

---

# L'ultrason comme approche pour la prédiction des sols affaissables non saturés

**Mohamed Salah Laouar <sup>\*,\*\*</sup> — Khelifa Abbeche <sup>\*\*</sup> — Farid  
Messaoud <sup>\*</sup>**

*\* Université de Tébessa, Département de Génie Civil, 12000, C\_laouar@yahoo.fr,  
mfarid21@yahoo.com*

*\*\* Université de Batna, Département de Génie Civil, 05000, abbechek@yahoo.fr*

---

*RÉSUMÉ. La plupart des régions arides possèdent des dépôts superficiels de sols granulaires lâches. Ces sols sont susceptibles de subir une grande réduction dans leurs volumes, après mouillage de leur structure, en donnant des tassements exorbitants. De tels dépôts sont connus comme des sols affaissables. La majorité des travaux effectués sur ces sols ont été consacré à la densité sèche initiale, la teneur en eau, le degré de saturation et la charge appliquée. Cette étude expérimentale conduite sur des sols reconstitués a pour but l'identification des sols affaissables en étudiant la relation entre la vitesse ultrasonique et le potentiel d'affaissement après avoir testé les échantillons de sol à l'ultrason.*

*ABSTRACT. The majority of the arid regions have surface deposits of loose granular soils. These soils are suspect to undergo a great reduction in their volumes, after the moisture of their structure by giving huge settlements. Such deposits are known as collapsible soils. Most of the work carried out on these soils was devoted to the initial dry density, the water content, the degree of saturation and the applied load. The purpose of this experimental study led on reconstituted soils is the identification of the collapsible soils by using the cone penetrometer (apparatus developed for the determination of the liquid limit) after having performed a correlation between the limit penetration and the collapse potential. In addition, to studying the influence of the ultrasonic speed on the collapse potential, based on having tested various samples with the ultrasound.*

*MOTS-CLÉS : sols affaissables, potentiel d'affaissement, l'ultrason.*

*KEYWORDS: collapsible soils, collapse potential, ultrasound.*

---

## 1. Contexte et problématique

Les sols affaissables sont des sols métastables, à structure ouverte lâche, de nature non saturés, se trouvant sous forme de dépôts. A l'état sec, une cimentation naturelle entre les grains leur confère 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. Ces sols sont localisés essentiellement dans les régions arides et semi arides. Ils concernent un nombre important de pays notamment ceux de l'hémisphère nord situés entre les 30<sup>ème</sup> et 55<sup>ème</sup> parallèles ainsi que des pays d'Amérique du sud, Abelev (1988).

A cause des potentiels d'affaissement important, ce type de sol est considéré instable comme support de fondations. L'affaissement brusque se produit si la densité sèche et la teneur en eau initiales sont faibles, Cui et al (1999) et Loiseau et al (2001). Si la densité relative est supérieure à 0.65% et la teneur en eau est proche de la teneur en eau optimum il n'y a pas de risque d'effondrement, Abbeche (2007).

Malgré qu'on dispose d'une grande gamme d'équipements ultrasoniques et la vaste utilisation de ce procédé dans les divers domaines, la littérature révèle que, mises à part la géotechnique marine et quelques applications, peu d'attention a été accordée à cette technique dans la mécanique des sols. Le présent travail a pour objectif de proposer une méthode de prédiction des sols affaissables basée sur des essais ultrasoniques. En plus des essais œdométriques, des courbes expérimentales originales des essais non destructifs aux ultrasons sont mis en parallèles.

## 2. Caractéristiques des matériaux

Les essais ont été effectués sur six sols reconstitués composés de sables et de kaolin en différentes proportions, pour lesquels l'application des critères d'affaissement, rapportés par Lutenecker (1988), montre que ceux-ci sont effondrables. Les sols S1, S2 et S3 sont reconstitués avec des sables de dunes et du kaolin, tandis que les sols S4, S5 et S6 sont reconstitués avec des sables de oued et du kaolin.

**Sable de dunes :** Granulométrie comprise entre 0.08 et 2mm, dont 1.36% des particules < 80  $\mu$ m,  $C_u=3.91$ ,  $C_c= 1.33$ ,  $E_s= 73.26\%$ .

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

**Kaolin :**  $\omega_L=65.83\%$ ,  $\omega_p=39.64\%$ ,  $G_s=2.49$ ,  $\% < 2 \mu\text{m}=43\%$ .

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

SOL	S1	S2	S3	S4	S5	S6
<b>Kaolin (%)</b>	15	35	50	20	30	40
<b>Sable de dunes (%)</b>	85	65	50	-	-	-
<b>Sable de oued (%)</b>	-	-	-	80	70	60
<b>G<sub>s</sub></b>	2.65	2.59	2.46	2.62	2.56	2.48
<b>ω<sub>L</sub> %</b>	16.47	26.63	35.37	18.47	28.97	33.42
<b>ω<sub>P</sub> %</b>	11.03	15.37	20.87	11.95	14.77	19.03
<b>γ<sub>d</sub> max (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.04	1.95	1.84	1.95	1.82	1.75
<b>ω<sub>opt</sub> %</b>	8.62	9.43	13.88	12.82	14.67	17.82
<b>%&lt;2 μm</b>	4.91	11.73	16.74	7.03	9.84	14.12

**Tableau 1.** *Caractéristiques géotechniques des sols reconstitués*

### 3. Procédure et réalisation des essais

#### 3.1. Essais œdométriques

Le sol de l'essai est constitué de sable et de kaolin selon les proportions mentionnées ci-dessus. On amène le sol à la teneur en eau voulue par ajout de l'eau distillée, l'ensemble sol - eau doit être bien homogénéisé dans un mortier en porcelaine. La gâchée de sol est ensuite versée dans le moule de l'œdomètre puis compactée à l'aide de la dame de compactage. Le compactage du sol consiste à laisser tomber le mouton qui coulisse à travers la tige de la dame d'une hauteur H=15 cm, ce qui va percuter le disque qui transmet le choc à l'échantillon. Pour la rendre parfaitement plane la face supérieure de l'éprouvette doit être arasée à l'aide d'une lame rigide.

Les essais de compressibilité à l'œdomètre sont faits selon la procédure de Jennings et Knight (1975) qui consiste à l'application successive des charges suivantes : 25, 50, 100, et 200kpa. Ensuite procéder à l'inondation de l'échantillon et relever la nouvelle valeur du tassement, puis augmenter le chargement jusqu'à 400kpa. Au cours de l'essai les lectures des tassements sont relevés à 15s, 30s, 1min, 2min, 5min, 10min et 24h.

### **3.2. Essais aux ultrasons**

Cette série d'essais commence par l'étalonnage de l'analyseur, en mesurant la vitesse de transmission de l'onde à travers le barreau de calibrage. Ensuite on mesure la vitesse d'un train d'ondes ultrasoniques, qui traverse des éprouvettes de sol, réalisées dans le moule œdométrique, conformément au mode opératoire des essais de compressibilité. Pour garantir une bonne transmission des ondes dans le corps de l'éprouvette et avant d'ajuster le système de mesure, on applique de minces couches de graisse de contact sur les deux faces des transducteurs (émetteur et récepteur). Sur l'écran de l'analyseur sont représentés, le temps ou la vitesse de transit de l'onde, cela selon la configuration de l'analyseur.

## **4. Matériels utilisés**

### **4.1. Essais œdométriques**

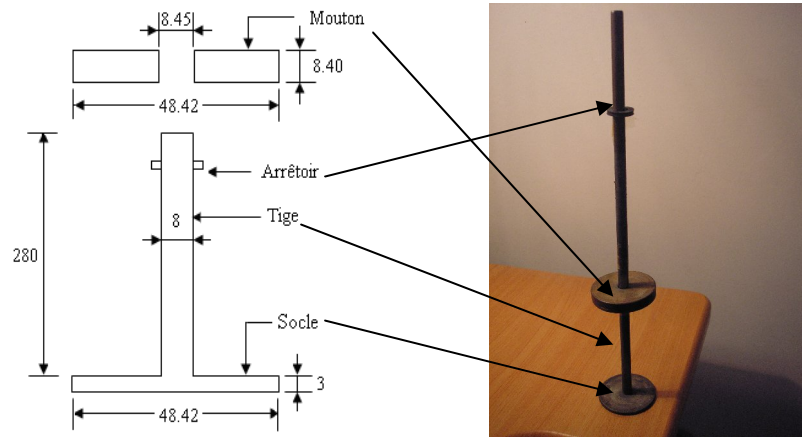
L'œdomètre dont les éléments essentiels sont :

- Moule œdométrique de 50.4mm de diamètre et 20mm de hauteur.
- Bâti de consolidation d'un bras de levier de 1/10.
- Jeu de poids.

La dame de compactage (Figure 1) est conçue spécialement au laboratoire pour le compactage du sol dans l'anneau œdométrique. Entièrement usinée en acier, elle est composée :

-D'un socle de 48.42mm de diamètre et de 3mm d'épaisseur attaché à une colonne support de guidage de longueur 280mm, à travers laquelle glisse un mouton. Un arrêtoir coulissant le long de la tige permet d'ajuster la hauteur de chute du mouton.

-D'un mouton en forme de disque circulaire de 84.42 mm de diamètre et de 8.40mm d'épaisseur. Sa masse est de 121g, ayant un perçage centré de 8.45 mm de diamètre.



**Figure 1.** Dame de compactage

#### 4.2. Essais ultrasoniques

L'appareillage comprend (Figure 2):

- Un analyseur pour mesure de la vitesse des ondes ultrasoniques.
- Un barreau d'étalonnage.
- Un jeu de deux transducteurs (capteurs) de 54 kHz avec câbles, agissant indifféremment comme émetteur ou récepteur.
- Un pot de pâte de contact.



**Figure 2.** Analyseur ultrasonique

## 5. Programme expérimental

Le tableau 2 illustre le programme expérimental

Type d'essai	Paramètres Retenus	Nombre d'essai	Observations
Essais œdométriques	Teneurs en eau : 2%,4%,6% et 8%. Degrés de compactage : 10, 25, 40 et 60coups.	96	Réalisés selon la procédure de Jennings
Essais aux ultrasons	Teneurs en eau : 2%,4%,6% et 8%. Degrés de compactage : 10, 25, 40 et 60coups.	96	Menés à l'aide d'Analyseur ultrasonique.

**Tableau 2.** Programme des essais

## 6. Résultats expérimentaux et interprétations

Un sol est susceptible à l'effondrement si au moins, l'un des critères suivants est vérifié (Ayadat 1999):  $A_C < 1$ ,  $I_L < 0$ ,  $I_p \leq 20$ ,  $I_C > 1$ ,  $I_w \leq 1$ . Les résultats des essais de consistance montre que ces sols sont susceptibles à l'affaissement et que les caractéristiques de consistance dépendent essentiellement de la teneur en eau initiale.

### 6. 1. Essais œdométriques (mise en évidence de l'effondrement des sols)

Le potentiel d'affaissement CP en (%) est calculé par de la relation :

$$CP = [\Delta e_c / (1+e_0)] \times 100\% \quad [1]$$

où :  $\Delta e_c = e_1 (200\text{kpa}) - e_2 (200\text{kpa}, \text{inondé})$ ,  $e_0 =$  Indice des vides initial.

Lors des essais œdométriques, la variation des teneurs en eau et des énergies de compactage permet de contrôler les potentiels d'affaissement CP des différents sols. Les résultats des CP obtenus sont : 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 %, et pour le sol S6 : de 0.77 % à 7.9 %.

D'après la classification de Jennings et Knight (1975), il y a risque d'effondrement si le CP est supérieur à 1. En se basant sur cette classification, on constate que les sols reconstitués correspondent aux rubriques allant de « pas de risque » à « troubles ». Les figures 3 et 4, représentent les courbes œdométriques des sols S1 et S5, ces courbes sont analogues à celle de Knight (1975).

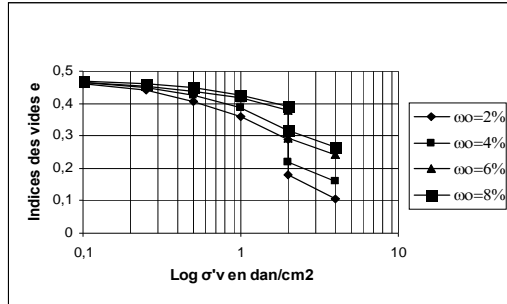


Figure 3. Courbes Oedométriques Sol 1 ( $E=10$ coups)

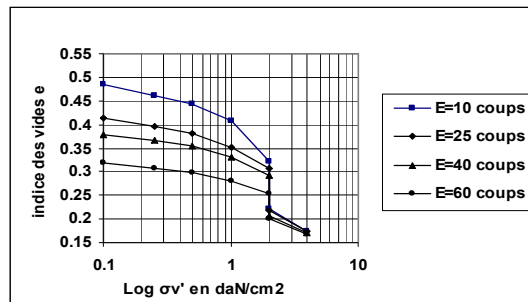


Figure 4. Courbes Oedométriques Sol 5 ( $\omega = 4\%$ )

#### 6. 1.1. Influence de la teneur en eau et de l'énergie de compactage

La décroissance de l'affaissement est d'autant plus marquée que la teneur en eau augmente (Figure 5). Pour une teneur en eau initiale donnée le potentiel d'affaissement est inversement proportionnel le nombre de coups de compactage (fig.6). Dans les mêmes conditions de compacité et de teneur en eau le sol contenant le plus grand pourcentage de kaolin exhibe le plus grand potentiel d'affaissement.

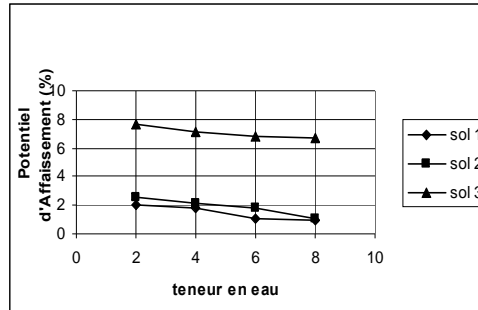


Figure 5. Potentiels d'Affaissement en fonction des teneurs en eau ( $E=25$ )

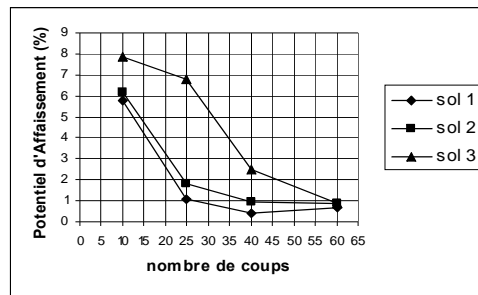


Figure 6. Potentiels d'Affaissement en fonction du nombre de coups ( $\alpha_0 = 6\%$ )

## 6.2. Essais aux ultrasons

### 6.2.1. 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 (Figures 7 et 8). 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 affaissables.



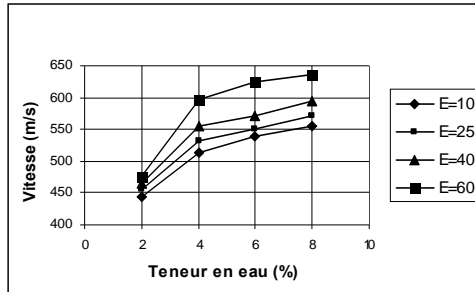


Figure 7. Vitesse ultrasonique en fonction de la teneur en eau (sol 4)

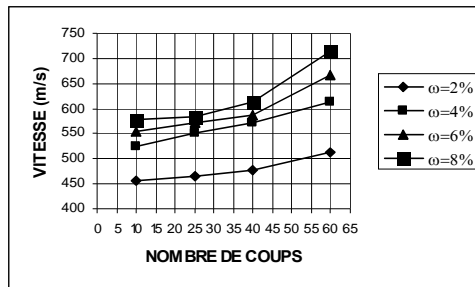


Figure 8. Vitesse ultrasonique en fonction du nombre de coups (sol 4)

### 6.2.2. Prédiction de l'affaissement par l'essai ultrasonique

La figure 9, concrétise 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 potentiels d'affaissement en fonction de vitesse ultrasonique montre que le compactage et la teneur en eau participent à la diminution de l'effondrement et à l'augmentation des vitesses ultrasoniques.

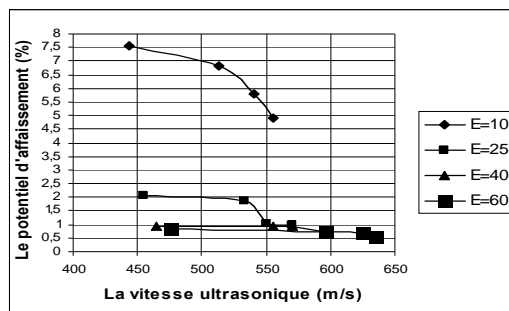


Figure 9. Potentiel d'affaissement en fonction de la vitesse (sol 1)

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.

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

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. Les résultats de l'auscultation ultrasonique peuvent être généralisés aux différents types de sols affaissables tel que les loess et d'autres sols non saturés.

## 7. Conclusion

- Le programme expérimental proposé permet de caractériser de manière satisfaisante le comportement des sols affaissables. Ces sols peuvent être reconstituer au laboratoire, en mélangeant à des différentes proportions le kaolin, comme particules fines, avec le sable, mené à des teneurs en eau inférieures à l'optimum de Proctor et compacté à des énergies de compactage modérés. Les caractéristiques de compressibilités et de consistances confirment cette idée.

- Proposition d'une nouvelle approche expérimentale de prédiction des sols affaissables : facile et rapide, elle est basée sur des essais ultrasoniques. Cette procédure peut être effectuée au laboratoire ou in situ, sur des échantillons de forme quelconque, intacts ou remaniés. Les vitesses ultrasoniques sont limitées comme suit :

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

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

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

- Les résultats obtenus montrent clairement l'influence de certains paramètres tels que ; la granulométrie, la teneur en kaolin, la teneur en eau et l'énergie de compactage sur le potentiel d'affaissement et la vitesse ultrasonique. Notons qu'une étude comparative des résultats obtenus, qui sont propres aux sols reconstitués, avec d'autres concernant des sols affaissables naturels reste recommandée.

## 8. Bibliographie

- Abbeche K., Hammoud F., Ayadat T. « Influence of relative density and clay fraction on soils collapse », *Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Springer Proceedings in Physics*, 2007. 112:3-9.
- Abelev M Y, « Loess and its engineering problems in the USSR », *Proc. of the int conf. engineering problems of regional soils*, Beijing, China, 1988.
- Ayadat T., Ouali S. « Identification des sols affaissables basée sur les limites d'Atterberg », *Note technique. Revue française de géotechnique*, 1999.
- Cui Y J., Delage P., Schlosser F, Wonarowcz M. « Etude du comportement volumique d'un loess du nord de la France », *XIIème Congrès européen de mécanique des sols et de géotechnique Amsterdam 1999*, Vol 1 337-342.
- Holtz W, Ghilf J W. « Settlement of Soil Foundation due to Saturation », *In: Proceeding 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1961.*, Vol 3 673-679.
- Jennings J E., Knight K. « 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.
- Knight K., Jennings J E, « 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.
- Loiseau C Cui Y.J & De Laure E. « Etude du comportement des loess sur le tracé du TGV Est », *rapport de recherche terrasol*. 2001.
- Lutenegger A J, Saber R T. *Determination of Collapse Potential of Soils*. Geotechnical Testing J. Vol 11, 3:173-178, 1988.