

SOLS GONFLANTS : METHODOLOGIE POUR LA CONCEPTION DES OUVRAGES

Par
Z. DERRICHE et F. KAOUA
Institut de Génie Civil, USTHB - Alger

Résumé

Les désordres importants causés par le gonflement des sols et reportés dans de nombreuses régions d'Algérie ont montré que le gonflement des sols est une réalité que le concepteur algérien se doit de maîtriser.

Le gonflement des sols est un phénomène très complexe et cet article se propose d'orienter le mécanicien du sol dans la prise en charge de ce problème.

Après une présentation simplifiée du mécanisme de gonflement, nous proposons une méthodologie générale pour la conception des ouvrages sur sols gonflants.

La méthodologie est basée sur une démarche progressive qui va de la reconnaissance du sol gonflant à la formulation de la solution.

Mots clés : gonflement - argile - stabilisation.

1 INTRODUCTION

Le caractère gonflant des sols argileux est à l'origine de fréquents désordres de fondations d'ouvrages.

Les conséquences du gonflement sont plus spectaculaires dans les régions arides à semi-arides (Afrique, Amérique, Australie). Les grands écarts de température conjugués à l'insuffisance et l'irrégularité des précipitations sont à la base de désordres importants dans ces régions.

Plus particulièrement, les désordres importants causés par le gonflement et reportés récemment dans de nombreuses régions d'Algérie (Ain-Amenas, M'sila, Sidi Aissa, Tlemcen, Tiaret, Batna) ont montré que le

phénomène de gonflement est une réalité que le concepteur algérien se doit de maîtriser.

Dans cet article, nous faisons le point des connaissances en ce qui concerne le mécanisme de gonflement des sols. Nous présentons d'une manière très simplifiée la manifestation des effets du gonflement sur les ouvrages et nous proposons enfin une méthodologie globale pour la conception des ouvrages sur sols gonflants.

2 MECANISME DE GONFLEMENT

Les argiles sont constituées d'un empilement de feuillets, ensembles cristallins plans construits à partir de deux motifs de base (Figure 1) :

- ✓ la silice oxygène tétraédrique,
- ✓ l'alumine octaédrique.

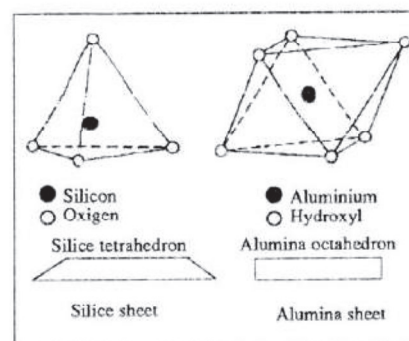


Figure 1 : Minéraux argileux de base.

Au moment de la formation des argiles, les ions Si et Al des couches tétraédrique et octaédrique sont parfois remplacés par d'autres ions métalliques de dimensions comparables mais de charges différentes. Du fait de cette substitution, dite substitution isomorphique, le feuillet d'argile devient électriquement chargé.

Pour obtenir la neutralité, l'argile attire des cations compensateurs présents dans la phase aqueuse. Ces cations compensateurs étant trop volumineux (Na^+ : 0.98 \AA K^+ : 1.13 \AA , Ca^{2+} : 1.06 \AA devant Si^{4+} : 0.32 \AA Al^{3+} : 0.57 \AA) pour rentrer dans la structure même du feuillet, se logent entre les feuillets (Figure 2).

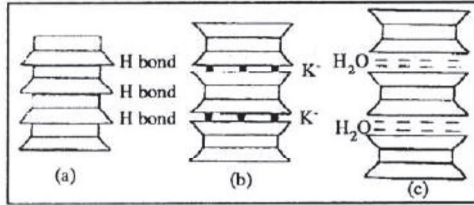


Figure 2 : Différentes familles d'argile.
(a) Kaolinite (b) Illite
(c) Montmorillonite

Le feuillet d'argile est chargé électronégativement mais l'ensemble argile-cation compensateur est neutre. De plus le feuillet d'argile n'est pas infini, lorsqu'il est rompu aux extrémités, il y a interruption des motifs tétraédriques et octaédriques et certaines valences ne sont plus satisfaites, il en résulte des déséquilibres électriques qui sont responsables d'adsorption d'ions.

Bien qu'une liste de plus de 400 minéraux argileux ait pu être établie par Caillere et Henin (1980), 3 grandes familles d'argile constituent la quasi-totalité des dépôts naturels. Il s'agit des familles de :

- ✓ La Kaolinite : un minéral stable et peu à pas gonflant.
- ✓ L'illite : un minéral peu gonflant.
- ✓ La Montmorillonite : un minéral actif potentiellement gonflant.

Le mécanisme de gonflement des argiles a fait l'objet de nombreuses hypothèses. Il est de nos jours bien établi que le phénomène de gonflement est un phénomène de physico-chimie des surfaces qui fait intervenir adsorption d'eau, échange ionique et oxydo-réduction. Cependant, les mécanismes d'adsorption d'eau sur la surface des particules ne sont pas encore parfaitement maîtrisés.

Des recherches fondamentales récentes basent le mécanisme d'adsorption sur la théorie de la double couche électrique (Gouy, Stern).

Conformément à la théorie de la double couche électrique, Baver et. al. (1972) font état de deux catégories d'adsorption qui sont responsables du phénomène de gonflement :

- ▲ Adsorption d'eau à la surface (hydratation de surface).
- ▲ Adsorption d'eau due à la pression osmotique.

● Hydratation de surface

Comme mentionné précédemment, les mécanismes d'adsorption d'eau sur la surface des particules d'argile

sont encore mal connus. Les interprétations qui en sont données sont parfois contradictoires mais toutes s'accordent pour reconnaître deux composantes d'adsorption :

◆ Adsorption intermicellaire

Il s'agit de l'adsorption de molécules d'eau sur la surface externe de la particule d'argile. Schématiquement, les faces négatives des particules attirent les molécules d'eau polaires par leurs extrémités positives (Figure 3). Ceci donne une première couche d'eau liée.

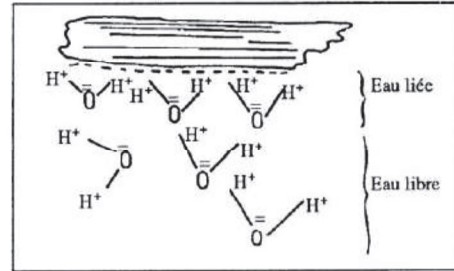


Figure 3 : Adsorption particulaire (eau liée, eau libre).

D'autres couches d'eau se lieraient ensuite à la couche d'eau adsorbée. Cependant, ces molécules sont de plus en plus libres lorsqu'on s'éloigne de la surface de la particule d'argile.

Lors d'une hydratation intermicellaire, les changements de volume qui s'ensuivent sont généralement faibles.

◆ Adsorption intramicellaire

Pour les argiles dont la structure fait intervenir des cations compensateurs, il se produit au contact de l'eau une hydratation de ces cations (Figure 4). Le cation hydraté acquiert une taille plus importante parce qu'il s'entoure de molécules d'eau. Il en résulte une augmentation de la distance interfoliaire et par voie de conséquence un affaiblissement de la liaison entre les feuillets. Ce qui permet à d'autres molécules d'eau de s'immiscer entre les feuillets d'une même particule, c'est l'adsorption intramicellaire.

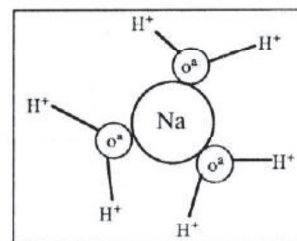


Figure 4 : Hydratation du cation compensateur.

L'hydratation intramicellaire est responsable de gonflements qui peuvent atteindre 100% du volume de l'argile sèche.

● Hydratation osmotique

Le feuillet d'argile en solution aqueuse est entouré d'un essaim de cations retenus par attraction électrostatique à son voisinage immédiat (Figure 5). Il s'ensuit une différence de concentration en cations entre le voisinage immédiat du feuillet et la zone d'eau libre. Pour contrebalancer cette concentration élevée près du feuillet, et parce que les cations ne peuvent pas se déplacer, il se produira un passage d'eau de la zone libre vers la zone liée jusqu'à équilibre des concentrations (Figure 5).

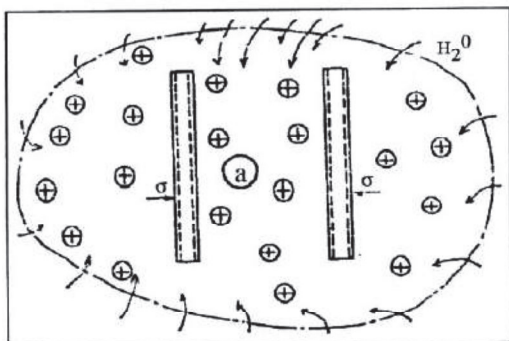


Figure 5 : Hydratation osmotique.

En l'absence d'action externe, deux feuillets d'argiles seront soumis à (Figure 6) :

- ✓ une force d'attraction (A) du type Van Der Waals,
- ✓ une force de répulsion (R) dans laquelle contribuent :
 - l'interaction des deux feuillets chargés négativement ou des doubles couches qui leur sont associées,
 - l'hydratation des cations compensateurs,
 - la pression osmotique.

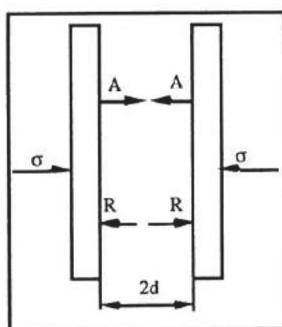


Figure 6 : Bilan des forces entre 2 feuillets d'argile.

La force de répulsion, quand elle l'emporte sur les composantes d'attraction, provoque le gonflement jusqu'à l'établissement d'un nouvel équilibre.

Il ressort clairement des paragraphes précédents que les principaux facteurs qui contrôlent l'importance du gonflement sont :

- Le déficit de charges portées par l'argile mesuré par la capacité d'échange de cations (CEC).
- La nature du cation compensateur (taille et valence).
- La concentration de la solution aqueuse en cations.

3 EFFETS DU GONFLEMENT SUR LE COMPORTEMENT DES OUVRAGES

Pour l'ingénieur géotechnicien, le phénomène de gonflement est perçu comme une instabilité volumique que manifestent les sols argileux quand ils sont mis en contact avec l'eau. Cette source d'eau peut être une précipitation ou une fuite accidentelle d'eau, due à une canalisation rompue ou à une variation du gradient d'évaporation.

Le gonflement se traduira différemment sur les ouvrages selon que l'on se trouve dans une région tempérée ou aride.

Dans les régions tempérées les couches superficielles sont quasi-saturées. En absence de construction, il y a un régime permanent de remontée capillaire sous l'action du gradient d'évaporation.

La construction vient perturber ce gradient d'évaporation. Les remontées capillaires se poursuivent mais à cause de la construction, l'eau ne peut plus s'évaporer, d'où une augmentation de la teneur en eau du sol, et donc gonflement sous la construction.

Si ce processus se produisait uniformément, la construction subirait un soulèvement uniforme sans efforts parasites notables. Malheureusement, le gonflement se développera dans la partie centrale de la surface sous la construction, partie la mieux protégée de l'évaporatoire naturelle.

Dans les climats arides à semi arides, les sols sont souvent secs. Le gonflement du sol se traduit par un soulèvement de la construction sur les bords. Le gonflement étant dû à une imprégnation rapide du sol à la périphérie de la construction lors d'une précipitation, le centre de la construction restant à l'abri de l'eau.

Selon le cas donc, il peut se produire soulèvement par le centre (center lifting) ou soulèvement par les bords (edge lifting). D'autres schémas de soulèvement ont été étudiés par certains auteurs (Pidgeon, 1980).

Dans tous les cas, ces soulèvements sont à la base de mouvements différentiels parasites importants qui peuvent mettre en péril la stabilité de la construction.

4 METHODOLOGIE POUR LA PRISE EN CHARGE DU GONFLEMENT DANS LA CONCEPTION DES OUVRAGES

D'après le nombre et la taille des sinistres reportés dans la bibliographie, il ressort que la conception des

ouvrages sur sols gonflants est une tâche complexe qui doit s'effectuer avec une grande prudence. Afin d'assister l'ingénieur dans cette tâche, nous proposons, ci-après une méthodologie générale basée sur une démarche progressive allant de la reconnaissance du sol gonflant à la formulation d'une solution.

La démarche proposée suit les étapes suivantes :

- 1/ Identification : déterminer si le sol de fondation est réellement expansif.
- 2/ Classification : évaluer l'importance probable de ce gonflement.
- 3/ Quantification : Si les étapes précédentes, révèlent que le sol est gonflant, l'évaluation numérique de l'amplitude probable des mouvements s'avère nécessaire.
- 4/ Choix d'une solution : En fonction du potentiel du gonflement trouvé, choix parmi les solutions possibles, d'une solution qui réponde aux critères de stabilité et d'économie.

□ Identification des sols gonflants

L'opération d'identification d'un sol gonflant peut commencer par un examen visuel du site et par l'étude du climat de la région. Elle peut être affinée si nécessaire par des essais de laboratoire.

A l'état sec, un sol gonflant est dur, il est traversé par un réseau régulier de fissures, et présente une surface vitrée quand il est excavé. Mis en présence d'eau, il se ramollit, devient pateux et colle aux doigts.

L'examen de la végétation peut fournir une indication appréciable sur le caractère gonflant du sol étudié. Nous savons que certains arbres comme les chênes poussent surtout sur les sols à faible potentiel de gonflement.

La considération du climat (précipitations, évapotranspiration) peut fournir une indication sur l'importance des mouvements qui sont susceptibles de se produire.

□ Classification du sol gonflant

L'utilisation de classifications de sols gonflants, permet d'obtenir une estimation du potentiel de gonflement. Les classifications sont généralement basées sur un nombre de caractéristiques du sol, qui sont simples à déterminer au laboratoire.

Holtz et Gibbs (1955) ont proposé une classification donnant le potentiel de gonflement sur la base de la teneur en fines ($<I_{\mu}$), l'indice de plasticité et la limite de retrait.

Données de base			Soulèvement probable % variation de volume	Potentiel gonflement
% fines < 1 μ	Indice de plasticité	Limite de retrait		
> 28	> 35	< 11	> 30	Très Important
20-13	25-41	7-12	20-30	Important
13-20	15-28	10-16	10-30	Moyen
< 15	< 18	> 15	< 10	Faible

Corrélations réalisées pour des essais avec charge de 1.0 psi.

USAEWES (United States Army Engineer Waterway Experiment Station) a proposé une autre classification qui semble donner de bons résultats. Cette classification est basée sur la limite de liquidité, l'indice de plasticité et la valeur de la succion initiale (mesurée in situ).

WI %	Ip %	Succion tsf	Potentiel de gonflement	Classification potentiel gonflement
< 50	< 25	< 1.5	< 0.5	Faible
50-60	25-35	1.5-40	0.5-1.5	Moyen
> 60	> 35	> 4.0	> 1.5	Important

La littérature compte un nombre considérable d'approches empiriques qui permettent au potentiel de gonflement d'être estimé sur la base de paramètres faciles à obtenir en laboratoire.

Parmi ces modèles de prédiction du gonflement, Snetlen (1984) conclut que les relations qui se basent sur les limites de liquidité et l'indice de plasticité sont les plus représentatives.

Pour de meilleurs résultats, toutefois, l'ingénieur est conseillé de ne pas se contenter d'une seule méthode. L'utilisation simultanée de plusieurs méthodes permet d'obtenir les recoupements nécessaires pour asseoir la décision.

Pour exploiter les résultats de la classification, Michael et al. (1980) proposent d'adopter les procédures de construction normales si le potentiel de gonflement trouvé est faible.

Si le potentiel de gonflement est moyen, le concepteur est conseillé de se référer à l'expérience concernant la construction passée sur ce sol, avant de prendre une quelconque décision. En l'absence de cette expérience, pour un potentiel de gonflement trouvé moyen, le sol sera considéré comme présentant un potentiel de gonflement important.

Si le potentiel de gonflement livré par la classification est important à très important, la quantification exacte des mouvements s'impose.

□ Quantification du gonflement

Les mesures des caractéristiques de gonflement en laboratoire constituent le meilleur moyen pour reconnaître un sol gonflant. L'amplitude du gonflement est déterminée normalement à l'oedomètre pour un échantillon de sol saturé sous une contrainte donnée.

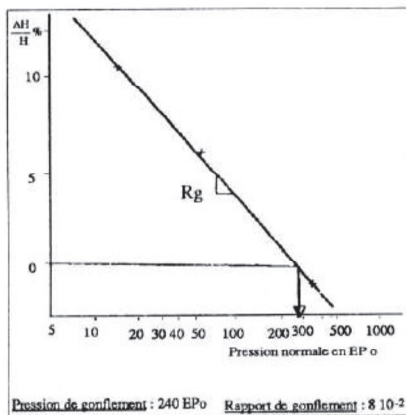
En ce qui concerne la pression de gonflement, il n'existe pas encore de consensus quant à sa définition, d'où la multitude de méthodes pour mesurer cette caractéristique.

Parmi ces méthodes, nous retenons celle basée sur la mesure de la pression de gonflement à volume constant, parce qu'elle a été adoptée jusque-là par plusieurs sociétés de mécanique des sols.

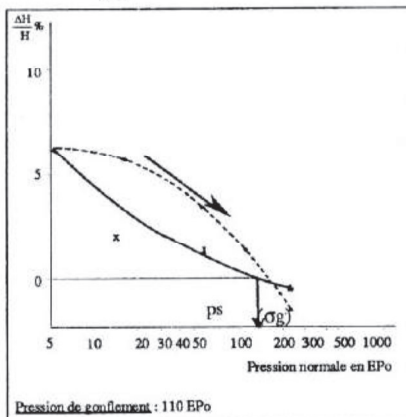
Pour un projet de construction sur sol gonflant donné, nous commençons par prélever des échantillons non remaniés, à différentes profondeurs dans le sol.

Chaque échantillon sera mis dans un oedomètre auquel sera appliquée une charge égale à la pression initiale in-situ, augmentée de l'incrément qui sera provoqué par la construction. L'échantillon est ensuite saturé d'eau, la charge est augmentée au fur et à mesure pour empêcher le sol de gonfler, jusqu'à équilibre du gonflement.

Le résultat de cet essai donne une relation linéaire (1a) ou hyperbolique (1b) entre la variation relative de volume de l'échantillon ($\Delta H/H$), et le logarithme naturel de la charge appliquée correspondante ($\log \sigma_v$) (Figure 7).



(a) Relation linéaire.



(b) Relation hyperbolique.

Figure 7 : Relation entre $\Delta H/H$ et $\log \sigma_v$ (d'après Philipponnat, 91).

$$\text{Linéaire} \quad S = \frac{\Delta H}{H} \% = -R_g \log \left(\frac{P_s}{\sigma_v} \right) \quad (1a)$$

R_g est appelé rapport de gonflement.

$$\text{Hyperbolique} \quad S = \frac{\Delta H}{H} \% = \frac{a}{\log(\sigma_v) - l_0} + d_{ho} \quad (1b)$$

(a, l_0 , d_{ho} : coefficients calés sur 3 points de la courbe expérimentale).

□ Détermination de l'amplitude de gonflement total

Pour une construction projetée donnée, l'amplitude de gonflement total est calculée suivant la relation

$$Y = \sum_{i=1}^N (S_i (\%) \cdot h_i)$$

- S_i : pourcentage de gonflement dans la couche de sol, i (couche soumise à une charge σ_{vi}), (σ_{vi} = contrainte initiale + incrément apporté par la construction),
- h_i : épaisseur de la couche,
- N : nombre total de couches dans la zone active.

□ Choix d'une solution

L'ingénieur dispose de plusieurs solutions pour lutter contre, pour éviter ou pour minimiser les effets du gonflement sur les ouvrages.

Ces solutions peuvent être classées en trois grandes familles.

- 1/ Solutions visant la stabilisation du sol gonflant.
- 2/ Solutions visant à éviter aux fondations les effets du gonflement, ceci pouvant se faire par :
 - protection du sol gonflant vis-à-vis des accès d'eau,
 - mise en place de fondations profondes développant leur capacité portante au delà du sol gonflant.
- 3/ Solutions qui acceptent les mouvements dus au gonflement en adoptant des fondations superficielles capables d'absorber ces mouvements sans dommages.

Nous examinons brièvement ces solutions.

Dans le cas des bâtiments, Michaels et al. (1980) donnent quelques recommandations pour la sélection d'un type de fondation en fonction du soulèvement total Y calculé comme montré précédemment.

Dans le cas où le gonflement du sol trouvé est trop important il est conseillé de recourir aux procédés de stabilisation des sols pour tenter de le limiter.

□ Stabilisation par additifs

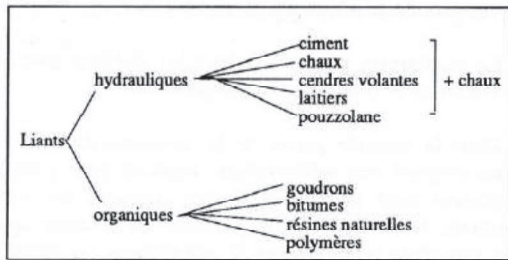
L'instabilité volumique (et en même temps la résistance) du sol, peut être traitée par ajout de matériaux inhibiteurs du gonflement.

Il existe 2 grandes familles d'additifs :

- les liants,
- les hydrophobants.

Les liants

Dans la famille des liants, on peut distinguer les liants hydrauliques et liants organiques.



Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont à base de chaux.

L'expérience a montré que l'addition de 5 à 7% de chaux à un sol gonflant est capable de réduire considérablement sa tendance au gonflement (Figure 8). En règle générale on admet que 1% de chaux est nécessaire pour chaque 10% de fines argileuses présentes dans le sol. En pratique, les proportions exactes sont arrêtées sur la base de tests tournés autour de ces chiffres.

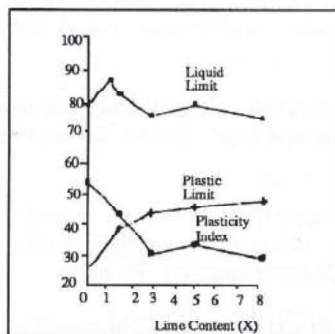


Figure 8 : Traitement des sols par ajout de chaux.

Le traitement des sols à la chaux est une technique codifiée dans le domaine routier (recommandations SETRA-LCPC) qui ne concerne que les premiers décimètres de terrain.

Il a été prouvé qu'un traitement en profondeur (jusqu'à 10 mètres) peut se faire sous forme de pieux

de chaux (Figure 9) ou par colonnes de sol traité à la chaux (Abelev, 1973).

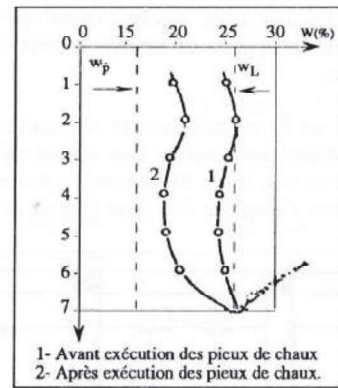


Figure 9 : Traitement des sols en profondeur par colonnes de chaux.

Les liants organiques

Les liants organiques sont des produits de type colle capables d'une bonne adhésion avec le squelette minéral. Il y a enrobage de la particule d'argile par le liant, ce qui confère au sol des propriétés hydrophobes.

L'efficacité des liants organiques est malheureusement affectée par leur grande biodégradabilité, particulièrement sous les climats tropicaux.

Les hydrophobants

Ce sont des produits dérivés aminés donnant des composés cationiques (amines aromatiques ou aliphatiques) très efficaces pour réduire la sensibilité à l'eau des argiles.

L'adsorption d'un produit hydrophobant par l'argile se traduit par deux effets :

- ✓ diminution définitive de l'affinité du sol pour l'eau,
- ✓ modification de la structure microscopique du sol.

Remplacement du sol

Le remplacement du sol gonflant par un matériau non expansif peut s'envisager dans le cas où la couche de sol gonflant n'est pas très importante et le matériau de remplacement disponible à proximité du site.

Mise en place de fondations profondes

Cette solution permet d'éviter la couche gonflante et de rechercher une assise où les déformations d'expansion sont nulles. Ceci peut se faire selon le cas par des fondations sur puits ou fondations sur pieux.

La réalisation de telles fondations doit être accompagnée des précautions impératives suivantes :

- ▼ Dégager les longrines liant les têtes de puits ou de pieux du sol par un vide de 20 cm minimum.
- ▼ Eviter l'adhérence le long du fût de la fondation sur la hauteur de la couche expansive. Ceci peut se faire en coulant la fondation dans une gaine isolante.

Si le fût est en contact avec le sol gonflant le pieu doit être calculé pour résister aux efforts de soulèvement. Dans ce cas, il est d'usage de concevoir le pieu avec une patte d'éléphant à la base (Figure 10).

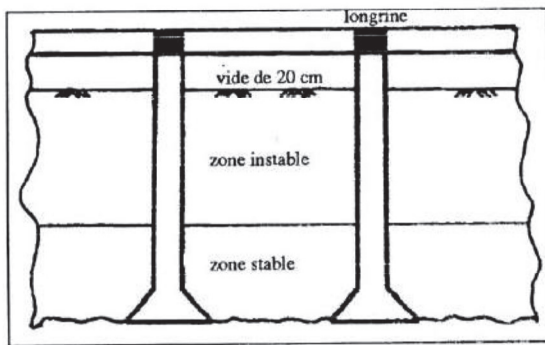


Figure 10 : Patte d'éléphant à la base des fondations profondes.

Cette patte d'éléphant doit pouvoir résister à un effort de soulèvement :

$$U = 2 \cdot \Pi \cdot r \cdot u \cdot z \cdot \tan \phi_{ps} \quad (2)$$

- r : rayon de la fondation,
- u : pression de gonflement horizontale,
- z : hauteur de la zone active,
- $\tan \phi_{ps}$: coefficient de frottement pieux-sol (0.2-0.4).

Utilisation de fondations superficielles

L'utilisation de fondations superficielles sur sols gonflants ne peut se justifier que si l'une ou l'autre des conditions suivantes est vérifiée :

- ◆ La structure est suffisamment lourde pour compenser la pression de gonflement qui pourrait se développer.
- ◆ La structure présente une grande souplesse d'ensemble avec une forte rigidité des éléments capable d'absorber les mouvements différentiels sans dommages.
- ◆ Le potentiel de gonflement peut être réduit ou éliminé par des mesures stabilisatrices.

5 CONCLUSION

Dans la première partie de cette communication nous avons présenté le phénomène de gonflement comme un phénomène de physico-chimie des surfaces qui fait intervenir adsorption, échange cationique et oxydo-réduction.

Nous avons montré que le gonflement est principalement le résultat des forces répulsives qui se développent entre les feuillets de l'argile.

Trois facteurs influent sur le phénomène de gonflement :

- la capacité d'échange de cations,
- la nature du cation compensateur (taille et valence),
- la concentration en électrolytes.

Ces facteurs agissent directement sur le bilan des forces entre les feuillets, augmentant ou diminuant les composantes répulsives.

Pour l'ingénieur géotechnicien, le gonflement est perçu comme une instabilité volumique exprimée dans le potentiel de gonflement.

Le gonflement peut être à l'origine d'efforts parasites (flexions et cisaillements) importants.

Dans la seconde partie de la communication nous avons proposé une méthodologie générale pour guider l'ingénieur dans la conception des ouvrages sur sols gonflants. Nous avons enfin présenté les solutions qui sont possibles pour inhiber le gonflement ou limiter ses effets sur les constructions ⑤

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Abelev Yu (1973) : "Construction d'ouvrages sur les sols argileux mous saturés". Trad. J. P. Magnan (1977) Ed. Techniques et documentation, Paris.
- [2] A. F. Abouleid (1982) : "Measurement of swelling and collapsible soil properties in Formation Engineering". P. 43-54 Edited by Georges Pilot. Presses des Ponts et Chaussées.
- [3] Baver, al. (1972) : "The viscosity and swelling of soil colloids". Soil Physics, vol. 1. (54-70) John Wiley.
- [4] F. G. Bell (1988) : "Stabilisation and treatment of clay soils with lime". Ground Engineering, Jan. P. 10-15.
- [5] P. G. Biddle (1983) : "Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils". Géotechnique, vol. 33, n°2.
- [6] I. J. A. Brackley (1983) : "An empirical equation for the prediction of clay heave". Proc. 7th. Asian Reg. Conf. Soil Mech. & Found. Eng.
- [7] S. Caillere, S. Hinin & M. Rautureau : "Minéralogie des argiles". Tome I "Structures et propriétés physico-chimiques". Actualités scientifiques et agronomiques de l'INRA n° 8, 1982, 184 pages. Edition Masson.

- [8] F. H. Chen (1988) : "*Foundation on expansive soils*". Elsevier.
- [9] Didier, al. (1987) : "*Etude à l'oedomètre du gonflement des sols*". IX European Conference of soil mechanics and foundation Engineering.
- [10] Driscoll R. (1983) : "*The influence of vegetation on swelling and shrinkage of clay soils in Britain*". Geotechnique, vol. 33 n° 2.
- [11] K. A. Geodfrey, JR. (1978) : "*Expansive and shrinking soils - Building design problems being attacked*". Civil Engineering ASCE (48 (10)) p. 87-91
- [12] Gras (1988) : "*Physique des sols pour l'aménagement*". Edition Masson.
- [13] R. E. Grim (1968) : "*Clay mineralogy*". 2nd ed. Mc Graw Hill New York.
- [14] G. J. Gromko (1974) : "*Review of expansive soils*". J. Geotech. Eng. Div. ASCE vol. 100 n° GT6. Proc. paper 10609, June 74. p. 667-687.
- [15] W. G. Holtz (1969) : "*Volume changes in expansive clay soils and control by lime treatment*". Proc. 2nd. Int. Research and Engineering conference on expansive soils (Texas, A. & M. University, College station, Texas).
- [16] W. G. Holtz, H. J. Gibbs (1956) : "*Engineering properties of expansive clay*". Trans. of ASCE, vol. 121 p. 641-679.
- [17] B. A. Kantey (1980) : "*Some secrets to building structures on expansive soils*". J. Civil Engineering. (ASCE) 50 (12) p. 53-55.
- [18] J. P. Krohn, J. E. Slosson (1980) : "*Assessment of expansive soils in the United States*". Proc. 4th. Int. Conf. Expansive soils, Denver, Colo. P. 596-608.
- [19] LTPC-SETRA (1972) : "*Recommandations pour le traitement en place des sols fins à la chaux*".
- [20] M. Mariotti (1986) : "*Caractéristiques des sols surconsolidés expansifs et conséquences de leur instabilité sur les problèmes de bâtiment et génie civil*". Rapport du CEBTP.
- [21] Michaels, al. (1980) : "*Methodology for foundations on expansive clays*". J. Geot. Eng. Div. vol. 106. GT12. p. 1367
- [22] P. Mouroux, al. (1988) : "*La construction économique sur sols gonflants*". BBRGM Manuels et Méthodes n° 14.
- [23] M. W. O'Neil, O. I. Ghazzaly (1977) : "*Swell potential related to Building performance*". J. GED ASCE vol. 103 n° GT12, Proc. Paper 13402. Dec. 77 p. 1363-1379.
- [24] G. Philipponat (1978) : "*Désordres dus à la présence de sols gonflants dans la région parisienne*". Annales ITBTP n° 364.
- [25] G. Philipponat (1987) : "*Sols expansifs en France. Identification et recommandations pour les fondations*". 6th. international Conference on Expansive soils New Delhi (India).
- [26] G. Philipponat (1991) : "*Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie*". Revue Française de Géotechnique, n° 57 p. 5-22.
- [27] Rama, al. (1988) : "*Closed form heave solutions for expansive soils*". J. Geot. Eng. vol. 114, n° 5. may. ASCE, p. 573-588.
- [28] H.B. Seed, R.J. Woodward et R. Lundgren (1962) : "*Prediction of swelling potential for compacted clays*". J. Soil Mech. & Found. eng. Div. ASCE vol. 88 n° 88, SM4, Proc. paper 3169, july, p. 107-131.
- [29] A. W. Skempton (1985) : "*Residual strength of clays in landslides folded strata and the laboratory*". Géotechnique 35, p. 3-18.
- [30] D. R. Snethen (1984) : "*Evaluation of expedient methods for identification and classification of potentially expansive soils*". Proc. 5th. int. Conf. Expansive soils (Aldelaide).
- [31] Cl. Thirriot, T. K. Karalis (1980) : "*Quelques expériences sur la rhéologie des argiles sèches et humides*". Rheologica Acta, 19 : p. 124-132.
- [32] V. N. Vijayvergiya, O. I. Ghazzaly (1973) : "*Prediction of swelling potential for natural clays*". Proc. 3rd. Int. Research & Eng. Conf. on expansive clay soils' p. 227-23.