

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Gonflement du Sol sous les Fondations d'un Bâtiment Industriel

## Swelling of the Soil under the Foundations of an Industrial Building

par A. MAYER, Ing. Général des Mines, 12, rue Brancion, Paris (XVème) France

et

P. HABIB, Ing. E.P. Dr. Sc., Chef de Section au C.E.B.T.P., 12, rue Brancion, Paris (XVème) France

### Sommaire

Les fondations d'un bâtiment industriel construit sur un sol, à forte teneur en calcaire, ont présenté un gonflement de l'ordre d'une quinzaine de centimètres, provoquant des dégâts sensibles dans la super-structure.

Ce gonflement a été provoqué par des infiltrations d'acide phosphorique dans le sol des fondations par suite de débordements répétés de cuves de stockage.

L'étude géotechnique donne la position de la nappe, les caractéristiques physiques et mécaniques du sol et les analyses chimiques de prélèvements effectués sous la fondation et loin du bâtiment.

Le gonflement est dû à la transformation du carbonate de calcium en phosphate tricalcique insoluble et de poids spécifique inférieur.

Un essai de gonflement à l'oedomètre ne permet pas de mettre en évidence le phénomène qui s'explique simplement par des considérations de perméabilité globale et de perméabilité locale.

L'observation des mouvements et de leur stabilisation permet de procéder aux réparations nécessaires.

Le groupe de filtration sous vide d'acide phosphorique de l'usine de la Société Industrielle d'Acide Phosphorique et d'Engrais (S.I.A.P.E.) à Sfax, est constitué par un bac en rotation continue, sous lequel des cuves d'acides à différentes concentrations, recueillent les produits traités. Au cours de la fabrication, il arrive que les cuves inférieures débordent; l'acide se répand alors sur le sol, puis s'y infiltre. Des dégâts ont été constatés dans le terrain même, par suite de l'attaque de l'acide; d'autre part, le béton des poteaux et le gros béton des fondations a été localement corrodé. Parallèlement à ces incidents, un gonflement du sol s'est produit, soulevant les fondations, par endroit de 15 cm. Ces fondations sont constituées sous chaque poteau par des massifs isolés, à base carrée, descendus jusqu'à la cote - 3 m. Le taux de travail est voisin de 2 kg/cm<sup>2</sup>. Le mouvement des fondations a provoqué des désordres importants dans la super-structure et en particulier dans la poutraison du niveau supérieur, au droit du bac rotatif. Le niveau de la nappe phréatique est situé en dessous du plan des fondations à 0.50 m ou 1 m de la base des massifs. Il paraissait évident, d'après la bonne tenue des bâtiments qui entourent le groupe de filtration, que les désordres observés étaient liés aux infiltrations certainement massives, mais d'un volume total inconnu, d'acide phosphorique dans le sol. Mais le mécanisme devait être précisé avant d'entreprendre les travaux de réparations de façon à prendre les précautions nécessaires pour éviter un gonflement ultérieur ou au contraire un tassement.

Une observation intéressante a été signalée lors de la mise en service des groupes de filtration: deux unités ont été mises en route à six mois d'intervalle. Ces unités sont rigoureusement identiques et en particulier les débordements d'acide sont tout à fait comparables. Or tous les désordres se sont produits dans la deuxième unité alors que la première n'a pratiquement pas bougé comme l'ont montré les nivellements effectués pour suivre la progression des désordres de la deuxième.

### Summary

The foundations of an industrial building on a soil with an appreciable content of chalk have shown a swelling that amounted to about 15 cm, causing damage to the superstructure.

The cause of the swelling is the infiltration into the soil of phosphoric acid spilled from storage vats.

The geotechnical study gives the position of the water level, the physical and mechanical characteristics of the soil and the chemical analysis of samples taken from under the foundation and at some distance from the building.

The swelling is accounted for by the transformation of calcium carbonate into insoluble tricalcium phosphate which has a lower density.

A swelling test in the oedometer does not show this effect which is explained by considering the local and total permeabilities.

Observation of the movements and their stabilization allows the necessary repairs to be carried out.

### Caractéristiques Géotechniques du Sol

Des essais ont été effectués d'une part sur des échantillons aussi intacts que possible prélevés à la main dans des fouilles spécialement ouvertes à cet effet et situées au-dessous du niveau des fondations et d'autre part, sur des échantillons prélevés au moyen d'un tube enfoncé par battage dans la région des désordres. Compte tenu du remaniement apporté par ce mode de prélèvement, les échantillons ainsi obtenus ont été étudiés simplement pour l'identification chimique ou géotechnique.

(A) *Prélèvements dans des puits*—Trois puits ont permis de faire des prélèvements intacts en dessous du plan de fondation. L'un était situé dans la zone des désordres, sous le groupe de filtration (échantillon I). Un autre était situé dans l'usine, dans un hall de stockage à une quinzaine de mètres des incidents étudiés (échantillon II). Le dernier enfin, était situé en dehors du périmètre de l'usine et suffisamment loin pour que tout risque de contamination par les phosphates soit écarté (échantillon III).

Le Tableau 1 résume les résultats obtenus.

Les Figs. 1 et 2 donnent les analyses granulométriques et les diagrammes de compressibilité. Ces échantillons faisaient fortement effervescence avec l'acide chlorhydrique; leur pH était voisin de huit c'est-à-dire légèrement alcalin. On distinguait par endroit des paillettes de gypse.

De ces résultats, on dégage les constatations suivantes:

(1) Le poids spécifique de ces matériaux est très inférieur (jusqu'à 15 pour cent) aux valeurs habituelles des sols courants. Or le poids spécifique des différentes phosphates de calcium les plus hydratés est de l'ordre de 2.25 alors que celui du carbonate de calcium est de 2.65.

Les mesures du poids spécifique ont été effectuées dans du sulfure de carbone. Dans l'eau, les sels solubles (phosphate ou gypse) étaient entraînés et l'on retrouvait des valeurs de l'ordre de 2.60.

Tableau 1

Nature des échantillons	Densités apparentes		Teneur en eau		Limites d'Atterberg			Poids spécifique au sulfure de carbone
	Densité humide	Densité sèche	w%	w moyen	LL%	LP%	IP	$\gamma_s$
<b>I</b> Limons jaunes, sableux et calcaires	1.88/1.90	1.57/1.56	de 15.9 à 21	18.3	27.6	13.5	14.1	2.41/2.45
<b>II</b> Limons jaunes, sableux et calcaires	2.00/2.04	1.71/1.74	de 17.1 à 18.1	17.7	27.7	13.3	14.4	2.33/2.42
<b>III</b> Limons jaunes, sableux et calcaires	2.06/2.10	1.77/1.84	de 15.2 à 16.4	16.0	25.2	13.7	11.5	2.51

Cette constatation tend à expliquer le gonflement du sol par la transformation irréversible du carbonate en phosphate de calcium de poids spécifique plus faible, c'est-à-dire avec augmentation de volume.

(2) Les teneurs en eau sont systématiquement faussées par la présence de l'eau de cristallisation des phosphates et du gypse, en partie décomposés par le séchage à l'étuve à 105°. En particulier il est difficile d'utiliser les limites d'Atterberg par comparaison avec les règles classiques d'identification. Néanmoins, étant donné la faible valeur de l'indice de plasticité, on peut affirmer qu'en présence d'eau ce sol a des caractéristiques de gonflement extrêmement faibles. Ceci est d'ailleurs confirmé par les diagrammes de compressibilité (Fig. 2).

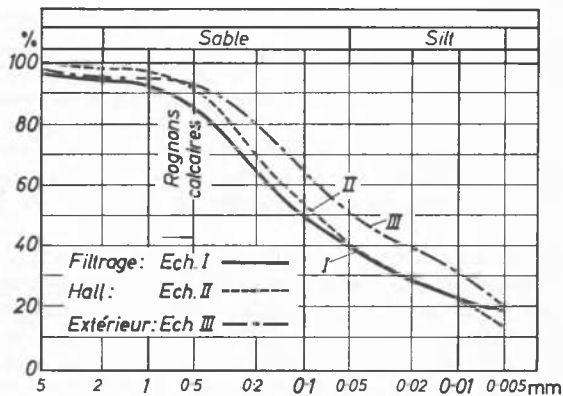


Fig. 1 Analyses granulométriques des échantillons  
Grain size distribution of the soil

(3) La perméabilité mesurée à l'oedomètre est faible ( $10^{-8}$  cm/s). Ceci est en contradiction avec les résultats des pompages dans les puits de prélèvement. Le débit d'épuisement était de l'ordre du  $m^3$ /heure pour un rabattement de 1 m environ. Il faut en déduire qu'il se trouve dans le terrain en place des passages privilégiés nombreux qui permettent une circulation des eaux facile dans un milieu imperméable en soi. Ces passages privilégiés peuvent correspondre à une dissolution partielle et à l'entraînement de  $Co_3Ca$  du terrain en place sous l'effet de l'acide. Selon la nature du terrain et la continuité des éléments calcaires, l'eau chargée d'acide doit transformer le calcaire en phosphate qui reste en place ou est entraîné. Dans le premier cas, le terrain augmente de volume, dans le second, on ne constate rien en surface: il y a simplement une réduction locale de la densité apparente du sol.

L'un et l'autre peuvent d'ailleurs être vrais simultanément;

c'est l'origine de la dispersion de certains résultats et en particulier du fait que les densités humides et sèches de l'échantillon I plus chargé que les autres, sont plus faibles que celles des deux autres échantillons. Pour reproduire le phénomène, un essai de gonflement a été effectué dans un oedomètre, en faisant percoler une solution d'acide phosphorique (étendu à 10 pour cent) à travers le sol naturel. L'échantillon était soumis à une charge voisine de  $2 \text{ kg/cm}^2$  et l'acide a été ajouté après stabilisation des déformations. Après une semaine, aucun gonflement n'a pu être mis en évidence. Ceci s'explique par la

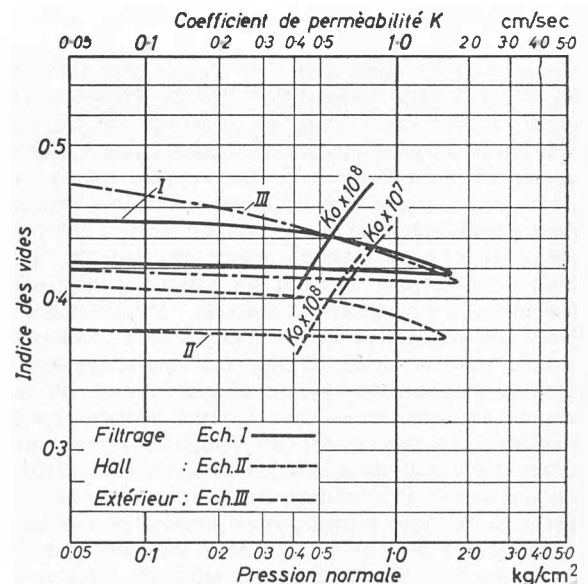


Fig. 2 Diagramme de compressibilité  
Compressibility

faible perméabilité du matériau. En réalité, il aurait fallu attendre un temps beaucoup plus long puisqu'à la fin de l'essai le liquide avait à peine progressé du 1/20 de l'épaisseur de l'échantillon. Mais le phénomène ne correspondrait plus à ce qui se passe dans la nature car le gonflement du sol a été relativement rapide comme on le constatera plus loin (Fig. 3).

(B) *Echantillon prélevé en profondeur* (échantillons non intacts)—Ces échantillons ont été prélevés sous le groupe de filtration, en un point où le gonflement était très important. Des essais d'identification et des analyses chimiques ont simplement été effectués. Ils sont résumés dans les Tableaux 2 et 3.

Tableau 2

Nature des échantillons	Cote dans le sol m	Teneur en eau moyenne w%	Poids spécifique (sulfure de carbone) $\gamma_s$
Limon sableux, nodules de calcaire, présence de gypse	- 3.8	19.5	2.63-2.55
Limon sableux et nodules de calcaire	- 4.5	17.2	2.58-2.68
Limon, nodules calcaires, gypse	- 5.2	12.9	2.42
Limon-gypse	- 5.9	14.8	2.56-2.59
Limon; nodule calcaire, nids de gypse	- 6.4	12.6	2.71-2.64

Tableau 3

## Analyse chimique des échantillons

Profondeur des échantillons m	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> soluble dans l'eau (phosphate monocalcique)	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> soluble dans eau + citrate (phosphate tricalcique)
- 3.70	4.1	0.4	4.0
- 4.40	1.7	0.3	0.6
- 5.10	0.4	0.3	0.3
- 5.70	0.3	0.2	0.3
- 6.30	0.3	0.2	0.3

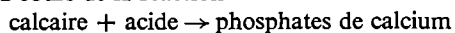
Tous ces échantillons faisaient fortement effervescence avec l'acide chlorhydrique. On constate d'après ces résultats:

- (1) Que la teneur en eau diminue avec la profondeur
- (2) Que la dispersion des mesures de poids spécifique est grande
- (3) Qu'on retrouve vers la cote - 6.40, un poids spécifique normal
- (4) Que la proportion de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> diminue avec la profondeur.

En définitive, il semble que la zone intéressée s'étende jusqu'à une cote située entre - 5 m et - 6 m tant d'après les poids spécifiques que d'après les résultats de l'analyse chimique.

## Interprétation des Résultats

L'explication du gonflement du sol par l'augmentation de volume au cours de la réaction



se vérifie d'une façon tout à fait satisfaisante.

Une augmentation de 0.1 sur le poids spécifique, soit 4 pour cent, correspond à une augmentation de volume de 4 pour cent. En intéressant une couche de trois mètres, on obtient un gonflement de 12 cm c'est l'ordre de grandeur du phénomène observé.

Il semble qu'un calcul plus précis serait illusoire si l'on tient compte du mécanisme du gonflement qui se produit certainement d'une façon hétérogène à partir des cheminements privilégiés que l'acide trouve dans le sol. Ceci est d'ailleurs la seule hypothèse qui permette d'expliquer l'absence de mouvement du premier groupe de filtration.

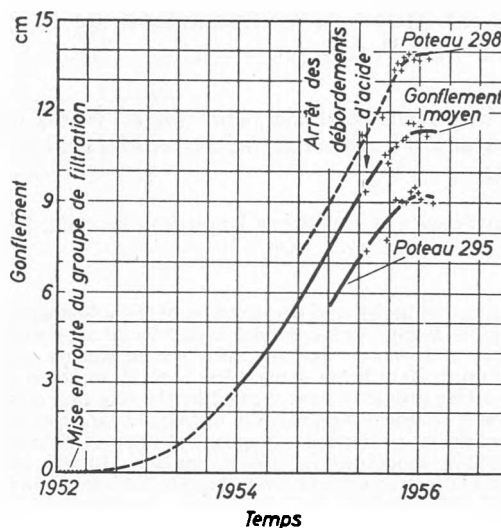


Fig. 3 Gonflement du sol en fonction du temps  
Swelling of the soil versus time

Comme on est en présence d'une réaction chimique irréversible, il n'y a pas lieu de craindre, après arrêt des écoulements d'acide, un mouvement de tassement inverse du précédent. Etant donné la faible perméabilité du sol, la réaction ne s'arrête pas immédiatement: il faut attendre la neutralisation de l'acide restant dans le sol par migration, diffusion ou percolation.

Les travaux effectués pour arrêter les désordres, ont consisté d'abord en la réalisation d'une chappe étanche pour supprimer toutes nouvelles infiltrations d'acide dans le sol. Les réparations de la super-structure ont été entreprises après stabilisation des déformations du sol. La Fig. 3 indique l'évolution du gonflement en fonction du temps.