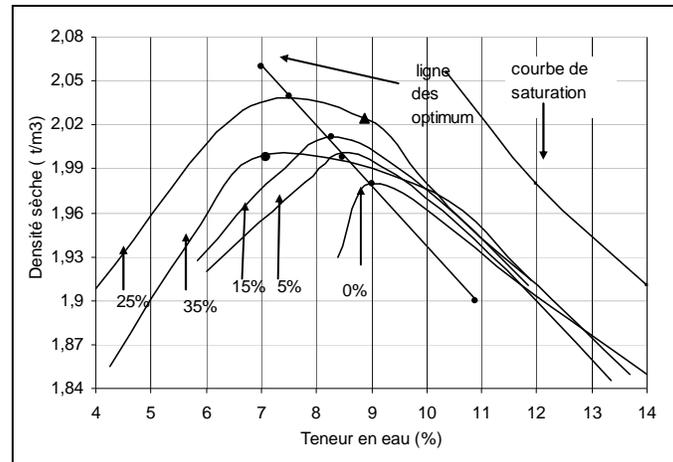


Figure 1.10 Courbes de compactage des différents mélanges à l'énergie Proctor modifiée (Morsli, 2007).

Les résultats des travaux ont montré que l'incorporation d'un sable de dune, à des taux variant de 5 à 35%, induit sur les caractéristiques de compactage des mélanges, des effets similaires à ceux provoqués par une augmentation de l'énergie de compactage sur un matériau donné: diminution de la teneur en eau optimale et densification du matériau. La portance, la résistance à la compression simple et l'aptitude au compactage s'en trouvent améliorées (Boukhiout, 2002).

Le taux optimal d'incorporation de sable de dune est estimé à 25%. A ce taux, on note : une réduction de 25 % de la teneur en eau de compactage; une augmentation de 30% de l'indice portant ; un module sécant supérieur à celui d'un tuf de référence quelles que soient les contraintes auxquelles le matériau est soumis. Les seuils d'utilisation imposés par la Technique Routière Saharienne sont ainsi atteints.

L'étude a permis d'asseoir que cette technique ouvre des perspectives prometteuses permettant de valoriser les matériaux locaux dans des régions où les matériaux classiques font défaut.

1.7 Stabilisation par solutions salines

Les sels sont des corps résultant de l'action d'un acide sur une base. Dans le domaine du génie civil, ils sont généralement utilisés pour lutter contre le gonflement de la formation argileuse, ils agissent sur l'équilibre de la pression osmotique et assurent une stabilisation des sols gonflants.

Des études ont été faites pour analyser l'effet des sels sur le gonflement libre des sols étudiés ; les échantillons ont été saturés dans une cellule oedométrique par des solutions salines à différentes concentrations. Ensuite le gonflement a été mesuré en fonction du temps jusqu'à stabilisation. Le gonflement final est comparé au gonflement final de l'argile saturée à l'eau. La réduction du gonflement final exprimée en pourcents est la différence entre les gonflements à l'eau et avec les solutions salines, rapportée au gonflement final en présence d'eau.

La réduction du gonflement est donnée par la relation :

$$\frac{DG}{G} = \frac{G_{\text{eau}} \% - G_{\text{sel}} \%}{G_{\text{eau}} \%}$$

Les paramètres qui déterminent le comportement gonflant des argiles sont déterminés par les essais d'identification soient : l'indice de plasticité, le pourcentage des particules argileuses, la valeur de l'essai au bleu de méthylène et la limite de retrait

1.7.1. Action de différents types des sels sur les caractéristiques des sols

Différentes études [(Aboubek et Aissa Mamoune, 2004) ; (Arabi et Djilali Merzoug, 2003)], ont permis de conclure que :

- Les sels augmentent la résistance du sol à l'érosion comme le carbonate de calcium ;
- Les sels déshydratent les argiles comme le chlorure de sodium et le chlorure de calcium mais le chlorure de calcium est plus efficace ;

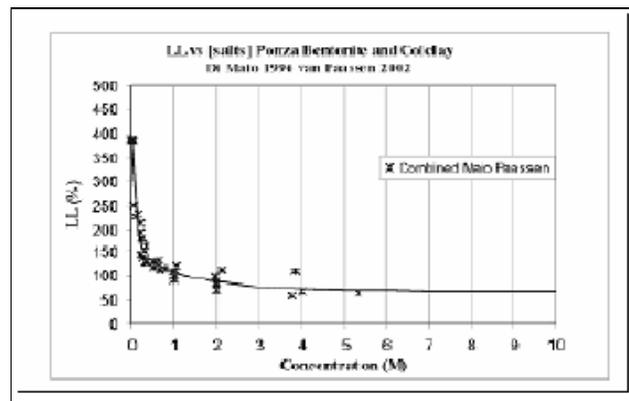


Figure 1.11 Diminution de la limite de liquidité de la bentonite en fonction de la concentration des cations monovalents

➤ Les meilleurs résultats peuvent être obtenus par l'association d'un sel de potassium (Kcl) et d'un polymère ;

Des travaux dans le but d'étudier l'influence des cation de Na^+ et Ca^{2+} sur la compressibilité du sol argile-silice sec et saturé permettent de dire que l'indice des vides est plus important dans l'échantillon riche en le sodium qu'à celui riche en calcium ;

La réduction de la limite de liquidité par les solutions salines avec l'augmentation de la concentration du sel est donnée dans la figure.1.11.

Les déformations dues au gonflement et au retrait sont influencées par la nature et la concentration en sel dissout dans l'eau déminéralisée. Il a été observé que le gonflement libre est plus élevé pour une solution de NaCl, plus faible pour une solution de KCl et intermédiaire pour une solution de $CaCl_2$.

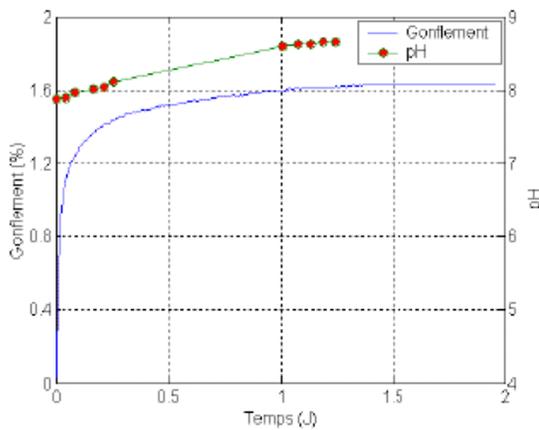


Figure 1.12 Gonflement et pH pour l'eau du robinet

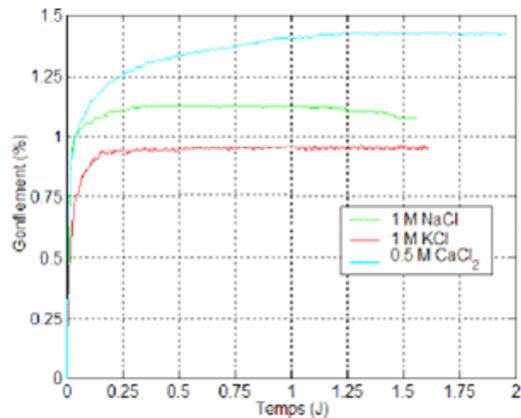


Figure 1.13 Influence de la valence des cations sur le gonflement

- La limite de liquidité est dénuée qu'à partir de la concentration de $C=0,1M$ du sel. L'augmentation des concentrations des sels monovalents, induit une diminution importante de la limite de liquidités (Kcl, Nacl). (La figure 1.14).

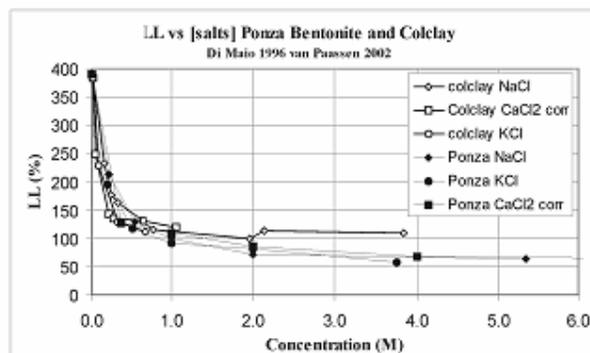


Figure 1.14 l'effet de sel sur la limite de liquidité

1.8 Stabilisation par des produits organiques

Les matériaux organiques sont utilisés depuis toujours dans la construction mais sont assez mal connus et surtout mal reconnus. Les bitumes, les matériaux composites, le bois, les liants routiers, les produits de réparation et de protection des bétons et des aciers, peintures, les géomembranes et les géotextiles utilisés en géotechnique, les équipements des ouvrages d'art (appareils d'appui, corniches, gaines de haubanage, etc.) ou de la route (murs anti-bruit, glissières de sécurité en bois, etc.), les adjuvants pour bétons spéciaux... tous ces matériaux ont en commun une origine chimique qu'on appelle «organique» pour signifier qu'ils sont constitués de carbone et d'hydrogène avec un peu d'oxygène, d'azote et quelquefois de soufre, voire d'oligo-éléments.

Les lignosulfates sont des stabilisants utilisés afin d'améliorer la tenue des matériaux fins en diminuant leur affinité pour l'eau, en enrobant leurs particules d'un film tensio actif. Ces produits sont des dérivés aminés tensioactifs, des résines associées à des agents durcisseurs ou des extraits de végétaux du type lignosulfonates ou lignosulfites. Ces additifs sont fournis sous forme de liquides, de pâte diluable ou de poudre dispersable. Ils ont une action d'imperméabilisation et/ou d'hydrophobation qui réduit l'imbibition par capillarité et par succion mais qui ne renforce pas les qualités mécaniques de sols intrinsèquement faibles. Ces solutions ont été appliquées dès la construction des premières routes sahariennes [(Fenzy, 1970) ; (Fumet, 1959) ; (Sierra R, 1959)].

Le lignosulfonate est le stabilisant testé dans notre partie expérimentale, en vu d'améliorer les performances d'un matériau fin, pour une utilisation en technique routière saharienne. Cet additif sera donc défini avec plus de précisions dans chapitre suivant.

1.9 Conclusions

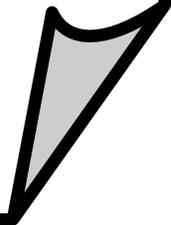
La stabilisation permet d'améliorer les performances des sols supports et d'élargir la gamme des matériaux utilisables en construction d'une manière générale et en technique routière en particulier.

L'Algérie, au vu de son vaste territoire, est appelée à construire de plus en plus de routes, parfois dans des zones arides ou semi arides où les matériaux classiques sont quasi inexistants. Ces derniers sont alors remplacés par des matériaux locaux dont les caractéristiques mécaniques ne répondent pas toujours aux exigences de la Technique Routière Saharienne.

Les techniques de stabilisations sont en pleine extension. L'industrie met sur le marché une grande variété d'additifs capables de répondre aux attentes des bâtisseurs. Toute la question est de savoir choisir des produits adaptés aux sols (ou matériaux) à stabilisés, à l'environnement et à l'économie.

CHAPITRE 02

STABILISATION DES SOLS SAHARIENS



2.1 Introduction

La nécessité de stabiliser un sol fin pour son utilisation en corps de chaussée est principalement dictée par le souci d'améliorer ses performances mécaniques. La question d'imbibition est généralement prise en charge par des dispositifs constructifs.

2.2 La chaussée saharienne

Selon la bibliographie consultée [(Fenzy, 1970) ; (Inal, 1980) ; (Boularek, 1989) ; (Benmoussa, 1994)], les routes, au Sahara, sont implantées en remblai de faible hauteur, cette disposition facilite le drainage et modifie favorablement la teneur en eau d'équilibre sous chaussée et les déblais sont évités car ils favorisent l'ensablement des chaussées.

Le principe d'une assise unique est souvent retenu ; son épaisseur varie entre 15 cm et 30 cm. Elle est réalisée, à chaque fois que c'est possible avec un matériau identique soumis à des normes strictes découlant de la Technique Routière Saharienne.

Lorsque les matériaux performants ne sont pas disponibles en quantité suffisante, les 10 cm inférieurs - jouant le rôle de couche de fondation - sont alors réalisés avec un matériau ayant des caractéristiques moins bonnes ; la structure de chaussée se présente alors selon le schéma de la typique représentée par la figure suivante :

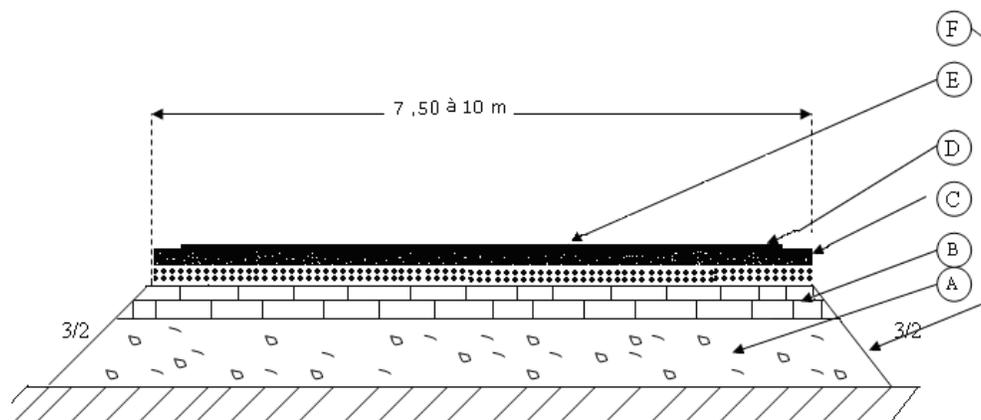


Figure 2.1 Coupe transversale type d'une chaussée saharienne (A) Les terrassements. (B) La couche de fondation. (C) La couche de base. (D) L'imprégnation. (E) Le revêtement

Mettant à profit les avantages qu'offre l'état de sécheresse de ces régions, des chantiers sont réalisés à base de matériaux locaux (tufs d'encroûtement, sable de dune, arènes granitiques, éboulis, limons, argiles...). Ces matériaux, dont les caractéristiques géotechniques et mécaniques s'éloignent des spécifications classiques exigées en zones humides, sont mis en place après humidification et compactage selon des techniques adaptées. Lorsqu'une ou plusieurs des performances exigées ne sont pas atteintes, on procède à une stabilisation

2.3 Exemples de réalisations

La stabilisation physico-chimique des matériaux sahariens a permis la réalisation d'un certains nombres d'ouvrages, le plus important reste la « routes des sables » et l'aérodrome de Tessalit.

En effet, le Sahara présente des conditions particulièrement favorables à une stabilisation physico-chimique :

- Longues distances et coûts très élevés des transports, qui font préférer, à l'emploi des produits routiers classiques, celui des produits plus élaborés, beaucoup plus actifs, mais utilisés en très faible proportion.
- Climat particulièrement sec et ou les précipitations abondantes, lorsqu'elles se produisent, sont rapidement évaporées.
- Sols favorables à ces procédés (toutes les gammes de sables plus ou moins pollués).
- Enfin, la monotonie de grandes zones qui permet la mise au point détaillé d'un procédé, et son utilisation sur de longs tronçons, avec de puissants moyens mécaniques.

Deux procédés ont été utilisés au grand Sahara ; Procédés qui à première vue, paraissent contradictoires mais qui se rapprochent beaucoup l'un de l'autre si on les examine plus en détail.

Les hydrophobants ont été utilisés dans l'aérodrome de Tessalit. Des produits hydrophiles dans le Gassi Touil, c'est-à-dire dans le couloir long de plus de 300 km, qui traverse, du Nord au Sud, le grand erg oriental pour réaliser la « routes des sables »

2.3.1 Cas de Tessalit

Il s'agissait de réaliser, en sable limoneux la couche de base de la piste d'envol. Une telle couche de base, lorsqu'elle est sèche et bien compactée est très portante. Revêtue d'un enrobé dense, elle supporte aisément, les roues des avions. Cependant, ce sable limoneux est très sensible à l'eau.

On pouvait craindre que la couche de surface, exposée à un soleil torride, se fissure et laisse passer l'eau de pluie jusqu'à la couche de base ce qui entraînerait immédiatement la ruine de la chaussée. On pouvait craindre en outre que la couche de base se réimbibe par remontées capillaires.

Pour empêcher cette imbibition, on a résolu de traiter la partie supérieure de ce sable limoneux avec un hydrophobant. Celui qui a été choisi est une amine spéciale à un dosage de un pour mille.

On a alors constaté soit sur chantier, soit sur éprouvettes, que le sol ainsi traité devenait moins sensible à l'eau que le sol initial : des éprouvettes du sol traités, immergées dans de l'eau pendant plusieurs mois conservent une résistance sensible. De plus l'eau pénètre difficilement dans ces sols traités et compactés et la pluie saharienne s'évapore avant d'avoir pu les imbiber.

Il est essentiel de remarquer que la cohésion de ces sols traités n'est pas due au produit ajouté ; bien au contraire ce produit réduit sensiblement la cohésion mais protège contre l'imbition.

2.3.2 Cas de Gassi- Touil : la route des sables

On a utilisé la technique de stabilisation au lignosulfite pour réaliser la couche de base de la route Hassi Bel- Hirane /Hassi Bel-Gebbour dite « route de sable », dans le Gassi Touil.

Le problème était différent du cas précédent. Tout d'abord il pleut très peu dans cette région (moins de 5 cm en moyenne par année). La prospection des matériaux a conduit à préconiser, pour la chaussée, la solution suivante :

- Couche de fondation en sable cohérent (sables limoneux ou même argileux).
- Au- dessus est placée une couche de base *en sable peu cohérent et à granulométrie étalée, comportant une certaine proportion de fines.*

Le matériau de la couche de base présente une *cohésion insuffisante* pour compenser le manque d'ossature tel que préconisé par la TRS. Le sable est alors traité sur ses 15 cm supérieurs avec 1 % de lignosulfite en poudre dans le but d'améliorer la cohésion.

Les courbes de la figure 2.2, tracées à partir des résultats d'essais de laboratoire, montrent un gain de résistance avec le temps de séchage mais aussi une résistance qui double dès l'incorporation d'1% de lignosulfite.

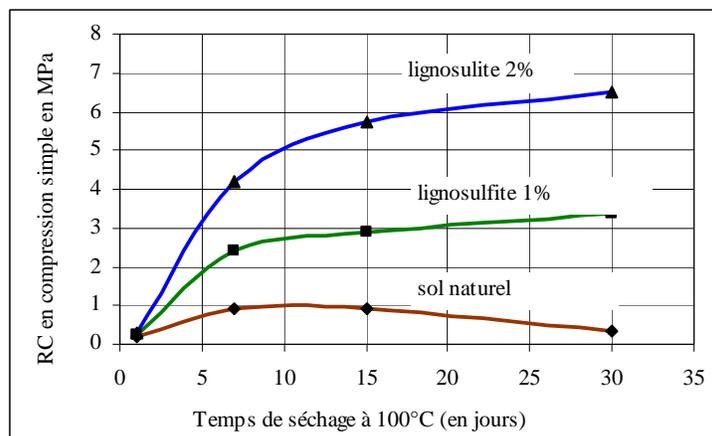


Figure 2.2. Résistance à la compression simple, obtenues après compactage et séchage, sur un sable peu cohérent de Gassi – Touil (13 % < 0.1 mm) à différents taux de lignosulfites (Peltier, 1959).

Le séchage donne à cette couche de base une bonne cohésion, surtout en surface, où le produit se concentre par évaporation et donne une croûte dure. Cette couche donne alors à la chaussée une portance suffisante pour supporter la circulation des lourds camions sahariens ; mais pour résister à l'usure, il est nécessaire de la revêtir par une couche de surface, qui dans la solution actuelle est en sand-asphalt, mais qui, dans les cas favorables, pourrait être remplacée par un enduit gravillonné mono ou bi-couche.

Des désordres apparurent deux ans environs après la mise en service. Sous forme de fissures longitudinales, partagent le revêtement en pavés qui finissent par se détacher. *La couche de*

base ne paraissait pas altérée ; on a constaté que le lignosulfite est concentré dans les 2 ou 3 cm supérieurs de la couche. Fenzy a attribué les désordres à la trop grande rigidité du tapis en sable enrobé, en égard à la souplesse de la structure sous-jacente et a estimé qu'un enduit superficiel aurait tenu (Fenzy, 1965).

Tests complémentaires

Deux points cependant, ont préoccupé les réalisateurs de ce projet

- 1) Une possibilité de migration capillaire du lignosulfonate dans les accotements, par suite de mise en solution après des pluies : bien que le produit est assez soluble dans l'eau, les mesures effectuées après une pluie nous ont tranquilisé : si le phénomène se produit ;il sera très lent, les pluies étant rares ,mais il faut noter que l'emploi de ce produit soluble en traitement de masse doit être réservé aux climats extrêmement secs. Dans le Sahara Septentrional, nous n'envisageront de l'utiliser éventuellement qu'accompagné d'un hydrophobant.
- 2) L'attaque éventuelle de ce produit organique par des micro-organismes des sols, phénomène qui a été relaté pour des sols stabilisés aux résines, il est vrai dans des climats humides.

Des études ont été entreprises à cet égard ; elles ont montré que les sables du désert ne sont pas exempts de micro-organismes, et que certains pouvaient vivre au dépend du lignosulfonate, mais des éprouvettes conservées en armoire bactériologique (à 25 °, à atmosphère humide) n'ont pratiquement pas perdu leurs résistance. On peut donc en conclure qu'avec les teneurs en eau de la chaussée (qui ne sont pas toujours négligeables), il n'y a rien à craindre.

En conclusion, il semble que la technique de stabilisation chimique ainsi décrite convienne bien au problème particulier qui était posé à Gassi Touil. Mais il faudrait se garder de l'extrapoler sous d'autres climats et même au Sahara central, avec d'autres sols, sans études préalables.

2.4 Etudes réalisées au laboratoire

L'étude présentée ci après est basée sur les résultats d'essais réalisés par l'Evébène dans les années 60, consignés dans un document appartenant au fond de documentation du Laboratoire des Travaux publics du Sud (LTTP sud).

Le matériau d'épreuve est un sable saharien, type Gassi-Touil.

Deux stabilisants ont été testés : le lignosulfite et La chromolignine.

La lignosulfite se présente comme une poudre de couleur marron foncé, de densité 0,5. Ses propriétés agglutinantes sont très importantes. C'est le résultat de la déshydratation des lessives acides bisulfiteques d'élimination de la lignine dans l'extraction de la cellulose du bois.

La chromolignine est obtenue grâce à la réaction d'oxydation sur la lignine sulfonée, (principal constituant du lignosulfite) qui provoque la transformation de celle-ci en une matière insoluble dans l'eau. Cette transformation est obtenue, dans notre cas, à l'aide de du bichromate de soude ; la réaction forme un gel de chromolignine insoluble qui devient en séchant un liant efficace pour la stabilisation des sols. Une proportion de 8 à 10% de bichromate par rapport au lignosulfite sec est nécessaire pour obtenir la transformation complète de ce dernier.

Le sol naturel, le sol stabilisé selon les deux méthodes ont été soumis aux essais suivants :

- i Essai Proctor modifié : Méthode S2 du Manuel du Laboratoire Routier de Mr Peltier.
- ii Essai d'écrasement à sec : Eprouvettes O : 2cm et H =4cm. Compactage Proctor modifié, séchage à 60°C pendant 36 heures selon la Méthode de la Technique Routière Saharienne, Fenzy)
- iii Essai de remontée capillaire : Méthode S 14 du Manuel du Laboratoire Routier.

Les courbes présentées dans cette étude ont été tracées par nos soins à partir de données extraites du document cité en référence.

2.4.1. Courbes Proctor modifié, sol naturel, sol+ lignosulfite

Les trois courbes de la figure 2.3 ont même allure avec un décalage des sommets des courbes des matériaux traités vers la gauche ; la densité sèche maximale restant quasi constante.

Sol naturel : $\gamma_d = 2.1$; $W_{opt} = 9.5\%$

Sol stabilisé : $\gamma_d = 2,0$; $W_{opt} = 8\%$

γ_d étant la densité sèche et W_{opt} la teneur en eau optimal Proctor

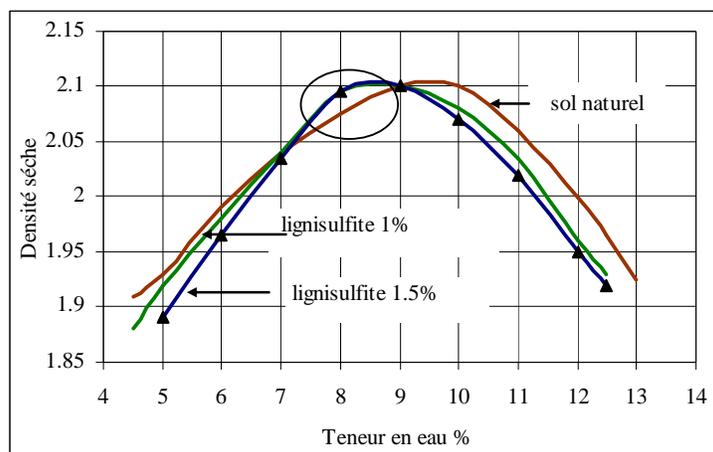


Figure 2.3 Courbes Proctor modifié du sol naturel, et du sol stabilisé respectivement avec 1% et 1.5% de lignosulfite (L'Évêbène, 1960).

2.4.2. Courbes Proctor modifié, sol naturel, sol + chromolignine

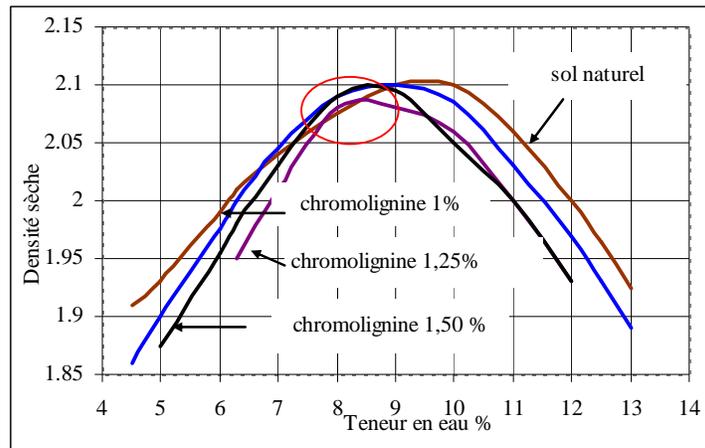


Figure 2.4 Courbes Proctor modifié du sol naturel, sol stabilisé respectivement avec 1% ; 1.25% et 1.50 de Chromolignine (L'Evébène, 1960).

Mêmes observation que dans le cas précédant ; on note cependant une baisse de la densité à 1.50% d'incorporation de chromolignine .

2.4.3. Résistance à la compression simple du sol stabilisé par les deux méthodes

Les essais comportaient les doses de 0.5 ; 0.75 ; 1 ; 1.25 et 1.50 de lignosulfite.

Les mêmes doses ont servi pour l'obtention de la chromolignine, l'humidification dans ce cas se fait avec la solution de bichromate dosée à 10% du poids sec du lignosulfite.

L'ajout de 1% de lignosulfite double la valeur de la résistance à la compression simple du sol naturel Au même dosage, avec l'ajout de la quantité adéquate de chromolignine, la résistance triple .

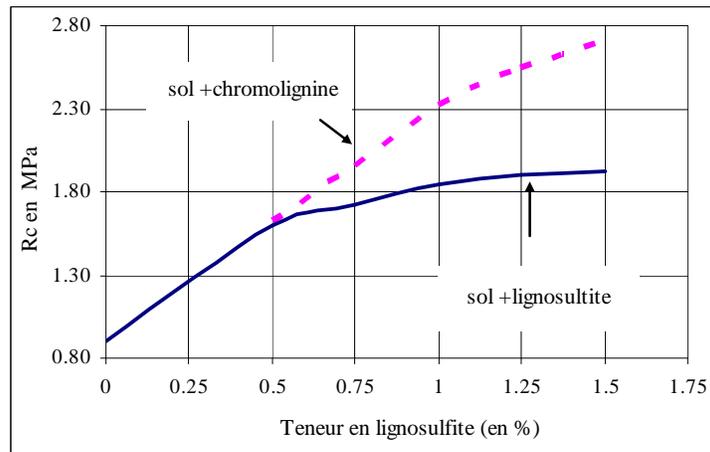


Figure 2.5 Résistance à la compression simple, obtenues après compactage et séchage, sur un sable type Gassi-Touil, stabilisé par ajout 1) de lignosulfite ; 2) lignosulfite + bichromate (L'Evébène, 1960).

2.4.4. Essais de remontée capillaire : sol naturel et sol stabilisé selon les deux méthodes

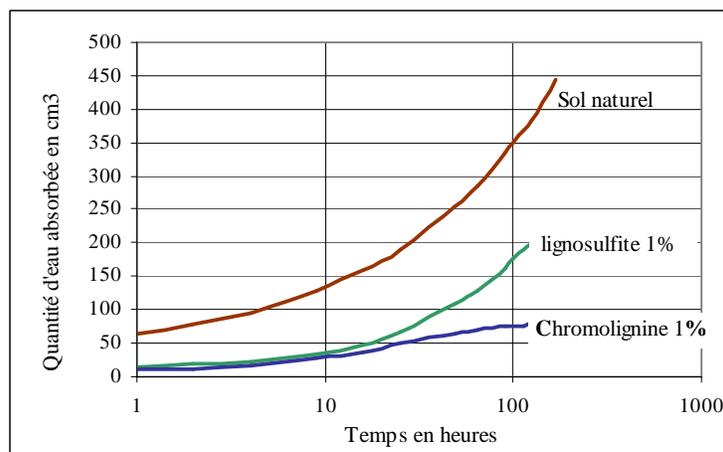


Figure 2.6 Quantité d'eau absorbée en fonction du temps par des éprouvettes :
1) de sol naturel ; 2) sol+ 1% de lignosulfite ; 3) sol + 1% de lignosulfite +0.1% bichromate
(L'Evêbène, 1960).

On note que les sols stabilisés s'imbibent plus lentement et moins que le sol naturel.

2.5 Proposition de mise en place sur chantier

2.5.1 Le lignosulfite

Après réglage et compactage du terrain naturel, considéré comme couche de base, la mise en place du lignosulfite peut être fait par son introduction dans les matériaux :

- Soit sous forme sèche. Selon le dosage choisi, par espacement des sacs de lignosulfite sur un cordon latéral, avant reprise au Travel-plan, épandage et nivellement du cordon traité, puis compactage.
- Soit sous forme d'une dispersion dans l'eau, pouvant varier de 15 à 25% de matière sèche de lignosulfite, selon la perméabilité des matériaux à compacter, par épandage sur la plate-forme.

2.5.2 Le chromolignine

1. Comme il est pratiqué pour les pistes sahariennes, on procède en premier lieu le lignosulfite sec dans les matériaux.
2. Dans l'eau nécessaire au compactage pour obtenir l'optimum Proctor modifié que l'on désire, on dissout la proportion convenable de bichromate de soude.
3. on répand cette solution sur la plate forme en formation, contenant déjà le lignosulfite.
4. on procède au compactage avec des rouleaux lourds.

Cette mise en place peut varier selon le matériel dont on dispose. Cependant, il faut que le compactage soit terminé avant la formation du gel de chromolignine pour obtenir la résistance mécanique maximum après séchage. En effet, au cours de sa formation, le gel de chromolignine augmente la plasticité du terrain, ce qui produit un effet analogue à celui d'un excès d'eau par rapport à Wopm, nuisible à l'efficacité du compactage.

Au cas où l'introduction du lignosulfite dans les matériaux serait faite sous forme d'une suspension aqueuse à 25% de matières sèches, la quantité d'eau dans ce but serait à déduire du volume total d'eau nécessaire à l'obtention de l'optimum Proctor ; le Bichromate serait donc à dissoudre dans le reste de l'eau à épandre avant le compactage pour atteindre cet optimum.

2.6 Conclusions et recommandations

Peltier, dans son article (Peltier, 1959) fait remarquer que :

« Le lignosulfite est un matériau à fort pouvoir collant (il en suffit de 1 % pour trouver de bons résultats à Gassi -Touil) ; il permet des écarts importants dans la qualité des sables à stabiliser d'où une appréciable facilité de chantiers.

Le lignosulfite est employé depuis longtemps déjà comme produit anti-poussière dans certains pays étrangers (Suède) ; mais ce sont les conditions particulières au Sahara qui ont permis ce nouvel emploi dans la masse.

Certains perfectionnements sont encore nécessaires et exigent de nouvelles recherches en laboratoire :

Le lignosulfite semble accroître d'une façon importante le retrait des sols, d'où une certaine fissuration des couches de bases, qui se transmet à la couche de surface sans grand inconvénient d'ailleurs, semble-t-il ; il serait toutefois intéressant d'étudier de plus près ces retraits et les moyens d'y remédier, afin de réaliser des chaussées monolithes et donc plus résistantes.

Il n'est pas impossible non plus que l'on puisse améliorer les lignosulfites ».

Fumet (Fumet, 1959) ajoute : deux points cependant, nous ont préoccupés au sujet de cette technique :

« Une possibilité de migration capillaire du lignosulfite dans les accotements, par suite de mise en solution après des pluies : bien que le produit soit en effet assez soluble dans l'eau, les mesures effectuées après une pluie nous ont tranquillisées : si le phénomène se produit, il sera très lent, les pluies étant rares, mais il faut noter que l'emploi de ce produit soluble en traitement de masse doit être réservé aux climats extrêmement secs.

Dans le Sahara Septentrional, nous n'envisagerions de l'utiliser éventuellement qu'accompagné d'un hydrophobant.

L'attaque éventuelle de ce produit organique par des micro-organismes du sol, phénomène qui a été relaté pour des sols stabilisés aux résines, il est vrai dans des climats humides. Des études ont été entreprises à cet égard ; elles ont montré que les sables du désert ne sont pas exempts de micro-organismes, et que certains pouvaient vivre au dépend du lignosulfite, mais des éprouvettes conservées en armoire bactériologique (à 25 °C, à atmosphère humide) n'ont pratiquement pas perdu résistance. On peut donc en conclure qu'avec les teneurs en eau de la chaussée (qui ne sont pas toujours négligeables), il n'y a rien à craindre ».

A. Ponton dans son article « construction des routes et de pistes en conditions sahariennes » à propos de Gassi- Touil a conclu :

« En raison du faible dosage nécessaire, le lignosulfite est le produit d'amélioration le plus économique actuellement connu : par ailleurs les doutes sur la durée de son efficacité

(notamment en raison de sa solubilité dans l'eau) n'ont été confirmés que très exceptionnellement par l'expérience ; son emploi est donc susceptible d'un grand développement dans le cas générale où l'action de l'eau n'est pas à craindre ou peut être efficacement contenue.

Son emploi est donc susceptible d'un grand développement dans le cas général où l'action de l'eau n'est pas à craindre ou peut être efficacement contenue ».

D'autres rapports plus récents ont été établis à propos de matériaux à cohésion moyenne avec stabilisation chimique (SCET - Coopération « rapport préliminaire sur les ressources en matériaux du premier tronçon Rhourde El Baguel- EL Borma »):

« Dans le cas du tronçon Rhourde El Baguel / EL- Borma la qualité médiocre des matériaux à fines calcaires ne permettra pas de les utiliser en couche de base tels quels ; il faudra très probablement recourir à une stabilisation chimique au lignosulfite ».

Aujourd'hui, alors que le développement de l'infrastructure routière dans le Sud Algérien est en pleine expansion, la question de la stabilisation physico-chimique, tombée dans l'oubli depuis quelques décennies, regagne de l'intérêt auprès des techniciens de la route. Des appels sont souvent lancés lors des congrès et séminaire pour «Relancer les recherches déjà entamées dans les années 60 de stabilisation physico-chimique des matériaux locaux » [(Bouzrara, 1996) ; (Bouzrara, 2006) ; (Domec, 1980) ; (Morsli, 2005) ; (1ier CAR, 2005)].

CHAPITRE 03

LIGNOSULFONATES ET LEURS UTILISATIONS

3.1 Introduction

Le lignosulfite cité dans notre bibliographie, utilisé pour stabiliser des matériaux dans le Sud Algérien, est un sous produit de l'industrie de la cellulose et fait partie de la famille des « matériaux organiques ».

Ce stabilisant n'étant pas disponible (à notre connaissance), nous avons porté notre choix sur un autre produit de la même famille le Lignosulfonate dont nous ferons une présentation dans ce chapitre avant de l'utiliser dans la partie expérimental.

3.2 Origine des lignosulfonates

La source naturelle de la lignine est le bois avec toutes ses variétés, c'est-à-dire la végétation. Elle est après la cellulose, la matière organique renouvelable la plus abondante à la surface de la terre.

L'existence d'un biopolymère différent des polysaccharides (cellulose) comme constituant essentiel des végétaux, fût pour la première fois mise en évidence par PAYEN en 1938.

Son rôle fut rapidement identifié comme étant celui du ciment végétal, qui, en association avec les hémicelluloses structure les végétaux dans la forme macroscopique que nous leur connaissons.

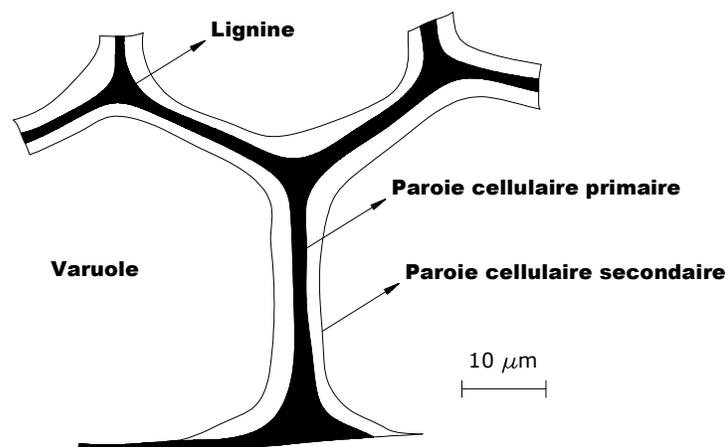


Figure 3.1 Localisation de la Lignine dans le tissu végétal

La teneur en lignine varie selon les espèces, elle est de 15% en poids de matière sèche dans la paille, elle peut passer à 20% dans le bois feuillu pour atteindre près de 35 à 40% dans le sapin Douglas.

La lignine est aussi présente, en quantité faible, dans la plupart des aliments concentrée et des fourrages jaunes.

Sa teneur croît avec l'âge des fourrages, et peut atteindre 12%. De la même façon, la structure des lignines varie selon l'origine des bois et l'âge de la matière première considérée.

3.3 Méthode de délignification

Par délignification, on entend méthode de séparation entre lignine et polysaccharides (cellulose) à partir des tissus végétaux; chez nous c'est l'alfa qui est la source principale de la cellulose.

Tous les procédés de délignification industriels dépendent du procédé utilisé dans l'industrie de fabrication de "pâte à papier". En effet, la délignification n'est qu'un petit montage industriel greffé dans un procédé de fabrication de pâte à papier; il est donc inconcevable de trouver une délignification isolée d'un procédé d'obtention de la cellulose.

La délignification est effectuée en milieu acide ou basique en présence de soufre, dans plusieurs types de procédés; la lignine étant dissoute, quelque soit le procédé, elle ne peut être récupérée d'usine de papeterie, et ainsi on peut obtenir quatre types de lignines:

1) kraft -lignines

C'est un procédé Allemand (Kraft = fort), ce procédé permet d'obtenir des pâtes qui donnent du papier de haute résistance.

2) sulfo-lignines

Il s'agit de lignines récupérées par le procédé de délignification au bisulfite (NaSO_3) en milieu acide.

3) lignines organosolves

Cette technique est très ancienne, elle a été formulée pour la première fois par KLEINERT.

4) soda-lignine

Ce procédé est spécifique aux pays de l'Afrique du Nord et du sud de l'Espagne. C'est en effet une technique de fabrication de la cellulose utilisant l'alfa comme matière première.

La délignification de l'alfa se fait par attaque à la soude caustique chaude. Cette technique est utilisée par les unités de la "CELPAP" de Baba-Ali, de Mostaganem et de Saïda, donnant une "demi-pâte" et une liqueur noire qui est rejetée quotidiennement dans les rivières et ailleurs.

La pâte cellulosique extraite est traitée ensuite à travers différentes étapes (chloration, sodation, purification et blanchiment) pour donner de la cellulose.

Les lignosulfonates ont un grand usage, notamment dans les domaines pharmaceutique, chimie du bâtiment, routes, agriculture, etc.

On peut citer à titre d'exemple quelques produits, où les lignosulfonates rentrent dans leurs fabrications :

Alimentation animale ; céramique ; Réfractaires, tannage ; panneaux aggloméré engrais, les émulsifs utilisés en technique routière.

Dans ce chapitre, on ne citera que les utilisations de lignosulfonates dans le domaine de génie civil, et notamment dans le béton (superplastifiant) et les sols (stabilisant).

3.4 Utilisation de lignosulfonates comme superplastifiant

Un superplastifiant fait partie de la catégorie des adjuvants appelés «réducteurs d'eau» qui servent à diminuer la quantité d'eau nécessaire au mélange de béton. Des réducteurs d'eau normaux, à base d'acides lignosulfoniques, d'oxacides carboxyliques ou d'hydrates de carbone traités peuvent réduire d'environ 10 à 15 % les besoins en eau. L'utilisation de plus grandes quantités pour réduire davantage la quantité d'eau entraîne des effets néfastes sur la prise, le contenu d'air, le ressuage, la séparation et le durcissement. Les superplastifiants sont chimiquement différents des réducteurs d'eau normaux et peuvent réduire d'environ 30 % les besoins en eau. Ils possèdent diverses appellations: superplastifiants, superfluidifiants, super réducteurs d'eau. Depuis leur première apparition au Japon il y a environ 15 ans, ils ont servi à produire plusieurs millions de mètres cubes de béton. Pour la seule construction du stade olympique de Montréal, 5000 éléments de béton ont été préfabriqués en y incorporant des superplastifiants.

Les superplastifiants sont classés en quatre groupes, soit les condensats nitrés de mélamine-formaldéhyde (SMF), les condensats nitrés de naphthaline-formaldéhyde (SNF), les lignosulfonates modifiés (MLS) et les autres, y compris les esters des acides sulfoniques, des hydrates de carbone, etc. Chaque catégorie comporte des variations et certaines formules peuvent renfermer un second élément. La plupart des données disponibles concernent cependant les adjuvants à base de SMF ou de SNF. Il s'agit de composés solides ou sous forme de solutions aqueuses.

Les avantages d'un béton de bonne ouvrabilité font qu'il est mis en place rapidement et facilement. Un béton raisonnablement ouvrable peut s'obtenir en utilisant une forte proportion de ciment tout en conservant le rapport normal ciment-eau ou en augmentant la quantité d'eau tout en n'ajoutant que la quantité normale de ciment. Les deux méthodes entraînent cependant la séparation, un retrait excessif, l'apparition d'une chaleur nuisible et des effets néfastes à long terme.

L'avènement des superplastifiants a permis d'obtenir un affaissement de plus de 200 mm par opposition à un affaissement de 50 mm, et ce avec des dosages de 0.3 à 0.6 %. Quelques minutes après l'incorporation du superplastifiant, le béton commence à couler facilement et se met automatiquement de niveau. Il conserve sa cohésion et ne présente pas de ressuage, de séparation ni de perte de résistance nuisibles. Un béton de ce genre s'appelle béton fluide ; pour obtenir de meilleurs résultats, on utilise des ingrédients très fins.

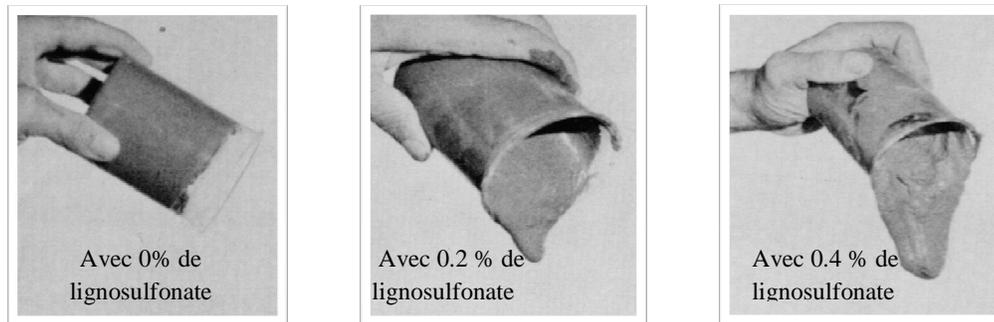


Image 3.1 Effet des plastifiants sur la fluidité de la pâte de ciment (rapport eau/ciment:0.3)
(www.Irc.nrc.gc.ca/pubs/cbd,1997)

La fluidité obtenue en ajoutant 0.3 % de superplastifiant au ciment composé d'un rapport eau-ciment de 0.3. ; Sans adjuvant, la pâte de ciment ne s'écoule pas, avec, elle coule comme un liquide. L'incorporation d'un réducteur d'eau normal (0.2 ou 0.4 % de lignosulfonate) entraîne, d'un autre côté, la formation d'une pâte de ciment visqueuse.

Remarques

Il y a longtemps que les techniciens du béton rêvent de découvrir une méthode qui permette de fabriquer du béton avec le plus faible rapport eau-ciment possible tout en conservant une excellente ouvrabilité. L'avènement des superplastifiants a en grande partie satisfait ce rêve. Ils ont en effet ajouté de nouvelles possibilités à l'application des adjuvants et ont rendu possible la production de béton dont la résistance à la compression est de l'ordre de 90 MPa.

Les superplastifiants ont d'autres applications possibles. L'économie de l'énergie et la rareté grandissante des matériaux bruts de haute qualité rendront de plus en plus nécessaire l'utilisation de ciments et d'agréats de qualité inférieure. Dans ces cas, l'utilisation des superplastifiants peut permettre de produire, avec de faibles rapports eau-ciment, des bétons suffisamment forts pour satisfaire aux exigences normales de qualité. Le nombre des éventuels domaines d'application des superplastifiants est littéralement illimité. Mentionnons par exemple la production de béton avec cendres volantes, de béton de ciment laitier, de mélanges composés de divers types de fibres, et de béton léger. De plus, l'effet dispersant des superplastifiants ne se limite pas au ciment portland et peut s'appliquer à d'autres types de ciment.

3.5 Les lignosulfonates comme abat-poussières et autres usages

Les émulsions de bitume, les huiles paraffiniques et les solutions de lignosulfonate d'ammonium sont principalement utilisées sur les routes forestières.

Le lignosulfonate d'ammonium forme une croûte qui lie les particules fines à la surface de la chaussée granulaire. Il peut présenter des performances intéressantes par temps sec sur des routes où le débit journalier est inférieur à 150 passages de véhicules.



Image 3.2 *Traitement d'une chaussée forestière.*

De plus, le produit est biodégradable et hydrosoluble. Son efficacité est fortement réduite après nivelage, contrairement aux produits hygroscopiques, dont le rendement peut être rétabli, en période de sécheresse, par un simple arrosage à l'aide d'un camion-citerne

3.5.1 Dépoussiérage des routes non revêtues

Les lignosulfonates lient les particules par une combinaison d'interactions chimiques et physiques.

L'utilisation de ces lignosulfonates comme dépoussiérants est fort répandue, mais pas autant que les chlorures de calcium et de magnésium.

Les produits de résine se vendent sous différents noms. L'élément de base des résines est le lignosulfonate. Ces produits donnent les meilleurs résultats lorsqu'ils sont mélangés au gravier de surface dans des conditions arides ou semi-arides pour se lier dans la couche supérieure aux éléments fins au bas ou à mi-chemin de l'échelle granulométrique. Comme dans le cas de la plupart des dépoussiérants solubles, il est peut probable que ces produits puissent éliminer efficacement la poussière pendant une deuxième année, mais il peut être possible de réduire la fréquence des applications à cause de l'effet résiduel.

Certains produits commerciaux de cette catégorie présentent une texture poisseuse, dégagent des odeurs et ont un fini peu attrayant. Ils peuvent ne pas convenir à certains endroits.

En résumé, les lignosulfonates comme dépoussiérants ont une durée de vie utile de six mois et donnent les meilleurs résultats lorsque les matériaux de surface ont une teneur élevée en éléments fins et présentent un indice de plasticité élevé dans des conditions arides.

3.5.2 Conditions d'application

Les dépoussiérants donnent les meilleurs résultats lorsque les matériaux routiers sont humides au moment de l'application. Les chlorures et les lignosulfonates devraient être appliqués vers la fin du printemps, après les pluies saisonnières, lorsque les matériaux de la couche de roulement et de la couche de base sont encore humides.

Le choix des quantités à appliquer dépend du type de gravier, de la circulation et de la période pendant laquelle on veut supprimer la poussière. Les fournisseurs des produits livrent également des recommandations générales quant aux quantités à appliquer. L'expérience permettra de tirer le meilleur parti de ces recommandations.

Certains dépoussiérants, tels que les chlorures et les lignosulfonates, sont solubles dans l'eau et ne conviennent donc pas dans les régions où les précipitations sont abondantes.

3.6 Conclusion

Les lignosulfonates sont utilisés principalement comme fluidifiant pour béton et abat poussière pour chaussées non revêtue.

Dans le cadre de notre travail, nous testerons ce produit (appartenant à la même famille que lignosulfite) comme stabilisant de masse, des matériaux fins, en zone aride.

CHAPITRE 04



ETUDE EXPERIMENTALE

المخبر المركزي للأشغال العمومية
LABORATOIRE CENTRAL DES TRAVAUX PUBLICS



L.C.T.P



Granitex



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

4.1 Introduction

L'étude consiste à étudier et comparer les performances de trois sols stabilisés à l'aide de lignosulfonate.

4.2 Plan du travail

L'étude s'est déroulée en quatre étapes :

- 1) Identifications des trois sols nommés échantillons N1 ; N2 et N3 : Analyse chimique, Granulométrie, Limites d'Atterberg, Equivalent de Sable, Essai au Bleu de méthylène, Présentation du stabilisant.
- 2) Détermination du taux optimal du lignosulfonate sur l'échantillon N° 1 en tenant compte des spécifications retenues pour l'utilisation des matériaux fins en Technique routière saharienne (20 bars pour la résistance à la compression simple).
- 3) Etude de l'influence du lignosulfonate, incorporé au taux retenu en deuxième partie, sur les caractéristiques des deux autres sols (N2 et N3). L'analyse porte principalement sur Résistance à la compression simple.
- 4) La sensibilité à l'eau des échantillons traités : remontées capillaires, séchage, retrait, limites d'Atterberg.

Les éprouvettes testées ont été confectionnées dans des moules cylindriques de 10cm de hauteur et 5 cm de diamètre. Elles ont été compactées à la teneur en eau optimale, à 100% de la densité sèche maximale retenue dans l'essai de Proctor modifié. Le compactage est statique.

Les essais en compression simple, ont été réalisés à la presse de triaxial, à la vitesse d'écrasement de 1 mm/mn. Les pressions exercées sur l'échantillon sont relevées à des pas de déformation constante. Une courbe Pression-déformation est tracée ; la résistance de rupture correspond au pic de la courbe.

Les essais de Proctor modifié ont été réalisés avec Le moule CBR, selon les Normes en vigueur.

Ces essais ont été réalisés au Laboratoire Central de Travaux Publics (LCTP) et au laboratoire de MDS de l'ENP.

Remarque

Vu l'importance de la notion d'argilosité citée dans la littérature, les limites d'Atterberg et la limite de retrait sont étudiées sur l'échantillon présentant le plus d'argile (N° 2), avec différents pourcentages d'incorporation de lignosulfonates (0.5 ; 1 et 2%).

4.3 Etude d'identification

Dans cette paragraphe nous identifions les sols à traités (N1 ; N2 et N3).

4.3.1 Présentation des échantillons



Image 4.1 Les sols utilisés dans l'étude

4.3.2 Analyses chimiques

Le but de cet essai est de déterminer la nature chimique des échantillons choisis. Cette étape étant importante dans l'identification des matériaux locaux utilisés en construction routière. Il s'agit entre autre de quantifier la teneur en calcaire (CaCO_3) et gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$).

L'analyse chimique donne les compositions quantitatives élémentaires du matériau :

- **Sulfate** : s'obtient par la précipitation du sulfate de baryum (BaSO_4) dans le filtrat provenant de l'attaque à chaud par l'acide chlorhydrique à 10%.
- **Chlorure** : sont déterminés par dosage volumétrique à l'aide de la solution de nitrate d'argent.
- **Carbonate de calcium** : déterminés à partir du volume de CO_2 dégagé par attaque de l'acide chlorhydrique.

Tableau 4.1 Composition chimique des trois sols

| Constituants chimiques | Pourcentages des constituants (%) | | |
|--|-----------------------------------|----------------|----------------|
| | Echantillon N1 | Echantillon N2 | Echantillon N3 |
| Calcaire (CaCO_3) | 37.5 | 10 | 69.83 |
| Gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) | 11.61 | traces | traces |
| Chlorure (NaCl) | 0.585 | 0.29 | 0.12 |
| Gaz carbonique (CO_2) | 16.5 | 4.4 | 30.72 |

4.3.3 Analyse granulométrique [NF P 18-560]

L'essai d'analyse granulométrique permet de reconnaître les constituants du sol en étudiant la taille de ses particules et de déterminer le pourcentage des différentes tailles de particules constituant le sol afin de pouvoir établir la courbe granulométrique qui nous donne pour chaque diamètre d , le pourcentage des particules de dimension inférieur ou égale à d (diamètre des grains passant).

L'échantillon N1 et N3 étant des matériaux friables et sensibles à l'eau, et pour éviter le durcissement du sol, cette partie a été faite par voie humide après une immersion totale pendant 24 heures, afin de séparer les particules agglomérées. La granulométrie de l'échantillon 02 a été faite par voie sec selon la norme en vigueur.

Echantillon N1

tableau4.2 Tamis utilisés et pourcentage de chaque dimension des grains de l'échantillon N1

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Tamis (mm) | 50 | 31.5 | 20 | 10 | 5 | 2 | 1 | 0.4 | 0.2 | 0.08 |
| Tamisât (%) | 98.59 | 98.28 | 98.13 | 97.00 | 96.10 | 74.54 | 49.43 | 27.42 | 4.27 | 2.34 |



Image 4.2 Séparation des grains de l'échantillon N1 par voie humide

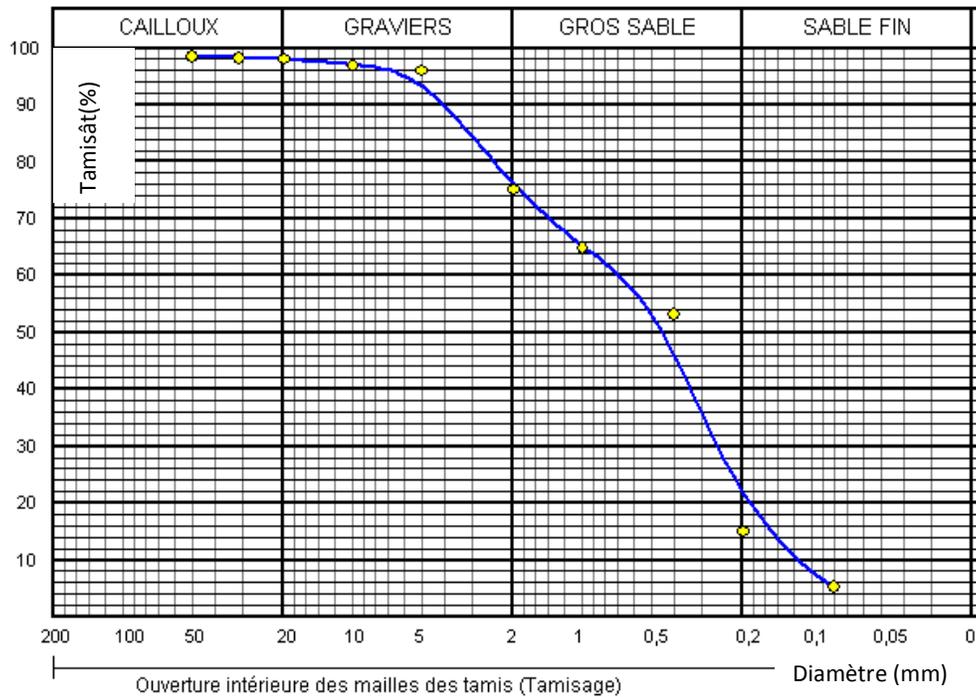


Figure 4.1 Courbe granulométrique de l'échantillon N1

Echantillon N2

tableau4.3 Tamis utilisés et pourcentage de chaque dimension des grains de l'échantillon N2

| | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tamis (mm) | 5 | 2 | 1 | 0.400 | 0.200 | 0.100 | 0.080 |
| Tamisât (%) | 99.37 | 96.69 | 85.93 | 52.62 | 26.36 | 5.90 | 3.21 |

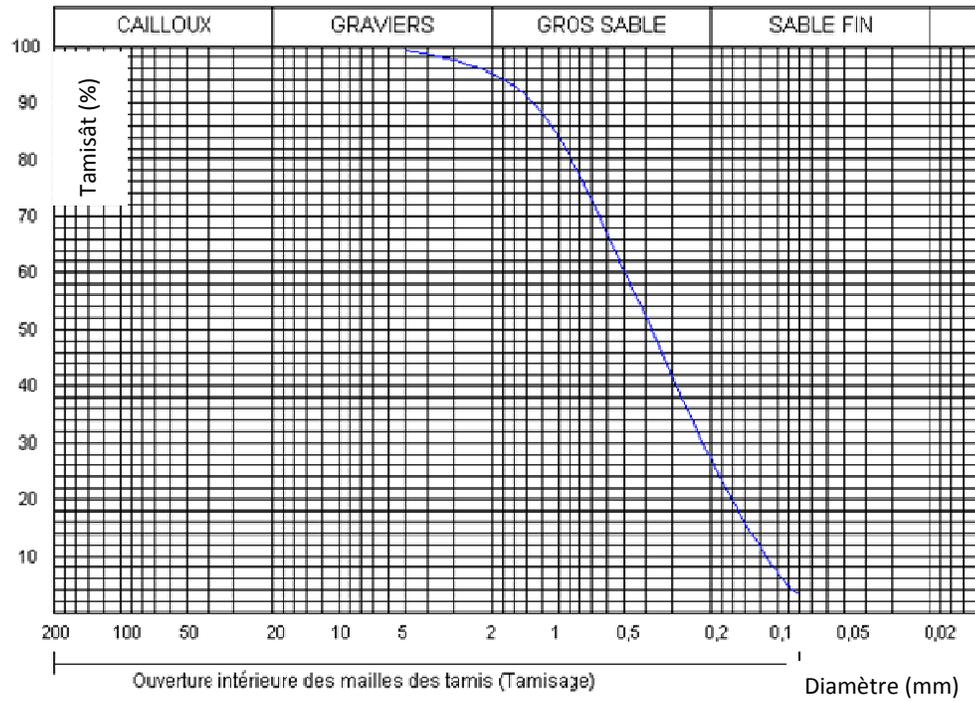


Figure 4.2 Courbe granulométrique de l'échantillon N2

Echantillon N3

Tableau 4.4 Tamis utilisés et pourcentage de chaque dimension des grains de l'échantillon N3

| | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Tamis (mm) | 12.50 | 4.00 | 0.200 | 0.08 |
| Tamisât (%) | 62.00 | 34.00 | 20.00 | 07.48 |

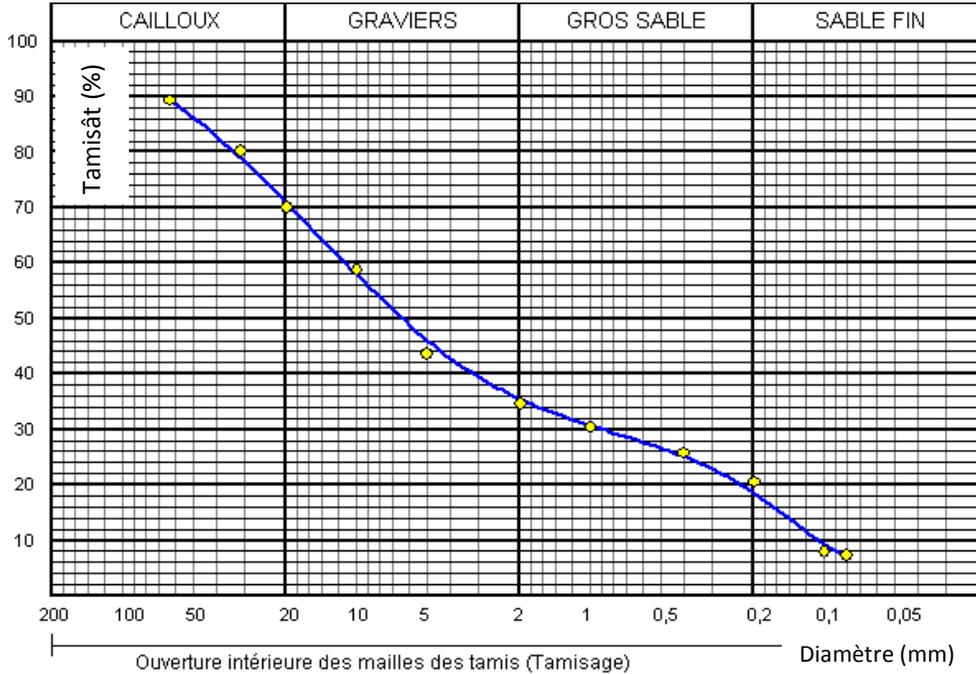


Figure 4.3 Courbe granulométrique de l'échantillon N3

4.3.4 Limites d'ATTERBERG [NF P 94-051]

Le comportement d'un sol varie dans des proportions importantes en fonction de sa teneur en eau. Pour une valeur élevée de la teneur en eau, le sol se comporte à peu près comme un **liquide** ; c'est de la boue: les forces de cohésion ne sont pas assez importantes pour maintenir les particules en place.

Quand la teneur en eau diminue, vient la phase **plastique** ; on peut encore modeler la terre sans qu'elle s'effrite, elle conserve sa forme.

Puis on ne peut plus modeler la terre: elle se fendille au cours du travail: c'est la phase **solide**.

On peut encore subdiviser cette phase solide. Lorsque la quantité d'eau demeure relativement importante, la pellicule d'eau qui enveloppe les grains repousse ces grains et augmente le volume apparent ; de sorte que, si l'on sèche un tel sol, il y aura **retrait**. Tandis que, pour une teneur en eau encore plus faible, l'eau ne repoussera plus les particules du sol, et le volume sec sera égal au volume humide: ce sera la phase **solide sans retrait**.

Les teneurs en eau qui correspondent au passage de l'un à l'autre de ces états sont respectivement :

- ❖ La **limite de liquidité** ω_l
- ❖ La **limite de plasticité** ω_p
- ❖ La **limite de retrait** ω_r

On appelle **indice de plasticité** la différence $I_p = \omega_l - \omega_p$. C'est l'étendue de l'intervalle pendant lequel on peut " travailler " le sol.

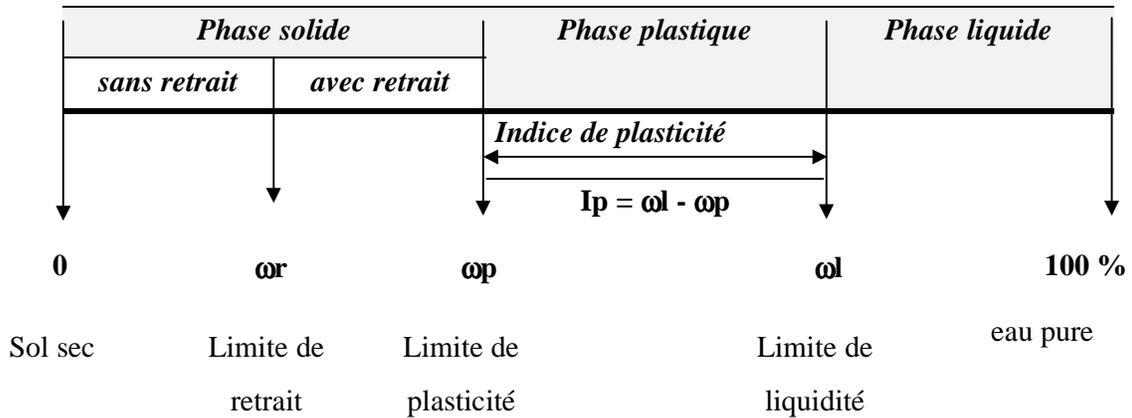


Figure4.4 Les différents états physiques d'un sol en fonction de la teneur en eau.

Le matériel utilisé est ; l'appareil de **Casagrande (figure.4.5)**, un outil à rainurer, coupelle métallique (calotte sphérique) qui tombe de **10 mm** sur un socle en bois de dureté bien déterminée.

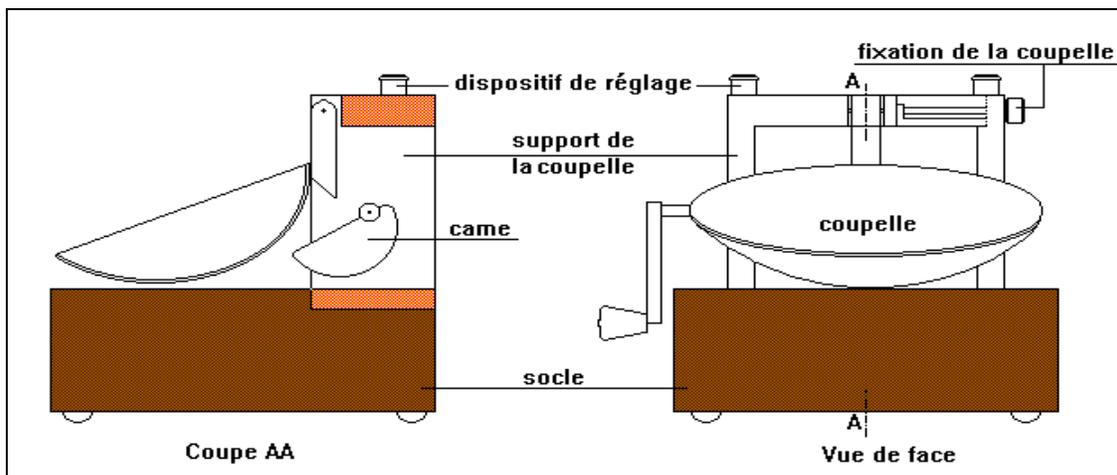


Figure.4.5 L'appareil de Casagrande

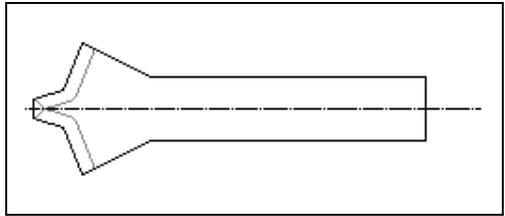


Figure.4.6 Outil à rainurer

Les limites d'ATTERBERG se mesurent sur les matériaux routiers contenant beaucoup d'éléments fins inférieurs à 80µm.

L'essai est réalisé par la fraction du matériau passant au tamis de 0.4 mm

▪ Echantillon N1

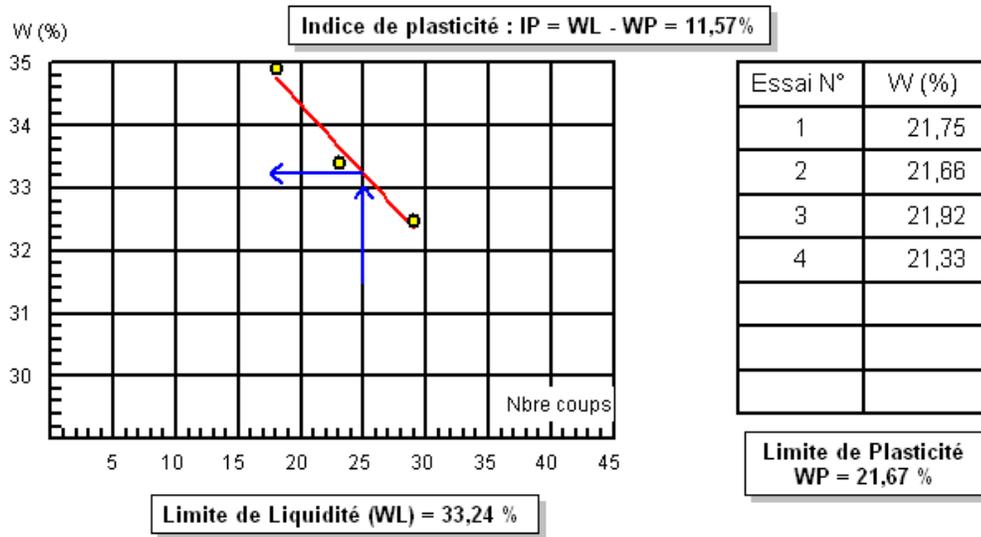


Figure.4.7 Limites d'Atterberg de l'échantillon N1

▪ Echantillon N2

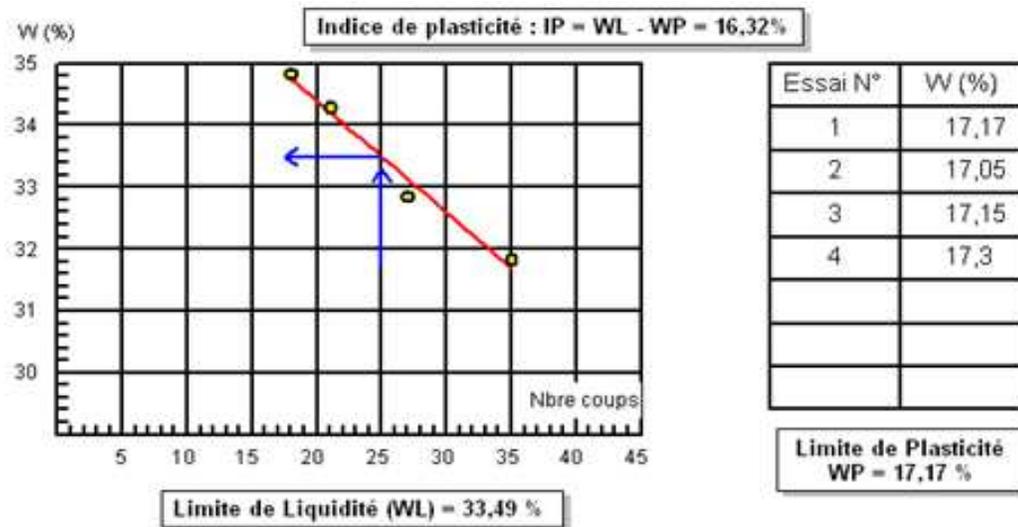


Figure.4.8 Limites d'Atterberg de l'échantillon N2.

On résume les résultats de cet essai dans le tableau suivant :

Tableau 4.5 Limites d'Atterberg des trois échantillons

| | Echantillons | | |
|------------------------|--------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Limite de liquidité % | 33.24 | 33.49 | 32.22 |
| Limite de plasticité % | 21.67 | 17.17 | 16.17 |
| Indice de plasticité | 11.57 | 16.32 | 16.05 |

- Plasticité des trois échantillons ; moyenne plasticité ($10 < IP < 20$).

4.3.5 Equivalent de sable [NF P 18-598]

L'essai est réalisé sur la fraction granulométrique passant au tamis de 5 mm, il consiste à mettre dans une éprouvette contenant un floculant de la fraction 0/5 mm du matériau en question.

L'équivalent de sable ES est donné par la formule suivante : $ES = h_1/h_2$

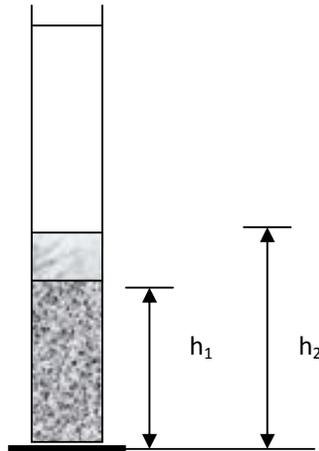


Figure.4.9 Eléments d'équivalent de sable

Après avoir subi une agitation mécanique dans le sens de sa longueur pendant 20 mn, l'éprouvette est mise en position verticale, sans perturbation pour décanter. Enfin, on mesure la hauteur 'h₁' du sédiment et du floculant 'h₂'.

Pour les trois échantillons, l'ES vaut :

Tableau 4.6 L'équivalent de sable des trois sols

| | Echantillon 1 | Echantillon 2 | Echantillon 3 |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| ES (%) | 19 | 37.07 | 22.38 |



Image 4.3 Equivalent du sable de l'échantillon N1

Pour une valeur de l'ES au-dessous de 20, l'essai perd sa signification, par exemple l'échantillon N1 fait croire qu'il est argileux, ce qui n'est pas vrai, d'où l'intérêt de l'essai au bleu.

4.3.6 Essai au bleu de méthylène [NF P 18-592]

L'essai est réalisé sur la fraction 0/0.2 mm, il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire à la saturation des particules argileuses en suspension dans l'eau et en permanence agitation. La valeur de bleu VBs est la quantité de bleu méthylène absorbé par 30 g de matériau.

Tableau 4.7 Valeurs de VBs des trois sols

| | Echantillon N1 | Echantillon N2 | Echantillon N3 |
|------------|----------------|----------------|----------------|
| VBs (ml/g) | 0.33 | 1.03 | 0.90 |

D'après les résultats de cet essai, le VBs des échantillons N2 et N3 est compris entre 0.5 et 1, donc ils sont pollués et contient de l'argile. Par contre l'échantillon N1 est pauvre en argile.

Cet essai confirme les résultats de l'essai de limites d'Atterberg.

4.3.7 Présentation du stabilisant

Le produit utilisé est un superplastifiant à base de lignosulfonate, élaboré par la société **GRANITEX**, il porte le nom commercial : **MEDAFLUID 40**

Les caractéristiques sont :

- Formeliquide
- Couleurmarron
- ph.....8/9
- Densité1.19±0.01
- Teneur en chlore..... < 1 g/L
- Extrait sec40 %



Image 4.4 Lignosulfonate utilisé

4.4 Détermination du taux optimal du lignosulfonate (Sol N° 1)

Le taux optimal du lignosulfonate à incorporer dans un sol donné est le fruit de plusieurs considérations technico-économiques. Dans une première approche, la détermination du taux optimal sera basée sur les points suivants : l'amélioration de la cohésion à sec et l'aptitude du matériau au compactage.

Dans le cas de la construction des chaussées en zone aride et semi aride, la résistance à la compression simple recommandée par les spécifications pour l'utilisation des matériaux fins est de 20 bars. Nous garderons cette valeur comme seuil à atteindre.

L'incorporation du lignosulfonate se fera sur le sol N1 aux taux suivants : 0.5 ; 1 et 2%.

Nous étudierons tour à tour l'influence de cette incorporation sur les caractéristiques de compactage (teneur en eau, densité sèche, allure de la courbe) et la cohésion à sec (résistance en compression après compactage et séchage).

4.4.1 L'influence du lignosulfonate sur les caractéristiques de compactage

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

On compacte des échantillons de sol dans un moule normalisé, en adoptant diverses valeurs de teneur en eau.

Pour chaque essai, on détermine la masse volumique apparente correspondante, puis on porte les résultats sur un graphique, et on trace une courbe passant au mieux par les points trouvés.

L'abscisse du maximum de cette courbe représente **la teneur en eau optimale ω_{opt}** , et son ordonnée **la masse volumique apparente sèche optimum ρ_{max}**

On utilise un moule dit moule PROCTOR et une dame

Le moule, C'est un tube métallique cylindrique, ouvrable en deux demi-coquilles que l'on peut fixer sur une base, et muni d'une hausse

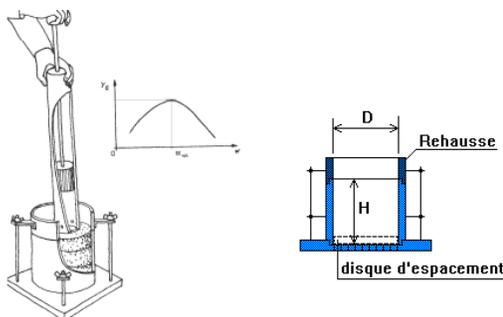


Figure.4.10 Le moule et la dame PROCTOR



Image4.5 matériel d'essais de Proctor et CBR

Dans le tableau suivant, on résume les résultats obtenus

Tableau4.8 Caractéristiques de Proctor modifié du sol naturel, et du sol stabilisé respectivement avec 0.5%,1% et 2% de lignosulfonate.

| | Sol naturel | Sol+lignosulfonate | | |
|---|-------------|--------------------|-------|-------|
| | | 0.5 % | 1% | 2% |
| Densité sèche maximale t/m ³ | 1.87 | 1.84 | 1.88 | 1.91 |
| Teneur en eau optimale % | 14.90 | 14.70 | 14.10 | 13.40 |

On représente les valeurs précédentes sous forme de graphes suivants ;

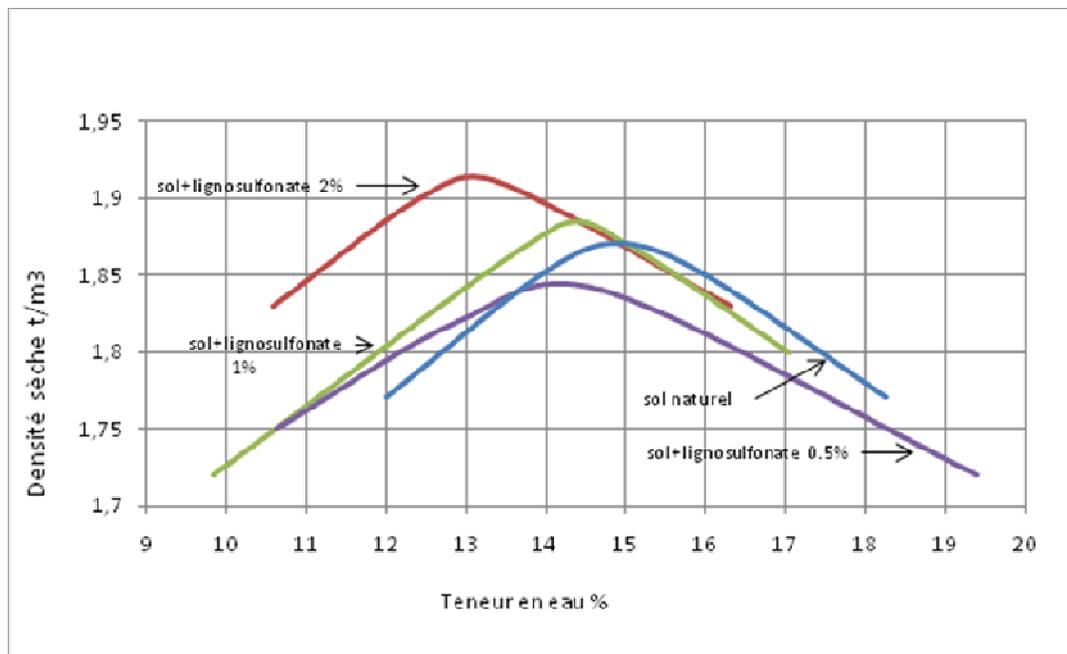


Figure.4.11 Courbes Proctor modifié du sol naturel, et du sol stabilisé respectivement avec 0.5%,1% et 2% de lignosulfonate

Tableau 4.9 l'effet du lignosulfonate sur les teneurs en eau optimales de Proctor modifié (sol N1)

| Lignosulfonate | 0% | 0.5% | 1% | 2% |
|--------------------|------|------|------|------|
| $\omega_{opm}(\%)$ | 14.9 | 14.7 | 14.1 | 13.4 |

On représente les résultats du tableau précédent sous forme de graphe suivant :

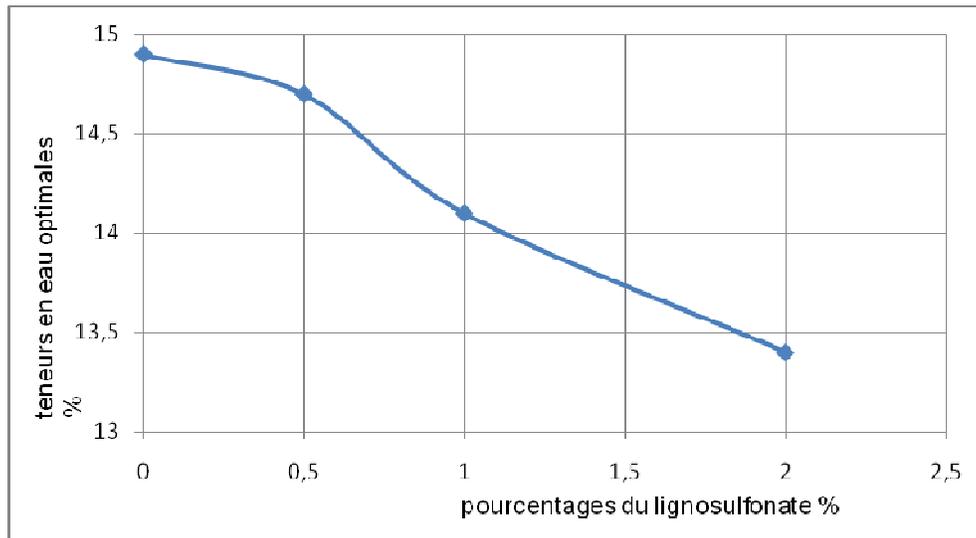


Figure.4.12 Teneur optimum de PROCTOR modifié en fonction de la teneur en lignosulfonate.

Tableau 4.10 L'effet de la teneur lignosulfonate sur la densité sèche.

| Lignosulfonate | 0% | 0.5% | 1% | 2% |
|---------------------------------|------|------|------|------|
| $\gamma_{d \max}(\text{t/m}^3)$ | 1.87 | 1.84 | 1.88 | 1.91 |

- Les courbes de la figure 4.11 sont décalées vers la gauche (par rapport à la teneur en eau optimale Proctor) au fur et à mesure que le taux d'incorporation augmente. Ainsi la teneur optimale en eau s'en trouve diminuée. Cette diminution, relativement au sol non traité, atteint son maximale (10%) pour les 2% du lignosulfonate, Voir tableau 4.10 et figure 4.12.
- Les densités semblent évoluer d'une manière non ordonnée : la densité du sol à 0.5% est inférieure à celle du sol naturel. Le sol traité aux autres taux (1 et 2%) présente des densités plus grandes que celles du sol non traité. On remarquera toute fois que la variation de la densité, dans tous les cas est comprise entre -2 et 2% (tableau 4.10).
- L'allure des courbes n'est pas affectée par l'ajout du stabilisant (même sensibilité de la densité sèche maximale vis-à-vis de la teneur en eau optimale) ; Pas d'aplatissement important des courbes figure 4.11.

4.4.2 L'influence de lignosulfonate sur la résistance à la compression (Sol N°1)

Déroulement des essais

Les échantillons sont confectionnés à partir du sol N° 1.

Les teneurs en lignosulfates sont celles du paragraphe 4.41 : (0.5 : 1 et 1%).

Les éprouvettes sont compactées aux teneurs en eau déterminées en 4.4.1 à 100% de la densité sèche maximum de l'essai Proctor modifié.

Les échantillons ainsi confectionnés sont gardés dans une étuve ventilée, chauffée à 50°C.

Les essais d'écrasement se sont effectués au triaxial avec une vitesse d'écrasement de 1 mm/mn. à différentes durées de conservation : immédiat, 2 jours et 4 jours.



Image4.6 Préparation des éprouvettes



Image4.7 Eprouvette du sol naturel étuvé à 48 h



Image4.8 Le matériel de l'essai de compression simple (la cellule et la presse de triaxial, le moule de confection des éprouvettes)

Résultats d'essais

- ❖ Le sol naturel
 - Ecrasement immédiat

Le sol naturel n'a donné aucune résistance à l'écrasement immédiat.

- Ecrasement à 2 jours

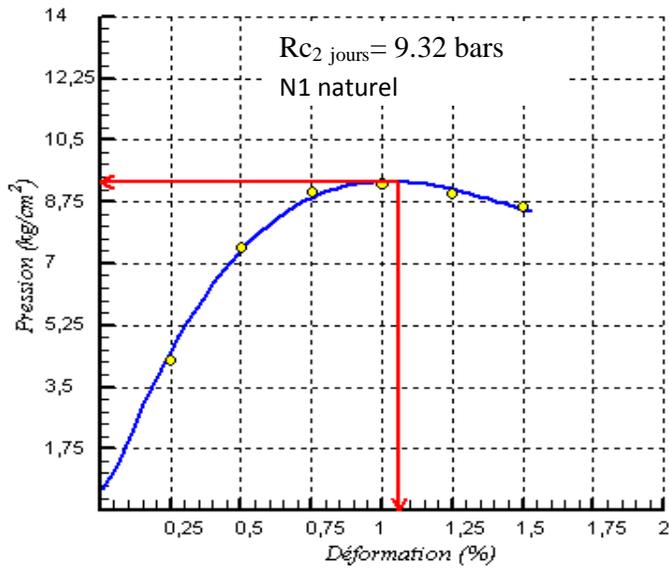


Figure.4.13 courbe contraintes/déformation du sol N1 naturel à 2 jours

Image4.9 Eprouvette écrasée du sol N1 naturel à 2 jours

- Ecrasement à 4 jours

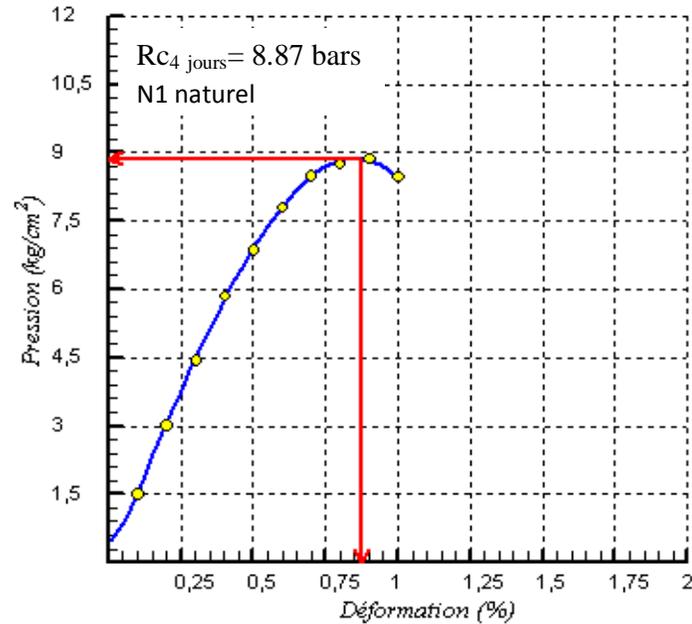


Figure.4.14 courbe contraintes/déformations du sol N1 naturel à 4 jours

Image4.10 Eprouvette écrasée du sol N1 naturel à 4 jours

Le sol plus 0.5% lignosulfonate

- **Ecrasement immédiat** :Ce sol n'a donné aucune résistance à l'écrasement immédiat.
- **Ecrasement à 2 jours**

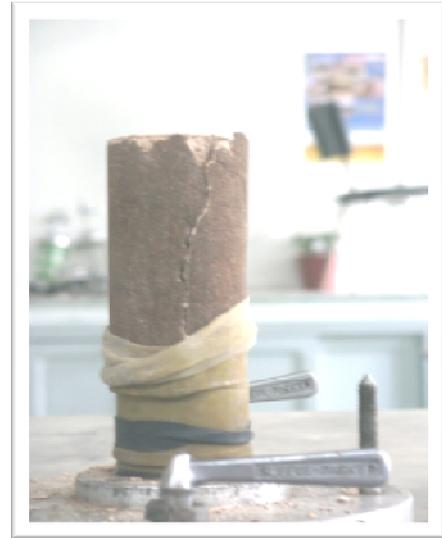
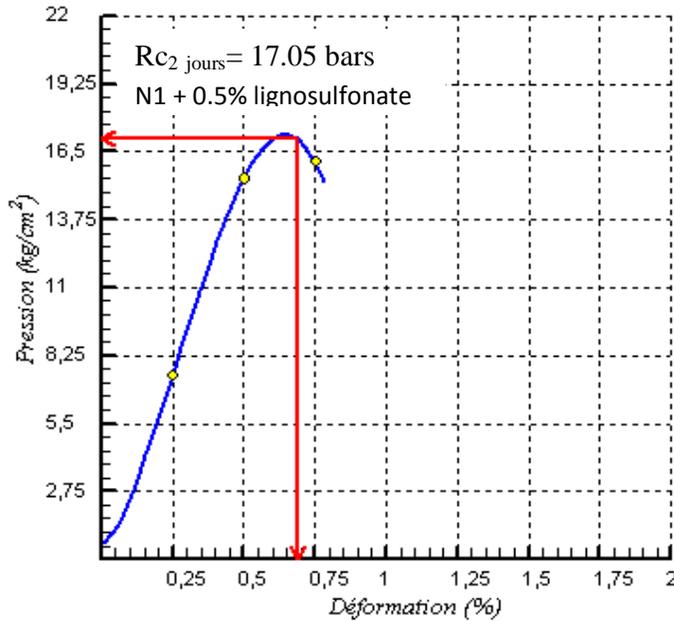


Figure.4.15 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 0.5%ligno à 2 jours

Image4.11 Eprouvette écrasée du sol N1 avec 0.5%ligno à 2 jours

- **Ecrasement à 4 jours**

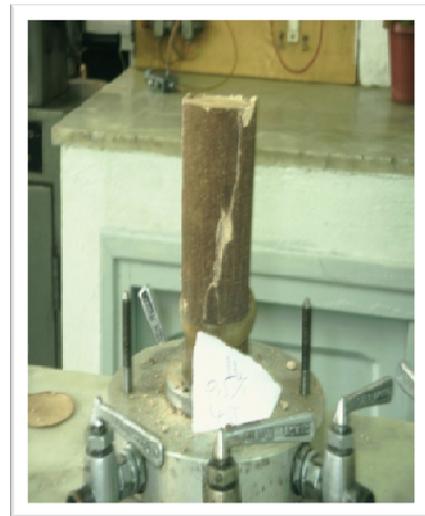
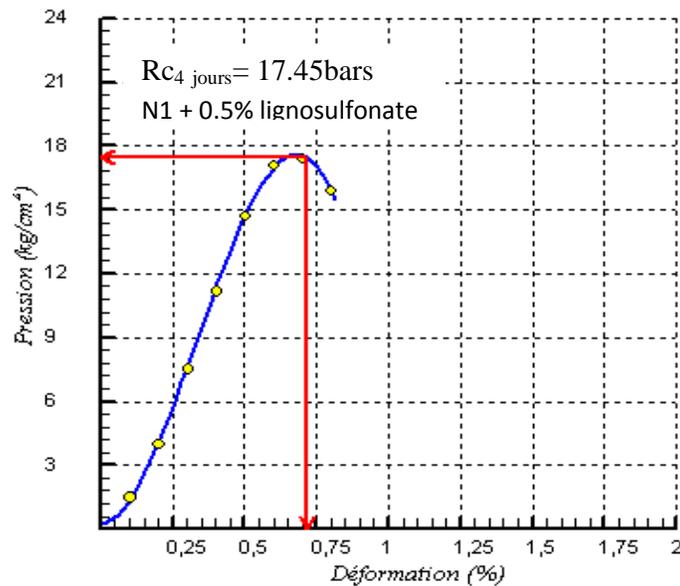


Figure.4.16 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 0.5%ligno à 4 jours

Image4.12 Eprouvette écrasée du sol N1 avec 0.5%ligno à 4 jours

Le sol plus 1% de lignosulfonate

▪ **Ecrasement immédiat**

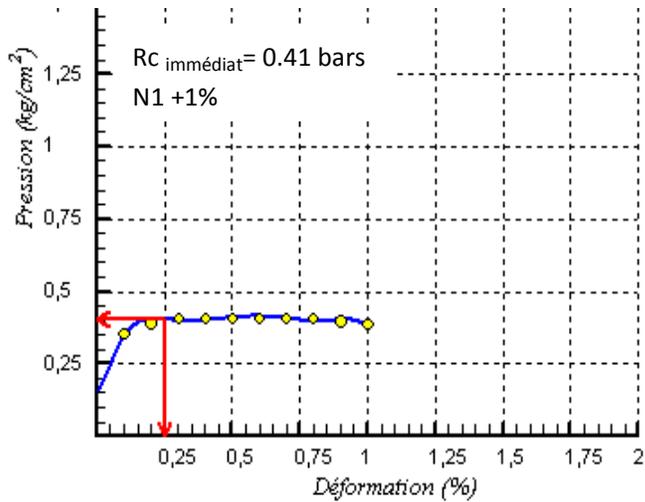


Figure.4.17 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 1%ligno immédiatement

Image4.13 Eprouvette écrasée du sol N1 avec 1%ligno immédiatement

▪ **Ecrasement à 2 jours**

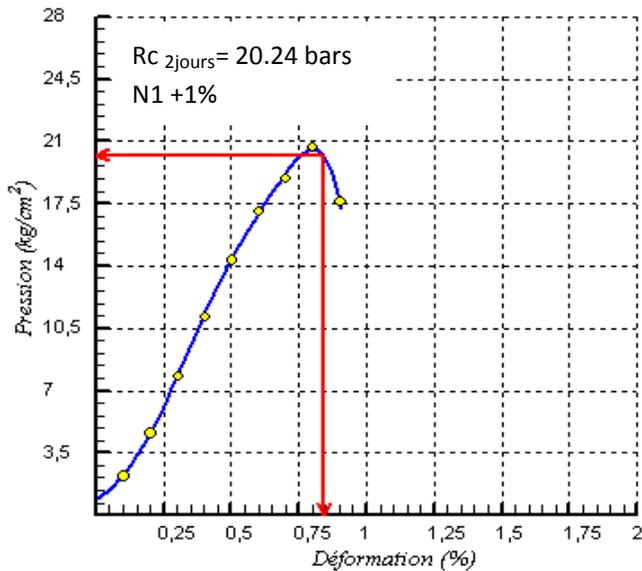


Figure.4.18 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 1%ligno à 2 jours

Image4.14 Eprouvette écrasée du sol N1 avec 1%ligno à 2 jours

▪ **Ecrasement à 4 jours**

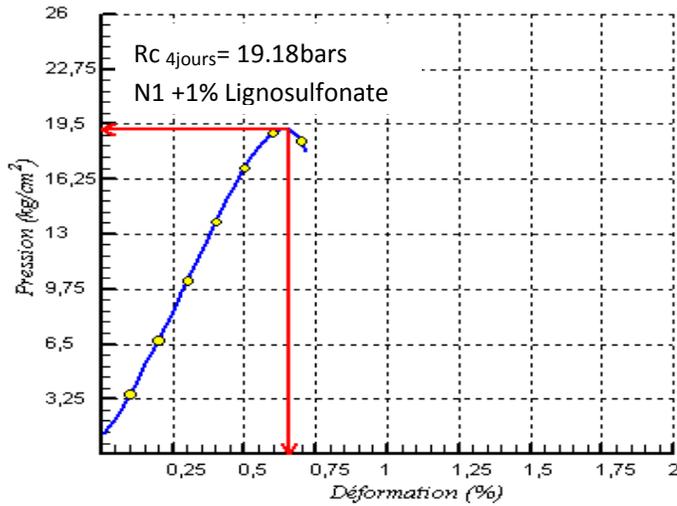


Figure.4.19 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 1%ligno à 4 jours

Image4.15 Eprouvette écrasée du sol N1 avec1%ligno à 4 jours

Le sol plus 2 % de lignosulfonate

▪ **Ecrasement immédiat**

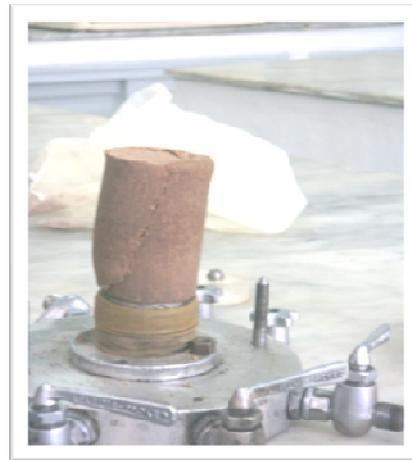
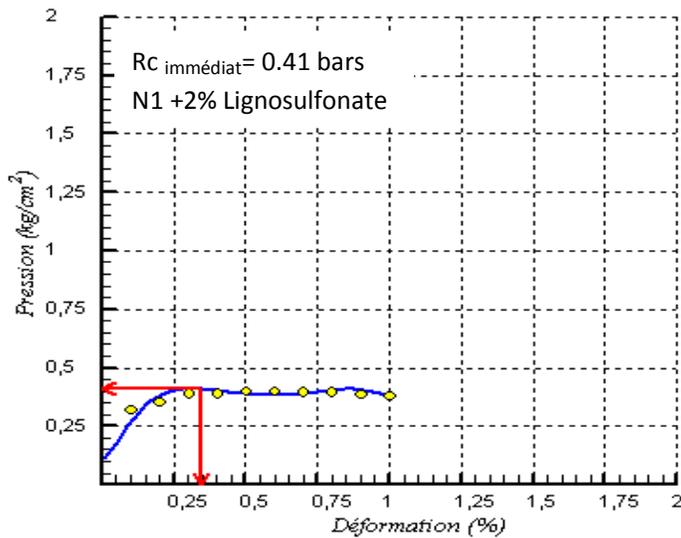


Figure.4.20 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 2%ligno immédiatement

Image4.16 Eprouvette écrasée du sol N1 avec 2%ligno immédiatement

▪ **Ecrasement à 2 jours**

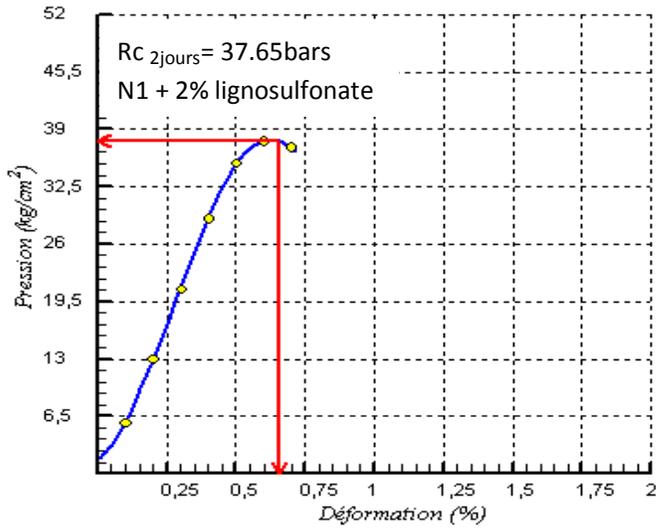


Figure.4.21 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 2%ligno à 2 jours



Image4.17 Eprouvette écrasée du sol N1 avec 2%ligno à 2 jours

▪ **Ecrasement à 4 jours**

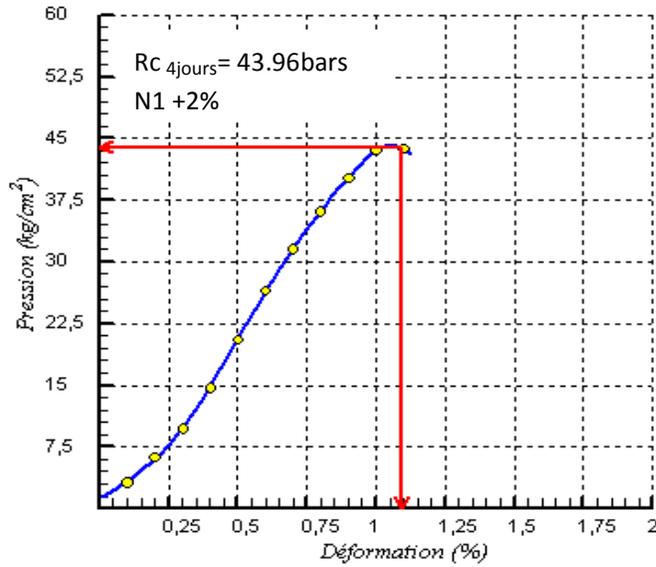


Figure.4.22 courbe contraintes/déformations du sol N1 avec 2%ligno à 4 jours



Image4.18 Eprouvette écrasée du sol N1 avec 2%ligno à 4 jours

On résume les résultats obtenus de compression simple dans le tableau suivant :

Tableau.4.11 influence du lignosulfonate sur la résistance à la compression en fonction du temps

| Pourcentages de lignosulfonate (%) | Résistances à la compression (bars) | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|---------|---------|
| | Immédiat | 2 jours | 4 jours |
| 0 | insignifiante | 9.32 | 8.87 |
| 0.5 | insignifiante | 17.05 | 17.45 |
| 1 | 0.41 | 20.24 | 19.18 |
| 2 | 0.41 | 37.65 | 43.96 |

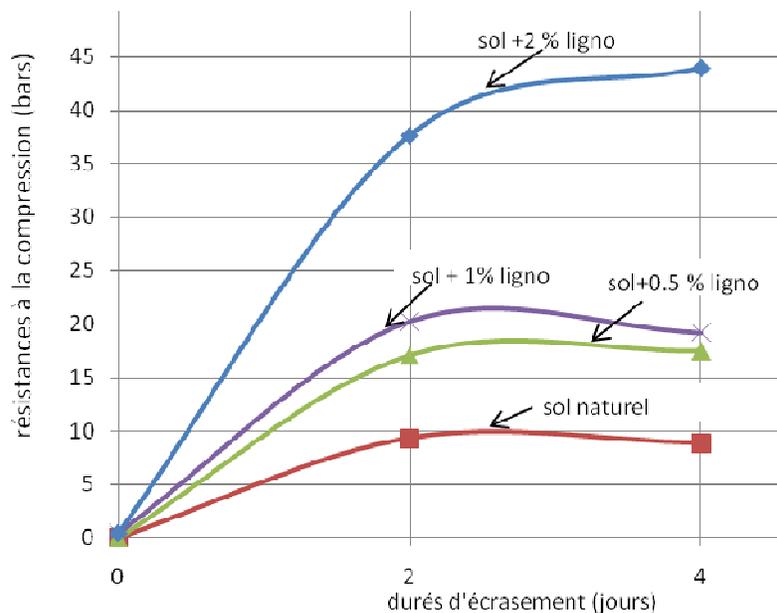


Figure 4.23 évolution de la résistance à la compression du sol naturel et des sols traité à 0.5%,1% et 2% à des durés de 2 et 4 jours

La figure 4.23 donne les différentes résistances en fonction de la durée de conservation et pour différents taux d’incorporation du lignosulfonate.

Toutes les courbes sont ascendantes entre le premier jour et le deuxième jour : les résistances augmentent avec le taux d’incorporation du lignosulfonate.

La chute de résistance à la compression peut – être expliquée par des micros fissures dues au départ de l’eau assez rapide au vu de l’enceinte dans laquelle les échantillons sont placés et de leur taille relativement petite (H=10cm et D=5 cm).

A 2% du lignosulfate, cette perte rapide d’eau est ralentie d’où une fissuration moindre et donc une meilleure résistance (voir l’influence du lignosulfonate sur le séchage de sol).

Les résistances du sol à 2% ont augmentés à 4jours.

Les autres courbes (sol à 0 ; 0.5 et 0 %) montrent une tendance à une légère baisse à 4 jours.

A 2 jours, la résistance a doublé pour 1% et a quadruplé à 2% du lignosulfonate.

Taux optimal du lignosulfonate

Si l'on retient le critère de 20 bars de la technique routière saharienne, le taux optimal est alors de 1%.

A ce taux $R_c = 20$ bars

Il est à noter que la valeur de 1% du lignosulfonate est le taux retenu pour la stabilisation des sables de la route décrite dans la partie bibliographique (Hassid Bel- Hirane /Hassi Bel- Gebbour dans le Gassi Touil).

Il faut signaler que cette valeur optimale est estimée pour le sol N1, peut être différente pour d'autres sols. En pratique, il faut donc déterminer la valeur optimale pour chaque sol à stabiliser.

Cependant, dans le cas de la suite de notre travail, pour pouvoir comparer l'effet de l'incorporation du lignosulfonate sur le sol, nous avons fait varier les sols et gardé un taux d'incorporation constant, correspondant à la valeur optimale trouvée pour le sol N°1.

4.4.3 Conclusions

- La teneur en eau optimale diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation du lignosulfonate.
- La densité sèche n'est pas très influencée par la teneur en lignosulfonate.
- L'incorporation du lignosulfonate n'améliore pas l'aptitude au compactage du sol traité.
- L'ajout de lignosulfonate à 1% double la résistance du sol. La résistance quadruple pour les 2% d'ajout.
- Le taux optimal retenu, compte tenu du seuil imposé pour la résistance est de 1%.

4.5. Influence du lignosulfonate sur d'autres sols (N2 et N3)

Cette partie a pour but d'étudier l'influence du lignosulfonate sur les deux autres sols (N2 et N3) à la teneur optimale (1%) retenue dans la partie précédente.

Les essais ont été conduits comme suit :

- 1) Détermination des caractéristiques de compactages des sols traité (N2 ; N2+1%) et (N3 et N3+1%)
- 2) Confectionnement d'éprouvettes et essais de compression simple, à 2 jours de séchage. La procédure étant celle décrite précédemment.

4.5.1 Résultats des essais

❖ Caractéristiques de compactage des sols N2, N3

Tableau .4.12 Caractéristiques de compactage des sols N2, N3

| | Echantillon N2 | | Echantillon N3 | |
|---|----------------|-----------------------|----------------|----------------------|
| | Sol naturel | Sol+lignosulfonate 1% | Sol naturel | Sol+lignosulfonate1% |
| Densité sèche maximale t/m ³ | 2.00 | 2.01 | 1.73 | 1.74 |
| Teneur en eau optimale % | 9.90 | 7.70 | 14.70 | 13.71 |

❖ Résistance à la compression des sols N2, N3

Les deux sols N2, N3 ont été testés à la compression simple ; sols naturel et sols plus 1% du lignosulfonate .La duré d'écrasement est de 2 jours. La duré est fixée à 2 jours cause des résultats obtenus pour le sol N1 ; la courbe Rc=f(t) s'est stabilisée à 2 jours (voir **figure4.23**)

Echantillon N2

❖ Le sol naturel

▪ Ecrasement à 2 jours

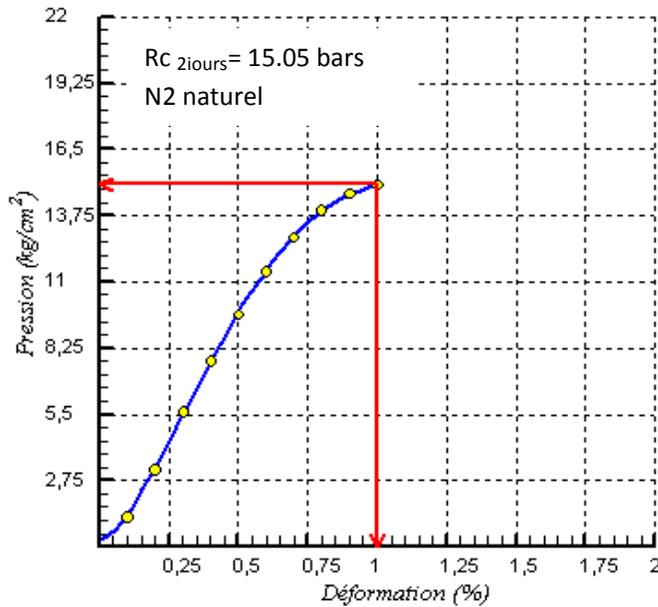


Figure.4.24 courbe contraintes/déformations du sol N2 naturel à 2 jours

❖ Le sol avec 1% de lignosulfonate

- Ecrasement à 2 jours

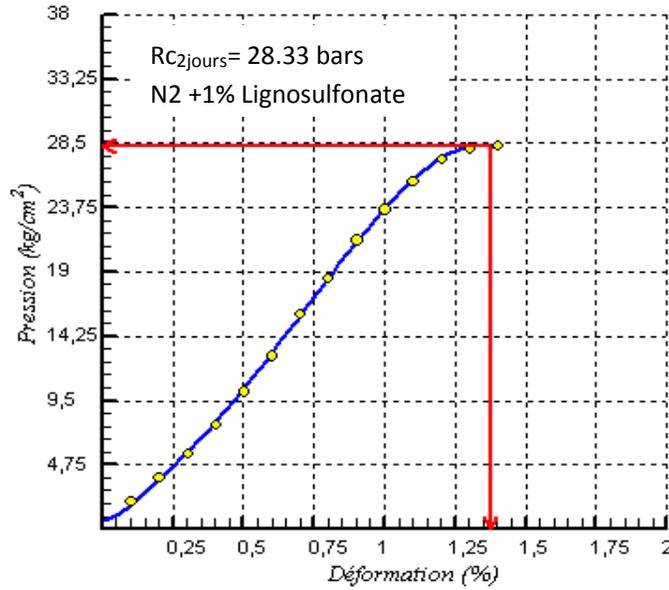


Figure.4.25 courbe contraintes/déformations du sol N2 avec 1%ligno à 2 jours

Echantillon N3

❖ Le sol naturel

- Ecrasement à 2 jours

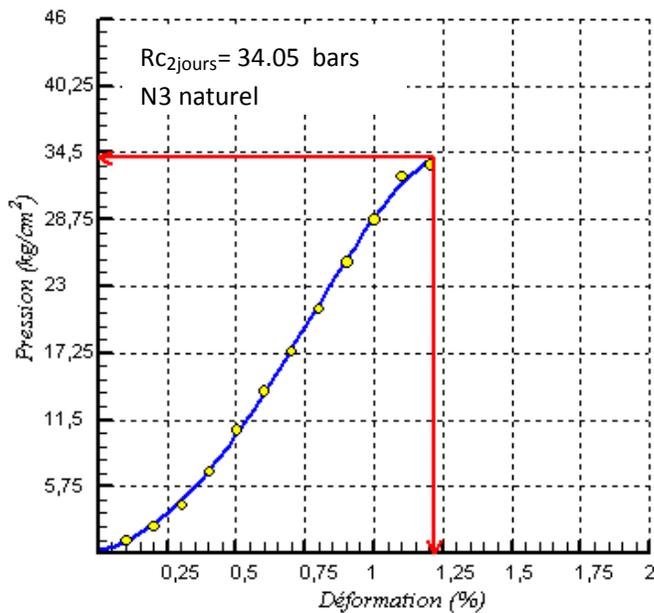


Figure.4.26 courbe contraintes/déformations du sol N3 naturel à 2 jours

❖ Le sol avec 1% de lignosulfonate

▪ Ecrasement à 2 jours

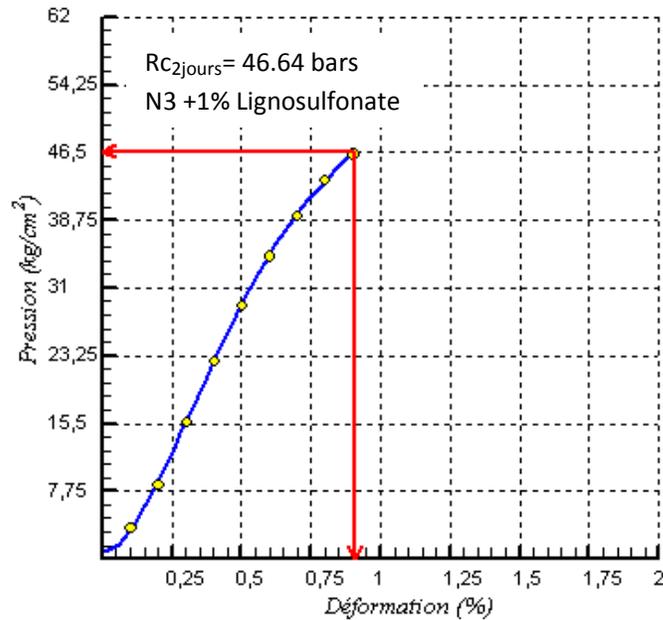


Figure.4.27 courbe contraintes/déformations du sol N3 avec 1%ligno à 2 jours

Tableau.4.13 tableau récapitulatif des résistances à la compression en fonction des trois sols1) sans stabilisation ; 2) sol + 1% de lignosulfonate.

| Sol | Résistances à la compression (bars) | | Gain en résistance |
|-----|-------------------------------------|----------|--------------------|
| | sol naturel | Sol + 1% | |
| N1 | 9.32 | 20.24 | 117% |
| N2 | 15.05 | 28.33 | 88% |
| N3 | 34.05 | 46.64 | 37% |

L'incorporation de 1% de lignosulfonate a fait augmenter la résistance (donc la cohésion) des trois matériaux. Cependant, le gain, pour un même taux d'incorporation (1%) n'est pas le même pour les trois sols.

Plus la cohésion initiale est faible, plus le gain relatif est important (117%, sol N1).

Le sol qui présente le plus de cohésion a un gain relatif le plus faible (37% ; sol N3).

Beaucoup de facteurs peuvent être à l'origine : la nature du sol, % de fines ...

Par ailleurs, le fait que les sols N2 et N3 ne soient pas stabilisés par le taux optimal correspondant à chaque sol, peut expliquer la différence de gain entre matériaux.

4.6. Etude de la sensibilité à l'eau des sols traités au lignosulfonate

L'eau joue un rôle primordial dans la stabilité des chaussées. En effet elle a des effets sur les sols traités au lignosulfonate. Les avantages de ces sols vis-à-vis de l'eau, on les illustre un par un, en faisant les essais suivants :

- L'influence du lignosulfonate sur les remontées capillaires
- Tenue à l'eau des sols traités
- L'influence du lignosulfonate sur le séchage des sols

❖ L'influence du lignosulfonate sur les remontées capillaires

Une possibilité de migration capillaire du lignosulfonate dans les accotements de chaussées, par suite de mise en solution après des pluies : bien que le produit soit en effet assez soluble dans l'eau, les mesures effectuées après une pluie nous ont tranquillisées : si le phénomène se produit, il sera très lent, les pluies étant rares. (Fumet, 1959)

Le but est d'améliorer la tenue des sols fins en diminuant leur affinité pour l'eau en enrobant leurs particules d'un film tensio actif.

Ils ont (les lignosulfonates) une action d'imperméabilisation et/ou d'hydrophobation qui réduit l'imbibition par capillarité et par succion [(Fumet, 1959) ;(Sierra, 1958) ; (Ponton, 1959) ; (SCET, 1980)].

Cet essai est réalisé sur une embase de triaxial, avec une éprouvette graduée pour contrôler le volume absorbé par le sol, sans aucune pression (par succion).



Image 4.19 éprouvette du sol naturel en cours d'essai de remontées capillaires

Trois éprouvettes ont été réalisées aux conditions de compactage de PROCTOR modifié ; sol naturel, sol plus le lignosulfonate de pourcentage 1% et 2%.

Dans le graphe suivant on représente l'évolution de l'absorption de l'eau en fonction du temps

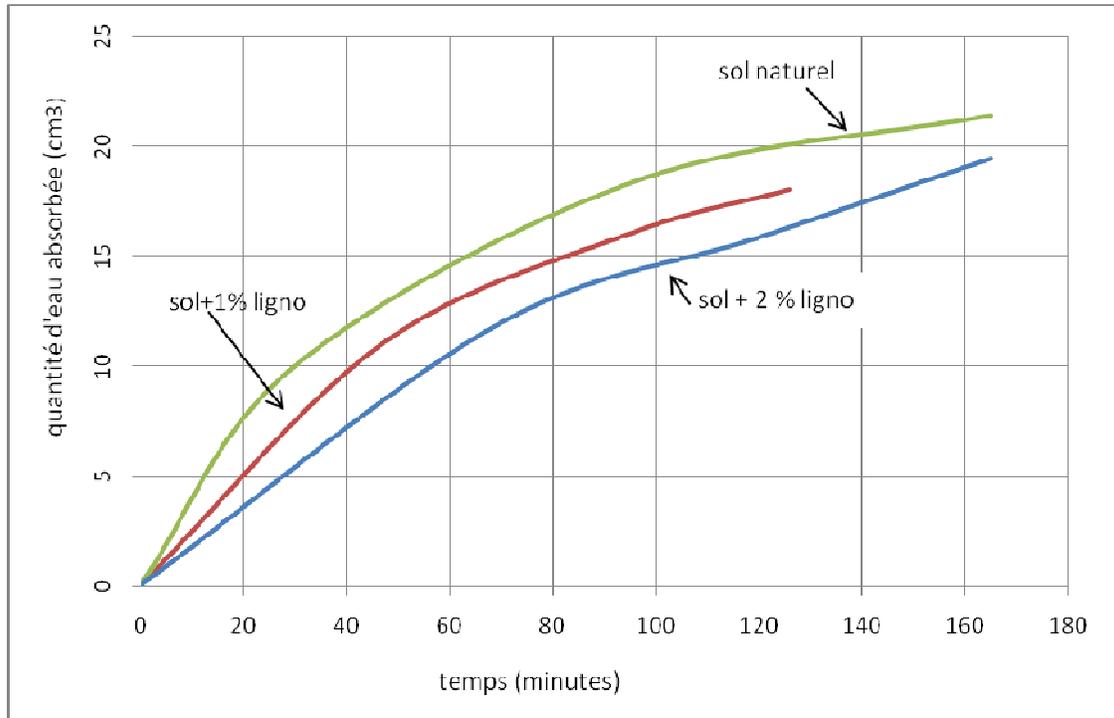


Figure 4.28 Absorption d'eau du sol naturel et des sols traités à 1% et 2% du lignosulfonate

Dans cet essai, on confirme que le lignosulfonate a une action d'imperméabilisation et/ou d'hydrophobation qui réduit l'imbibition par capillarité et par succion.

❖ Tenue à l'eau des sols traités

Comme les lignosulfonates sont solubles à l'eau, la pluie peut les lessiver ou les faire pénétrer trop profondément dans la chaussée et les rendre inefficaces. En effet, une seule pluie peut réduire considérablement ou éliminer complètement leur efficacité.

Il faut donc veiller à ne pas étendre ces produits pendant une pluie abondante ou à une période où de la pluie est annoncée. Une pluie légère peut faire augmenter l'efficacité de l'application, mais il ne doit pas y avoir d'écoulement.

Les lignosulfonates sont corrosifs pour l'aluminium et ses alliages. Cette action corrosive est neutralisée lorsqu'un mélange semi-liquide de carbonate de calcium est ajouté au produit.

Ce mélange présente en outre l'avantage de réduire la solubilité du lignosulfonate et d'en freiner ainsi le lessivage dans la chaussée.

On a visualisé l'effet de CaCO_3 sur la solubilité du lignosulfonate en immergeant six échantillons dans l'eau dans les mêmes conditions de séchage ; trois échantillons naturels (N1, N2, N3), et trois autres (N1+1%ligno, N2+1%ligno, N3+1%ligno).

On suit dans cet essai la durée d'effondrement qui sépare l'échantillon naturel et l'échantillon traité ; on constate bien que cette durée est importante pour l'échantillon N3 (70% de CaCO_3). Cela revient à la faible solubilité du lignosulfonate qui forme toujours une liaison entre les grains du sol, même en présence de l'eau.



Image 4.20 l'effet du CaCO_3 sur la tenue à l'eau des échantillons stabilisés au lignosulfonate

❖ L'influence du lignosulfonate sur le séchage des sols

Lors des manipulations précédentes, on a remarqué que les sols qui ont des pourcentages du lignosulfonate, restent humides par rapport au sol naturel.

Ce phénomène est beaucoup plus important, que le pourcentage des lignosulfonate est grand.

Pour bien illustrer cette remarque, on a préparé trois sols de pourcentages :

0.5%, 1% et 2% du lignosulfonate comparé à un sol naturel, mis dans des tares, qui ont les mêmes volumes. Le pourcentage du lignosulfonate est par rapport au poids sec du sol. Ces tares ont été mises dans l'étuve à 50 °C.

Dans cet essai, on mesure la quantité d'eau dégagée en fonction du temps.



Image.4.21 Quatre tares contiennent respectivement ;
sol naturel, sol+0.5% ligno, sol+1% lignosulfonate et sol+2% lignosulfonate

On représente les valeurs les valeurs obtenues sous forme de graphes :

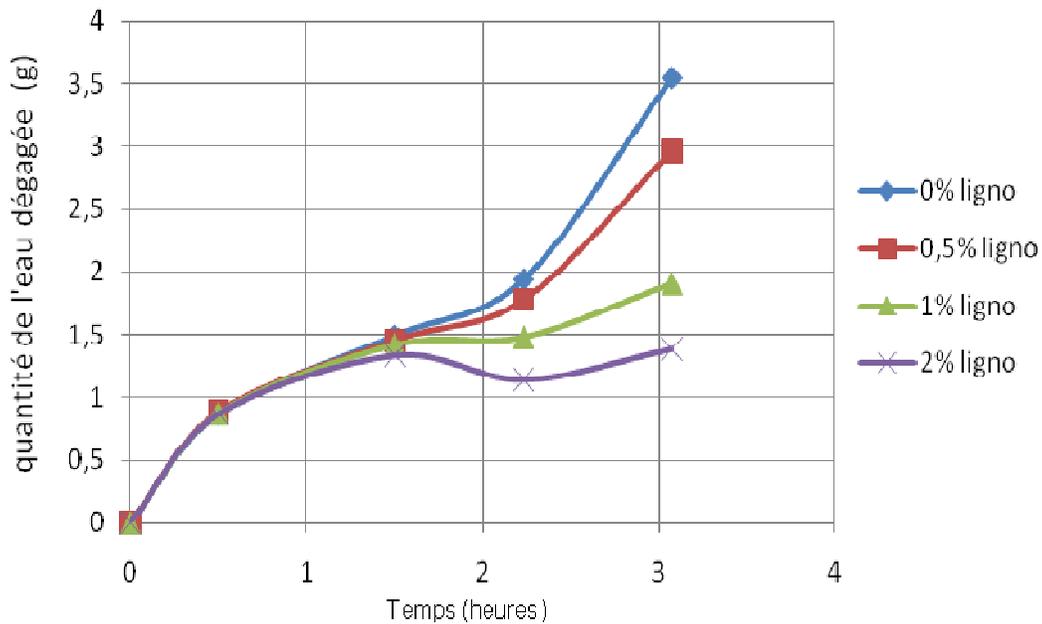


Figure4.29 La quantité d'eau dégagée (grammes) en fonction du temps (heures).

Ces résultats montrent que la quantité d'eau dégagée a été diminuée en fonction des pourcentages de lignosulfonate injectés dans le sol. Ce phénomène est expliqué d'une part, par l'effet du lignosulfonate comme retardateur d'évaporation de l'eau, d'autre part, par l'émigration du lignosulfonate vers la surface, cela forme une couche à la surface plus concentrée en lignosulfonate, qui empêche l'eau à s'évaporer



Image.22 L'immigration du lignosulfonate vers la surface.

Pour illustrer l'effet retardateur du lignosulfonate au niveau de l'évaporation de l'eau, on a comparé l'évaporation de l'eau naturel avec de l'eau plus 1% du lignosulfonate, mis dans l'étuve à 50°C.

De la même façon que l'essai précédent, on mesure la quantité de l'eau évaporée en fonction du temps.



Image.4.23 Deux récipients contiennent respectivement; eau naturel et eau+1%lignosulfonate

Tableau.4.14 l'effet du lignosulfonate sur l'évaporation de l'eau

| | | Temps (minutes) | 0 | 75 | 130 | 220 | 440 |
|------------------------------|--------------------------|-----------------|---|------|-------|-------|--------|
| Quantité de l'eau dégagée(g) | Sol naturel | | 0 | 8.53 | 36.84 | 96.32 | 243.65 |
| | Sol+1% de lignosulfonate | | 0 | 8.01 | 36.00 | 89.02 | 219.84 |

On représente les valeurs du tableau précédent sous forme de graphes :

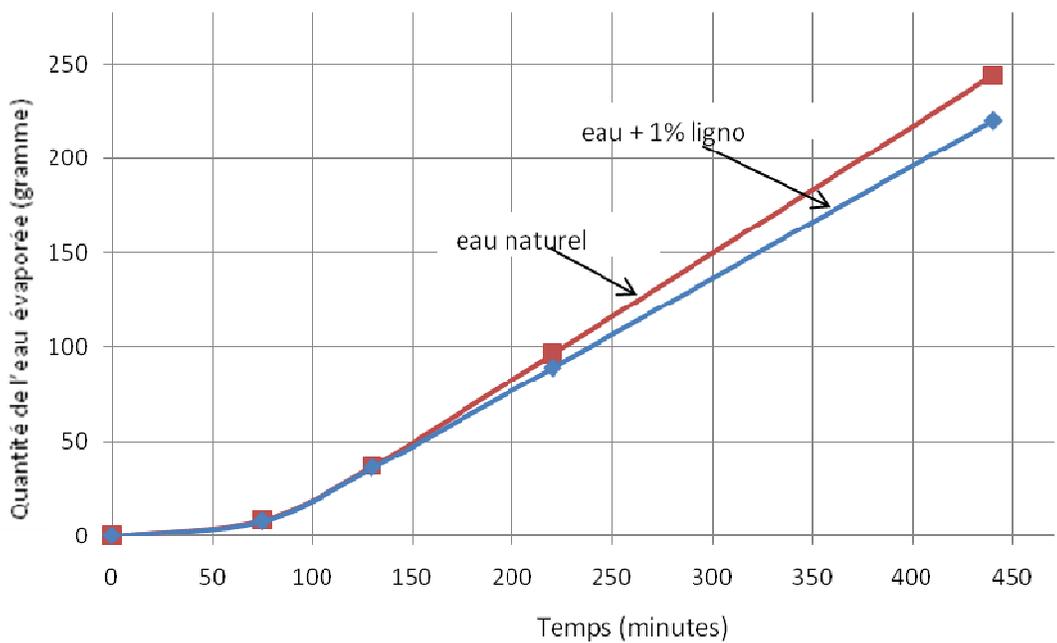


Figure 4.30 La quantité d'eau dégagée (grammes) en fonction du temps (minutes).

Cet essai illustre bien l'effet retardateur du lignosulfonate au niveau du séchage des sols, qui n'influe pas beaucoup sur la quantité d'eau séchée lors une imbibition du corps de la chaussée par capillarité ou par les précipitations éventuelles car différence entre le sol naturel et le sol traité n'est pas assez importante. En revanche cet effet présente un avantage lors de la mise en œuvre des chaussées des routes, un tel effet convient aux climats où le séchage rapide des sols présente un grand problème lors de la mise en œuvre.

❖ L'influence du lignosulfonate sur le retrait des sols

Le lignosulfonate semble accroître d'une façon importante le retrait des sols, d'où une certaine fissuration des couches de chaussée, qui se transmet à la couche de surface, cela permet aux précipitations éventuelles de la pénétrer vers le corps de la chaussée.

Dans cette partie, on choisit l'échantillon le plus riche en argile (échantillon N2) pour étudier l'influence du lignosulfonate sur les limites de liquidité et de plasticité. Trois pourcentages ont été utilisés ; 0.5 – 1 – 2 %. Les pourcentages du lignosulfonate sont par rapport au poids sec du sol utilisé.

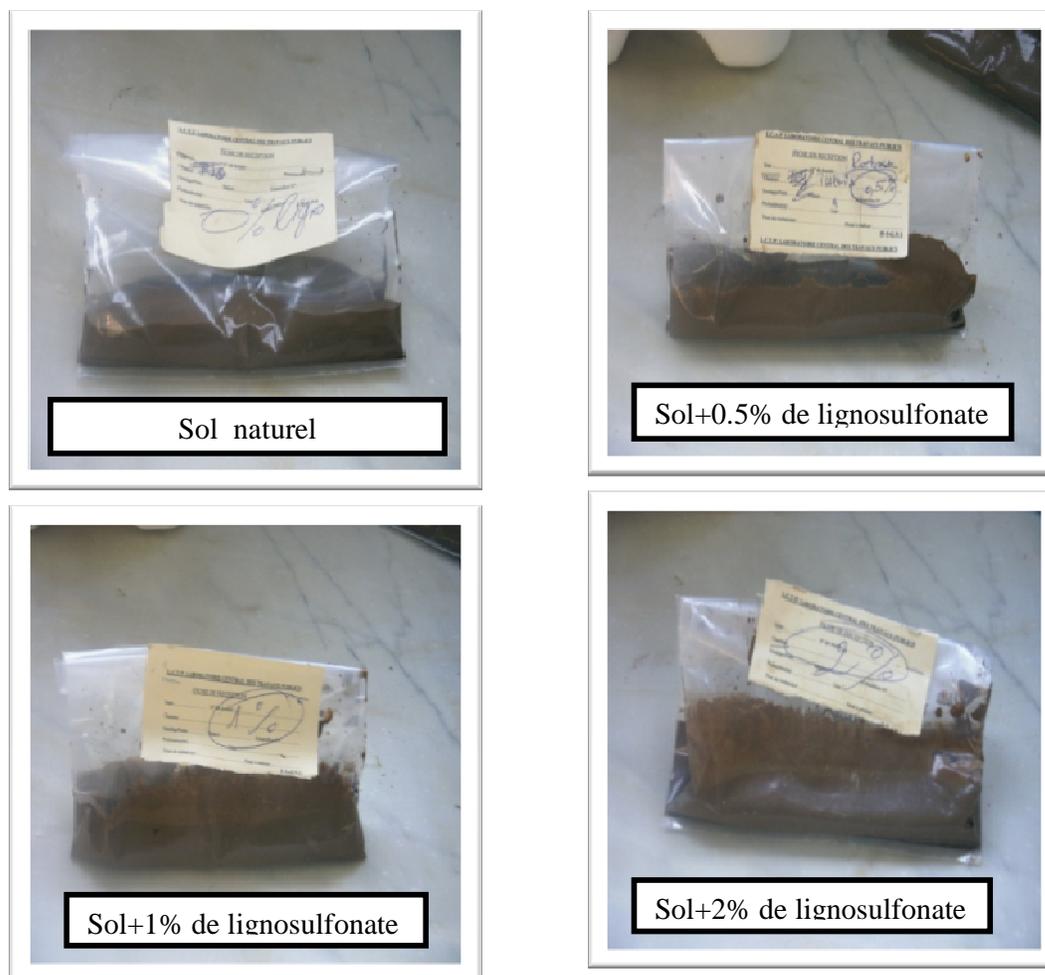


Image 4.24 Echantillons de l'essai de limite de retrait

Présentation des résultats obtenus

Tableau 4.15 L'effet de la teneur en lignosulfonate sur la limite de retrait

| lignosulfonate | 0% | 0.5% | 1% | 2% |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Limite de retrait (%) | 23.32 | 21.54 | 19.53 | 16.41 |

On représente ces résultats sous forme de graphe :

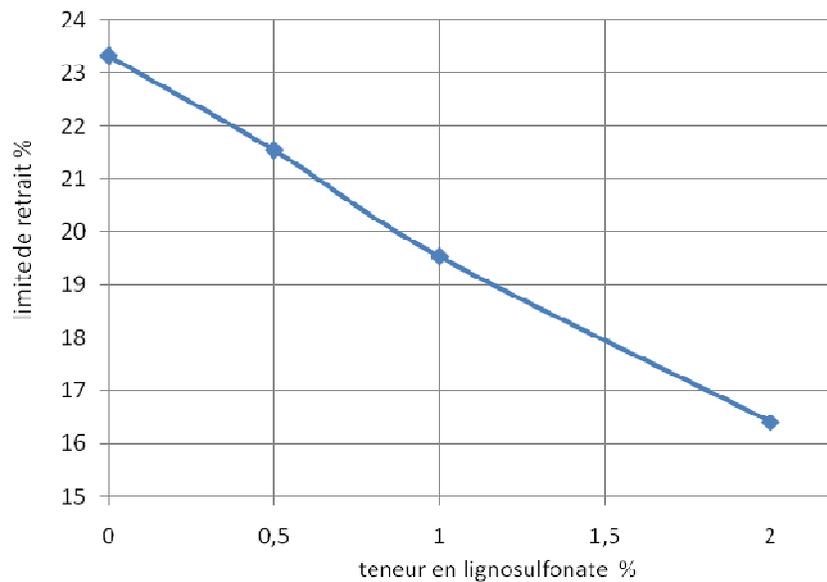


Figure.4.31 Représentation de la limite de retrait en fonction de la teneur en lignosulfonate.

❖ On constate que la limite de retrait a diminué ; en effet le lignosulfonate a augmenté le retrait du sol. Ce phénomène revient à la forte cohésion que fait le lignosulfonate. La diminution de la limite de retrait dans la fourchette de « 0-2 » %, est de l'ordre de 6.91 %.

- L'influence du lignosulfonate sur les limites d'Atterberg
- ❖ Limites d'Atterberg pour le sol N2 avec 0.5 % du lignosulfonate

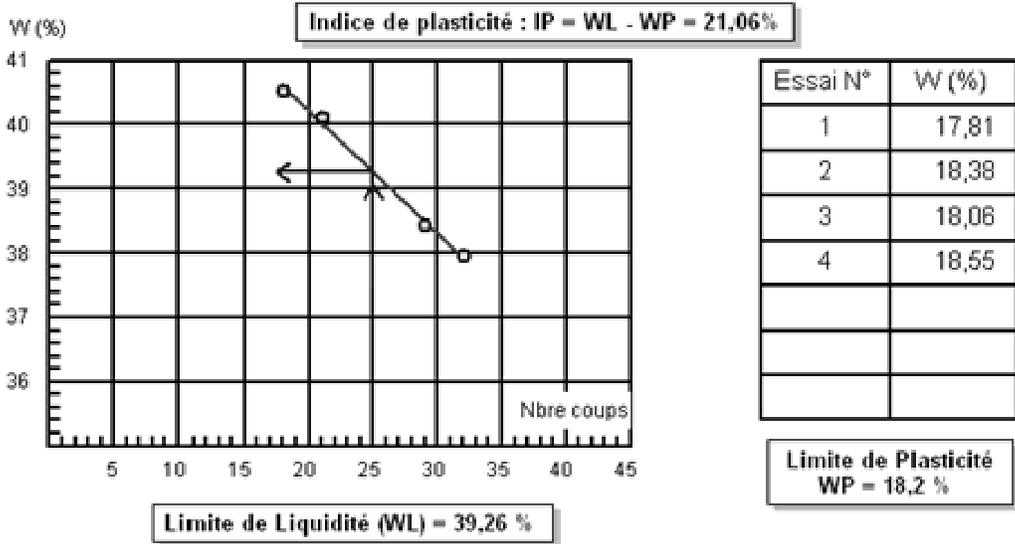


Figure.4.32 Limites d'Atterberg de l'échantillon N2 avec 0.5% du lignosulfonate

- ❖ Limites d'Atterberg pour le sol N2 plus 1 % du lignosulfonate

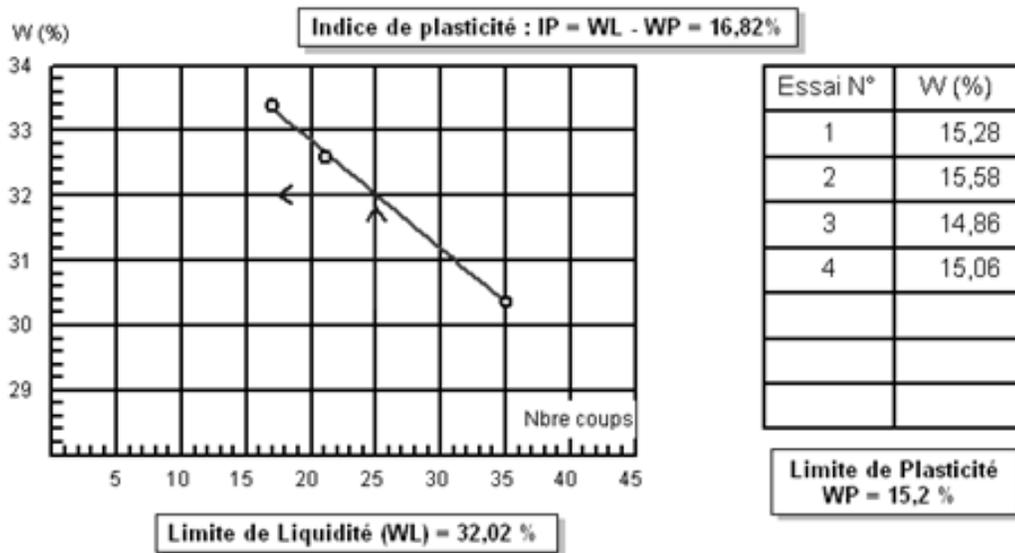


Figure.4.33 Limites d'Atterberg de l'échantillon N2 avec 1% du lignosulfonate

❖ **Limites d'Atterberg pour le sol N2 plus 2 % du lignosulfonate**

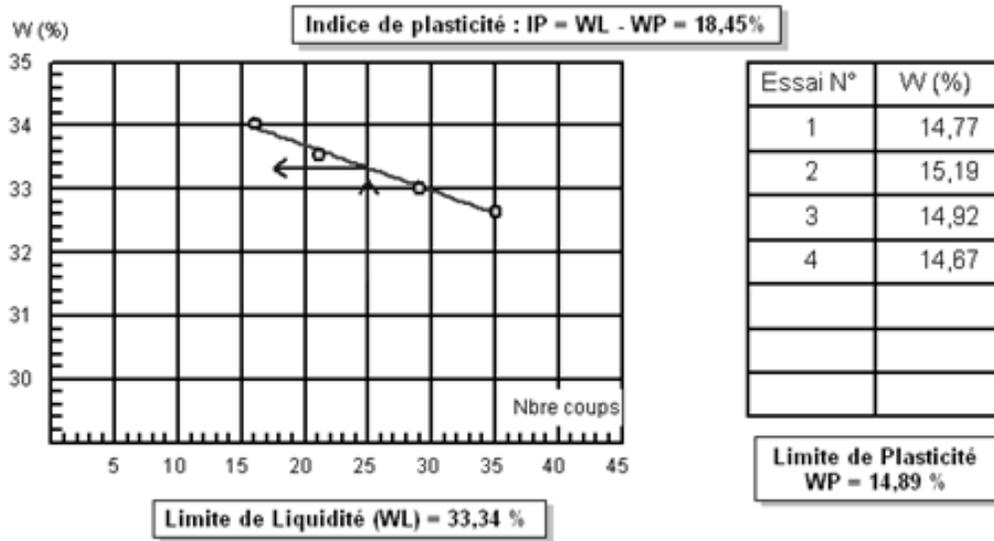


Figure.4.34 Limites d'Atterberg de l'échantillon N2 ave2c% du lignosulfonate

On résume les résultats précédents dans le tableau suivant :

Tableau 4.16 L'effet de la teneur en lignosulfonate sur les limites d'Atterberg

| | Sol naturel | lignosulfonate | | |
|------------------------|-------------|----------------|-------|-------|
| | | 0.5% | 1% | 2% |
| Limite de liquidité % | 33.49 | 39.26 | 32.02 | 33.34 |
| Limite de plasticité % | 17.17 | 18.20 | 15.20 | 14.89 |
| Indice de plasticité | 16.32 | 21.06 | 16.82 | 18.45 |

❖ **Influence du lignosulfonate sur la limite de liquidité**

Tableau 4.17 L'effet de la teneur en lignosulfonate sur la limite de liquidité

| lignosulfonate | 0% | 0.5% | 1% | 2% |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Limite de liquidité(%) | 33.49 | 39.26 | 32.02 | 33.34 |

On représente ces résultats sous forme de graphe :

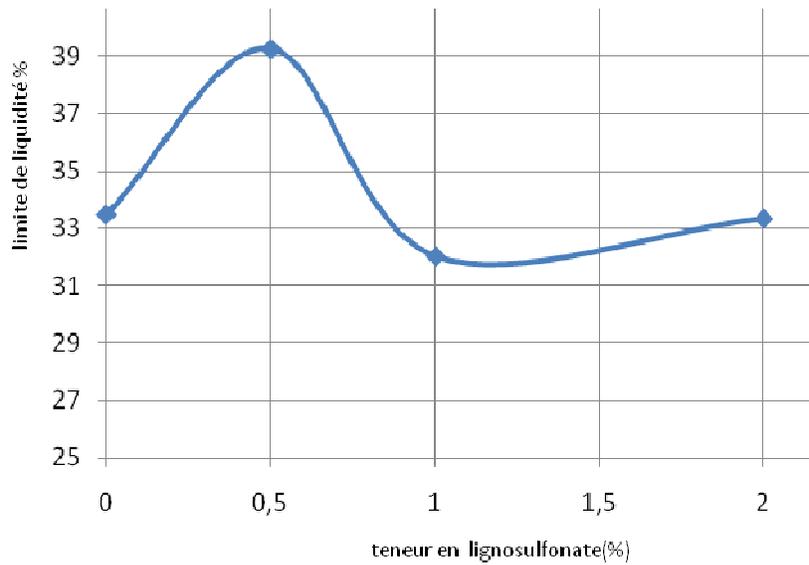


Figure.4.35 Graphe de limite de liquidité en fonction de la teneur en lignosulfonate.

❖ Influence du lignosulfonate sur la limite de plasticité

Tableau 4.18 L'effet de la teneur en lignosulfonate sur la limite de plasticité

| lignosulfonate | 0% | 0.5% | 1% | 2% |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Limite de plasticité(%) | 17.17 | 16.00 | 15.20 | 14.89 |

On représente les résultats précédents sous forme de graphe :

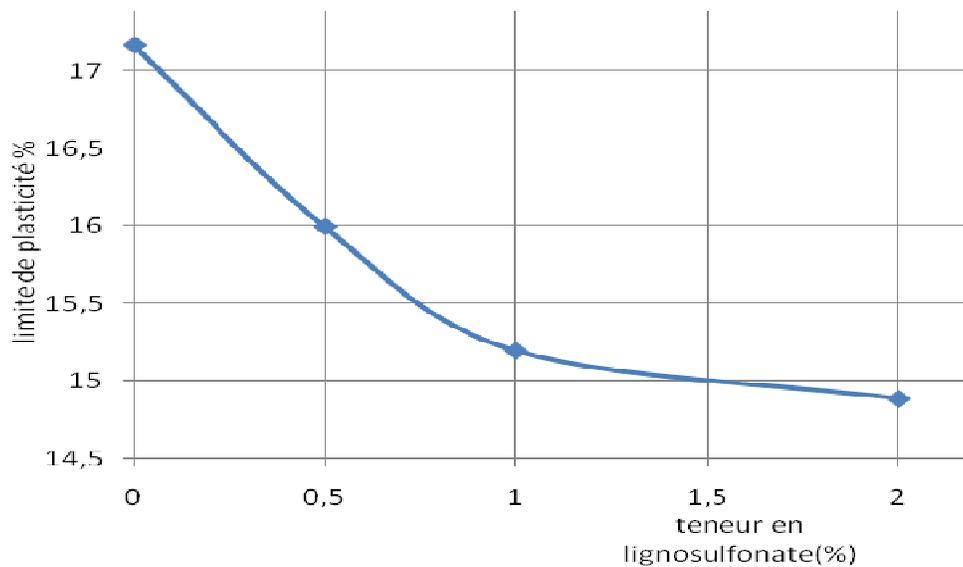


Figure.4.36 Graphe de limites de plasticité en fonction de la teneur en lignosulfonate.

❖ Influence du lignosulfonate sur l'indice de plasticité

Tableau 4.19 L'effet de la teneur en lignosulfonate sur l'indice de plasticité

| lignosulfonate | 0% | 0.5% | 1% | 2% |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Indice de plasticité | 16.32 | 23.26 | 16.82 | 18.45 |

On représente ces résultats sous forme de graphe :

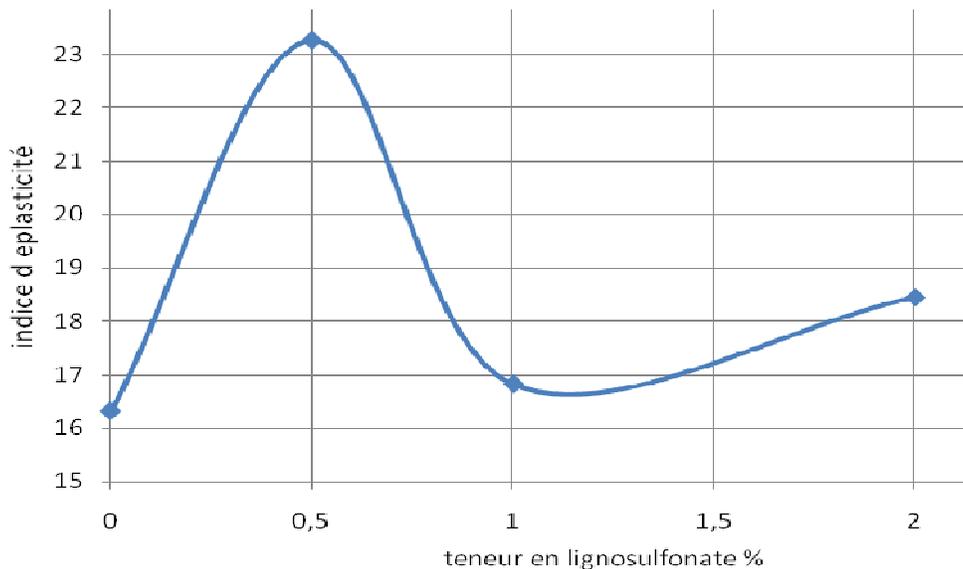


Figure.4.37 Graphe des indices de plasticité en fonction de la teneur en lignosulfonate.

Interprétations

- ❖ On constate que la limite de plasticité a été diminuée, cela revient à l'action fluidifiante du lignosulfonate.
- ❖ On constate aussi que la limite de liquidité a été augmentée pour des faibles teneurs en lignosulfonate, puis elle s'est stabilisée à partir de 1% du lignosulfonate ; cela est expliqué par l'action collante du lignosulfonate pour des faibles teneurs, une fois le pourcentage du lignosulfonate est au-dessus de 0.5%, l'action fluidifiante du lignosulfonate devient la plus dominante.
- ❖ L'indice de plasticité est plus grand au niveau des faibles teneurs en lignosulfonate.

Même ces changements au niveau des limites d'ATTERBERG, cela ne change pas la classification du sol dans l'abaque de CASAGRANDE.

D'après de ce que on a réalisé comme essais, on constate que le lignosulfonate;

- Augmente le retrait du sol, cette augmentation est beaucoup plus importante, que le son pourcentage est important
- Augmente l'indice de plasticité pour des faibles pourcentages
- Diminue les remontées capillaires.
- Retarde le séchage du sol
- L'échantillon N3 a une meilleure tenue à l'eau, tenue qui pourrait être expliquée par la présence importante de CaCO_3 .

❖ Conclusion

Le lignosulfonate, produit dérivé de l'industrie de cellulose, est un produit à fort pouvoir collant.

Il agit comme lubrifiant, permettant de réduire la teneur optimale de compactage.

Il améliore considérablement la résistance à la compression du sol à sec. Incorporé à 1%, dans un sol peu cohérent, il permet de doubler la résistance.

Seul le sol contenant de CaCO_3 (N3) a montré une certaine tenue à l'eau.

5. Conclusion et perspectives

Le lignosulfonate, produit dérivé de l'industrie de cellulose, est un produit à fort pouvoir collant. Les résultats obtenus lors de nos travaux confirment ceux relatés dans la littérature concernant les lignosulfites.

Le lignosulfonate agit comme lubrifiant, permettant de réduire la teneur en eau optimale de compactage.

Il améliore considérablement la résistance à la compression du sol à sec. Incorporé à 1%, dans un sol peu cohérent, il permet de doubler la résistance.

La densité sèche n'est pas très influencée par la teneur en lignosulfonate.

L'incorporation de lignosulfonate n'améliore pas l'aptitude au compactage du sol traité.

Il augmente l'indice de plasticité pour des faibles pourcentages et diminue les remontées capillaires. Il retarde le séchage du sol.

L'échantillon de sol contenant une importante quantité de CaCO_3 présente une meilleure tenue à l'eau.

Le travail effectué dans le cadre de la préparation de ce mémoire de fin d'étude est une ébauche qui nous a permis de conclure à l'efficacité du lignosulfonate quant à l'amélioration de la cohésion des matériaux fins.

Etant donné la généralisation, dans certaines régions du sud dépourvues de granulats, de l'utilisation des matériaux fins en corps de chaussée ; étant donné la nécessité de remplacer le manque d'ossature de ces matériaux par une cohésion minimale et vu l'état de sécheresse de ces régions, ce type de stabilisation promet d'ouvrir des perspectives intéressantes pour la stabilisation des matériaux sahariens.

Certains perfectionnements sont encore nécessaires et exigent de nouvelles recherches en laboratoire ; il serait intéressant :

D'étudier de plus près les retraits et les moyens d'y remédier.

De suivre l'évolution dans le temps du produit incorporé : attaque éventuelle du produit par des micros organiques..

De réaliser des planches d'essais.

D'établir une étude technico-économique.

L'emploi du lignosulfonate est donc susceptible d'un grand développement dans le cas général où l'action de l'eau n'est pas à craindre ou peut être efficacement contenue ».

Un inventaire de matériaux se prêtant à la stabilisation ainsi que de nouveaux produits susceptibles de répondre à cette stabilisation est à envisager.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aboubek R. et Aissa Mamoune S. H. 2004. Stabilisation des sols gonflants par les sels. Conférence Internationale de Géotechnique – Beyrouth 2004
- Arabi M. & Djilali Merzoug A. (2003), Stabilisation chimique de deux argiles par ajout de sels, Projet de Fin d'Etudes Département de Génie Civil, Université de Tlemce
- Boularek M., 1989 – Mode de construction et contrôle des routes sahariennes – Rencontre Maghrébine sur les techniques routières, Tunis, 20-23 nov.
- Boulkhiout M., 2002 – Utilisation des tufs calcaires- sable de dune en géotechnique routière – Mémoire de Magister, ENP Alger.
- Bouzrara M. A., « Utilisation des matériaux locaux en construction routière. Des techniques novatrices et économiques »,
- Domec M., Alloul B., 1980. Construction des chaussées au Sahara, Rapport technique du Laboratoire Central des Travaux Publics, Alger. Fenzy E., 1966. « Particularité de la technique routière au Sahara », Revue générale des routes et aérodromes, N° 411, p. 57-71.
- Fenzy E., 1970. L'état actuel de la Technique Routière au Sahara, Rapport technique, Direction de l'Infrastructure de l'Organisme Saharien, Ministère des travaux publics, Algérie, 1970
- Fumet P., 1959. « Chaussées en sables gypseux et en sables stabilisés chimiquement », Revue général des routes et aérodromes, numéro spécial Sahara, N° 329, p. 169-178.
- Irex, materloc , Projet National SOLS FINS, Paris, 1997
- Kettab R., Contribution à la valorisation du sable de dune, Thèse d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
- L'Evébène, Essais de stabilisation chimique des sols, Laboratoire de Travaux Publics su Sud. 1960.
- Morsli M., Bali A, Fleureau J.M., « Conception et réalisation des chaussées en milieu désertique » Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy, 2002.
- Morsli M., Bali A, Fleureau J.M., « Particularité de la technique routière Saharienne » 3^{ème} Congrès Algérien de la Route, Alger, 2001.
- Morsli M., Bali A, Fleureau J.M., « Valorisation des matériaux locaux », Conférence Internationale de Géo engineering, USTHB, Alger, 2000.
- Morsli M., Bali A., Bensaibi M., Gambin M., « Etude du durcissement d'un tuf gypso-calcaire de Hassi-Messaoud, Algérie » Revue Européenne de Génie Civil, Vol 11/9-10. pp 1219-1240, 2007.
- Morsli M., Bali A., Fleureau J. M., « La solution par la stabilisation », Le premier congrès Africain de la route : Routes, importance économique et techniques de construction, Alger 2005.
- Morsli M., Bali A., Fleureau J. M., « La solution par la stabilisation » Le premier congrès Africain de la route : Routes importance économique et techniques de construction, Alger. 2005.
- Morsli M., Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtements en Technique Routière Saharienne, Thèse d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique. Alger, 2007.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Peltier R., « Le rôle du laboratoire dans la technique routière saharienne », Revue générale des routes et aérodromes, Numéro spécial Sahara, N°329, pp. 165-168,1959.

Ponton A. « Construction des routes et de pistes en conditions sahariennes » Revue général des routes et aérodromes, numéro spécial Sahara, N° 329, 1959.

SCET - Coopération « rapport préliminaire sur les ressources en matériaux du premier tronçon Rhourde El Baguel- EL Borma » à propos de matériaux à cohésion moyenne avec stabilisation chimique

SCET, Rapport préliminaire sur les ressources en matériaux du premier tronçon Rhourde El Baguel- EL Borma » – Coopération, 1980.

Sierra R., Construction des routes des pistes et des aérodromes au Sahara, Les études au laboratoire des problèmes de stabilisation chimique », Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1958.