

LA PRESSION DE PRÉCONSOLIDATION : DÉTERMINATION ET USAGES

PRECONSOLIDATION PRESSURE: DETERMINATION AND USES

Jean-Pierre MAGNAN^{1,2}, Grégory MEYER²

¹ Université Gustave Eiffel, Département Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre, Marne-la Vallée, France

² SYSTRA, Paris, France

RÉSUMÉ – Cette communication analyse les difficultés pratiques rencontrées lors de la détermination de la pression de préconsolidation des sols argileux comme marqueur de l'histoire géologique de ces sols sédimentaires. Elle distingue les sols peu et très surconsolidés et explore les effets du remaniement associé au prélèvement des carottes et des procédures d'essai. Ce paramètre reste très difficile à déterminer avec précision.

ABSTRACT – This paper analyses the difficulties met in practice when assessing the preconsolidation pressure of clayey soils, as a marker of the geological history of these sedimentary deposits. The cases of slightly overconsolidated and heavily overconsolidated soils are discussed separately. The effects of remoulding associated to core sampling and test procedures are analysed. It is difficult to determine precisely the value of this parameter.

Introduction

La pression de préconsolidation est un concept géotechnique qui traduit l'influence de l'histoire des sols sur leur comportement mécanique. Il est admis que sa valeur peut être estimée par les essais de compressibilité à l'œdomètre. La pression de préconsolidation sert de base pour déterminer le rapport de surconsolidation, qui est utilisé dans certaines lois de comportement et pour évaluer le coefficient de pression des terres au repos. La détermination de ce paramètre rencontre de nombreuses difficultés dans la pratique, dues à la qualité des éprouvettes qui servent aux essais, mais aussi à la variabilité des sols dans les directions horizontales et verticale. On peut s'interroger sur son utilisation dans la pratique des études géotechniques.

L'étude des sols sédimentaires dont font partie les sols argileux s'appuie sur quelques idées fondamentales situées aux confins de la géologie et de la mécanique. On fait référence à un processus de formation idéalisé, dans lequel la déposition progressive des particules dans une masse d'eau douce ou salée conduit à augmenter l'épaisseur des particules empilées et à accroître progressivement la contrainte verticale. La contrainte verticale, appelée effective dans la mécanique des sols moderne, augmente avec l'épaisseur et la densité du sol. Pour de très grandes différences de densité, l'empilement des particules peut être fortement modifié et le comportement mécanique en termes de contraintes et déformations peut varier de façon importante. Les nombreuses études consacrées au comportement mécanique des argiles montrent l'influence d'autres facteurs comme la température, le temps (la durée d'application des charges et leur vitesse de variation, ce que l'on traduit en viscosité et fluage) et la vitesse d'écoulement des liquides dans les pores du sol.

Depuis le milieu du vingtième siècle, on fait référence au modèle de la figure 1, qui représente la formation d'un sol argileux en termes de contrainte effective (axe horizontal) et indice des vides (axe vertical). Si le sol n'a subi aucun chargement ni déchargement après sa formation, son état de contrainte correspond à l'effet du poids du sol situé au-dessus du point considéré, en tenant compte des pressions interstitielles existant dans le

massif. Cette situation est limitée aux argiles et vases récentes (post-glaciaires, c'est-à-dire postérieures à la dernière glaciation du Quaternaire). Il existe très peu d'argiles antérieures qui n'aient jamais été chargées ou déchargées géologiquement par la suite.

Si le sol a été déchargé après avoir atteint son état d'équilibre initial, le point représentant son état s'éloigne vers la gauche de la ligne de compression (contraintes plus faibles). L'irréversibilité générale des déformations des sols fait que l'indice des vides varie peu lors de ce déchargement, le plus souvent dû à l'érosion. Dans le massif de sol dont on veut caractériser le comportement mécanique, cet état de contrainte est celui qui décrit l'état initial du sol (contrainte effective initiale σ'_{vo}). L'état final de la contrainte après prélèvement et installation dans le laboratoire est σ'_{vi} (valeur très faible ou imposée par la succion).

L'idée de base de la caractérisation œdométrique des sols est que le prélèvement des carottes est la suite du déchargement géologique naturel et que les essais qui seront réalisés permettront de retrouver l'état de contrainte de préchargement géologique du sol.

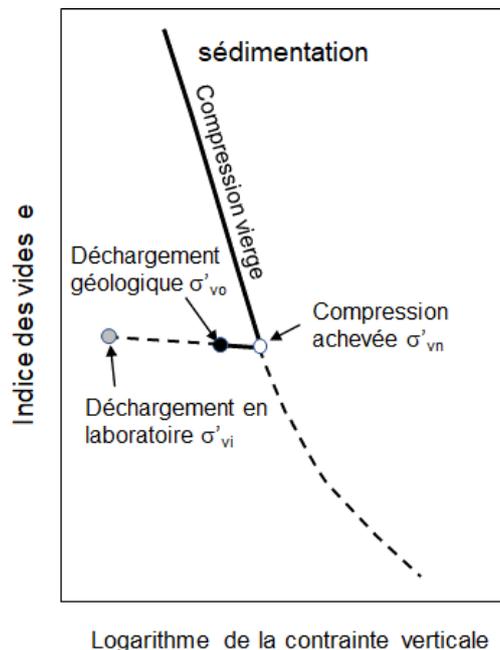


Figure 1. Schéma idéalisé de la formation des sols sédimentaires argileux

L'effet du temps sur la compression œdométrique des sols argileux est communément caractérisé par des lignes parallèles correspondant chacune à une durée d'application de la charge (Figure 2). L'espacement vertical de ces lignes est lié à la vitesse de fluage (paramètre C_α ou $C_{\alpha e}$). Dans l'état naturel du sol, la valeur de l'indice des vides e_0 dépend de l'âge de la courbe de compressibilité. L'exécution d'un essai œdométrique ne peut produire qu'un point situé sur la courbe à 24h, puisque c'est la durée normalisée des paliers de chargement successifs des essais. La pression de préconsolidation à un jour est plus forte que les pressions de consolidation correspondant à des temps plus élevés. La procédure d'essai a donc pour effet de surestimer les pressions de préconsolidation. La pression de préconsolidation à 1 jour doit donc être nécessairement utilisée avec un calcul de fluage pour tenir compte de l'évolution de l'indice des vides au cours du temps.

Effet du prélèvement du sol sur la pression de préconsolidation

Une fois la pression de préconsolidation définie comme mémoire de l'histoire géologique du sol, les difficultés rencontrées pour l'évaluer sont nombreuses. Elles sont toutes liées à la modification de l'état du sol lors du prélèvement, du transport et de la conservation des échantillons ainsi qu'à la procédure adoptée pour installer les éprouvettes dans les appareils et bâtis de mesure et réaliser les essais.

Les difficultés sont différentes selon l'état de surconsolidation des sols, lié à la profondeur des prélèvements. Nous allons d'abord traiter le cas des sols argileux mous que l'on rencontre dans les dépôts quaternaires superficiels récents. Nous examinerons ensuite le cas des sols argileux fortement surconsolidés.

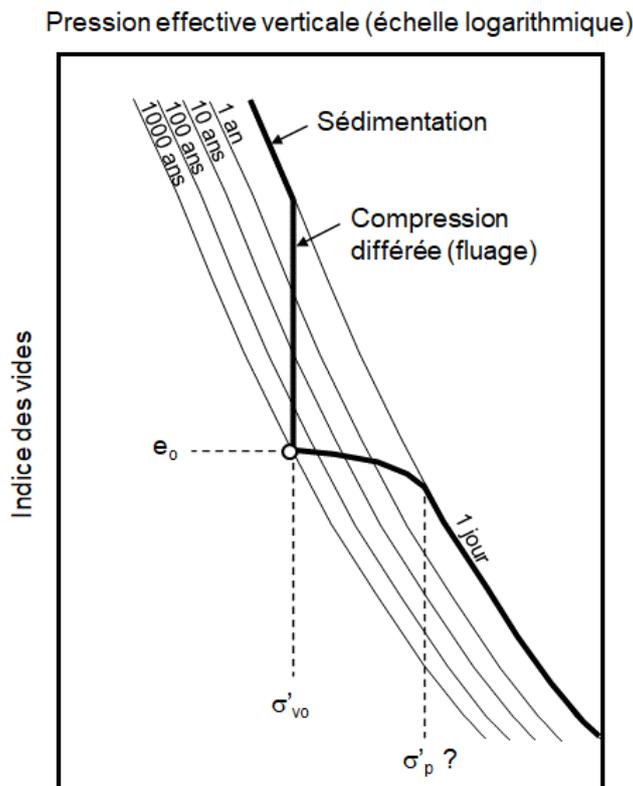


Figure 2. Influence du temps sur la pression de préconsolidation

Analyse des sols mous peu surconsolidés

Le comportement mécanique des vases et argiles molles est un sujet d'intérêt très ancien pour la communauté géotechnique mondiale. De nombreux travaux ont été effectués aux Etats-Unis d'Amérique, à l'époque de la 2^{ème} guerre mondiale. Ils ont porté en particulier sur l'effet du remaniement dû au prélèvement sur les courbes de compressibilité œdométrique.

La figure 3, issue des travaux de Rutledge (1944, cité par Holtz et Kovacs (1981)), montre l'effet du remaniement sur une éprouvette d'argile de Chicago. On observe que l'éprouvette remaniée est plus déformée que l'éprouvette intacte (sa déformabilité est plus élevée) et que la pression de préconsolidation est plus forte pour l'éprouvette intacte.

La figure 4 (Holtz et Kovacs, 1981) résume la position des courbes œdométriques par rapport au schéma théorique de la relation des contraintes et indices des vides sur le terrain. Ces courbes, inspirées des possibilités réelles des essais sur échantillons carottés, suggèrent qu'il reste une différence réelle entre les courbes expérimentale et l'information recherchée. Elles rappellent aussi que le remaniement des carottes et des éprouvettes que l'on y découpe est une source importante de problèmes.

Les travaux des laboratoires des Ponts et Chaussées, à la grande époque des travaux de construction d'autoroutes sur sols mous en France (années 1970-1990) se sont beaucoup préoccupés de la meilleure façon de prélever les carottes pour respecter le plus possible la structure et le comportement mécanique des argiles et vases molles.

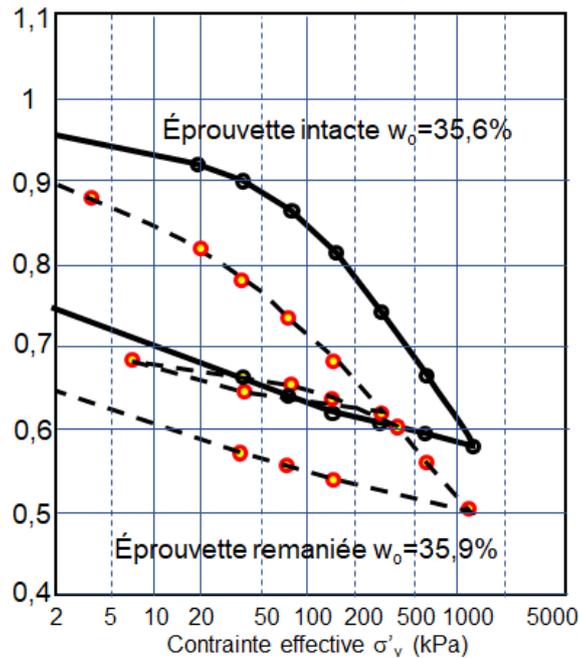


Figure 3. Argile de Chicago intacte et remaniée

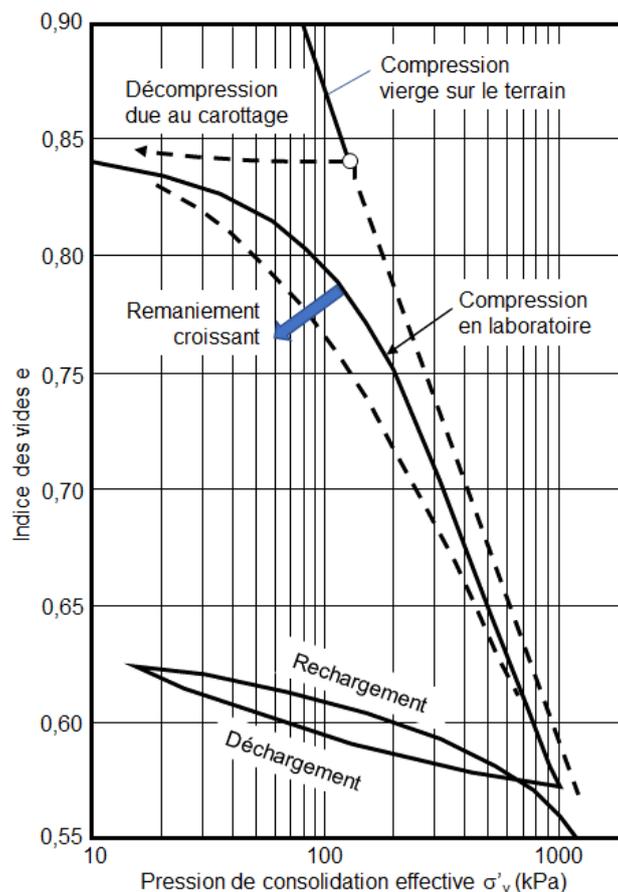


Figure 4. Schéma de principe de l'essai œdométrique par rapport au terrain naturel

Les argiles et vases de la vallée de la Dordogne (site expérimental de Cubzac-les-Ponts) et de la vallée de l'Adour (remblais d'essais de Guiche) ont été les lieux principaux de ces études. Sur le site de Guiche, Khemissa et al. (1997) ont comparé deux types de carottiers, un carottier à piston stationnaire de 100 mm de diamètre et le carottier développé à l'Université Laval, qui est un carottier à piston stationnaire et enveloppe rotative (carottes de 200 mm de diamètre). Les carottes prélevées entre 10 et 15m de

profondeur ont permis d'obtenir des résultats très satisfaisants, avec un remaniement très faible jusqu'à 12,5m de profondeur. La figure 5 montre les résultats d'un essai réalisé à 12,5m de profondeur, représenté de façon classique (indice des vides en fonction du logarithme de la contrainte). Le même essai est représenté en coordonnées linéaires sur la figure 6. Il est clair que la forme bilinéaire de la courbe œdométrique est liée pour beaucoup au mode de représentation choisi. Dans les études anciennes sur les essais œdométriques dans les argiles, il est expliqué que la proportionnalité des déformations au logarithme des contraintes a été choisie pour tenir compte de la relation linéaire observée entre les modules de déformation $M = d\sigma'/d\varepsilon$ et les contraintes σ' . Aarhaug (1984) utilise des relations non linéaires non logarithmiques pour les autres types de sols. Toute la procédure de détermination de la pression de préconsolidation appliquée aux argiles s'appuie sur cette hypothèse.

La linéarisation directe de la courbe de compressibilité œdométrique, telle qu'appliquée sur la figure 6, est certainement acceptable tant que l'on reste dans des intervalles de variations de contraintes réduits.

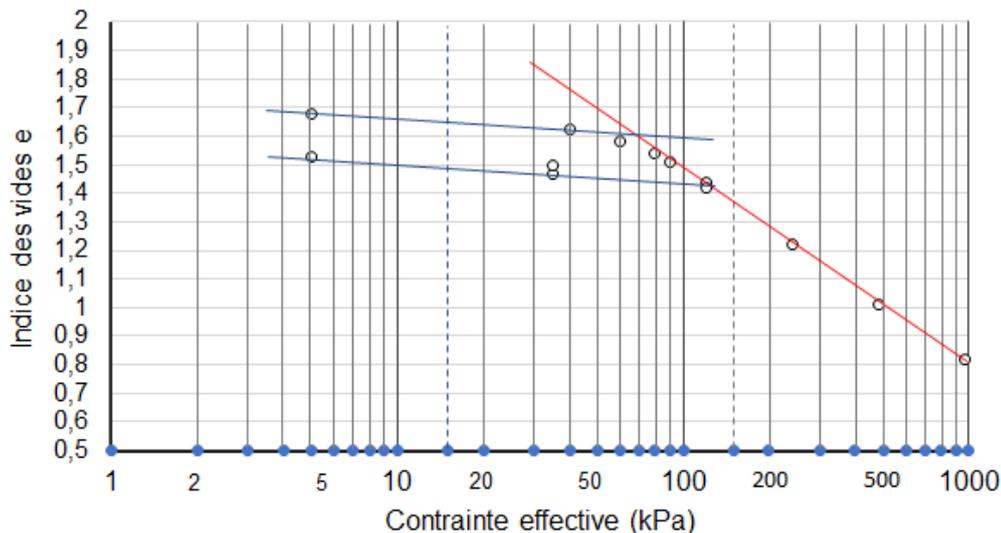


Figure 5. Essai œdométrique en coordonnées semi-logarithmiques

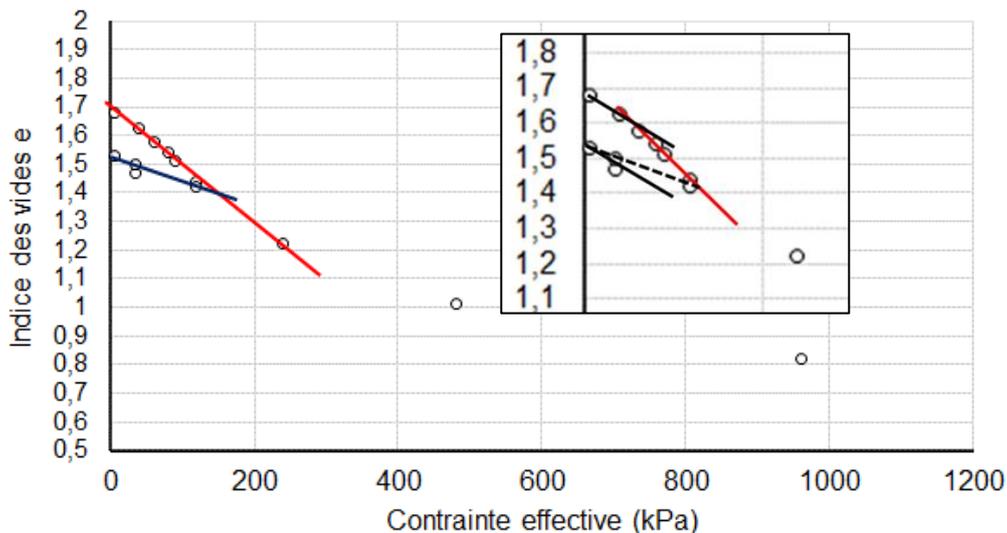


Figure 6. Essai œdométrique en coordonnées linéaires

En conclusion, le prélèvement de carottes quasi-intactes est possible dans les sols mous de surface jusqu'à 10-12m de profondeur et l'on peut dans ce cas déterminer les pressions de préconsolidation de façon fiable, à condition d'utiliser un matériel adapté, mais pas toujours usuel de nos jours.

Analyse des sols argileux surconsolidés

Le modèle de la figure 1 sert aussi de référence quand les sols argileux ont été chargés par d'autres couches de terrains que l'érosion a fait disparaître par la suite. En France, cette situation est rencontrée pour l'argile des Flandres et pour les dépôts argileux du sous-sol de la région parisienne (argile verte de Romainville et argile plastique de l'Yprésien). Les études menées sur l'argile des Flandres par H. Josseaume et le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées (Josseaume et al., 1991) ont conclu que le choix de l'appareillage conditionne fortement les résultats des essais œdométriques. Avant de recourir à un système de chargement à haute pression, des œdomètres classiques dont la charge maximale est inférieure à 2 MPa ont été utilisés pour faire les essais et ont très souvent produit des courbes œdométriques inutilisables (pression de préconsolidation inférieure à la contrainte effective actuelle en place), ce qui est inacceptable pour ce type de sol.

Deux exemples de courbes avec des œdomètres limités à 2 MPa sont présentés sur la figure 7. La pression de préconsolidation déduite de l'essai est de l'ordre de 300 à 400 kPa.

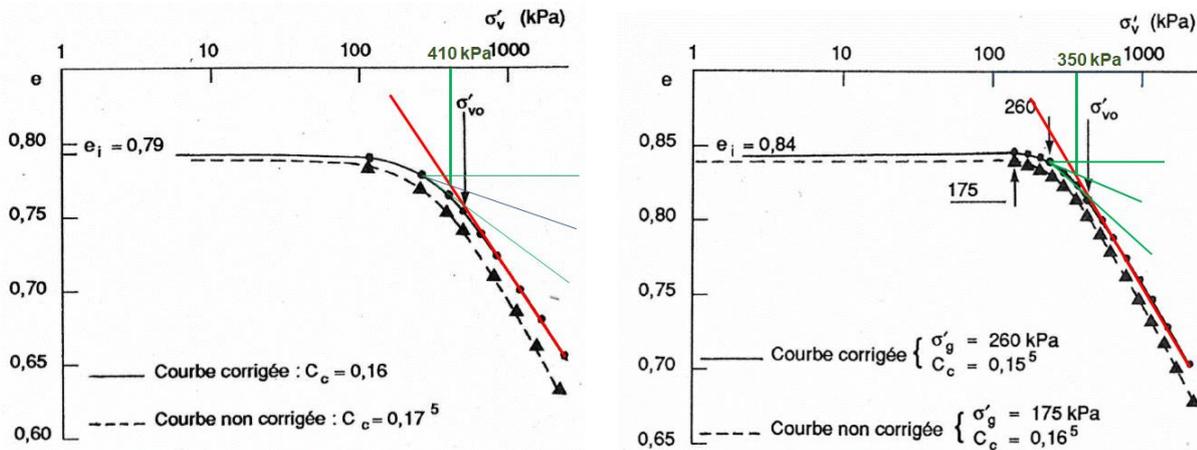


Figure 7. Deux essais œdométriques sur l'argile des Flandres (charge limitée à 2 MPa)

Une série d'essais a été réalisée ultérieurement avec un œdomètre montant à 20 MPa. La figure 8 présente le résultat d'un essai à haute pression (pour une profondeur 43m), qui donne une pression de préconsolidation de 3400 kPa, plus proche de ce que l'on attend pour l'argile des Flandres. Les deux courbes à « basse pression » de la figure 7 ont été reportées sur cette figure. L'utilisation d'un matériel permettant un chargement suffisant est donc indispensable. Ces exemples suggèrent qu'il faut se préoccuper aussi de la déformabilité du matériel.

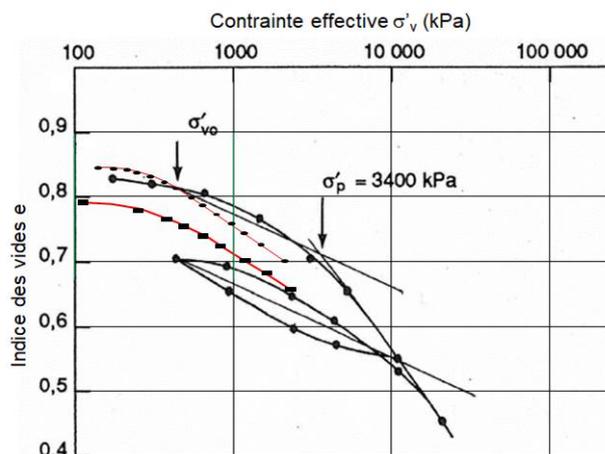


Figure 8. Essai œdométrique à haute pression sur l'argile des Flandres.

Les procédures utilisées pour ces essais à haute pression comportent des cycles de chargement préalable sans mettre l'éprouvette en contact avec de l'eau. Ces cycles ont pour objectif de limiter et réparer un peu les effets du prélèvement sur l'état des éprouvettes. Les différentes opérations effectuées lors du carottage créent, même dans le cas des carottiers triples, des distorsions et décompressions dans les carottes qui fragilisent le sol et favorisent sa fissuration et sa désaturation.

Des essais œdométriques réalisés sur des carottes de sols argileux très surconsolidés prélevés à une dizaine de mètres de profondeur ont été réalisés avec un premier cycle de chargement sans mettre l'éprouvette en contact avec l'eau. Un exemple est montré sur la figure 9. Dans beaucoup d'essais, ce cycle préalable a créé un tassement de 6 à 10%, repris en grande partie lors de la mise en eau de l'éprouvette. Ce fort tassement témoigne du remaniement provoqué par le prélèvement des carottes au carottier triple. De tels phénomènes perturbent l'interprétation des résultats des essais.

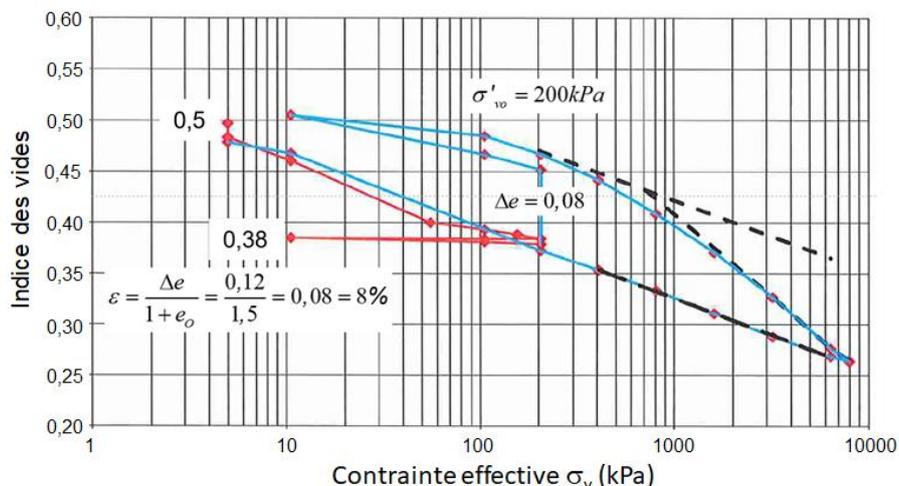


Figure 9. Essai à haute pression avec cycle initial à sec (en rouge).

Variabilité des résultats d'essais

La variabilité naturelle du terrain peut être une source importante de variation des valeurs de la pression de préconsolidation. Le graphique de la Figure 10 montre les variations de σ'_p sous le remblai expérimental D du site expérimental de Cubzac-les-Ponts (Haghou, 1983), ainsi que l'influence du diamètre du carottier utilisé. Si la pression de préconsolidation est un paramètre lié à l'histoire géologique du sol, ces variations sont plutôt des erreurs de mesure, car une telle variabilité du sol est peu probable.

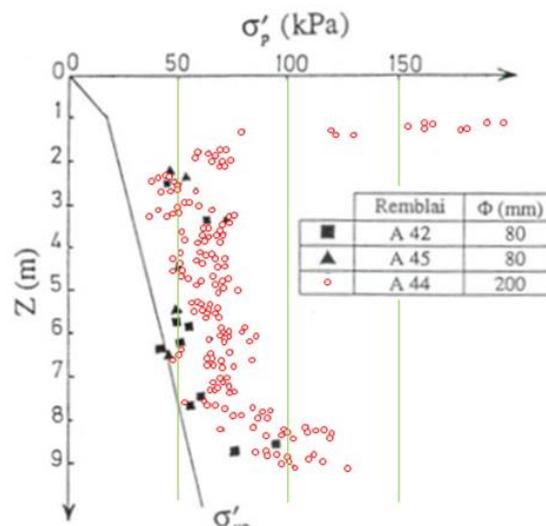


Figure 10. Variations des pressions de préconsolidation sous le remblai D de Cubzac

Pour les sols argileux surconsolidés, la variabilité des résultats d'essais est aussi impressionnante. Dans l'argile plastique de l'est parisien (Yprésien), les valeurs de σ'_p déduites des essais œdométriques varient de 28 et 2255 kPa (Figure 10).

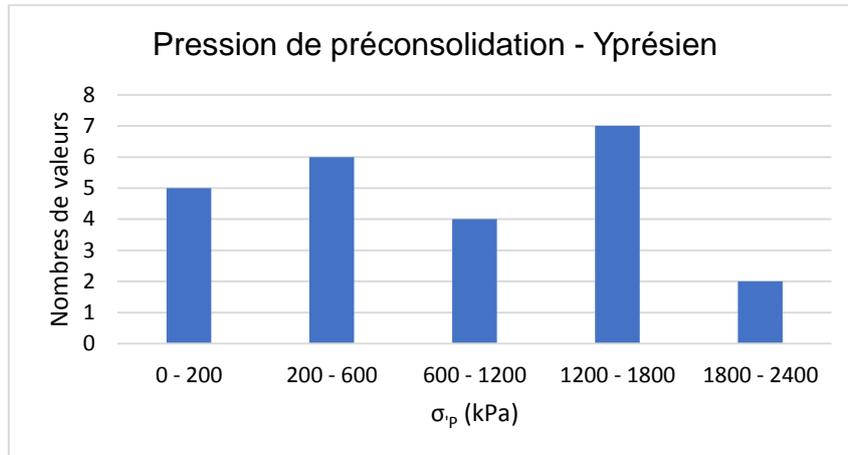


Figure 11. Histogramme des valeurs mesurées de la pression de préconsolidation

Ces variations sont beaucoup plus importantes que ce que l'on peut attendre dans une couche sédimentaire âgée de dizaines de millions d'années. Cette fois encore il faut probablement incriminer les conditions de prélèvement des sols et l'exécution des essais.

Conclusion

Il est plus facile de limiter le remaniement des sols argileux mous de surface qui n'ont été préconsolidés que par leur propre poids et les fluctuations du niveau de la nappe. L'emploi de carottiers de plus gros diamètre permet de limiter les effets du prélèvement jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur.

Pour les sols fortement surconsolidés, qui ont souvent été déchargés au cours de leur histoire géologique, le remaniement associé au prélèvement à quelques dizaines de mètres de profondeur, même avec un carottier triple, produit une décompression importante (des contraintes en place aux contraintes plus faibles du laboratoire), qui s'ajoute à la perturbation de la structure du sol argileux (succession de compression et décompression lors de la pénétration du carottier, cisaillement lors de la remontée du carottier). Les éprouvettes testées peuvent être fissurées, décomprimées, voire désaturées, et leur comportement est celui d'un matériau remanié, avec une modification importante de la courbe œdométrique et de la pression de préconsolidation, qu'il est difficile d'empêcher.

Références bibliographiques

- Aarhaug O.R. (1984). Geoteknikk og fundamenteringslaere 1. NKI-forlaget, Norvège, ISBN 82-562-0493-1, 262 pages
- Haghgou M. (1983). Étude du comportement d'un remblai expérimental sur sols compressibles. Thèse de docteur-ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Holtz R.D., Kovacs W.D. (1981). An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 733 pages.
- Josseume H., Hieng I.O., Stempfelet J.-P. (1991). Détermination des paramètres de compressibilité d'une argile raide à partir d'essais œdométriques à haute pression. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 172, pp. 109-120.
- Khemissa M., Magnan J.P., Josseume H. (1997). Étude en laboratoire des propriétés mécaniques de l'argile molle de Guiche (vallée de l'Adour). Revue Française de Géotechnique, n°81, pp. 3-25.