

III.1. Introduction

Les projets routiers deviennent, de plus en plus, contraignants et demandent des mouvements de terre importants dans des sols parfois difficilement réutilisables, et les gisements naturels de matériaux nobles, inégalement répartis, s'épuisent. Il convient donc d'épargner les ressources existantes, d'autant plus que le coût du transport devient élevé.

Les sols fins, contiennent des proportions notables d'argiles et de limons, qui influent sur ses propriétés géotechniques intrinsèques. Ils gonflent et deviennent plastiques en présence d'eau, se rétractent avec la sécheresse, et foisonnent sous l'effet du gel. Alors, ces sols sont considérés comme mauvais ou médiocres et ne présentent pas, par conséquent, les performances nécessaires pour supporter le trafic de chantier, la chaussée et le trafic futur.

Dans les travaux de terrassements routiers, le recours à la technique de traitement du sol peut se faire par l'amélioration immédiate des sols trop humides en augmentant leur stabilité et en assurant leur mise en œuvre pour la réalisation des plates-formes rigides et stables, sous forme de couches de forme traitées, en visant des caractéristiques mécaniques élevées.

Le choix de l'agent de traitement et son dosage sont déterminés par le type de sol, sa teneur en eau au moment du traitement ainsi que les caractéristiques visées.

III.2. Traitement d'un sol à la chaux

Dans la pratique, deux techniques de traitement permettent de valoriser les sols:

- Par le compactage (réduction de la porosité);
- Par l'utilisation d'agents chimiques (modification des caractéristiques physiques et mécaniques).

Dans le cas des sols fins, ces deux techniques sont utilisées afin de rendre les sols aptes à supporter des structures routières. Le traitement des sols avec la chaux est une technique qui consiste à incorporer, au sein du sol, cet élément d'apport, pour diminuer à court terme la teneur en eau des sols plastiques, de neutraliser, et aussi de flocculer les argiles.

L'ajout de la chaux provoque une modification physicochimique importante du sol, ainsi il corrige ses défauts et améliore ses qualités, par une diminution de l'indice de plasticité (I_p), une augmentation de l'Indice portant, et produit un aplatissement de la courbe Proctor Normal avec une diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale. La chaux élève, donc, la contrainte au cisaillement et transforme les caractéristiques de compactage du matériau (Figure III.1).

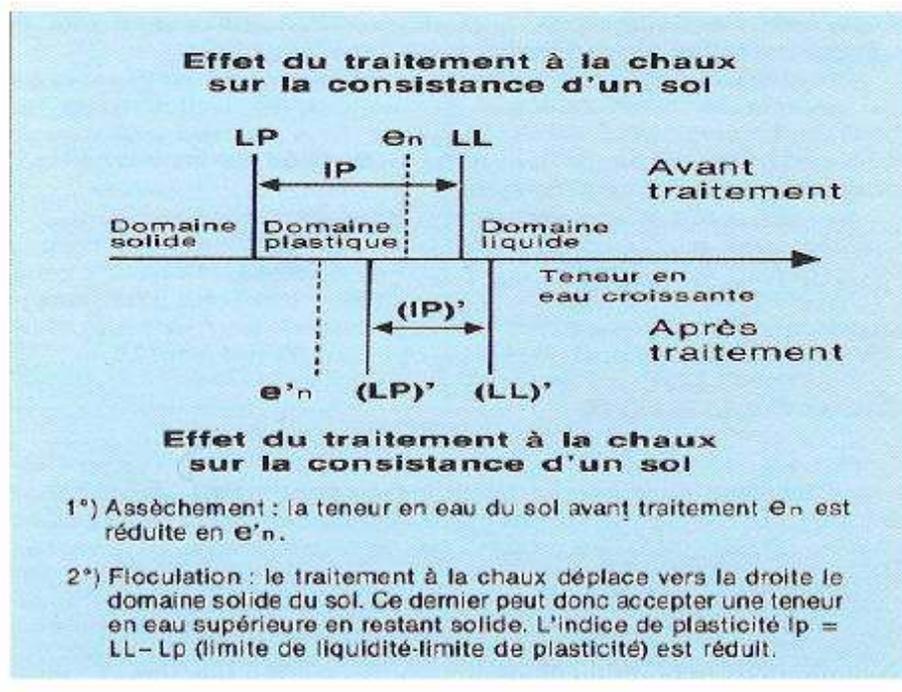


Figure III.1: Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de la chaux vive

Le traitement à la chaux améliore, durablement, la portance des sols ainsi que leur résistance, donc il permet de réduire l'épaisseur totale d'un corps de chaussée (Figure III.2), et aussi de réduire l'achat et le transport de matériaux supplémentaires.

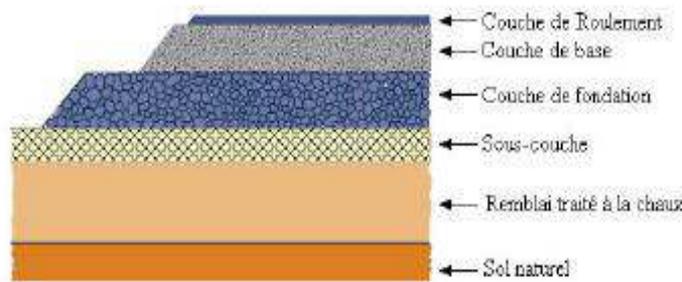


Figure III.2: Coupe transversal de la route

III.3. La chaux

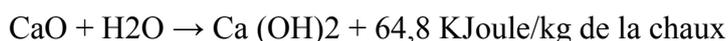
La chaux est un produit naturel et biologique, qui respecte l'environnement. La chaux est une matière, généralement, poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée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

a. Basicité

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

b .Hydratation

La chaux vive est très avide d'eau. En s'hydratant, elle s'éteint avec un fort dégagement de chaleur selon la réaction chimique suivante:



Cette propriété est utilisée pour assécher des sols très imprégnés d'eau.

c. Flocculation

Le phénomène de flocculation s'explique par la formation de ponts $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CaOH^+ entre les feuillets d'argile, ce qui modifie la consistance du milieu et le fait de passer d'un état plastique à une structure grumeleuse stable ce qui permet un bon compactage (ou une bonne consolidation). La chaux utilisée dans cette étude est une chaux fabriquée à l'unité d'Oum Djérane (wilaya de Saida) affiliée au groupe ERCO (Entreprise des Ciments et Dérivés de l'Ouest) à l'ouest Algérien. Le tableau III.1 donne les caractéristiques chimiques et physiques de la chaux utilisée dans cette étude.

Caractéristiques de base		La fiche technique de la chaux
Apparence physique		Poudre blanche sèche
Oxyde de calcium CaO	(%)	> 73.3
Oxyde de magnésium MgO	(%)	< 0.5
Oxyde de fer Fe ₂ O ₃	(%)	< 2
Oxyde d'aluminium Al ₂ O ₃	(%)	< 1.5
Dioxyde de silicium SiO ₂	(%)	< 2.5
Trioxyde de soufre SO ₃	(%)	< 0.5
Oxyde de sodium Na ₂ O	(%)	0.4 - 0.5
Dioxyde de carbone CO ₂	(%)	< 5
Carbonate de calcium CaCO ₃	(%)	< 10
Densité spécifique	(g/cm ³)	2
Plus de 90 µm	(%)	< 10
Plus de 630 µm	(%)	0
Matériau insoluble	(%)	< 1
Densité apparente	(g/l)	600-900

Tableau III.1: Caractéristiques physico-chimique de la chaux utilisé

La chaux doit être suffisamment fine afin de réagir rapidement avec le sol (Cette caractéristique est garantie avec une granulométrie de 0-2mm). Lors du traitement des sols argileux à la chaux deux importantes réactions se produisent simultanément:

- a. Une réaction d'hydratation, fortement exothermique, de la chaux vive avec l'eau présente dans les sols en diminuant la teneur en eau de ceux-ci. Cette réaction dégage de la chaleur, ce qui réchauffe le sol et entraîne l'évaporation de l'eau. La chaux hydratée peut, alors, réagir avec les minéraux argileux, provoquant une floculation des argiles.
- b. Une deuxième réaction lente, qui durcit progressivement le mélange sol-chaux compacté, responsable des effets à long terme (stabilisation du sol).

La chaux augmente le PH du sol, ce qui libère les silicates et les aluminates. Ces derniers peuvent, alors, réagir avec le calcium apporté par la chaux et l'eau présente dans le sol. Dès ce moment débute le durcissement du sol. Alors, la portance du sol, dépend de la nature et de la réactivité des minéraux argileux présents dans le sol à traité, ainsi que de la quantité de chaux ajoutée.

III.4. Essais sur les sols

Pour décider de la pertinence d'un traitement de sol, il faut le reconnaître et en prélever des échantillons représentatifs. L'étude préalable de ces échantillons en laboratoire portera sur l'état et les caractéristiques des sols à traiter. Afin de déterminer les caractéristiques du sol, un programme expérimental a été mené au Laboratoire de Mécanique des Sols de l'université de Tébessa (choix des matériaux utilisés: sol et chaux), analyses minéralogiques et chimiques; et essais d'identification physique. Le sol utilisé dans cette étude a été obtenu à partir d'un site traversé par une nouvelle route (évitement de Tébessa). La lithologie des puits effectués dans le terrain, montre une certaine hétérogénéité elle est représenté dans la majorité par des argiles brunâtres, des limons argileux noirâtre et des argiles limoneuses brunâtres (Tableau III.2).

Profondeur (m)		Description lithologique
0.60		Terre végétale.
7.00		Argile limoneuse brunâtre
17.00		Argile marneuse brunâtre grisâtre

Tableau III.2: Description lithologique

Après leur extraction, les sols ont été mis dans des sacs en plastique hermétiquement fermés pour maintenir la teneur en eau intacte. Les échantillons remaniés ont été prélevés pour la détermination de la teneur en eau naturelle de 0.1m jusqu'à 3.00 m de profondeur. Il est indispensable, avant tout démarrage de travaux d'avoir une idée des caractéristiques physiques et chimiques du sol en

présence (Tableau III.3) et, ainsi, de comprendre son comportement mécanique, parce que la bonne connaissance des qualités du sol permet: d'évaluer l'intérêt du traitement de sol (Figure III.3 et Figure III.4) de déterminer le liant hydraulique de traitement à utiliser, et d'avoir une idée de la quantité du liant de traitement à ajouter au sol.

Teneur en eau w%		15.80
Densité sèche γ_d t/m ³		1.50
Degré de saturation sr %		53
Densité humide γ_h t/m ³		1.75
Analyse Granulométrique	Dmax (mm)	2
	2mm	100
	0.080mm	98.4
Limites d'Atterberg	WL %	58
	IP %	36
Valeur de Bleu de Méthylène Analyses Chimiques	VBS %	8.67
	Teneur en CaCo ₃	47.69
Proctor modifié	W opt %	18
	γ_d opt t/m ³	1.85
Indice CBR imbibé à 4 jours	%	4.47

Tableau III.3: Caractéristiques physico-chimique du sol étudié

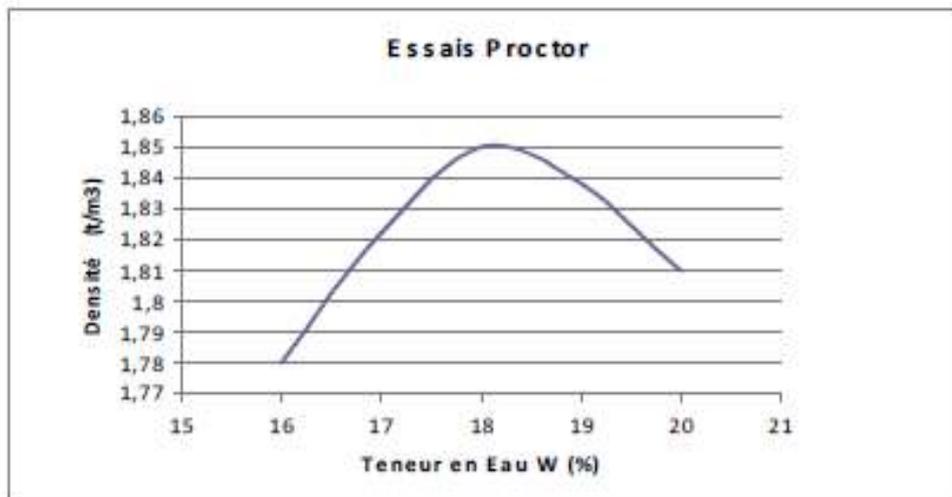


Figure III.3: Courbe de compactage Proctor

On distingue deux grandes familles de paramètres dont la connaissance est capitale pour la caractérisation d'un sol vis-à-vis de son traitement à la chaux:

a. Les paramètres de nature

Ils caractérisent ce qui ne varie pas (ou peu) dans le temps ou au cours des manipulations que peut subir le sol (la granularité, l'argilosité, et la présence de constituants chimiques particuliers);

b. Les paramètres d'état des sols

L'état hydrique (teneur en eau) conditionne le choix de l'agent de traitement le mieux adapté et les dosages nécessaires à appliquer.

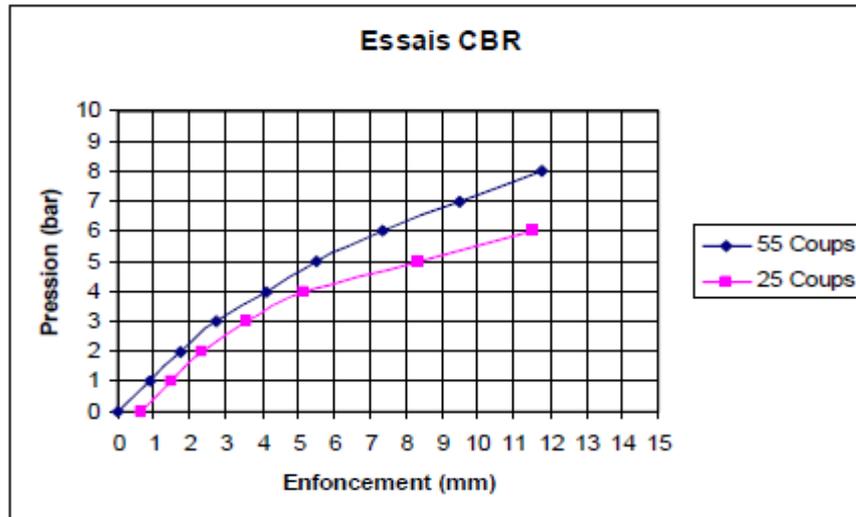


Figure III.4: Essai CBR

III.5. Etude de formulation

L'étude de formulation effectuée au laboratoire a pour objet de préciser le pourcentage de la chaux à ajouter en fonction des teneurs en eau rencontrées. Elle permet, également, de tester directement l'efficacité d'un traitement pour obtenir les performances recherchées pour une application visée par la fixation de la quantité d'agent de traitement à utiliser (Tableau III.4). Cette étude comporte, en générale, des mesures de sensibilité à l'eau, par essai CBR.

Nature du sol	Dosage moyen en Chaux	Domaine d'emploi du sol Traité
Sols fins moyennement à Fortement argileux	Chaux vive : 1 à 3 %	Utilisés en remblai
	Chaux éteinte : 3 à 5 %	Utilisés en couches

Tableau III.4: Domaine d'emploi du sol traité à la chaux

Il faut faire une étude de formulation, ce qui permet de vérifier le comportement du sol traité et de déterminer le dosage optimal à appliquer. Toutefois, si une étude n'est pas souhaitée, on peut appliquer les dosages maximaux, mais il faut être conscient des risques encourus (teneur en eau pas optimale, manque de résistance au gel, gonflement,...). Un faible pourcentage en chaux (1 à 3%) est, généralement suffisant pour l'amélioration du comportement des sols plastiques ou argileux.

III.6. Essais sur le sol traité

Compte tenu de ses propriétés, la chaux modifie de façon sensible le comportement des sols fins argileux ou limoneux, grâce à trois actions distinctes:

- a. Une diminution de la teneur en eau des sols argileux;
- b. Des modifications immédiates des propriétés géotechniques du sol, par une diminution de l'indice de plasticité I_p , une augmentation de l'indice portant immédiat I_{PI} , et une diminution de la densité de l'optimum Proctor (avec une augmentation de la teneur en eau optimale);
- c. Des modifications à long terme, car la chaux élève le PH du sol c'est-à-dire diminue son acidité et provoque l'attaque des constituants du sol (silice et alumine). Il se forme alors des aluminates et des silicates de calcium hydratés (réaction pouzzolanique) qui, en cristallisant, agissent comme un liant entre les grains du sol (l'augmentation du PH contribue à un bon sous-sol). La complexité de cette étude d'identification varie avec la diversité géologique du terrain et l'application visée (remblai, sol-support, couche de forme).

III.6.1. Influence du traitement sur l'optimum Proctor

L'essai Proctor consiste à déterminer l'optimum à partir de plusieurs mesures de densité sèche, effectuées sur des sols présentant une teneur en eau croissante. Les argiles présentent une sensibilité à l'eau que le traitement à la chaux permet de limiter: la courbe est plus aplatie en même temps que l'optimum Proctor est déplacé vers des teneurs en eau plus fortes (Figure III.5).

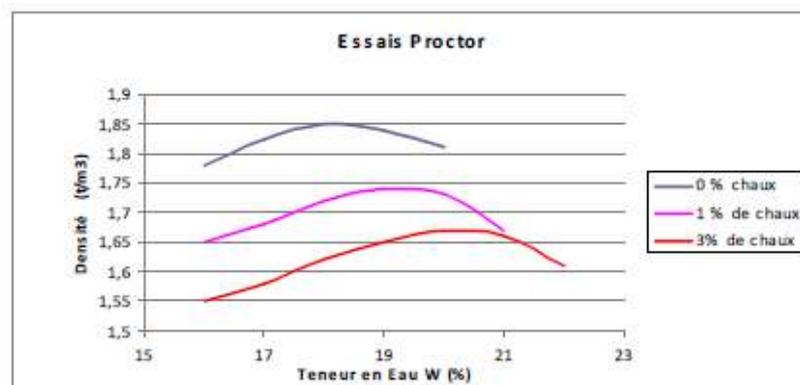


Figure III.5: Essai Proctor avant et après traitement

III.6.2. Influence du traitement sur l'indice CBR

La détermination de l'indice CBR, en fonction de la teneur en eau du sol pour des pourcentages variables de chaux, montre l'augmentation très rapide de cet indice en fonction du traitement avec l'augmentation de la cohésion. A compacité égale et à teneur en eau égale, l'indice CBR du

mélange sol-chaux est, à l'âge de deux heures, 4 à 10 fois plus grand que celui du sol non traité. Dans notre exemple on a remarqué après deux heures, pour une teneur en eau initiale de 18%, l'indice CBR, de 8 avant traitement, passe à 28 pour 1% de chaux et à 64 environ pour 3% de chaux (Figure III.6).

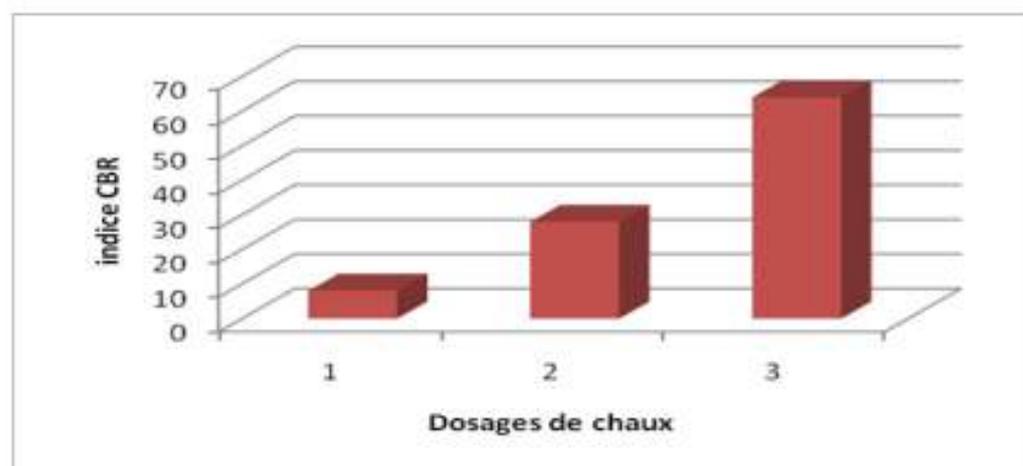


Figure III.6: Indice CBR en fonction du pourcentage de chaux

III.6.3. Influence du traitement sur la plasticité

On peut remarquer après l'ajout de la chaux, à notre sol, une réduction de l'indice de plasticité I_p et la valeur au bleu de méthylène (VBS), Voir le tableau III.5.

Pourcentage de la chaux	Indice de Plasticité IP	Valeur de Bleu de Méthylène VBS
0%	36	8.67
1%	32	8.04
3%	21	6.80

Tableau III.5: Variation des limites d'Atterberg et la valeur au bleu du sol étudié en fonction du pourcentage de chaux

On a remarqué une faible augmentation de l'indice CBR pour quelques échantillons à cause de quelques éléments perturbateurs (des matières organiques et des sulfates).

III.7. Influence du ciment sur le gonflement et la Microstructure d'une argile naturelle

La sécheresse qui a sévi en Algérie durant les trois dernières décennies et plus particulièrement dans les régions de l'Ouest du pays a fait subir aux bâtiments construits sur des sols gonflants des dommages considérables tels que les fissurations et le soulèvement de fond de fouilles. Nous nous sommes intéressés au comportement d'un sol gonflant.

On a d'une part, apprécié l'influence de l'ajout du ciment à différents pourcentages sur le potentiel de gonflement, la pression de gonflement et les limites de consistance de ce sol, et d'autre part nous avons étudié l'influence de ces ajouts sur sa microstructure par des observations au microscope électronique à balayage.

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur du matériau utilisé
Masse volumique des grains solides (NFP94-054)	ρ_s	mg/m ³	2.67
Limite de liquidité (NF P94-051)	W_L	%	49
Limite de plasticité (NF P94-051)	W_P	%	21-21.5
Indice de plasticité (= $w_L - w_P$)	I_P	%	27.5-28
Limite de retrait (NF P94-051)	W_R	%	12
Pourcentage d'éléments inférieurs à 2 μ m (NF P94-057)	F2	%	26
Activité ($A_c = I_P / F2$)	A_c	-	1.10
Valeur de bleu de méthylène (NF P94-068)	VBS	%	9.0
Surface spécifique totale = 21 VBS (TranNgoc Lan 1977)	SST	m ² /g	189
Teneur en carbonate de calcium (NF X31-106)	CaCO ₃	%	18
volumique sèche à l'OPN (NF P94-093)	γ_{dmax}	mg/m ³	1.63
Teneur en eau optimale (NF P94-093)	W_{opt}	%	20

Tableau III.6: Les résultats des essais d'identification sont rassemblés

III.8. Influence du ciment sur les limites de consistance

Les limites d'Atterberg sont des paramètres essentiels dans l'estimation du potentiel de gonflement des sols expansifs. Afin d'étudier l'influence de la stabilisation sur les limites de consistance de l'argile, des mesures des limites de liquidité et de plasticité ont été effectuées avec le ciment à différents pourcentages. Les résultats de ces essais sont consignés dans le tableau III.7.

Matériaux	Limites d'Atterberg	H ₂ O	Ciment		
			2%	4%	6%
Argile	W_L	49	47	44	42
	W_P	21	23	25	27
	I_P	28	24	19	15

Tableau III.7: Limites de consistance mesurées en présence de ciment

A partir de ces résultats on constate que:

Dans la plupart des cas il se produit une diminution sensible de l'indice de plasticité.

D'après ces résultats, nous remarquons que l'influence du ciment est très appréciable, la diminution de la limite de liquidité est proportionnelle au pourcentage de ciment ajouté, de 49% pour l'argile non traitée à 42% pour un ajout de 6% ciment.

Par contre la limite de plasticité croît en fonction du pourcentage d'ajout, elle varie de 21% pour l'argile non traitée, à 27% pour un ajout 6% de ciment. Ceci influe directement sur l'indice de plasticité qui diminue de moitié.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'influence de quelques ajouts sur le comportement du sol, nous avons basé sur des essais réalisés auparavant et d'autre bibliographie. Dans la majorité des cas les ajouts influents positivement sur le comportement du sol c'est-à-dire présentent une amélioration remarquable à savoir l'augmentation de portance, diminution de gonflement, stabilité du sol.