

# ANALYSE DU MECANISME DE L’AFFAISSEMENT DES SOLS LOESSIQUES NON SATURE LORS DE L’HUMIDIFICATION PROGRESSIVE

**OULARBI A** : Docteur de l’université de Nantes – Université de Blida

## RESUME

Le loess est un sol fin, souvent présent dans l’état non saturé. Lors d’une humidification progressive sous chargement due à des infiltrations d’eau, il peut se tasser fortement et entraîner des dommages aux fondations.

On interprète ce phénomène de tassement ou d’affaissement par les diminutions de la résistance de cisaillement  $\Delta\tau$  due à des variations d’indice des vides  $\Delta e$  et de la teneur en eau  $\Delta \omega$ . La communication présente des résultats de la quantification des variations de la résistance de cisaillement  $\Delta\tau$ , de la cohésion  $\Delta c$  et de l’angle de frottement interne  $\Delta\phi$  à partir de l’analyse de la variation volumique en fonction des deux paramètres physiques : indice des vides  $e$  et la teneur en eau  $\omega$  du sol non saturé, sans mesure de la succion  $\Psi$  ( $\Psi$  caractéristique des sols non saturés). On montre que, la cause majeure de l’effondrement de ce type de sol est l’infiltration d’eau vers les fondations, conséquence, entre autre, d’une chute de la résistance de cisaillement  $\tau$ . C’est pourquoi un traitement préventif de fondation sur des sols loessiques avant la construction d’édifices est absolument recommandé, accompagné de mesures adéquates permettant d’éviter des infiltrations d’eau vers la fondation d’ouvrage.

**Mots clés** : Loess, indice des vides, teneur en eau, résistance de cisaillement, succion, non saturation, cohésion, angle de frottement.

## Liste des symboles

Symboles	unités	Définitions
$S_r$	%	Degré de saturation
$\omega$	%	Teneur en eau
$\tau$	KN/m <sup>2</sup>	Contrainte au cisaillement
$C'$	KN/m <sup>2</sup>	Cohésion effective du sol saturé
$\sigma'$	KN/m <sup>2</sup>	Contrainte normale effective du sol saturé
$\phi'$	degrés	Angle de frottement interne du sol saturé
$\phi^b$	degrés	Angle de frottement interne lié à la variation de la succion matricielle
$u_a$	KN/m <sup>2</sup>	Pression atmosphérique
$U_w$	KN/m <sup>2</sup>	Pression interstitielle
$e_0$	-	Indice des vides initial
$\Psi$	KN/m <sup>2</sup>	Succion matricielle

## INTRODUCTION

Les problèmes liés au loess proviennent principalement de leur tendance naturelle à l'affaissement brutal lorsque, soumis antérieurement à un chargement (poids d'un édifice) dans leur état non saturé, ils sont saturés par des infiltrations d'eau naturelle ou provenant des fuites au niveau des canalisations enterrées.

La raison de cette instabilité est la succion matricielle  $\Psi$  parfois élevée contribuant à maintenir artificiellement l'assemblage lâche de particules fines (silt). La saturation progressive de ce type de sol entraîne l'annulation quasi instantanée de la succion provoquant ainsi un affaissement brutal.

Une des solutions préconisées contre ce risque d'affaissement est le compactage préalable avant même le chargement (construction de l'édifice).

L'analyse de l'évolution des propriétés mécaniques et notamment de la résistance en relation avec le niveau de la succion développée dans le sol est un domaine d'investigation largement ouvert.

Pour une première estimation qualitative du comportement des sols non saturés, sans recours à la mesure de la succion, une analyse simplifiée d'identification du mécanisme d'affaissement des sols loessiques en relation avec divers paramètres du sol est adoptée.

A cet égard des essais d'identifications des caractéristiques mécaniques (essais de cisaillement direct) et de l'analyse de leurs évolutions en fonction de la variation en teneur en eau ont été élaborés.

Ce sont les résultats et observations faites au cours d'essais en laboratoire qui sont décrits et analysés.

## 1. CONSIDERATIONS THEORIQUES

Dans les sols saturés, le modèle de Coulomb est souvent utilisé pour traduire leur résistance au cisaillement :

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg}(\varphi') \quad (1)$$

Pour les sols non saturés, la résistance au cisaillement dépend de l'état de saturation du sol, c'est souvent le cas pour les sols loessiques.

A partir d'observations expérimentales des auteurs proposent une nouvelle formulation [1]

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg}(\varphi') + (u_a - u_w) \operatorname{tg}(\varphi^b) \quad (2)$$

Avec :  $\sigma-u_a$  : contrainte normale du sol non saturé  
 $u_a-u_w$  : succion matricielle dans le sol non saturé

A l'état totalement saturé la formule (2) se transforme en la formule (1) de Coulomb.

Par ailleurs de nombreux auteurs ont constaté que l'humidification est la cause majeure de l'affaissement des sols lœssiques, souvent dans leur état non saturé. Afin de palier à ce phénomène d'effondrement, un compactage à la teneur en eau optimale est recommandé, afin d'atténuer, lors d'une humidification du sol, l'affaissement d'une fondation sous charges de services.

Cependant la stabilité du sol de fondation ne dépend pas uniquement du poids spécifique mais aussi des caractéristiques mécaniques à l'état non saturé  $c^s$ ,  $\varphi^s$ ,  $\varphi^b$ .

L'examen de la résistance au cisaillement d'un sol compacté affaissable, en fonction de la teneur en eau  $\omega$  et du poids spécifique sec  $\gamma_d$  est nécessaire.

## 2. CARACTERISTIQUES DU SOL TESTE

Les compositions chimique et granulométrique sont données dans les tableaux 1 et 2 et les caractéristiques physiques dans le tableau 3.

**Tableau 1.** Composition chimique

Si	Al <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	P <sup>3+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Zn	Cu <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>
27.94	12.58	7.86	25.78	10.74	4.87	5.62	6.32	0.90	0.05	0.01	0.008	18.24

**Tableau 2.** Composition granulométrique

Gravier (%)	Sables (%)	Silts (%)	Argiles (%)
-	62.00	20.00	18.00

**Tableau 3.** Caractéristiques physiques

Teneur en eau naturelle	Poids volumique Sec	Densité relative des grains	Limites d'Atterberg		
$\omega$ (%)	$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	$G_s$	$\omega_L$ (%)	$\omega_p$ (%)	$I_p$ (%)
24.92	13.3	2.70	55.0	36.3	18.7

Le type de sol est un loess à gros grains, caractérisé par une très faible plasticité ( $I_p < 6$ ) et non saturé à l'état initial  $S_r < 50\%$ .

Cette non-saturation est due à l'action combinée de la faible plasticité et de la forte porosité ( $\eta > 40\%$ ) [ 2 ]

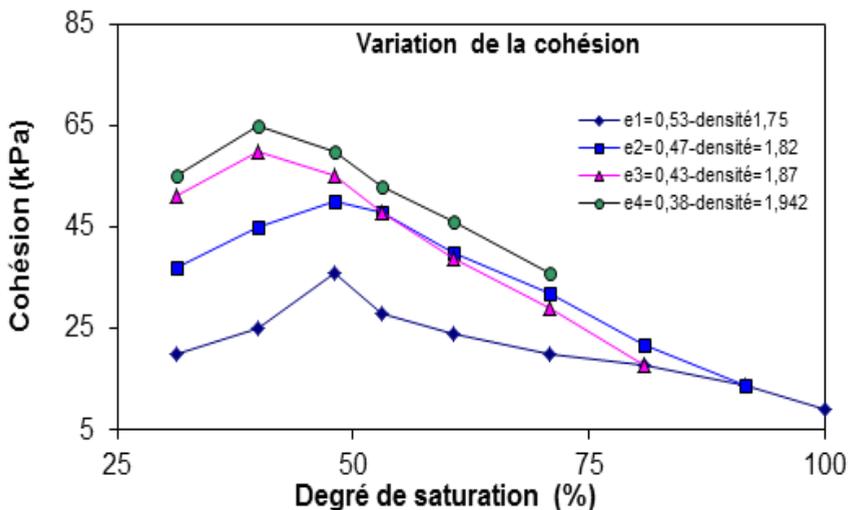
### 3. CARACTERISATION DU PHENOMENE D'AFFAISSEMENT EN FONCTION DE L'INDICE DES VIDES ET DU DEGRE DE SATURATION

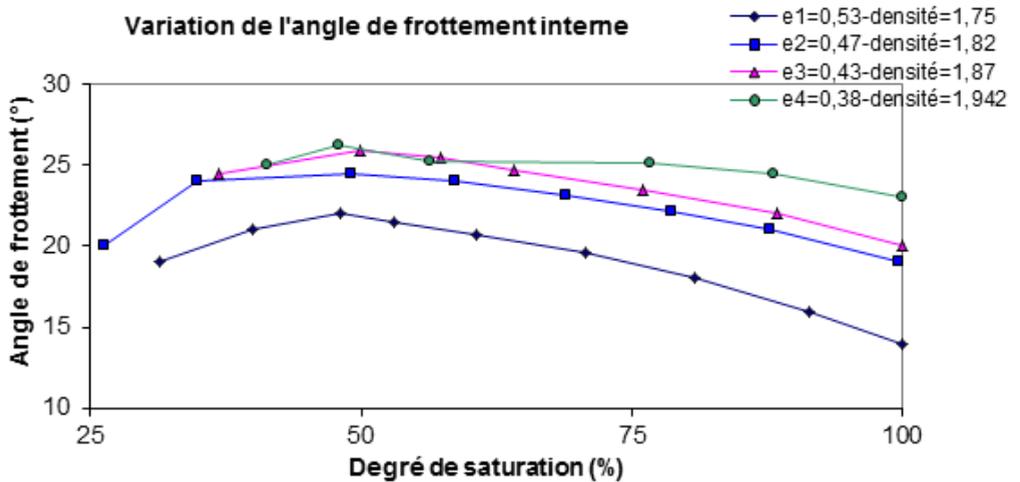
#### 3.1 Analyse de la résistance au cisaillement

Il est possible, compte tenu des mesures des essais de cisaillement direct réalisés sur des échantillons remaniés et partiellement saturés à des teneurs en eau différentes, d'étudier directement, sans la mesure de la succion, l'influence de l'état de saturation sur la variation de la résistance de cisaillement et prédire, par conséquent, le taux d'affaissement.

L'examen des courbes expérimentales (figure 1), montre une tendance de diminution des propriétés mécaniques du sol lorsque son degré de saturation augmente, particulièrement au-delà d'une certaine valeur optimale, et ceci quel que soit l'état de compacité initiale.

Cette diminution est d'autant plus importante que l'indice des vides, comme le montre les courbes, est plus important.





**Fig. 1.** Variation des propriétés mécaniques en fonction de l'état de saturation du sol

Il ressort aussi de cet examen que l'influence de la variation des deux paramètres physiques, degré de saturation et indice des vides, sur la cohésion est plus sensible que sur l'angle de frottement interne. Ce qui reconforte la contribution essentielle de la succion matricielle dans la cohésion de la structure inter-granulaire.

On constate aussi que, pour un même état de saturation du sol, une diminution de l'indice des vides par l'effet de compactage avec une énergie donnée, contribue d'une manière appréciable l'amélioration des propriétés mécaniques du sol.

### 3.2 Analyse du taux d'affaissement en fonction de l'indice des vides

A l'appui des résultats expérimentaux du tableau 4, on observe que l'état de compacité initiale du sol influe considérablement sur son taux d'affaissement compte tenu des taux de diminution de l'angle de frottement interne et de la cohésion observés pour des accroissements approximatif de 50 % du degré de saturation.

**Tableau 4.** Taux de variation de l'angle de frottement et de la cohésion en fonction de l'état de compacité initiale

$e_0$	0.53	0.47	0.43	0.38
$\delta\phi$ (%)	36.40	22.40	22.80	12.55
$\delta c$ (%)	75.00	72.00	70.00	44.62

On remarque que le taux de diminution le moins important est atteint pour l'indice des vides le moins élevé ce qui correspond à l'état de compacité le plus élevé.

En conséquence, en cas d'affaissement, l'un des paramètres majeurs qui peuvent influencer sur l'affaissement c'est bien l'indice des vides initiale  $e_0$ .

Le taux d'affaissement sera d'autant plus élevé que l'indice des vides initial  $e_0$  est plus élevé, c'est le cas des sols lâche. Ce qui traduit l'intérêt de l'opération de compactage.

## CONCLUSION

Le comportement des sols loessiques non saturés compactés est influencé d'une manière décisive par son degré de saturation et son indice des vides.

En particulier cette analyse a contribué à élucider le mécanisme de l'affaissement par l'interprétation de l'influence du degré de saturation et de la variation de l'indice des vides sur les propriétés mécaniques du sol.

Cette description a permis d'identifier les causes majeures de l'effondrement de la structure des sols loessiques qui sont une porosité importante, facteur d'instabilité de la structure, et l'infiltration d'eau provoquant une diminution brusque de la résistance au cisaillement.

Une réflexion plus approfondie du phénomène avec élaboration d'un modèle de calcul pour ce type de sols est un atout important pour la prédiction de l'affaissement.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Fredlund D. G. – Morgenstern N. R. 1978 *The shear strength of unsaturated soils*. Can. Geotech. J. 15, 313-321.
2. Fredlund D. G. – Xing Anqing, 1985 *The relationship of unsaturated soils shear strength to the soil – water Characteristic curve*. Can. Geotech. J. 32, 440-448.
3. Cui Y. J. 1 & al ,1999 *Etude du comportement volumique d'un loess du Nord de la France* . ENPC & TERRASOL. Ponts formation édition.
4. Houston Sandra L. & al , 1988. *Prediction of field collaps of soils due to wetting- Journal of geotechnical engineering – ASCE* 6 vol 114,N°1,1/1988, p4-59.
5. Oloo S. and Fredlund D. G. F.,1996 *A method for determination of  $\Phi^b$  for statically compacted soils*. Can. Geotech. J., 33, p. 272-280.
6. Yoshida Yoshitada & al ,1991 *Effect of saturation on shear strength of soils*. Soils and foundations, Vol, 31,N°1 P 181-186.

7. Gallet S. & al, 1998 *Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust-Earth and planetary Science Letters*, 156, 1998, p. 157-172.