

---

# La cimentation naturelle et l'état de compacité des sols macroporeux étude expérimentale

Laouar Mohamed Salah<sup>1\*</sup>, Houam Abdelkader<sup>1</sup>

<sup>1</sup> laboratoire de géotechnique minière, Département de Génie Civil, Université de Tébessa 12002 -Algérie-

...

\* [C\\_laouar@yahoo.fr](mailto:C_laouar@yahoo.fr)

---

**RÉSUMÉ.** Le travail concerne un sujet d'actualité ; les sols macroporeux non saturés. Il s'intéresse essentiellement à l'effet de la teneur en eau, de la cimentation naturelle et de l'état de compacité sur le comportement de ces sols. Plusieurs transformations dans les sols macroporeux surtout en régions arides sont dues essentiellement aux effets liés aux changements climatiques. La synthèse bibliographique est consacrée à une recherche poussée concernant les travaux réalisés sur les sols à effondrement brusque et les sols non saturés. La phase expérimentale est entreprise en utilisant l'œdomètre, le pénétromètre à cône et l'analyseur ultrasonique. L'influence des paramètres retenus est considérée dans chaque série d'essais. Enfin est suggérée une proposition d'une nouvelle approche de prédiction des sols macroporeux basée sur les résultats des essais non destructifs.

**ABSTRACT.** The work relates to a current issue; unsaturated macroporous soil. It is more particularly interested in the effect of the water content, the natural cementation and condition of compactness on the behavior of these soils. Several changes in macroporous soils especially in arid regions are due mainly to the effects of climate change. The literature review is devoted to extensive research on the work done on the soils and the sudden collapse of unsaturated soils. The experimental phase was undertaken using the oedometer, the cone penetrometer and the ultrasonic analyzer. The influence of chosen parameters is considered in each test series which allows us to interpret the effects of several ways. Finally, with the aim to enrich the data specific to the subject, has suggested a proposal for a new approach for predicting macroporous soils based on the results of NDT.

**MOTS-CLÉS :** cimentation, kaolin, sols macroporeux, teneur en eau, ultrasons.

**KEY WORDS:** cementing, kaolin, macroporous soils, water content, ultrasound.

---

## **1. Introduction et problématique**

De large surface de l'écorce terrestre sont couvertes des sols macroporeux, surtout dans les régions arides et semi arides : en Afrique, essentiellement dans le sud Algérien et les pays du sahel africain, en Chine, en Amérique et en Europe de l'Est particulièrement dans la Russie où 14% du territoire total est couverte de sols macroporeux. La profondeur de ces dépôts dépasse parfois les trente mètres. Ces sols sont formés par une structure lâche, formées souvent de grains allant du silt aux particules fines. A l'état sec, une cimentation naturelle entre les grains confère, à ces sols, une importante liaison intergranulaire et peuvent supporter des charges très élevées. Cependant, la saturation, même sans chargement supplémentaire, provoque la désintégration des liaisons donnant une structure plus dense suivie d'un effondrement soudain des particules du sol. A cause des potentiels d'affaissement important et des conséquences graves qui peuvent se produire dans les constructions, ce type de sol est considéré instable comme assise de fondations. Parmi les causes de saturation de ces sols il y a la remontée des nappes phréatiques, l'infiltration de l'eau par le dessus et les fuites dans les canalisations.

Des désordres importants causés par l'affaissement des sols macroporeux ont été enregistrés dans plusieurs régions du monde. Récemment, les observations faites dans les régions de Biskra et de Hassi Messaoud en Algérie, en constituent une bonne illustration (CTC, 2002). L'affaissement de Cheria 2009 à l'Est Algérien constitue aussi un bon exemple, où un grand effondrement a été enregistré, dans lequel des dizaines de constructions se sont enfoncées de plus de deux mètres et demi dans le sol. En attendant d'accomplir les mesures de l'expertise technique, le constat impute cette catastrophe à un mouvement dans les nappes phréatiques. Une étude géotechnique faite par (LNHC, 2000) dans le cadre de la réalisation d'une station de gaz naturel à Hassi Messaoud montre que le site est composé de deux couches de nature affaissable, la solution adoptée est la substitution de la première couche et de prendre des mesures pour éviter l'infiltration des eaux à la seconde couche. Les cycles de sécheresse prolongée qui se sont produits ces dernières années à plusieurs reprises et dans plusieurs régions du monde modifient les paramètres régissant le comportement du sol et donnent naissance à de nouvelles zones de sol macroporeux, (Laouar, 2010).

## **2. Caractéristiques des matériaux**

Les essais ont été effectués sur six sols reconstitués au laboratoire composés de deux types de sables de dunes et de kaolin en différentes proportions, pour lesquels l'application des critères rapportés par (Abbeche et al, 2007), montre que ceux-ci sont macroporeux et susceptible à l'affaissement. Les matériaux entrant dans la reconstitution ont les caractéristiques suivantes:

**Sable de dunes 1 :** Granulométrie comprise entre 0.08 et 2mm, dont 1.36% des particules < 80  $\mu\text{m}$ ,  $C_u=3.91$ ,  $C_c= 1.33$ ,  $E_s= 72.25\%$ .

**Sable de dunes 2 :** Granulométrie comprise entre 0.08 et 2mm, dont 3.01% des particules <80  $\mu\text{m}$ ,  $C_u=2.19$ ,  $C_c=0.94$ ,  $E_s=68.59\%$ .

**Kaolin:**  $W_L=65.83\%$ ,  $W_P=39.64\%$ ,  $G_S=2.49$ ,  $\%<2\ \mu\text{m}=43\%$ .

Les caractéristiques géotechniques des sols reconstitués sont présentées dans le tableau 1.

**Tableau 1.** Caractéristiques des sols reconstitués

SOL	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Kaolin (%)	15	35	50	20	30	40
Sable de dunes 1 (%)	85	65	50	-	-	-
Sable de dunes 2 (%)	-	-	-	80	70	60
$G_s$	2.65	2.59	2.46	2.62	2.56	2.48
$w_L$ %	16.47	26.63	35.37	18.47	28.97	33.42
$w_P$ %	11.03	15.37	20.87	11.95	14.77	19.03
$\gamma_d$ max ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.04	1.95	1.84	1.95	1.82	1.75
$w_{opt}$ (%)	8.62	9.43	13.88	12.82	14.67	17.82
$\%<2\ \mu\text{m}$	4.91	11.73	16.74	7.03	9.84	14.12

### 3. Programme expérimental

Le programme des essais représenté au tableau 2 comporte trois séries d'essais. Dans chaque essai le compactage est effectué au moyen de la dame de compactage décrit par (Ayadat et al, 1996).

**Tableau 2.** Programme des essais

TYPE D'ESSAI	PARAMETRES RETENUS	OBSERVATIONS
<b>Essais œdométrique</b>	Teneurs en eau : 2%,4%,6% et 8%. Degrés de compactage : 10, 25,40 et 60coups.	réalisés selon la procédure de Jennings et Knight.
<b>Essais de pénétration</b>	Teneurs en eau : 2%,4%,6% et 8%,10%,12%, et14%. Degrés de compactage : 10, 25,40 et 60coups.	réalisés au Pénétrömètre à cône.
<b>Essais aux ultrasons</b>	Teneurs en eau : 2%,4%,6% et 8%. Degrés de compactage : 10, 25,40 et 60coups.	Menés à l'aide d'Analyseur ultrasonique.

## 4. Résultats expérimentaux et interprétations

### 4.1 Mise en évidence de l'affaissement

L'objectif des essais de compressibilité est de vérifier si ces sols détiennent les propriétés des sols macroporeux. L'évolution des teneurs en eau et des états de compacité permet de contrôler les divers potentiels d'affaissement. Les courbes obtenues, figure 1, sont similaires à celle de (Knight et al, 75). Les potentiels d'affaissement CP (%) sont calculés par la relation :

$$Cp = \frac{\Delta e_c}{1 + e_0} \times 100\% \quad \text{Avec : } \Delta e_c = e_1(200\text{kPa}) - e_2(200\text{kPa, inondé})$$

$e_0$  : Indice des vides initial,  $e_1$ : indice des vides sous  $P = 200$  kPa

$e_2$ : indice des vides sous  $P = 200$  kPa (inondé).

D'après la classification de (Jennings et al, 1975), il y a risque d'effondrement, si le CP est supérieur à 1. Les résultats obtenus, pour différentes teneurs en eau initiales ( $w_0$ ) et énergies de compactages (E), montrent que le potentiel d'affaissement CP varie : pour le sol S1, de 0.52 % à 7.54 % ; pour le sol S2, de 0.59 % à 8.34 % ; pour le sol S3, de 0.83 % à 8.92 % ; pour le sol S4, de 0.66 % à 7.61 % ; pour le sol S5, de 0.74 % à 7.84 % ; pour le sol S6 de 0.77 de % à 7.9 %. Ces résultats correspondent aux rubriques allant de « pas de risque » à « troubles ».

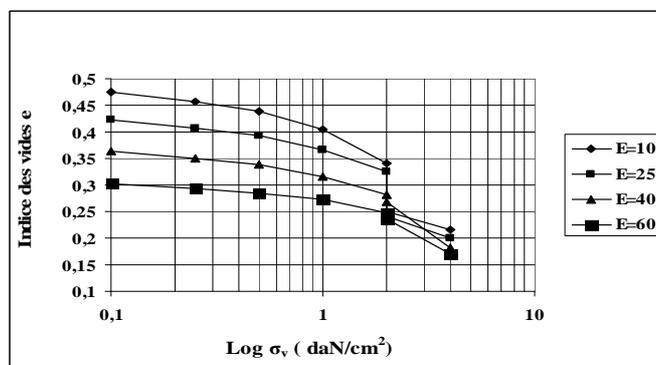


Figure 1. Courbes œdométriques sol 6 ( $w_0=8\%$ )

### 4.2 Essais de pénétration

#### 4.2.1 Interprétation des pénétrations en fonction de $w_0$

Les teneurs en eau initiale entre  $w_0 = 2\%$  et  $w_0 = 8\%$  ne donnent pas une idée claire sur le comportement des sols étudiés ; à cet effet, l'accroissement des teneurs

en eau est augmenté jusqu'à 14 %. Les courbes qui en découlent sont divisées en deux versants, Figure 2:

Dans le premier, l'affaissement diminue progressivement avec l'augmentation de la teneur en eau jusqu'à une limite inférieure quand la teneur en eau initiale se rapproche de l'optimum de Proctor.

Dans le second versant on constate un comportement inverse dans lequel l'affaissement croît avec l'augmentation de la teneur en eau. Une conduite similaire est constatée pour tous les sols testés.

Vu sa rapidité et sa commodité par rapport à l'essai Proctor, il peut être plus pratique pour les projets de compactage des sols macroporeux d'utiliser l'essai de pénétromètre à cône pour la détermination de la pénétration limite et la teneur en eau correspondant ; qui divise la courbe de pénétration en deux versants le premier sec, le second est mouillé. Ceci est analogue à l'essai Proctor dans lequel la teneur en eau optimum sépare aussi la courbe de compactage en deux versants ; sec et mouillé. On peut en déduire qu'à propos des sols macroporeux effondrables, il y a une proportionnalité inverse entre l'essai de pénétration et l'essai Proctor, le premier servant à déterminer la pénétration limite et le deuxième la densité sèche maximale.

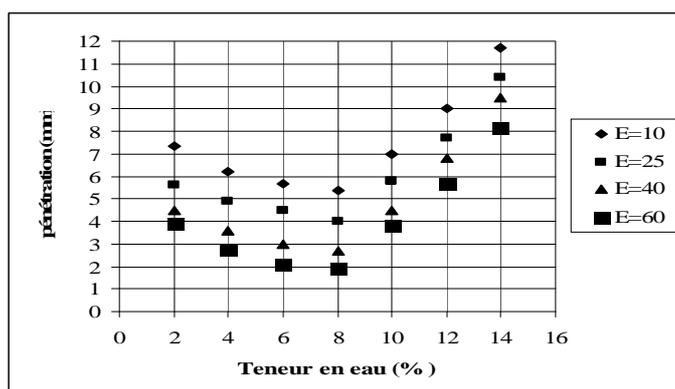


Figure 2. Variation de la pénétration en fonction de la teneur en eau (sol3)

#### 4.2.2 Interprétation des pénétrations en fonction de $w_{opt}/w_0$

Les sols macroporeux sont caractérisés par la condition  $w_{opt}/w_0 > 1$ , (Holtz, 1961). L'analyse des courbes de pénétration en fonction du rapport  $w_{opt}/w_0$ , Figure 3, confirme aussi l'existence de deux comportements distincts et séparés par la droite  $w_{opt}/w_0 = 1$ . A gauche de cette droite, la pénétration connaît une décroissance graduelle pour ensuite croître de manière quasiment régulière au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la limite séparant les sols macroporeux affaissables ( $w_{opt}/w_0 > 1$ ) des sols non affaissables. Cette limite correspond à la pénétration limite désignée par Plim.

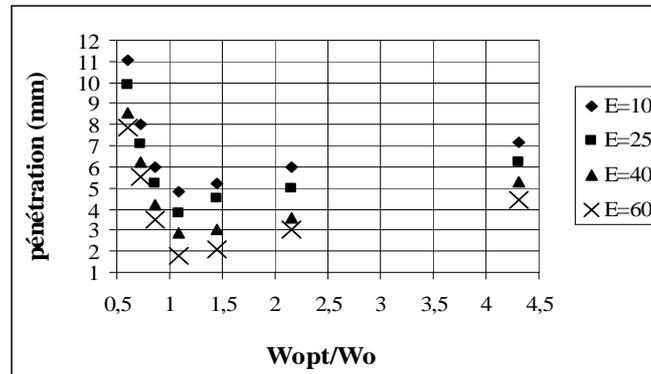


Figure 3. La pénétration en fonction de  $w_{opt}/w_0$  (sol 1)

### 4.3 Essais aux ultrasons

#### 4.3.1 Influence de la teneur en eau et de l'énergie de compactage

Les résultats des essais ultrasoniques montrent que la vitesse ultrasonique varie selon la variation de l'énergie de compactage et/ou de la teneur en eau, Figure 4 et 5. Pour la même valeur de l'énergie de compactage, quel que soit le sol, la vitesse ultrasonique est proportionnelle avec l'accroissement de la teneur en eau. L'accroissement du compactage contribue à l'augmentation des vitesses, surtout lorsque la teneur en eau s'approche de l'optimum de Proctor. Notons que les courbes correspondantes à 60 coups présentent des valeurs de vitesse plus importantes par rapport aux autres énergies de compactage, surtout avec l'augmentation des teneurs en eau. Ceci prouve un bon état de compacité dû à l'humidification et au réarrangement des grains ; c'est le cas de sols non affaisables.

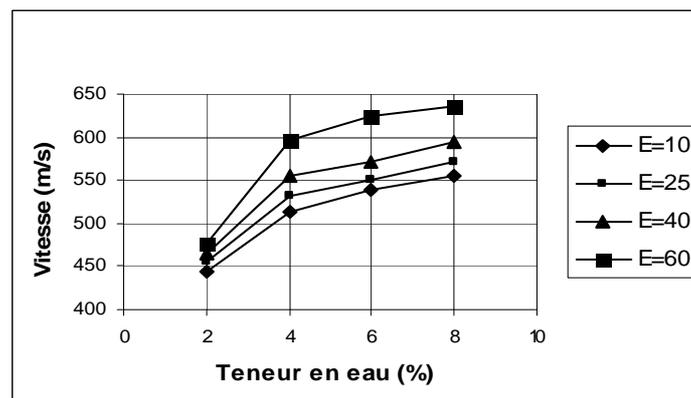


Figure 4. La vitesse en fonction de la teneur en eau (sol 1)

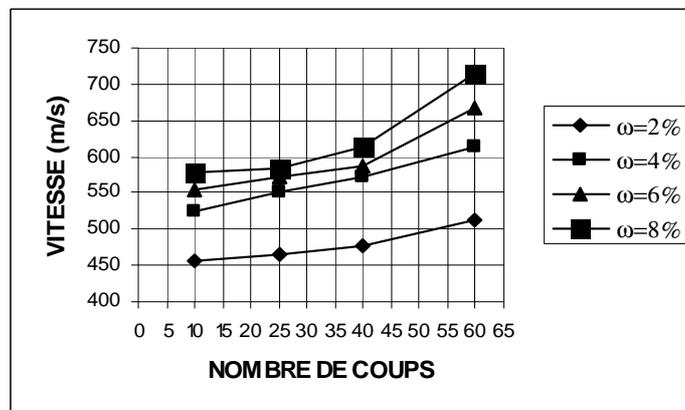


Figure 5. La vitesse ultrasonique en fonction du nombre de coups (sol 4)

#### 4.3.2 Prédiction de l'affaissement par l'essai ultrasonique

Les figures (6 et 7) concrétisent une liaison vitale entre la vitesse ultrasonique et le potentiel d'affaissement ; la décroissance de l'un est synchronisée avec l'augmentation de l'autre. Les courbes de la figure 6 ont la même allure, elles passent par trois phases, au début des droites rectilignes parallèles traduisant une chute importante dans les CP avec des valeurs de vitesse très proches. Ensuite, deux inclinaisons successives des courbes sont constatées ; dans la première, une réduction des CP correspond à une augmentation des vitesses, dans la seconde, la stabilisation de l'affaissement s'explique par de grandes valeurs de vitesses et de potentiels d'affaissement très proche.

Les courbes potentiels d'affaissement en fonction de vitesse montrent que le compactage et la teneur en eau participent à la diminution de l'effondrement et à l'augmentation des vitesses ultrasonique. La figure 7 montre que l'énergie de compactage contribue plus efficacement que la teneur en eau à la réduction de l'affaissement. Pour une énergie de compactage élevée, qui rend le sol non affaissable, on constate une faible variation dans l'état de compacité des sols, cela pour les différentes proportions de teneurs en eau, tandis que la variation des vitesses est plus importante.

A partir de ces constatations, on compare les valeurs de vitesses ultrasoniques en fonction des différents teneurs en eau et énergies de compactage, étant donné que les sols en question ont la possibilité de s'effondrer quand ils sont dans un état lâche, on propose une méthode de prédiction des sols affaissables basée sur des essais ultrasoniques (non destructifs), rapides et faciles à réaliser.

XXIX<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

Les valeurs de vitesses ultrasoniques sont limitées comme suit :

- si  $V \leq 400$  m/s : l'affaissement se manifeste ;
- si  $400 \text{ m/s} < V < 1000$  m/s : l'affaissement peut se produire ;
- si  $V > 1000$  m/s : le risque d'affaissement est écarté.

Dans le deuxième cas la susceptibilité d'affaissement dépend de la teneur en eau et de l'état de compacité du sol.

Cette procédure peut être appliquée sur les sols intacts ou remaniés, au laboratoire et même sur chantier. Vu ses avantages, les résultats de l'auscultation ultrasonique peuvent être généralisés aux différents types de sols affaissables tel que les lèss et d'autres sols non saturés.

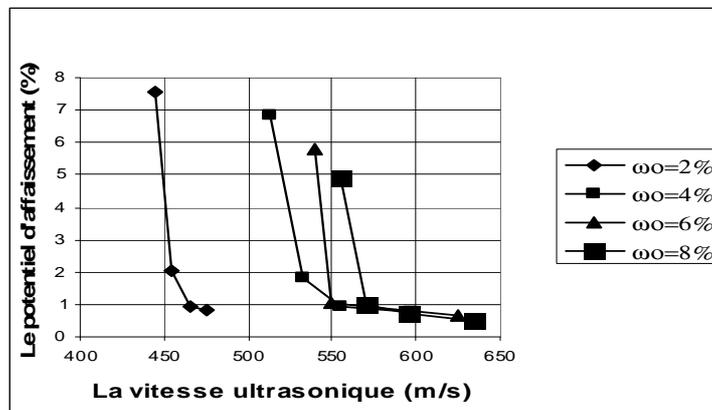


Figure 6. Le potentiel d'affaissement en fonction de la vitesse (sol 1)

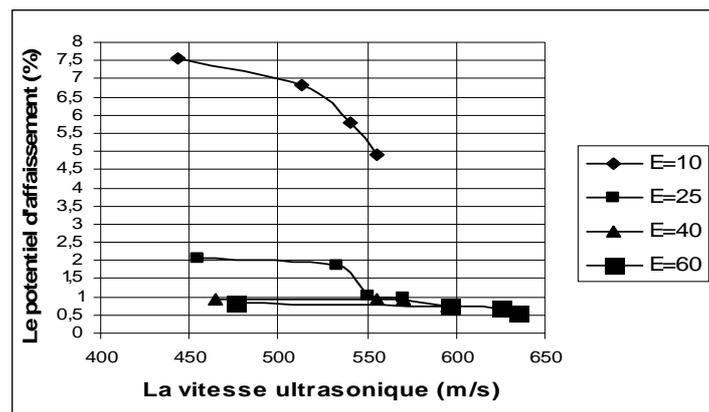


Figure 7. Le potentiel d'affaissement en fonction de la vitesse (sol 1)

#### 4.3.3 Relation pénétration limite vitesse ultrasonique

Les résultats des essais de compressibilité à l'œdomètre montrent que l'énergie de compactage qui correspond à 60 coups rend les sols non affaissables, cela quel que soit le pourcentage des particules fines et la teneur en eau. Cette déduction concorde avec la représentation des pénétrations limites en fonction des vitesses ultrasoniques (figure 8), où on constate que la réduction des pénétrations limites est proportionnelle avec l'augmentation des vitesses ultrasoniques. Pour les énergies de compactage qui varient entre 10 et 40 coups, les sols restent susceptibles à l'effondrement et les droites ont presque la même pente et les mêmes équations de tendances. Une inclinaison remarquable de ces pentes est visualisée on appliquant une énergie de compactage égale à 60 coups ; ce qui explique l'existence d'un comportement similaire propre aux sols affaissables et qui diffèrent complètement du comportement des sols non affaissables.

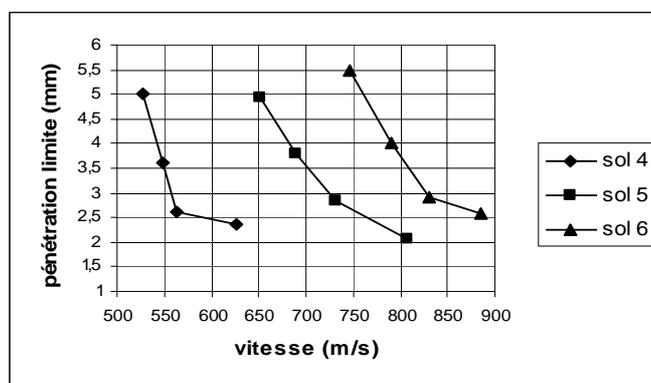


Figure 8. Variation de la pénétration limite en fonction de la vitesse

## 5. Conclusions

Les principaux résultats qu'on peut tirer de cette étude se synthétisent comme suit :

- la cimentation entre les grains est due à la présence des particules de kaolin.
- Plus la fraction en kaolin augmente, les valeurs du potentiel d'affaissement augmentent et l'effondrement s'accroît quelque soit la teneur en eau et l'énergie de compactage.
- Le potentiel d'affaissement peut être important, si la teneur en eau est faible.
- La possibilité d'utilisation du pénétromètre à cône comme moyen d'identification des sols macroporeux permet de suivre l'évolution de l'affaissement et de proposer une pénétration limite, séparant les sols affaissables des sols non affaissables.
- Proposition d'une nouvelle approche expérimentale de prédiction de l'effondrement des sols ; facile et rapide, elle est basée sur des essais ultrasonores.

*XXIX Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.*

- Cette procédure peut être effectuée au laboratoire ou in situ, sur des échantillons de forme quelconque, intacts ou remaniés.

- Les résultats obtenus dépendent de la granulométrie, de l'état de compacité du sol et de la teneur en eau.

- Les vitesses ultrasoniques sont limitées comme suit :

Si  $V \leq 400$  m/s, l'effondrement se manifeste ;

Si  $V > 1000$  m/s, le risque d'effondrement est écarté.

Entre ces deux limites, l'effondrement peut se produire, il dépend de la teneur en eau et de l'état de compacité.

## **6. Bibliographie**

Abbeche K., Hammoud F., Ayadat T., «Influence of Relative Density and Clay Fraction on Soils Collapse». *Experimental Unsaturated Soil Mechanics [C]*. Springer Proceedings in Physics. 112:3–9.2007.

Ayadat T., Bensalem A., Benkerri A., «Traitement d'un sol affaissable par la chaux». *Revue Française de Géotechnique*, n°77.1996.

CTC., Biskra – Intervention du directeur du CTC de Biskra. 2eme coll. Maghrébin de génie civil 10 et 11 December Biskra, Algeria.2002.

Holtz W., Ghilf J W., «Settlement of Soil Foundation due to Saturation» In: *Proceeding 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol 3 673-679. 1961.

Jennings J E., Knight K., «A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain-structure». *Proc. 6th Regional Conf. For Africa on SMFE Durban, South Africa*. PP 99-105. 1975.

Knight K., Jennings J E., «The Additional Settlement of Foundation due to Collapse of Sandy Soils on Wetting». In: *Proceeding. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 316-319.1975.

Laouar M S., «Ultrasonic and cone penetrometer tests for predicting the collapsible soils». *International review on modelling and simulations* .Février 2010.

LNHC., Projet extension des gazoducs à Hassi Messaoud. Rapport de reconnaissance de sol. Laboratoire national de l'habitat et de la construction de Batna, Algérie 2000.