

## **STABILISATION DES SOLS ARGILEUX PAR LA CHAUX**

### **CLAY SOIL STABILIZATION BY LIME**

Zouhair ATTIMA<sup>1</sup>, Abdelilah DEKAYIR<sup>1</sup>, Mohamed Amine Doss BENNANI<sup>2</sup>, Kamal ELHAMMOUTI<sup>3</sup>

*1 Département des sciences de la terre, faculté des sciences, université Moulay Ismail, 11201 Zitoune, Meknès, Maroc.*

*2 Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes, Meknès. Bd. Saâdyine Q.I. B.P. 5041 AL Bassatine Meknès, Maroc.*

*3 Département des sciences de la terre, faculté des sciences, université Mohamed 1er, BP 717 60000 Oujda, Maroc.*

**RÉSUMÉ** — Ce travail de recherche avait pour objectif la stabilisation des marnes et des sols marneux souvent sujets à des problèmes (gonflements, glissement). En effet, l'ajout de la chaux vive naturelle à ces marnes peut apporter une solution idéale pour les stabiliser et ceci par des modifications intéressantes de leurs propriétés géotechniques. Il a été notamment prouvé que l'addition de la chaux aux marnes dans le domaine humide de la courbe de compactage apporte une contribution très sensible dans la portance et permet d'avoir des qualités meilleures qui sont:

- Une addition de 5% de chaux vive permet d'atteindre la maturation à 48 heures et du coup la stabilisation de sa plasticité,
- Une réduction de sa surface spécifique qui est démontrée par une baisse du VBS
- Une chute de la valeur de sa masse volumique sèche (1.8 %) et de sa teneur en eau optimale,
- Un ajout de 5% de chaux aboutit à une augmentation significative de plus de 100% de son indice CBR (3,6 vers 28,9).

**ABSTRACT** — The goal of this research work was to study the stabilization of marls and clayey expansive soils often subject to geotechnical problems (swelling, rutting, etc.). Indeed, the addition of natural quicklime in marls can bring an ideal solution to stabilize them through modifying their geotechnical properties. It was proved in particular that the addition of the lime to marls in the wet domain of the compaction curve led to a sensitive change increasing their bearing capacity and improving their qualities as:

- An addition of 5 % of quicklime allowed reaching the maturation in 48 hours and then the stabilization of its plasticity,
- A reduction of its specific surface as demonstrated by the diminution of VBS
- A decreasing of its dry density (1.8 %) and its optimum moisture content
- An addition of 5 % of lime led to increase by more than 100 % the CBR index (3.6 to 28.9).

## 1. Introduction

Les marnes du miocène de la carrière d'El Harra, située sur la route RN13, à la sortie Nord de Meknès-Maroc (Fig.1), sont des roches sédimentaires argileuses riches en calcaire. Elles présentent une résistance élevée à l'état sec mais leur comportement est différent une fois en contact avec l'eau ; elles deviennent gonflantes et fragiles, ce qui limite leur utilisation dans les travaux de génie civil et infrastructures.

Les principaux problèmes relevés sont :

Les gonflements importants qui affectent l'ensemble ou une partie de la structure. Une fissuration importante se développe dans la structure sur plusieurs dizaines de mètres.

Un orniérage apparaît après une pluie, rendant difficile la circulation sur la couche de forme, due à leur forte sensibilité à l'eau.

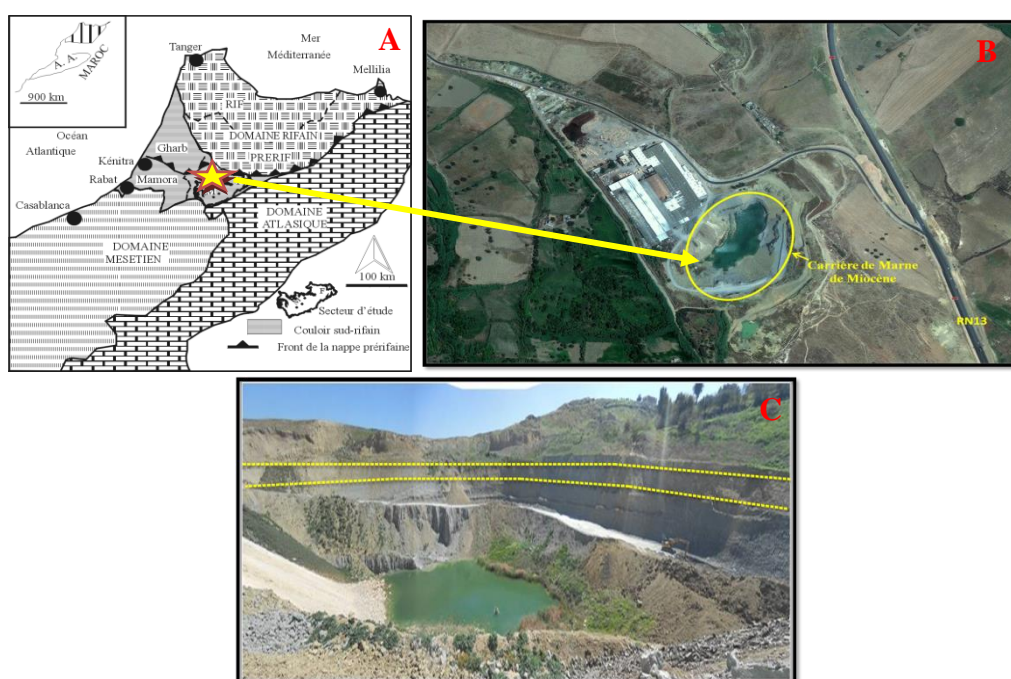


Figure 1: Situation de la zone d'étude (A : carte géologique (Cirac, 1987) ; B : Image satellitaire (Google earth 2013) ; C : image panoramique de la carrière).

## 2. Caractérisation des secteurs d'échantillonnage

### 2.1. Contexte géologique

La série lithostratigraphique du bassin de Saïss comprend de la base vers le sommet (Fig 2) :

Le Burdigalien, situé à la base est constitué de formations grossières détritiques (conglomérats, grès et molasses).

Au dessus, on trouve le Tortonien, caractérisé par le développement d'une série puissante de marne à foraminifères de couleur grisâtre, sur lequel repose le Messinien, représenté par des marnes généralement grises, à la différence du

Tortonien, ces marnes sont localement sableuses et présentent parfois des intercalations gréseuses.

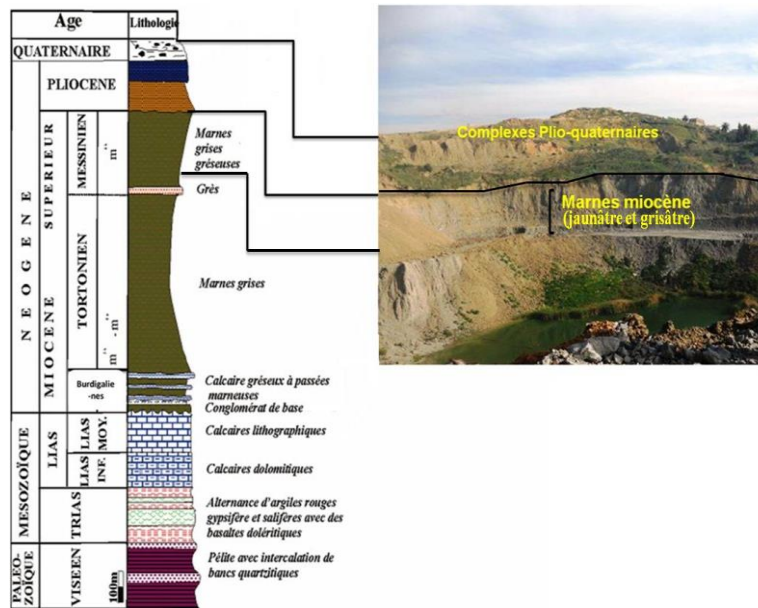


Figure 2: Coupe lithostratigraphique du bassin de Saïss (Essahlaoui, 2000).

### 3. Matériels et méthodes

#### 3.1. Analyse minéralogique, physique et essais géotechniques réalisés

Des prélèvements d'échantillons ont été effectués au niveau de site El Harra et ont été soumis à l'analyse minéralogique au Centre de Recherches et des Technologies (CRT) du technopôle de Borj Cedria- Tunisie, avec un diffractomètre de marque Philips, utilisant une anticathode en cobalt. L'utilisation du logiciel X'Pert High Score Plus version (2) a permis l'identification qualitative et quantitative des différentes phases minérales.

Essai d'identifications physique (Critères granulométriques (NP 18-560)) et chimique de la chaux utilisée (Test de réactivité à l'eau NF P 98-106) et L'analyse élémentaire par spectrométrie de fluorescence X utilisée selon les modalités de la NF P 15-467 au Centre Nationale pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST) Rabat, Maroc.

Les essais d'identification à savoir (L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol (NF P 94-056) et (NF P 94-057), Limites d'Atterberg (Limite de liquidité à la coupelle à l'aide de l'appareil CASAGRANDE- limite de plasticité au rouleau, NF P 94-068), valeurs de bleu de méthylène (son principe est mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur la prise d'essai, NF P 94-068), teneur en CaCO<sub>3</sub> (déterminer la teneur en CaCO<sub>3</sub> par une décomposition chimique du matériau par l'acide chlorhydrique, NM 13.1.029), Essais Proctor (déterminer pour un compactage défini la teneur en eau optimal pour que la densité sèche sera maximale, NF P 94-093), Essai CBR (déterminer l'aptitude des matériaux à supporter

les charges (indice de CBR après immersion), NF P 94-078) réalisés au laboratoire public d'étude et d'essai (LPEE) de Meknès, Maroc.

Essais de traitement des marnes par différents pourcentages de la chaux (Mesures des limites d'Atterberg, essais du bleu de méthylène, essais de compactage et essais CBR imbibés) réalisés au laboratoire public d'étude et d'essai (LPEE) de Meknès, Maroc.

#### 4. Résultats et discussions des essais d'identifications et de traitement

##### 4.1. Les essais d'identifications géotechniques et minéralogiques

Les résultats obtenus à partir des essais d'identifications géotechnique et minéralogique réalisés sur la marnes et la chaux sont présentés dans les tableaux I et II.

Tab I : Propriétés physico-chimiques et mécaniques de la marne d'El Harra.

Les essais sur les Marnes miocène	Résultats
pourcentage des inférieurs à 0,08 mm :	99 à 100 %
la teneur en argile :	46 à 50 %
Limite de liquidité WL% :	45 à 62 %
Limite de plasticité WP% :	24 à 28 %
Indice de plasticité IP% :	24 à 31 %
valeurs de bleu de méthylène (VBS) :	4, 5 à 5,2 %
Surface spécifique Sst (m <sup>2</sup> /g)	210 à 254 m <sup>2</sup> /g
Carbonate de calcium CaCO <sub>3</sub> :	30 %
la densité sèche optimale :	1,70 KN /m <sup>3</sup>
la teneur en eau optimale :	22,1 %
indice.CBR :	3,6
Diffraction du rayon X sur poudre :	Quartz 20%, CaCO <sub>3</sub> 25%, phyllosilicate 55%
Sur lames orientés :	Illite 28%, Kaolinite 7%, Smectite 18% et Chlorite 2%

Tab II : Caractéristiques physico-chimiques de la chaux.

CaO %	MgO %	200 µm	80 µm	60 °c
56%	38%	≥ 80 %	≥ 50 %	< 25 min.

Sur la base des résultats d'identification on constate que les marnes miocènes d'El Harra sont de type:

Classe R34 selon la classification GMTR, l'état de fraction 0/50 mm de cette marne fragmentable est caractérisée A2 à tendance A3 selon la même classification GMTR.

Classe argile moyennement plastique à tendance très plastique selon la classification LCPC,

Classe St0 (I.CBR = 3,6 < 4) selon le catalogue des structures de chaussée neuve (CSCN).

L'analyse minéralogique montre l'existence d'espèce minérales gonflantes, telles que la smectite.

Cela signifie que les marnes de ce site ont une aptitude faible à supporter les charges et donc il faut améliorer leur portance par un traitement à la chaux.

Selon les résultats du tableau II ainsi que la norme de spécification (NF P 98-101), on peut dire que la chaux vive de Casablanca est conforme pour son utilisation dans le traitement de ces marnes.

#### *4.2. Stabilisation des sols par l'ajout de chaux*

La stabilisation des sols argileux par la chaux est contrôlée par quatre réactions:

##### *4.2.1. Echange cationique*

La dissolution de la chaux dans un sol argileux hydraté libère des cations de calcium  $Ca^{2+}$  et des hydroxyles  $(OH)^-$ . Les cations sont instantanément adsorbés et intercalés dans l'espace interfoliaire des smectites (structure TOT) et remplacent les différents cations inter-foliaires existants. Cet échange induit des forces attractives entre les feuillets d'argile et réduit la double couche d'eau diffuse (Arabi et Wild, 1989). Cette réaction instantanée se poursuit avec l'addition de la chaux jusqu'à la saturation complète des argiles en calcium.

##### *4.2.2. Floculation et agglomération*

Cet échange cationique entraîne une modification de la densité de la charge électrique superficielle des particules argileuses et par conséquent les couches d'eau interfoliaires disparaissent (Diamond et Kinter, 1965; Bel, 1996; Khattab et al. , 2002 ; Cabane, 2004). Cette floculation - agglomération change la texture de l'argile et améliore la consistance des sols argileux traités.

##### *4.2.3. Réaction pouzzolanique*

La dissolution de la chaux dans l'eau du sol (libération des cations  $Ca^{2+}$  et anions  $OH^-$ ) permet la saturation de la solution en calcium avec une élévation de pH. En milieu basique et saturé en cation de calcium, les argiles sont attaquées et libèrent l'alumine et la silice qui réagissent avec le calcium en présence d'eau et les hydroxyles provenant de la chaux pour former des hydrates calciques similaires à ceux des ciments (CSH), hydrate d'aluminate calcique (CAH) et hydrate alumino-silicate calcique (CASH) (Clara et Handy, 1963; Eades et Grim, 1966; Bel, 1996; Locat et al, 1996), (Cabane, 2004).

##### *4.2.4. Carbonatation (formation de la calcite)*

La chaux réagit avec le  $CO_2$  atmosphérique pour former des carbonates tels que  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$  selon le type de chaux utilisée. Cette réaction provoque une réduction de la résistance finale à cause de la consommation d'une partie de la chaux disponible pour la réaction pouzzolanique (Diamond et Kinter, 1965; Khattab, 2002; Cabane, 2004).

### 4.3. Les essais de traitement de la Marne par la chaux

#### 4.3.1. Effet de la chaux sur la limite d'Atterberg

Pour chaque teneur en chaux, nous avons effectué des mesures de limites d'Atterberg (Fig.3).

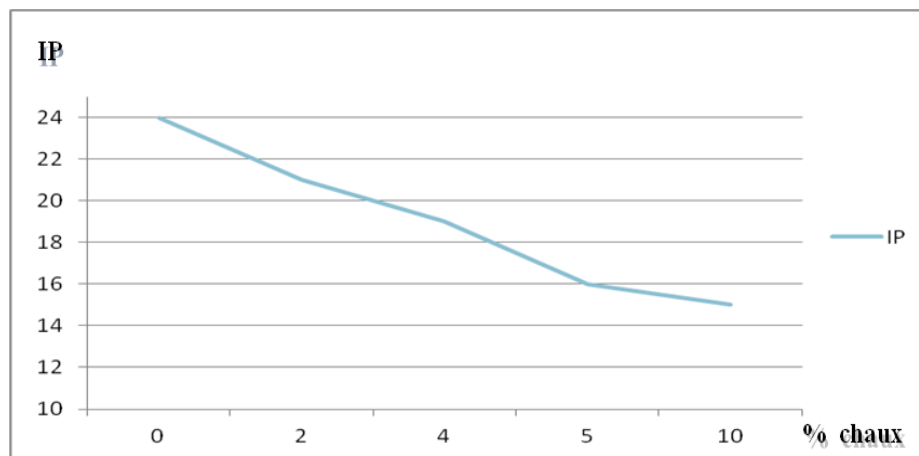


Figure 3: Évolution de l'indice de plasticité de la marne étudiée à différents pourcentages de la chaux.

On observe que l'indice de plasticité «IP » diminue fortement avec la quantité de chaux ajoutée jusqu'à 5 % puis diminue plus faiblement avant de se stabiliser pour des pourcentages plus élevés.

Pour confirmer ce résultat on a suivi l'évolution du mélange marne + 5 % de chaux après 24 h, 48h et 144h (Fig. 4).

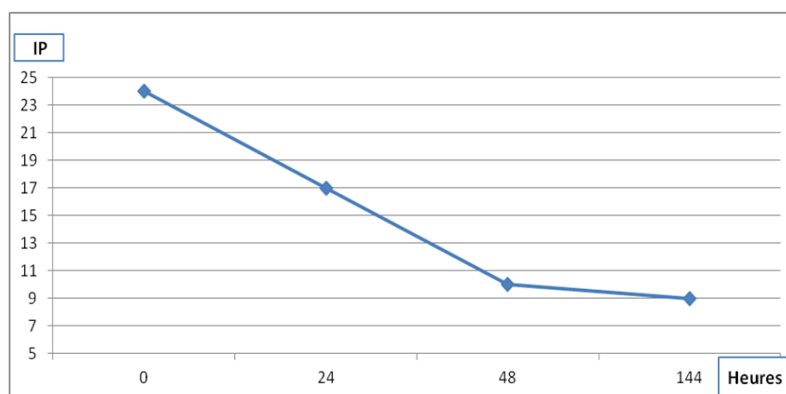


Figure 4: Évolution d'indice de plasticité de marne + 5 % de chaux en fonction du temps.

À t = 24 h : L'augmentation de 74% de WP et 20 % de WL ont comme conséquence une réduction de l'IP de 33 %. C'est le début de la réaction d'échange cationique.

À t = 48 h : L'augmentation continue de plus de 100 % de WP et 30 % de WL ont comme conséquence une réduction de l'IP de 58 %. C'est le point de fixation de la chaux.

À t = 144 h : Une stabilisation remarquable des limites WL et WP causées par la saturation parfaite des marnes par le Ca<sup>2+</sup> existant dans l'espace interfoliaire.

#### 4.3.2. Des mesures de la valeur au bleu de méthylène

Pour chaque teneur en chaux, nous avons effectué des mesures de la valeur au bleu de méthylène. Les résultats des mélanges sont récapitulés dans le tableau III.

TAB III : Les résultats obtenus de VBS

Chaux	0%	5%	10%
VBS %	5,05	3,22	2,39

L'augmentation de la teneur en chaux provoque une diminution du VBS et par conséquent la surface spécifique de la marne traitée diminue. Cette diminution est remarquable pour un ajout de 5 %, par rapport à 10 %.

Les hydrates issus de la réaction pouzzolanique tapissent la surface des particules du sol et agissent comme des liants entre les particules. Ceci réduit la surface spécifique des particules argileuses et par conséquent la valeur au bleu de méthylène.

#### 4.3.3. Effet de la chaux sur l'essai de compactage

Pour chaque teneur en chaux, nous avons effectué des essais de compactage (Fig. 5).

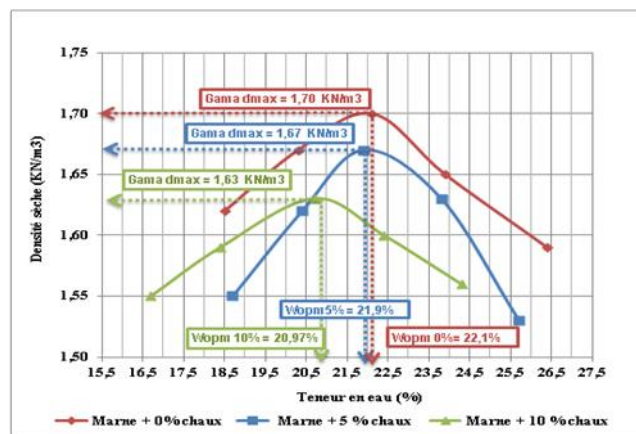


Fig 5: Influence de l'addition de chaux sur les courbes de compactage.

La courbe Proctor de la marne traitée (Fig. 5) est déplacée vers la gauche et vers le bas par rapport à la courbe de la marne non traitée (naturel), c'est-à-dire :

Le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse volumique sèche, La diminution de la teneur en eau est due à la diminution de la surface spécifique des particules argileuses des mélanges traités par les grains fins de la chaux.

#### 4.3.4. Effet de la chaux sur la portance

Pour chaque teneur en chaux, nous avons effectué une étude de la portance (fig.6).

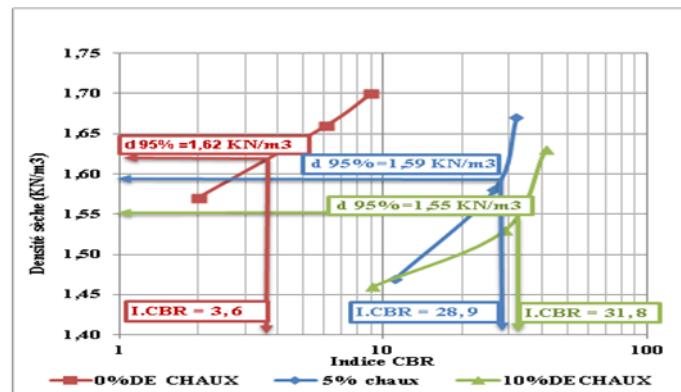


Fig 6: Influence de l'addition de chaux sur les courbes de CBR après immersion.

La figure 6 montre une augmentation remarquable des valeurs d'indice CBR à 5% de chaux (I.CBR = 28,9) par rapport à 10 % de chaux (I.CBR = 31,8).

Lorsque la chaux est mise en contact avec une matière contenant des silicates et des aluminates (ce qui est le cas pour les marnes), il se forme des aluminates et des silicates de calcium hydratés, qui en cristallisant, entraînent une véritable "prise" des matières en contact, tel est le cas de la prise du ciment. Cette réaction, dite "pouzzolanique", se traduit par une augmentation de la résistance à la compression simple, de l'indice CBR et de la stabilité au gel.

#### 4.3.5. Analyses minéralogiques par diffraction des rayons X du mélange

L'étude minéralogique des poudres désorientées des mélanges réalisés à 5 % et 10 % de chaux montre :

Que le mélange marne + 5 % de chaux est caractérisé par :

La présence de quartz, de la kaolinite, de l'illite et de la calcite,

Disparition de l'illite-smectite et de la smectite est justifiée par le début de la réaction pouzzolanique.

Que le mélange marne+ 10 % chaux est caractérisé par :

L'apparition des nouveaux minéraux comme la portlandite et la dolomite,

La disparition des minéraux argileux.

La disparition des minéraux est justifiée par la réaction pouzzolanique, par contre l'apparition de nouveaux minéraux est justifiée par la réaction de carbonatation.

## 5. Conclusion

Le traitement à la chaux des marnes très plastiques améliore d'une manière significative ses propriétés géotechniques et permet d'avoir des qualités meilleures, en effet :

Une addition de 5% de chaux vive permet d'atteindre la maturation à 48 heures et du coup la stabilisation de sa plasticité,

Une réduction de sa surface spécifique qui est démontrée par une baisse du VBS,



Une chute de la valeur de sa masse volumique sèche (1.8 %) et de sa teneur en eau optimale,

Un ajout de 5% de chaux aboutit à une augmentation significative de plus de 100 % de son indice CBR (3,6 (St0) vers 28,9(St4)).

Le traitement des ces marnes par la chaux reste une solution idéale pour stabiliser ces types de sols pour des raisons économique, écologique et technique.

### **Références bibliographiques**

Arabi M, Wild S., 1989. Property changes induced in clay soils when using lime stabilization. Municipal Engineer (London). vol.6, April, pp 85 – 99.

Bell F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soil. Engineering Geology. Vol. 42, n° 4, pp 223 – 237.

Cabane N., 2004. Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. Thèse de doctorat de l'École National-Supérieur des Mines de St-Etienne. 173 p.

Clara H, Handy R.L., 1963. Characteristics of lime retention by montmorillonitic clays. Highway Research Record. n° 29, pp 55 – 69.

Diamond S, Kinter E.B., 1965. Mechanisms of soil-lime stabilization. Highway Research Record.n° 92, pp 83 – 102.

Essahlaoui, A., 2000. Contribution a la Reconnaissance des Formations aquifères dans le bassin de Meknès -Fès prospection géo électrique, Etude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau ; thèse de Doctorat en Sciences Appliquée ; Ecole Mohammedia d'ingénieurs. Rabat. 250 p.

Eades J.L, Grim R.E. 1966. A quick test to determine lime requirements for soil stabilization. Highway Research Record. n° 139, pp 61 – 72.

Khattab S.A.A, Al-Mukhtar M, Fleureau J.M., 2002. Effect of initial suction on the swelling pressure and porosity of lime-stabilised clays. Proceedings of 3rd Int. Conference on unsaturated soils 10-13 march, Recife-Brazil, (A.A.Balkema Publishers, Unsaturated Soils, Jucà, de Campos & Marinho Editors, ISBN 90 5809 371 9). Vol. 2, pp 605–609.

Locat J et al., 1990. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. Canadian Geotechnical Journal. vol. 27, pp 294 – 304.

Locat J, Tremblay H, Lerouel S., 1996. Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime. Canadian Geotechnical Journal. vol. 33, n° 4, pp 654 – 669.

NF P 15-113 : norme française. , Décembre 1997, chaux de construction : définition, spécification, et critère de conformité.

NF P 94-056 : norme française. , Mars 1996, sols : analyse granulométrique d'un sol, méthodes par tamisage.

NF P 94-057 : norme française. , Mai 1992, sols : analyse granulométrique d'un sol, méthode par sédimentation

NF P 94-051 : norme française. , Mars 1993, sols : détermination des limites d'Atterberg, limite de liquidité à la coupelle, limite de plasticité au rouleau.

NF P 94-068 : norme française. , Octobre 1998, sols : Reconnaissance et essais : mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux.

NF P 94-078 : norme française. , Mai 1997, Sols : reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice Portant Immédiat – Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

NF P 94-093 : norme française. , Octobre 1999, Sols : reconnaissance et essais – Détermination des référence de compactage d'un matériau : Essai Proctor normal, Proctor modifié

NM 13.1.010/ NF P 94-050 : norme marocaine / française. , Septembre 1995, détermination en teneur en eau pondérale d'un sol – méthode par étuvage.

NM 13.1.029 : norme marocaine. , 2001 Essai sur sols : détermination de la teneur en  $\text{CaCo}_3$ .

Wild S, Arabi M, Leng–Ward G. (1986): Soil–lime reaction and microstructure development at elevated temperature. Clay Minerals. Vol. 21, pp 279 – 292.