

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.

Soulèvements d'une Argile Déchargée et Leur Prévision

Upheaval of Unloaded Clays—Tentative Method of Its Calculation

J. KERISEL Simecsol, Paris,
P. SAVEY Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, France

RESUME : Pendant la construction et la mise en eau de l'usine de Caderousse, importante centrale hydro-électrique du Bas-Rhône fondée sur une argile compressible, il a été effectué de nombreuses mesures des déformations, des contraintes et des pressions interstitielles jusqu'à des profondeurs très importantes. La communication analyse les principaux résultats obtenus : décalage de plusieurs mois entre l'application de la contrainte maximale de déchargement et la mesure du soulèvement maximum, existence de transferts liquides dans les couches superficielles du terrain de fondation, modules de déformation réels très supérieurs à ceux déterminés en laboratoire. Par analogie avec la théorie de la consolidation, un coefficient de déconsolidation ν est introduit, dont une estimation est donnée. Ces observations sont le support d'une méthode de calcul des déplacements verticaux à court terme plus en accord avec la réalité que les méthodes classiques.

INTRODUCTION

Plusieurs centrales hydroélectriques, construites sur le Bas-Rhône et équipées de groupes turbo-alternateurs d'une puissance unitaire de 30 MW, sont fondées sur une argile compressible d'origine marine et d'âge Pliocène.

Des mesures in situ ont été effectuées pendant la construction des cinq usines déjà mises en service. Nous traiterons plus particulièrement dans la présente communication des observations relatives à la dernière de ces usines, celle de CADEROUSSE.

Après avoir analysé les résultats qui concernent notamment des mesures de déformation verticale et de charge piézométrique au sein de l'argile en-dessous de la fondation, nous donnerons une interprétation des phénomènes et en tirerons quelques enseignements sur les méthodes de calcul prévisionnel des déplacements verticaux.

2. CARACTERISTIQUES GENERALES DES TERRAINS ET DESCRIPTION DES PHASES DE TRAVAUX

Sur le site de l'usine de CADEROUSSE, à partir du niveau du terrain naturel à la cote NGF (29) sont successivement rencontrées :

- les alluvions sablo-graveleuses du Rhône sur 17 m d'épaisseur, de la cote (29) à la cote (12) dans lesquelles circule une nappe alluviale dont le niveau moyen est à la cote (26).

- l'argile Pliocène sur des épaisseurs de plus de 100 m. Il s'agit d'une marne argilo-silteuse, surconsolidée et présentant des caractéristiques sensiblement constantes tant en plan qu'en profondeur :

$$W = 23 \quad \gamma_d = 1,67 \quad W_p = 23,7 \quad W_L = 33,2$$

$$K = 1 \text{ à } 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s} \quad d_{2\mu} = 0,18$$

A partir d'essais de compressibilité à l'oedomètre et au triaxial il a été établi une courbe oedométrique type conduisant aux valeurs des modules ci-après :

Pour les pressions comprises :

Entre	MPa	0,1/0,2	0,2/0,4	0,4/0,8
E (MPa)				
au chargement		9	13	22
au déchargement		16	39	85

Les phases de construction de l'ouvrage ont comporté :

a) l'exécution d'une grande fouille de 29 m de profondeur s'enfonçant de 12 m dans l'argile Pliocène, jusqu'à la cote (0). Le volume des terrassements, effectués en 7 mois, a atteint 1.100.000 m³, correspondant à un déchargement de 0,60 MPa environ au droit de l'usine (le volume de terres enlevées au droit de l'usine peut

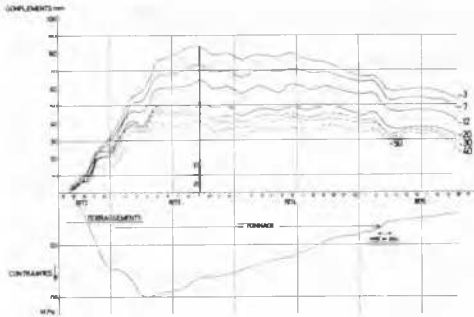


Fig. 1 : variation des gonflements mesurés à différents niveaux par le repère (7) en fonction du temps et de la variation de la contrainte moyenne au niveau de la fondation .

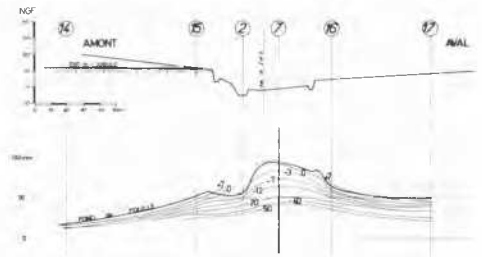


Fig. 2 : courbes de gonflement à différents niveaux dans un profil transversal (relevé du 21. 9. 73)

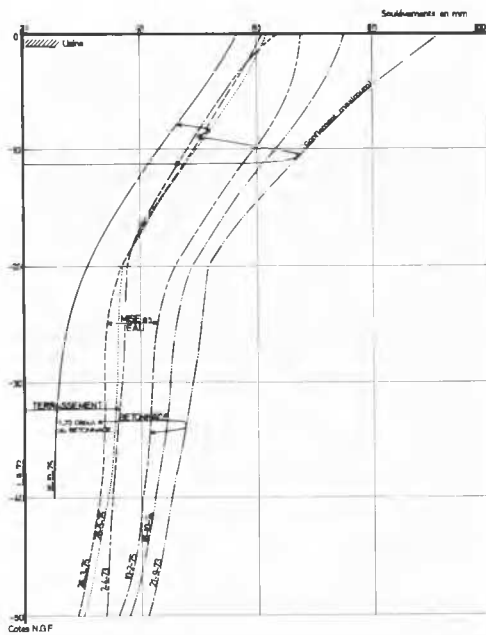


Fig. 3 : courbes isochrones des mouvements verticaux de l'argile au droit du repère (7)

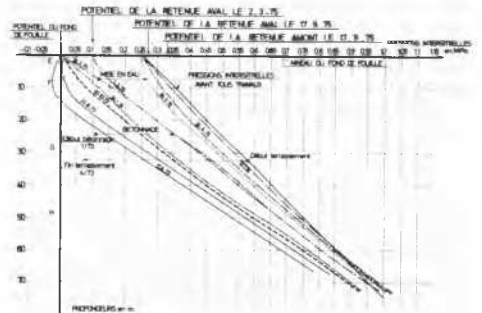


Fig. 4 : courbes isochrones des pressions interstitielles au sein de l'argile .

- être assimilé à un parallépipède rectangle de 29 m de haut, 62 m de large et 102 m de long).
- b) le bétonnage des ouvrages de l'ensemble usine-écluse . Le volume du béton coulé en 2 ans représente 300.000 m³ . La contrainte correspondant au poids de l'ouvrage sur la fondation est , au droit de l'usine , de 0,48 MPa .
- c) la mise en eau des ouvrages .

3. DISPOSITIFS DE MESURE

- Au droit de la fouille de l'usine ont été disposés :
- 17 repères de tassement multiple , type "Torpille" . De nombreux repères de nivellement , fixés sur l'ouvrage lors du bétonnage , ont par ailleurs permis de suivre ses mouvements .
 - 23 capteurs Glotzl de pression interstitielle , 130 capteurs Glotzl de contrainte totale , placés directement sous l'ouvrage , et 11 capteurs

Télémac de pression interstitielle, placés à différentes profondeurs au sein de l'argile.

4. PRINCIPAUX RESULTATS

Les principaux résultats des observations effectuées pendant les différentes phases de travaux sont rassemblés sur les figures 1 à 4 et suscitent un certain nombre de remarques.

Phase terrassements :

L'excavation de la fouille a provoqué un gonflement des argiles qui s'est poursuivi après la fin des terrassements et le début du bétonnage (cf. fig. 1 à 3). En particulier le gonflement global (mesuré à la cote -3) s'est encore accru de 40 % environ pour atteindre sa valeur maximale, 84 mm 5 mois après la fin des terrassements. Il a fallu attendre que la contrainte de rechargement atteigne 70 % environ de la contrainte maximale de déchargement pour que le gonflement global retrouve la valeur qu'il atteignait à la fin des terrassements.

Par ailleurs, le déchargement des terrains s'est traduit par une diminution de la pression interstitielle (cf. fig. 4). La diminution maximale a été mesurée vers 15 m de profondeur sous le fond de fouille, et correspond à une pression interstitielle nulle à la fin des terrassements. A ce niveau, l'Over Consolidation Ratio (O. C. R.), rapport de la contrainte initiale à la contrainte finale après déchargement, est de l'ordre de 3.

Il convient d'insister plus particulièrement sur l'allure de la distribution des pressions interstitielles. Sur les 15 premiers mètres environ, la courbe représentant les variations de la pression interstitielle avec la profondeur présente une courbure très prononcée, alors qu'au-delà elle est sensiblement linéaire. Si l'on suppose les soulèvements de l'argile régis par des phénomènes semblables à ceux qui président à ses tassements, il est possible d'écrire une équation analogue à l'équation classique de la consolidation :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{E' K_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

dans laquelle

u = pression interstitielle

t = temps

K_v = coefficient de perméabilité verticale

γ_w = poids volumique de l'eau

z = profondeur

E' = module de gonflement avec circulation d'eau

Ceci suppose bien sûr que les migrations d'eau sont verticales et que l'on peut négliger les réalignements latéraux.

La courbure de la courbe $u(z)$ traduit alors l'existence de transferts liquides sur les 15 premiers mètres de profondeur. Au-delà, le caractère

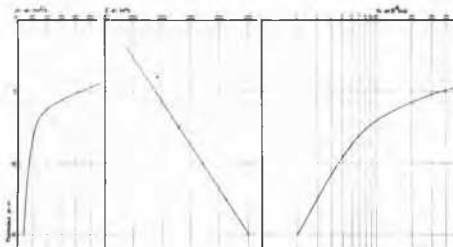


Fig. 5 : variations en fonction de la profondeur, dans les 15 premiers mètres sous le fond de fouille, de :

E' = module de déformation verticale (déduit des gonflements observés)

K_v = coefficient de perméabilité verticale (déduit des observations)

$dv = \frac{E' \times K_v}{\delta w}$ coefficient de déconsolidation

linéaire de cette courbe exclut la possibilité de semblables migrations liquides, et les mouvements observés ne sont que des déformations de type élastique.

Par analogie avec la théorie classique de la consolidation, nous proposons de poser :

$$dv = \frac{E' K_v}{\delta w} \text{ coefficient de déconsolidation}$$

Les mesures effectuées sur le site de Caderousse permettent d'estimer la valeur de dv , à différentes profondeurs :

on détermine facilement $\frac{1}{E'} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t}$

(v = volume) à partir des courbes de la fig. 3. Par ailleurs $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ se calcule aisément à partir des courbes de la fig. 4, d'où la valeur de K_v à partir de l'équation (1)

on détermine facilement E' , puisque l'on connaît la contrainte totale de déchargement et qu'on a mesuré les pressions interstitielles et les soulèvements de l'argile

on peut alors calculer $dv = \frac{E' K_v}{\delta w}$

Nous avons fait figurer sur la fig. 5 les variations sur les 15 premiers mètres de profondeur de K_v et dv ainsi calculés. Ces résultats suscitent les remarques suivantes :

de 5 à 15 m de profondeur, le coefficient de perméabilité varie de 10^{-7} m/s à $2 \cdot 10^{-8}$ m/s. Ces valeurs sont très supérieures au coefficient de perméabilité de l'argile Pliocène déterminé en

laboratoire (de 1 à $5 \cdot 10^{-10}$ m/s), ce qui confirme bien l'existence d'une décompression des couches supérieures. On note d'ailleurs que K_v diminue quand la profondeur augmente.

de 5 à 15 m de profondeur, le module de gonflement varie de 250 à 400 MPa. Les essais de déchargement effectués en laboratoire avaient abouti à la détermination de modules de déchargement de l'ordre de 85 MPa à ces mêmes profondeurs. Il existe donc un rapport de 3 à 4 entre les modules "mesurés" in situ et ceux déterminés en laboratoire.

de 5 à 15 m de profondeur, le coefficient de déconsolidation varie de 88 à 8 cm²/s. Ces valeurs sont à rapprocher de celle du coefficient de consolidation déterminé en laboratoire : $C_v = 3,6 \cdot 10^{-4}$ cm²/s. On note donc un rapport de l'ordre de 10^4 à 10^5 entre le coefficient de déconsolidation et le coefficient de consolidation ce qui tendrait à prouver que, contrairement à ce qui se passe pour les tassements de consolidation les gonflements de déconsolidation sont atteints relativement rapidement. On remarque par ailleurs qu'à partir d'une certaine profondeur dv tend vers une valeur constante.

ESSAI D'UNE METHODE DE CALCUL DES SOULEVEMENTS

Compte tenu de ces observations, nous proposons la méthode de calcul suivante :

a) pour la zone profonde ($OCR < 3$), faire un calcul élastique en contraintes totales de déchargement, en prenant un module de décompression égal à trois fois celui donné par un essai triaxial.

b) pour la zone supérieure ($OCR > 3$), calculer le soulèvement en contraintes effectives de déchargement, en prenant un module de décompression égal à 3 fois celui déterminé à l'oedomètre. Le calcul de Δu peut se faire de façon simple en supposant, à la fin des terrassements, la pression interstitielle nulle dans cette zone : l'expérience montre que cette approximation est très acceptable.

Le calcul, par cette méthode, des soulèvements de l'argile de Caderousse a permis de retrouver avec une bonne approximation les valeurs mesurées in situ.

CONCLUSIONS

Lors de l'excavation de fouilles profondes de grandes dimensions dans les argiles Pliocènes :

- il y a un décalage de plusieurs mois entre le déchargement maximum et le soulèvement maximum. Il faut un rechargement égal à 70% du déchargement maximum pour retrouver le soulèvement mesuré en fin de déchargement.

- dans les couches supérieures du terrain déchargé, correspondant à un O.C.R. supérieur à 3 , se produisent des transferts d'eau. On peut définir pour ces couches un coefficient de déconsolidation. Il est environ 10^4 fois plus grand que les coefficients de consolidation usuels.

- il y a un rapport de 3 entre les modules de décompression observés et ceux mesurés en laboratoire.

Les auteurs proposent une méthode de calcul qui, dans l'essentiel, distingue nettement les couches d'OCR supérieur et inférieur à 3 .

La construction d'une nouvelle centrale hydro-électrique sur le Bas-Rhône, à VAUGRIS, vient de commencer. L'important programme de mesures mis en place à cette occasion devrait permettre d'approfondir et de compléter les observations effectuées jusqu'à présent, et leur application pratique sur le plan du calcul.

BIBLIOGRAPHIE

J. MATHIAN - M. DE LAMOTTE
Grande Structure fondée sur argile préconsolidée
VIII^e Congrès ICSMFE Moscou T 1-3 p.161-166

P. SAVEY
Gonflement et tassement d'un substratum argileux
utilisé pour la fondation de grands ouvrages

Annales Institut Technique du Bâtiment et des
Travaux Publics - PARIS Déc. 1975 -P. 71-85.