

Immeubles de grande hauteur et fluage des sols

Jean-Claude GRESS

*Professeur Traitement des Sols et des Roches à l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat de Vaux en Velin, France, Directeur Technique Hydrogéotechnique
jc.gress@hydrogeotechnique.com*

Résumé : les immeubles de grande hauteur induisent sur les sols de fondation des niveaux de contrainte élevés et le calcul des tassements se doit d'être particulièrement pertinent, intégrant l'approche classique déjà délicate de la consolidation primaire, mais celle moins bien maîtrisée du fluage. Sont analysées ci-après les difficultés de l'estimation des tassements et développées celle particulières du fluage des sols, des recommandations étant proposées dans la conduite des investigations géotechniques pour éviter les pièges.

Mots-clés : immeubles de grande hauteur, tassements, fluage

Abstract : high levels of stresses are induced on the different soil layers, through the foundations of very high buildings. The assessment of settlements must be particularly relevant, including the classical though already difficult approach of the primary consolidation but also, the one, less well mastered, of the secondary compression. Are analysed hereafter the difficulties of a good assessment of the settlements and particularly developed the ones due to the creep of soils, recommendations being proposed for how to run the geotechnical investigations in order to avoid the traps.

Keywords : very high buildings, settlements, creep.

1. Introduction

Le site de la Défense à PARIS est un site géologiquement bien connu. Le projet de réalisation de la Tour Carpe Diem (160m de hauteur) a nécessité la réalisation d'investigations de type sondages carottés, essais en laboratoire, forages avec essais pressiométriques et dispositif cross hole, afin de définir un mode de fondation et les tassements associés, en amplitude et évolution dans le temps,

Nous présentons, dans le tableau 1, les caractéristiques de densité, oedométriques et pressiométriques révélées par la campagne d'investigations. Les sables de Cuise sont aquifères ainsi que les niveaux sous-jacents. La nappe des sables de Cuise est calée à 25 NGF.

**Tableau 1. Caractéristiques de densité, oedométriques et pressiométriques
révélées par la campagne d'investigations**

Nature	Profondeur du toit et du mur Référence TN 47 NGF		ρ_{di} (kN/m ³)	ρ_{do} (kN m ³)	eo	Cs en 10 ⁻³	C α en 10 ⁻⁴	σ'_{vo} (kPa)	σ'_p (kPa)	E _M (MPa)	α	E Young (MPa)	V
Marnes et caillasses altérées	5,70 – 11,40		14/19,6							45	0,3	150	0,33
Marnes et caillasses	11,4 – 18,90									199	0,3	663	0,3
Calcaire grossier	18,90 – 32,70		18,3 – 25,8							242	0,25	968	0,3
Sables de Cuises	1	32,70 – 35,50	16,70	20,4	0,324	10,4	3,1	571	1041	166	0,3	553	0,45
	2	35,5 – 41	12,50	20,8	0,297	7,6	2,3	612	1082				
	3	41 – 45,50	16,7	20,6	0,310	10,00	2,6	662	1132				
Fausses glaises	45,50 – 52,70		12,5	19,2	0,405	16,4	6,5	716	1186	80	0,66	121	0,47
Sables d'Auteuil	52,70 – 55,30		14,4 – 15,3	19,9	0,360	10	5	765	1235	64	0,5	128	0,46
Argiles plastiques	1	55,30 – 64,50	13	18,8	0,438	16	7,4	829	1299	84	0,66	127	0,47
	2	64,50 – 69,70	18,4	19,5	0,383	14,2	5,7	901	1371				
Marnes et calcaires de Meudon	> 69,70									137	0,25	548	0,3

Où ρ_{di} est la densité mesurée sur échantillon intact, eo l'indice des vides in situ, sous la contrainte initiale effective σ'_{vo} , Cs l'indice de gonflement primaire oedométrique, C α l'indice de fluage oedométrique, σ'_p la contrainte de pré-consolidation, E_M le module pressiométrique, α le coefficient rhéologique pressiométrique, E_y le module d'YOUNG, V coefficient de POISSON.

Seule la valeur de Cs est donnée, la contrainte σ'_{vo} augmentée de la contrainte induite restant inférieure à la contrainte de pré-consolidation σ'_p .

Nous allons analyser ci-après :

- 1°) la pertinence des résultats des essais oedométriques conventionnels,
- 2°) le fluage oedométrique et la notion de contrainte de pré-consolidation vraie et apparente,
- 3°) le fluage déviatorique.

2. Pertinence des essais oedométriques

Dans le tableau 1, apparaît une différence forte dans les niveaux de sables de Cuise, de fausses glaises, sables d'Auteuil et argiles plastiques entre la valeur de la densité ρ_{di} sur échantillon prélevé et la valeur de la densité découlant de e_o .

Une difficulté majeure de l'étude oedométrique réside dans le prélèvement d'échantillons, au carottage à l'eau, à grande profondeur.

La libération des contraintes et le prélèvement sous charge d'eau se traduit par un gonflement important des échantillons et le strict respect du mode opératoire AFNOR 94-090-1 ne permet pas d'obtenir des paramètres pertinents.

A cette fin, nous suggérons de déterminer la densité de sols in situ, à la contrainte σ'_{vo} , par exemple par une mesure continue de la teneur en eau volumique en dessous de 25 NGF, dans la nappe, par une sonde à neutrons. On procède alors dans la cellule oedométrique à une première mise en charge jusqu'à obtenir l'indice des vides in situ ainsi estimé, puis on décharge et on procède à la réalisation de l'essai oedométrique conventionnel, en vérifiant que e_o est bien obtenu pour σ'_{vo} . Les résultats des essais oedométriques du tableau 1 ont été obtenus de cette manière.

L'essai pressiométrique présente ici deux intérêts particuliers en situation saturée, car il permet à la fois de confirmer un ordre de grandeur de la densité et de la valeur de σ'_p contrainte de pré-consolidation.

Concernant la densité, la corrélation suivante est utile, pour confirmer les niveaux de ρ_d mesurés à la sonde gammam-gamma :

$$\rho_d \approx 11,5 \frac{1 + 2pl^*}{1 + pl^*} \pm 1 \quad \rho_d \text{ en kN/m}^3 \text{ et } pl^* \text{ en MPa} \quad (1)$$

Concernant la corrélation avec la contrainte de pré-consolidation, une relation dérivée de celle de MAYNE, corrélant q_T résistance de pointe nette à σ'_p , s'écrit :

$$\sigma'_p = 0,33 \left(\frac{pl^*}{0,36} \right)^m \left(\frac{\sigma_{atm}}{100} \right)^{1-m} \quad \text{où } \sigma_{atm} \text{ est la pression atmosphérique} \quad (2)$$

avec $m = 0,9$ pour les argiles limoneuses, $m = 0,8$ pour les limons silteux et $m = 0,7$ pour les limons sableux à sable limoneux. Elle permet de confirmer les ordres de grandeur de σ'_p , la difficulté étant la très grande sensibilité de cette relation à la valeur de m .

Dans le cas particulier de la Tour Carpe Diem, l'estimation des tassements par un modèle élastoplastique conduit à un tassement d'ensemble estimé de 29 à 35 mm.

L'estimation des tassements primaires en théorie oedométrique a conduit à un tassement de 42 à 48 mm à la fin de la consolidation.

L'estimation du fluage oedométrique a été de l'ordre du centimètre.

Avec un mode opératoire approprié, l'approche oedométrique donne des ordres de grandeur légèrement supérieurs à l'approche élastique, conformes aux tassements observés pour ce type de tour à la Défense. L'avantage supplémentaire de l'approche oedométrique est de montrer pour des sols fortement surconsolidés, l'absence de fluage, alors que des niveaux comme les fausses glaises et les argiles plastiques se révèlent très plastiques.

3. Fluage oedométrique et notions de contrainte de pré-consolidation vraie et apparente

La contrainte de pré-consolidation mesurée à l'oedomètre est une contrainte de pré-consolidation apparente. Naturellement, les sols naturels ont tous flué sous la contrainte de pré-consolidation vraie. La décharge à σ'_{vo} a fait apparaître une contrainte de pré-consolidation apparente.

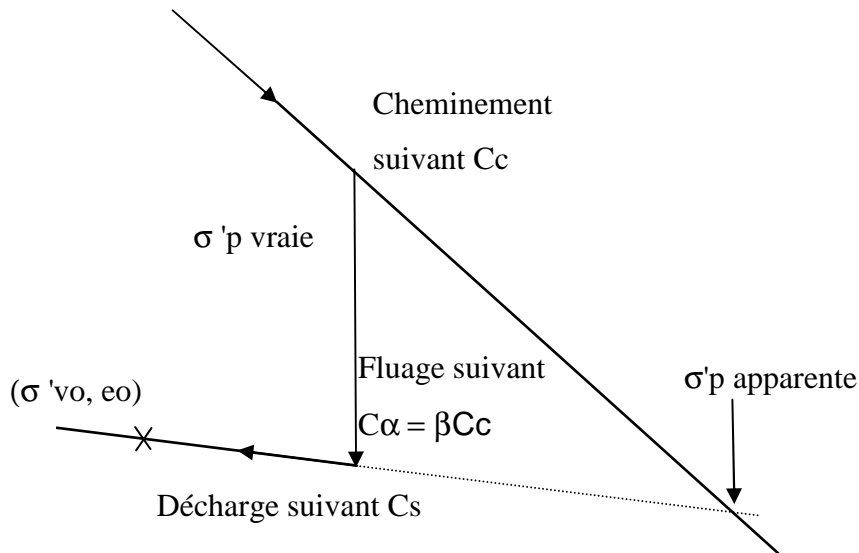


Figure 1. Contrainte de pré-consolidation apparente

A la recharge, jusqu'à $\sigma'p$ vraie, le tassement primaire se fait suivant C_s et les sols fluent suivant un C_α de l'ordre de 0,015 à 0,04 C_s . Si t_p est la durée de la consolidation primaire et t_f la durée du fluage, on a :

$$\frac{\sigma' p \text{ app}}{\sigma' p \text{ vrai}} = \left(\frac{t_p}{t_f} \right)^{\beta \frac{C_c}{C_c - C_s}} \text{ avec } C_\alpha = \beta C_c \quad (3)$$

Au-delà de $\sigma'p$ apparent, le tassement oedométrique se fait suivant C_c et le fluage, dépend d'un C_α de l'ordre de 0,015 à 0,05 C_c , lequel peut être important. Entre $\sigma'p$ vrai et $\sigma'p$ apparent, le tassement primaire se fait suivant C_s et le fluage se fait suivant un C_α interpolé linéairement entre les deux comportements extrêmes. Cette distinction entre $\sigma'p$ vrai et $\sigma'p$ apparent se révèle donc importante, et explique le fluage faible estimé pour la Tour Carpe Diem.

4. Fluage déviatorique

Sous une tour de grande hauteur, le champ des contraintes n'est pas de type oedométrique. Compte tenu des géométries courantes des impacts au sol, apparaît un champ déviatorique. C'est ce champ déviatorique qui permet à SKEMPTON et BJERRUM de proposer un coefficient correcteur μ , sur l'estimation de l'amplitude de tassement primaire :

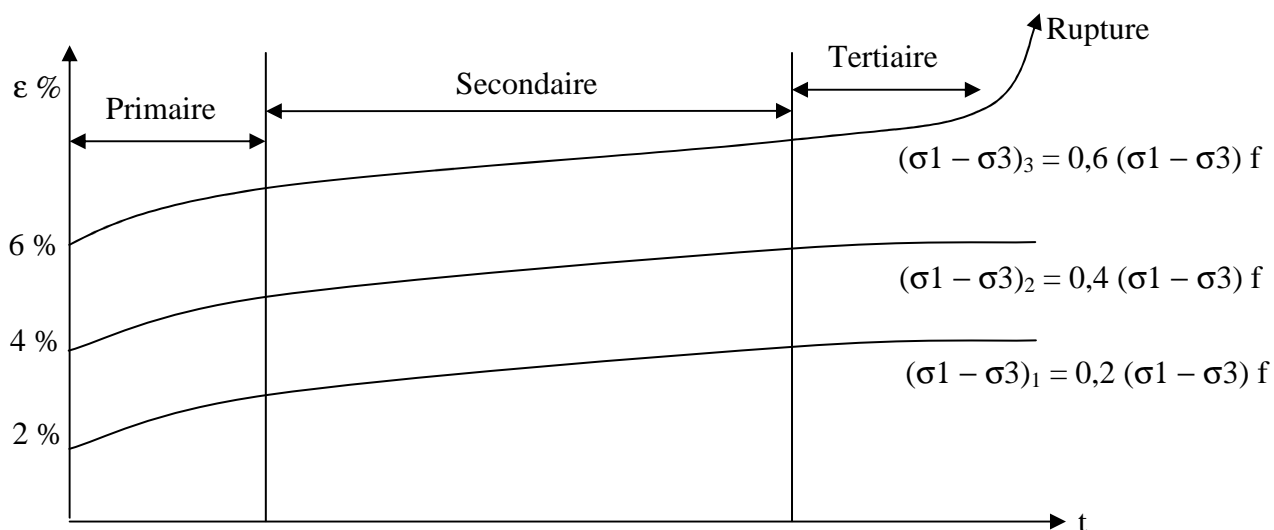
$$\mu = A + (1 - A) \alpha \quad (4)$$

où A gère l'augmentation de pression interstitielle en relation avec l'apparition d'un déviateur et α est un coefficient tenant compte de la géométrie de la fondation et de la profondeur de calcul des contraintes induites.

Par contre, l'existence de déviateurs peut faire craindre l'apparition d'un fluage associé, quand le rapport du déviateur au déviateur à la rupture dépasse une valeur critique, déviateur à la rupture mesuré par un essai triaxial à déplacement imposé.

La figure 1 montre l'évolution constatée sur un essai triaxial à charge imposée, pour un σ_3 donné, de la déformation fonction du temps. Les $(\sigma_1 - \sigma_3)$ sont croissants de 1 vers 3.

Ce graphique fait apparaître trois phases. La phase tertiaire a, pour des déviateurs faibles, un comportement asymptotique.



Mais le comportement tertiaire peut faire apparaître au bout d'un temps assez long un fluage à la rupture. Celui-ci apparaît pour des valeurs de $\sigma_1 - \sigma_3$ qui peuvent n'être que de 50 à 60 % du déviateur à la rupture, mesuré par un essai triaxial classique. La difficulté majeure d'une bonne reconnaissance géotechnique va donc être de détecter ces horizons, souvent peu épais, pouvant poser problèmes de fluage déviatorique. Le sondage carotté permettra par un examen attentif des échantillons, prélevés de manière intacte, sous gaines en continu, de détecter les niveaux pouvant poser problèmes. Les essais au pénétromètre statique sont un complément intéressant, mais leurs profondeurs d'investigations sont souvent limitées. Les autres essais in situ, comme le pressiomètre et le SPT, présentent le défaut d'une fréquence discontinue de réalisation.

C'est donc là aussi qu'une investigation continue à la sonde à neutrons ou à la sonde gamma est indispensable, pour bien individualiser les niveaux pouvant générer des déformations de fluage déviatorique, et demander la réalisation d'essais spécifiques triaxiaux à charge imposée, en gardant à l'esprit que ces essais sont très longs.

Un exemple de ce risque est par exemple celui d'un remblai en Normandie, de hauteur 16m, qui tasse chaque année de 1 cm depuis l'année 1976 de sa construction, et probablement par un fluage de type déviatorique.

5. Conclusions

L'étude des fondations des immeubles de grande hauteur est caractérisée par celle d'un bulbe des contraintes pénétrant à grande profondeur, le taux de sollicitation des différentes couches d'assise étant important.

La difficulté des investigations préalable est une particulière pertinence des paramètres à introduire dans les modèles. Une investigation préalable par les sondes à neutrons sous nappe ou gamma gamma, par la connaissance de la densité en place en continu des formations permet d'améliorer le protocole de réalisation des essais oedométriques et permet de caractériser, pour certains niveaux faibles, le risque de fluage déviatorique, qu'il est alors possible de quantifier par des essais triaxiaux à charge imposée.

L'application de cette démarche pour la Tour Carpe Diem a permis de vérifier l'absence de risque de fluage déviatorique et a permis d'estimer les tassements de manière fiable.

6. Références

James K Mitchell and Kenichi Soga, 2005. *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley and Sons.

R.F Craig, 1974. *Soil Mechanics*. Van Nostrand Reinhold Company.

P.W. Mayne et al., 2009. *Proceedings of the 17th International Conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. IOS Press.