

Comportement des sols plastiques traités à la chaux (région de Tébessa)

Tarek Ninouh^{1*}, Ahmed Rouili^{1},**

*1*Département de Génie Civil Université de Tébessa, Algérie

tninouh@hotmail.com*, *arouili@hotmail.com*

RÉSUMÉ.

Les emprises des projets routiers deviennent plus importantes et de plus en plus contraignantes, mobilisant ainsi des mouvements de terre de plus en plus importants dans des sols parfois difficilement réutilisables, ainsi les gisements naturels de matériaux nobles, inégalement répartis, s'épuisent. Ajouté à ces impératifs économiques, l'apparition d'un nouveau contexte prenant en compte l'amélioration du cadre de vie des gens et la protection de l'environnement, notamment dans la limitation de la constitution de décharges de matériaux impropres à la réutilisation et la préservation des ressources naturelles utilisées par les techniques dites traditionnelles dans l'exécution des remblais et des couches de forme.

Cet article a pour objet d'étudier le comportement des sols plastiques ou limoneux après leur traitement par la chaux ; et de définir la relation qui existe entre certaines propriétés physiques de la chaux, telles que la granulométrie, la basicité, l'hydratation et la floculation, et le comportement du sol traité.

ABSTRACT.

The impact of road's construction projects on sites is becoming increasingly important as it usually involves mobilization of significant earth movements of soils. Natural deposits of clayey fine materials unevenly distributed are seriously affected by those works. The economic imperatives and the emergence of a new context, taking into account the improvement of people's lives and the protection of the environment, particularly in limiting the formation of landfill materials unsuitable for re-use are not usually considered. The preservation of natural resources traditionally used in construction techniques requires more attention in the investigation of the performance of embankments and sub grades. This paper presents some results of an investigation related to the behavior of limonous plastic soils when treated with lime; with the scope of finding the impacts of some properties of the lime on the general behavior of treated soils

MOTS-CLÉS : couche de forme, remblai, sol argileux, chaux.

KEYWORDS: road's sub-grade, embankment, clayey soil, lime.

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 oeuvre 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.

L'approche que nous avons choisie pour comprendre les mécanismes conduisant à la stabilisation du sol support de la future route, est une approche expérimentale. Cette démarche consiste à déterminer les caractéristiques physico-chimiques, mécaniques, et aussi structurales des sols avant et après traitement à la chaux.

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 I.

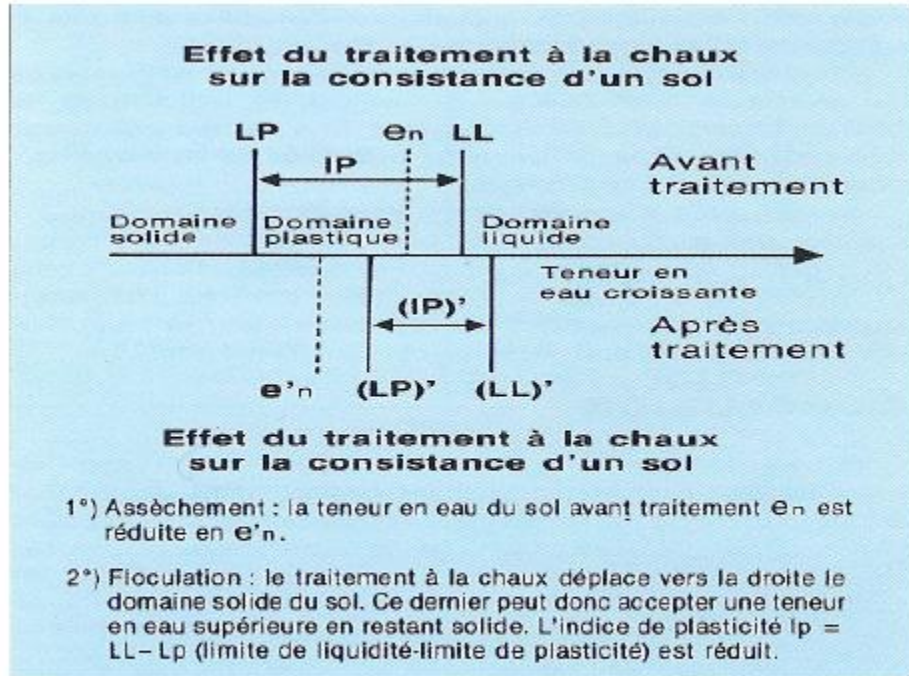


Figure I. *Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide Provoquée par l'introduction de la chaux vive*

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 II, et aussi de réduire l'achat et le transport de matériaux supplémentaires.

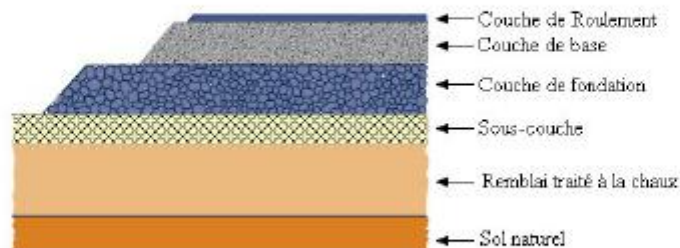


Figure II. *Coupe transversale de la route*

3. La chaux

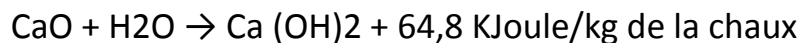
La chaux est un produit naturel et biologique, qui respecte l'environnement. La chaux est une matière, généralement, poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée 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-Floculation

Le phénomène de floculation 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 I donne les caractéristiques chimiques et physiques de la chaux utilisé 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 I. *Caractéristiques physico-chimiques 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.

4. Essais sur le Sol

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 II.




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

Tableau II. *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 3,0 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) 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 et FigureIV), 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. *Caractéristiques physico-chimiques du sol étudié*

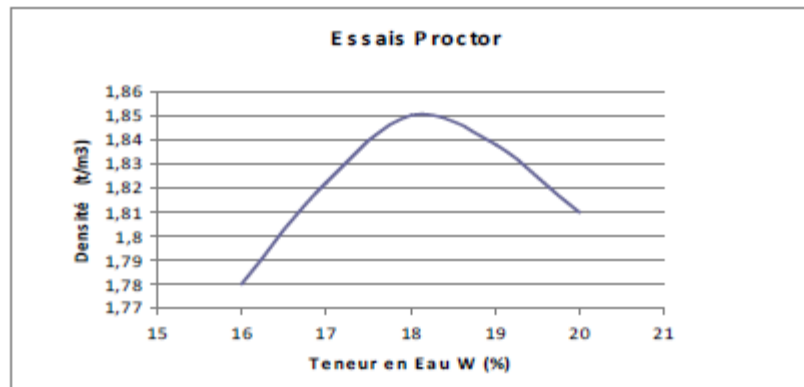


Figure III. *Essai Proctor*

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:

1°) 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) ;

2°) 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.

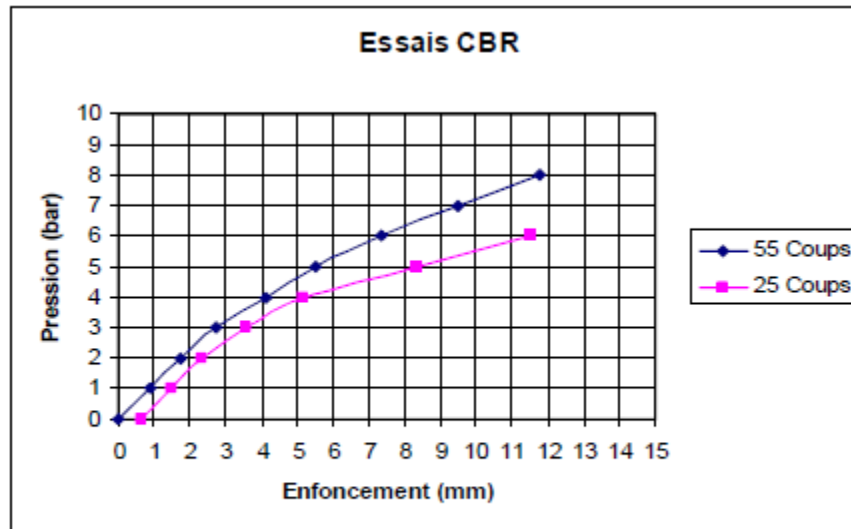


Figure IV. Essais CBR

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 IV. 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 IV. 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.

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 IPI, 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).

6.1. L'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 V.

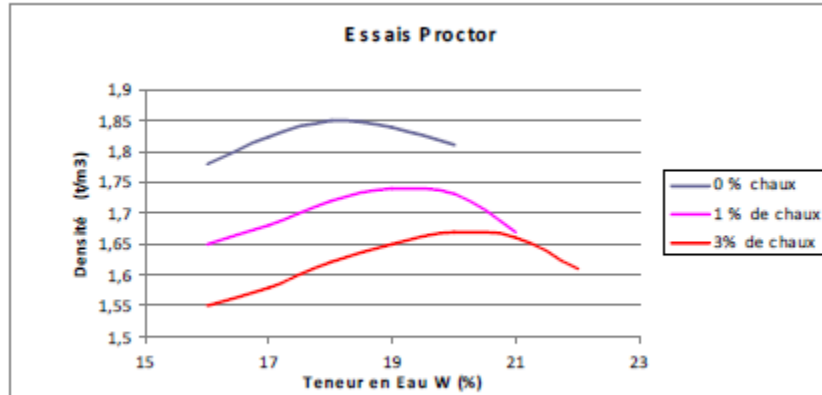


Figure V. Essai Proctor avant et après traitement

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, montrent 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 VI.

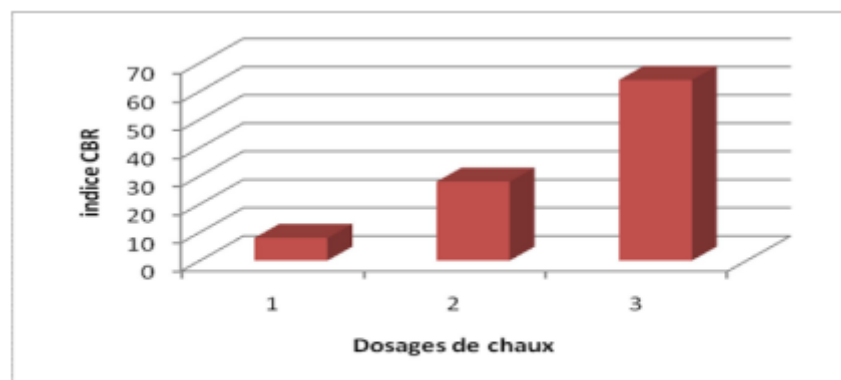


Figure VI. L'indice CBR en fonction du pourcentage de chaux

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 IP et la valeur au bleu de méthylène (VBS), Voir le tableau V.

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 V. *Variation des limites d'Atterberg et la valeur au bleu du sol étudié en fonction du pourcentage de chaux*

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

Conclusion

Les travaux de construction des remblais et des couches de formes représentent une part importante du coût global de réalisation des projets routiers. Cette importance justifie une recherche d'optimisation globale, visant à minimiser les coûts. On a donc intérêt à privilégier les performances des remblais et de la couche de forme des structures routières, en sol argileux ou limoneux, par la technique de traitement des sols à la chaux. L'ajout de la chaux présente de nombreux avantages, notamment : l'économie d'énergie (traitement à froid), l'économie de transport de matériaux (travail in situ), l'économie en granulats d'apports (préservation de l'environnement), et l'économie sur le coût total des projets routiers. Mais dans certains cas, ce type de traitement est inefficace en raison de la présence dans le sol à traiter de perturbateurs, surtout les matières organiques et les sulfates, parce que les matières organiques peuvent retarder l'effet du traitement en consommant une quantité de l'agent de traitement, et aussi les sulfates peuvent entraîner le gonflement du sol. Pour mieux prévoir le comportement à long terme des sols traités, il faut suivre les recherches, notamment sur la durabilité des effets du traitement.

Bibliographie

Aissiou F.Z., Nechnech A.. *Amélioration de Caractéristiques Mécaniques d'un Sol Argileux par Incorporation de Chaux*. SBEIDCO Oran (Algérie), 2009

Cabane Nicolas, *Sols Traités à la Chaux et aux Liants Hydrauliques*, Thèse de doctorat, l'Université Jean Monnet, France 2004

J. Dupraz et Zohry M., *la technique de traitement de sols argileux à la chaux*, Rapport 2004

Fiches techniques, *Traitement des sols à la chaux ou au ciment*, Librairie des Haras 2004

Guide technique, *Stabilisation des sols pour couches de sous-fondation*, Bruxelles, 2003

Mellal F., Lamri B., *Etude du Comportement d'un Remblai Routier Traité à la Chaux*.

SICZS_2010.Université de Chlef (Algérie), 26 – 27 octobre 2010

Docum. technique, *Le traitement des sols à la chaux pour l'exécution des remblais et des couches de forme*, Centre d'information sur le ciment et ces applications, 2004

Recommandations, *Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou au ciment*, centre de recherches routières, Bruxelles 2004

Tangi Le Borgne, *Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010