

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 123 (1997)  
**Heft:** 23

**Artikel:** Identification du gonflement des argiles: le gonflement libre en solution  
**Autor:** Derriche, Zohra / Tas, Mohamed / Bouzid, Farid  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-79159>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 12.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Identification du gonflement des argiles

Par Zohra Derriche,  
Maître de conférences  
Institut de Génie Civil  
Université des sciences et technologie  
Houari Boumediène (USTHB), B.P. 32,  
El-Alia;  
Mohamed Tas  
Maître assistant,  
Institut de Génie Civil – Rural  
Université de Blida  
Route de Soumaa, B. P. 270, Blida;  
Farid Bouzid,  
étudiant en post-graduation  
Institut de Génie Civil USTHB, B.P. 32,  
El-Alia (Algérie)

## Le gonflement libre en solution

### 1. Introduction

Divers procédés peuvent être appliqués à l'identification des sols gonflants. Certains, tels que l'identification minéralogique et les mesures directes de gonflement à l'œdomètre comme au triaxial, sont plus ou moins longs et nécessitent un appareillage bien spécifique parfois très onéreux. Or il existe également des procédés, peut-être moins précis que les précédents, mais qui offrent l'avantage d'être relativement rapides et beaucoup moins coûteux: ils sont basés sur des paramètres de mécanique des sols parmi les plus élémentaires, tels que les limites de consistance, la teneur en fines, la teneur en eau naturelle, la densité sèche.

Utilisant ces paramètres, plusieurs auteurs ont introduit des modèles de prédiction du gonflement des sols exprimés en majorité sous forme de classifications. Parmi ces classifications, plusieurs ont été construites sur les limites de consistance [6]<sup>1</sup>, [13], [15], [17] et [18].

Tout comme les limites de consistance, le gonflement libre en solution est une expression du comportement physico-chimique du sol argileux et peut de ce fait s'avérer un paramètre intéressant pour l'identification du gonflement des sols. A notre connaissance, très peu de travaux ont été consacrés à ce paramètre.

L'importance de cette question nous a donc conduits à entreprendre une investigation expérimentale susceptible de dégager les relations pouvant lier le potentiel de gonflement des sols à la plasticité d'un côté et au gonflement libre en solution de l'autre. Le présent article rend compte de cette analyse et tente d'exprimer des corrélations à usage pratique entre le gonflement des sols et le

paramètre «gonflement libre en solution».

### 2. Investigation expérimentale

D'après les résultats expérimentaux rapportés dans la littérature, le lien étroit qui existe entre les phénomènes physico-chimiques régissant le gonflement et ceux qui interviennent dans les limites de consistance et le gonflement libre en solution peut nous amener à utiliser ces derniers comme paramètres indicateurs du gonflement. Ces phénomènes physico-chimiques se manifestent dans le gonflement en fonction du bilan des forces interparticulaires en présence. Simplement présenté, l'équilibre des forces s'exerçant entre deux feuillets d'argile peut se traduire par une force nette d'attraction (A) et une force nette de répulsion (R).

A l'exception des contraintes extérieures, les forces d'attraction sont généralement imputables

- aux forces de Van Der Waals entre feuillets voisins qui ne sont fonction que de la distance interfeuillets et de l'épaisseur des feuillets,
  - à l'attraction coulombienne due à la présence des cations compensateurs entre feuillets.
- Quant aux forces de répulsion, elles sont dues
- à l'interaction des doubles couches ioniques associées à des feuillets voisins,
  - à l'énergie d'hydratation des feuillets et des cations compensateurs, ainsi que de la pression osmotique.

La présente étude montre que ces forces peuvent varier d'une manière significative en fonction de la nature et de la concentration des électrolytes présents dans le fluide hydratant.

### 2.1 Programme expérimental

Le programme expérimental à la base de notre recherche a consisté en une série de mesures des limites de consistance, du gonflement libre en solution et des paramètres de gonflement à l'œdomètre. Ces mesures ont porté sur une argile pure: la bentonite de Maghnia. Ce choix a été dicté par le souci d'écartier toute interaction entre les différents matériaux qui sont susceptibles de se trouver dans les sols naturels, de telles interactions pouvant fausser les interprétations.

Afin de faire varier le comportement physico-chimique de l'argile utilisée, elle a été hydratée, pour toutes les mesures effectuées, avec différentes solutions électrolytiques préparées à différentes concentrations.

Les paramètres de gonflement sont mesurés à l'œdomètre en préparant les échantillons avec de l'eau distillée à des densités et teneurs en eau optimales proctor.

### 2.2 Matériaux utilisés

#### • L'argile

Le matériau utilisé est une argile montmorillonitique connue sous le nom de bentonite de Maghnia. Extraite de la région du même nom, elle est commercialisée par l'E.N.O.F. Les résultats des essais d'identification de cette bentonite sont consignés dans les tableaux 1, et 2.

#### • Les solutions hydratantes

Les solutions utilisées pour l'hydratation de l'argile sont des chlorures ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{NO}_4\text{Cl}$ ,  $\text{CuCl}_2$ ). Ces chlorures ont été retenus d'une part parce qu'ils sont prépondérants dans la nature [5], d'autre part parce qu'ils ne donnent lieu à aucune réaction parasite en solution [11].

Tableau 1 – Composition chimique de la bentonite de Maghnia

Composant	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	PAF
Pourcentage	65,20	17,25	2,10	1,20	3,10	2,15	0,60	0,20	8,20

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article

LIMITE DE LIQUIDITÉ (%)

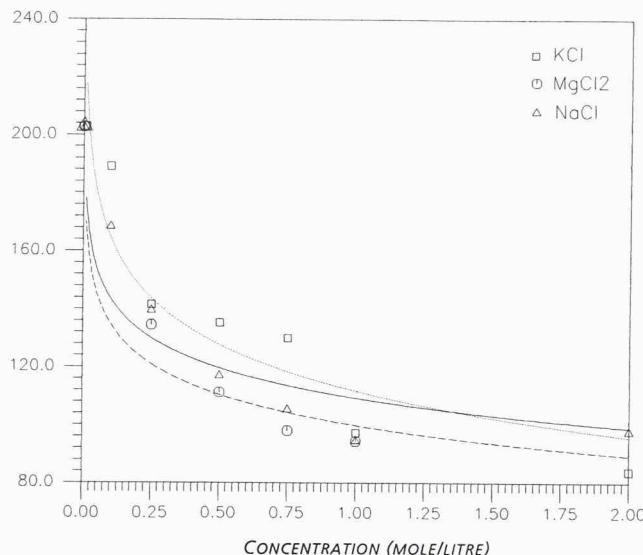


Fig. 2.- Influence de la solution hydratante sur la limite de liquidité

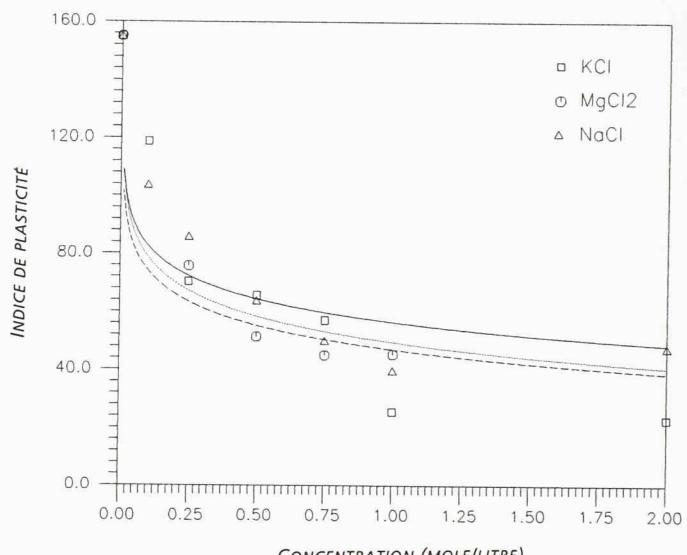


Fig. 3.- Influence de la solution hydratante sur l'indice de plasticité

### 3. Résultats – Discussion

#### 3.1 Etude de la plasticité

L'indice de plasticité représente la plage des teneurs en eau pour laquelle le sol agit comme un maté-

riaux plastique. Quand il est à sa limite de liquidité, une bonne partie de l'eau que contient un sol gonflant est emprisonnée entre les feuillets des minéraux argileux. De ce fait, la distance interfeuillets est maximale et la force d'attraction minimale. L'argile est ainsi quasi-saturée et ne gonfle plus.

A sa limite de plasticité, le sol a diminué de volume au point où seules les forces de répulsion interparticulaires empêchent une plus grande réduction de volume. A un niveau d'hydratation plus bas que la limite de plasticité, les forces d'attraction deviennent plus importantes et l'argile se comportera comme un solide.

En considérant différents couples bentonite-solution, nous faisons varier les forces physico-chimiques et observons la variation des limites de consistance qui s'en suivent.

#### • Limite de plasticité

Il ressort des résultats obtenus (fig. 1) que la présence d'électrolytes dans les solutions même à très faible concentration engendrerait une augmentation de la limite de plasticité. Il semblerait, d'après les mêmes résultats, que cette limite varie très peu avec la concentration des solutions. Nous pensons que cela est dû au fait qu'à la limite de plasticité, le ni-

veau d'hydratation étant trop faible et les particules très rapprochées les unes des autres, les forces dominantes sont de type attractif (forces de Van Der Waals notamment). De nature non électrique, ces forces sont donc indépendantes de la concentration en électrolytes de la solution. Ce résultat est de toute façon conforme à la conclusion de [1] selon laquelle à faible humidité, l'influence des caractéristiques des ions (dimension, polarisabilité) l'emporte sur la concentration de ces ions dans le comportement des systèmes argile-eau.

#### • Limite de liquidité et indice de plasticité

Concernant la limite de liquidité, l'augmentation de la concentration de toutes les solutions utilisées réduit considérablement les valeurs de la limite de liquidité et de ce fait celles de l'indice de plasticité (fig. 2 et 3). Pour les fortes concentrations, toutefois, limite de plasticité et indice de plasticité semblent tendre chacun de son côté vers une valeur palier.

A la limite de liquidité, le niveau d'hydratation atteint par l'échantillon est très élevé, les particules sont très éloignées les unes des autres et les forces dominantes sont de nature répulsive. Ces forces sont principalement déve-

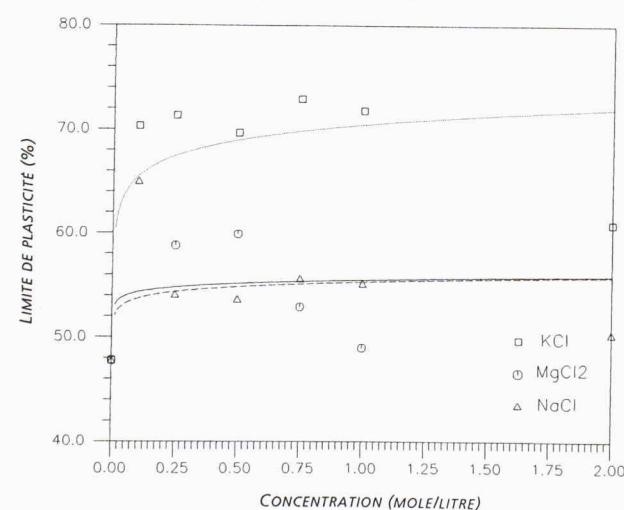


Fig. 1.- Influence de la solution hydratante sur la limite de plasticité

Tableau 2 – Identification physique de la bentonite de Maghnia

Limites d'Atterberg	Limite de liquidité Limite de plasticité Indice de plasticité	203 % 48 % 155 %
Granulométrie	Sable fin Limon Argile	13 % 22 % 65 %
Activité		2,385
Classification de Casagrande		At
Optimum proctor	Teneur en eau Densité sèche	34 % 1,21

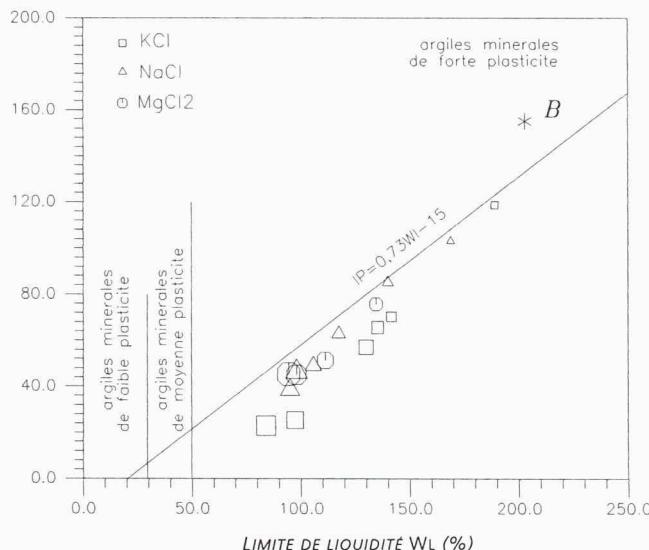


Fig. 4.- Plasticité du matériau en fonction de la solution hydratante

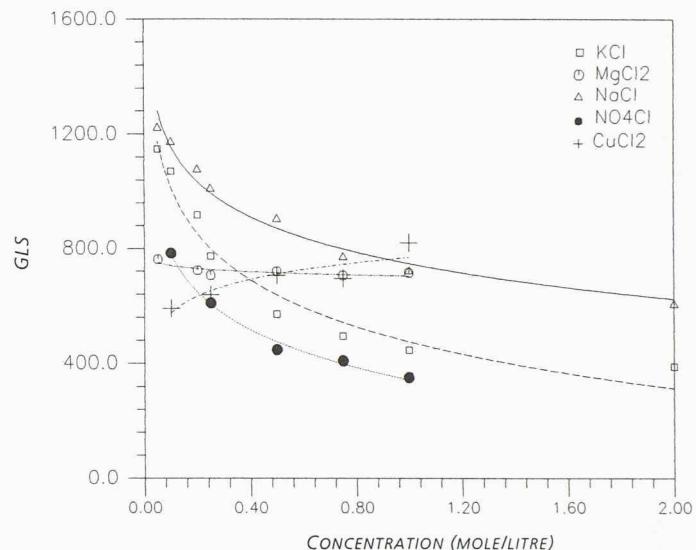


Fig. 5.- Le gonflement libre en solution en fonction de la solution hydratante

loppées par l'interaction des doubles couches ioniques et impliquement par l'effet osmotique. Si l'étendue de la double couche ionique dépend effectivement de la nature de l'électrolyte présent, elle est encore bien davantage influencée par la concentration de ce dernier dans le fluide hydratant.

**• Classification de Casagrande**  
Afin de mieux apprécier l'effet des électrolytes (présence, type et concentration) du fluide hydratant, nous représentons à la figure 4 la classification selon Casagrande des couples bentonite-solution.

Il ressort de cette représentation que le point correspondant au couple bentonite-eau distillée, repéré dans la figure 4 par (\*B), se trouve au dessus de la droite A dans le domaine des argiles de très forte plasticité, soit probablement dans le domaine des argiles potentiellement gonflantes.

Avec l'augmentation de la concentration (représentée dans la figure 4 par la taille croissante des symboles), tous les points passent au dessous de la droite A et tendent vers les sols de moins en moins plastiques et donc de moins en moins gonflants avec toutefois un meilleur rendement enregistré pour le KCl.

Les résultats présentés à la figure 4 font également ressortir un affaiblissement de l'effet des électrolytes avec la concentration, visible dans le rapprochement des points à mesure de l'augmentation régulière de la concentration.

### 3.2 Etude du gonflement libre en solution

Le gonflement libre en solution (GLS) représente la différence entre le volume gonflé d'une quantité de matériau mise en suspension dans une solution puis sédimené et le volume initial de cette quantité. Il se détermine par l'expression

$$GLS = \frac{V_f - V_g}{V_f} \times 100 \quad (1)$$

avec  $V_g$  = volume initial des grains  
 $V_f$  = volume final sédimené

Le procédé présenté par [7] a été utilisé pour la mesure du GLS et les résultats des mesures concernant les solutions utilisées sont reproduits à la figure 5. Signalons tout d'abord qu'avec l'eau distillée, on obtient une suspension stable et qu'aucune flocculation n'a été observée bien après une semaine. Ce résultat indiquerait l'existence dans la bentonite de cations échangeables essentiellement monovalents [5].

En revanche, en présence d'électrolytes, la flocculation est rapidement enregistrée et la sédimentation des particules se stabilise au bout d'une durée qui diminue avec la concentration.

A l'exception du chlorure de cuivre ( $CuCl_2$ ), le gonflement libre en solution diminue avec la concentration pour tous les sels utilisés, avec toutefois des pouvoirs de flocculation différents dans chaque cas. Pour les cations monovalents, on remarque en particulier que le  $NO_4^+$  semble présenter un effet deux fois plus grand que celui enregistré pour les  $Na^+$  et  $K^+$ . Par ailleurs,  $K^+$  semble présenter un meilleur pouvoir de flocculation que  $Na^+$ . Pour les cations divalents, le gonflement libre en solution paraît insensible à la concentration en  $Mg^{2+}$ . Quant aux résultats obtenus avec le  $Cu^{2+}$ , ils sont tout à fait incohérents.

### 3.3 Les paramètres de gonflement à l'œdomètre

D'après les résultats reproduits à la figure 6, le potentiel de gonflement libre à l'œdomètre paraît être lui aussi très affecté par la présence et la concentration des électrolytes utilisés. Il varie de la même manière que les limites de liquidité et le gonflement libre en solution,

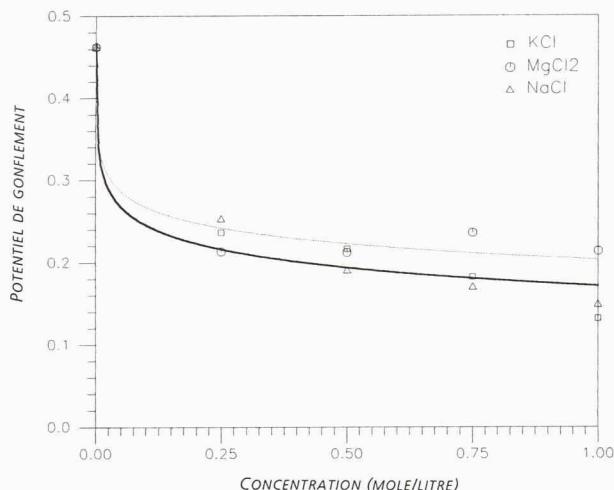


Fig. 6.- Le potentiel de gonflement en fonction de la solution hydratante

avec toutefois un léger avantage enregistré pour le chlorure de sodium par rapport au chlorure de potassium. La concentration en MgCl<sub>2</sub> au delà de 0,25 mole/litre ne semble pas exercer de pouvoir sur le potentiel de gonflement. Pour ces concentrations, on enregistre un meilleur rendement des cations monovalents Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> par rapport au cation divalent Mg<sup>2+</sup>. Ce résultat confirme en quelque sorte que les charges négatives d'un minéral ne peuvent être neutralisées localement que par des cations monovalents [9]. Par

ailleurs, les résultats résumés à la figure 7 ne permettent pas de dégager un sens de variation cohérent pour la pression de gonflement.

#### 4. Interprétation et tentatives de corrélations

Les résultats expérimentaux présentés ci-dessus ont permis de mettre en évidence un comportement commun pour les limites de liquidité, le gonflement libre en solution et le potentiel de gonflement à l'œdomètre. L'étude a aussi confirmé que le comportement du matériau utilisé est principalement physico-chimique ou du moins qu'il l'est pour les niveaux d'hydratation considérés. Par ailleurs, l'analyse des résultats obtenus a permis de montrer que les trois paramètres étudiés suivent la même loi de variation que celle qui régit l'étendue moyenne de la double couche ionique. En effet, d'après [1], l'étendue (*l*) de la double couche ionique est donnée par :

$$l = \frac{\alpha}{Z \times \sqrt{C}} \quad (2)$$

avec  $\alpha$  = constante

$C$  = concentration en cations

$Z$  = valence du cation

Ce comportement commun aux paramètres étudiés et au développement de la double couche ionique nous autorise à affirmer qu'on peut prédire le potentiel de gonflement (et pourquoi pas la plasticité ?) d'un sol montmorillonitique à partir de son gonflement libre en solution. Parce que ce dernier est un paramètre dont la détermination est facile, rapide et peu coûteuse, il pourrait constituer un moyen d'identification des sols gonflants très intéressant. La logique entre le gonflement d'un sol et sa plasticité a en effet été mise en évidence par plusieurs auteurs depuis une trentaine d'années déjà [8].

Or sur la base des résultats de cette étude et de quelques données tirées de [2], nous montrons à la figure 8 qu'il existe une corrélation très significative ( $R = 0,943$ ) entre la plasticité (limite de liquidité) et le gonflement libre en solution. Cette corrélation annonce tout naturellement qu'il existe une relation entre le potentiel de gonflement et le gonflement libre en solution du sol. Un exemple de cette relation, d'ailleurs très significative ( $R = 0,988$ ), est exprimé à la figure 9.

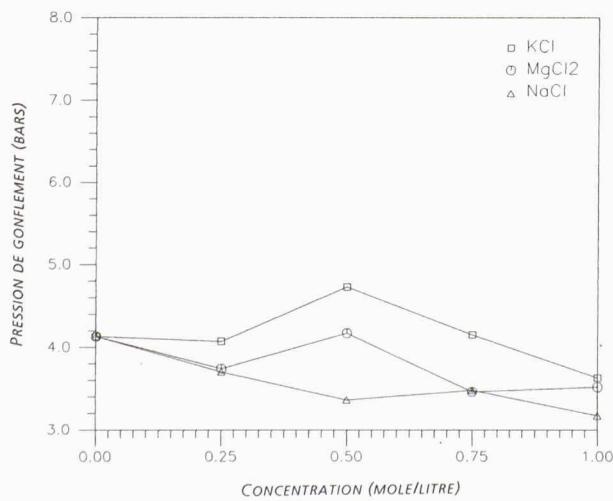


Fig. 7.- La pression de gonflement en fonction de la solution hydratante

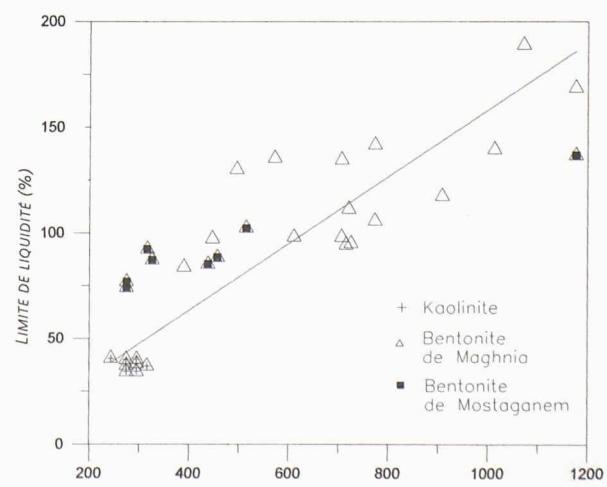


Fig. 8.- Relation entre la limite de liquidité et le gonflement libre en solution

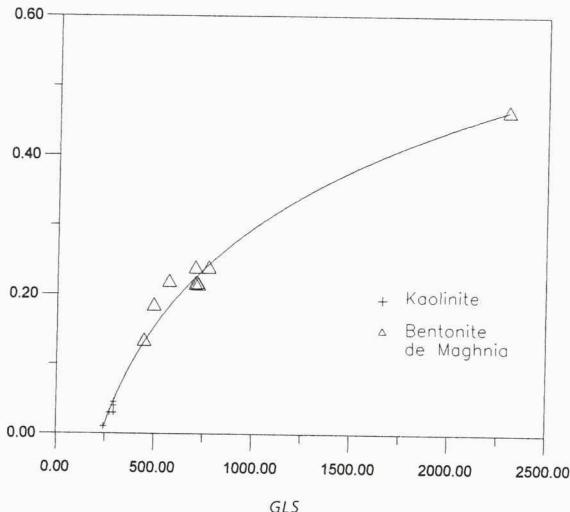


Fig. 9.- Relation entre le potentiel de gonflement et le gonflement libre en solution

## 5. Conclusion

Les modèles de prédition constituent des techniques indirectes de prédition du potentiel de gonflement d'un sol. Ces techniques sont utilisées pour l'identification et la classification des sols gonflants et ne doivent servir qu'à caractériser qualitativement le potentiel de gonflement des sols. Parce que la plasticité est un bon indicateur du gonflement, elle a bénéficié d'un plus grand intérêt que tous les autres paramètres d'identification. Les résultats obtenus dans cette étude ont d'une part confirmé l'étroite relation qui existe entre la plasticité et le potentiel de gonflement et ont en outre permis de mettre en avant une relation intéressante avec le gonflement libre en solution. La mesure du gonflement libre en solution, par rapport à celle des limites de consistance, présente l'avantage d'être un procédé simple qui ne nécessite ni appareillage, ni personnel qualifié. Ce procédé n'étant pas coûteux, le GLS peut être déterminé intensivement sur chantier. C'est donc un paramètre qui mérite d'être étudié plus en détail pour des sols naturels, car il peut se révéler comme un moyen d'identifier le gonflement d'un grand intérêt.

## 6. Bibliographie

- [1] CAILLÈRE, S., HÉNIN, S., RAUTUERAU, M.: «Minéralogie des argiles. Tome 1: Structures et propriétés physico-chimiques», Actualités scientifiques et agronomiques de l'INRA N° 8, 184 pages, Masson, 1982
- [2] DERRICHE, Z.: «Influence du fluide hydratant sur le gonflement des argiles pures», 7<sup>e</sup> Cong. Int. de l'Ass. Int. Géol. de l'Ing. (Lisbonne, Portugal), 1994
- [3] DHOWIAN, A. W.: «Simplified heave prediction model for expansive shale», *Geotechnical testing Journal, GTJODJ*, vol. 13, N° 4, déc. 1990, pp. 323-333
- [4] DIDIER, G., LAREAL, P., GIELLY, J.: «Prévision du potentiel et de la pression de gonflement des sols», Comptes Rendus Cong. Int. Mec. Sols trav. fond., Moscou 1973
- [5] HALITIM, A.: «Sols des régions arides d'Algérie», OPU, Alger, 1984
- [6] HOLTZ W. G., GIBBS H. J.: «Engineering properties of expansive soils», *Trans. A.S.C.E.*, vol. 121, pp. 641-663, 1956
- [7] ILTIS, M.: «Contribution à l'étude du traitement des argiles gonflantes en cours de forage», thèse de docteur-ingénieur, I.N.S.A. Lyon, 1979
- [8] KOMOMIK, A., DAVID, D.: «Prediction of the swelling pressure of clays», *Jour. of the S.M.F.D., SMI*, pp. 209-225, 1969
- [9] MERING, J., GLAESER, R.: «Sur le rôle de la valence des cations échangeables dans la montmorillonite», *Bull. Franç. Miner. Crist.* pp. 519-530, 1954
- [10] MITCHELL J. K.: «Influence of mineralogy and pure solution chemistry on the swelling and stability of clays», Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Expansive Soils, Technicon City, Haifa, vol. 22, 1973
- [11] MOORE, R.: «The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of pure and natural clays», *Geotechnique*, 41.1., pp. 35-47, 1991
- [12] OLOO, S., SHREINER, H. D., BURLAND, J. B.: «Identification and classification of expansive soils», 6<sup>th</sup> Int. Conf. on expansive soils, New Delhi, (India), 1987
- [13] RANGANATHAN, B. V., SATYANARAYANA, B.: «A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays», Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Montreal, vol. 1, div. 1-2, pp. 92-96, 1965
- [14] SEED, H. B., WOODWARD, R. J., LUNDGREN, R.: «Prediction of swelling potential for compacted clays», *Jl. Soil Mech. & Found. Eng. Div. ASCE*, vol. 88 N° 88, SM4, Proc. paper 3169, July, pp. 107-131, 1962
- [15] SKEMPTON, A. W.: «The colloidal activity of clays», Proc. 3<sup>rd</sup> ICSMFE, Zurich, vol. 1, pp. 57-61, 1953
- [16] SNETHEN, D. R.: «Evaluation of expedient methods for identification and classification of potentially expansive soils», Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Expansive soils, Adelaide, 1984
- [17] VIJAYVERGIYA, V. N., GHAZZALY, O.I.: «Prediction of swelling potential for natural clays», Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Research & Eng. Conf. on expansive clay soils, pp. 227-234, 1973
- [18] WILLIAM, A. A. B., DONALDSON, G. W.: «Building on expansive soils in South-Africa 1973-1980», Proc. Int. Conf. on expansive soils, Denver, vol. 1, pp. 834 – 844, 1980