

CONSIDERATIONS AUTOUR DES MODELES DE GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX

CONSIDERATIONS OF THE SWELLING LAWS FOR CLAYEY SOILS

Elsa DAMPFHOFFER¹, Martin CAHN¹, Sébastien BURLON¹

¹ Terrasol SETEC, Paris, France

RÉSUMÉ – La modélisation du gonflement se fait classiquement à partir d'une loi empirique caractérisée en laboratoire, qui exprime la déformation verticale en fonction de la contrainte verticale. Cette communication vise à montrer qu'il est possible de retrouver les résultats expérimentaux en rendant compte du mécanisme selon différentes manières : le recalage de la loi de gonflement n'est pas univoque et l'impact sur les ouvrages en est modifié.

ABSTRACT – Usually, an empirical law is used to characterize the swelling of clay soils. This law is evaluated in laboratory. It describes the vertical strain of a sample depending on the vertical stress. This paper aims to point out that the experimental results can be found by accounting for the mechanism according to different approaches. There are various models which can fit the experimental test but the impacts on the structure are different.

1. Introduction

La manifestation des phénomènes de gonflement sur les ouvrages enterrés prend différentes formes : génération de pressions supplémentaires sur les structures et soulèvements du radier ou du fond de fouille. La prise en compte des effets du gonflement peut ainsi poser des problématiques de vérifications structurelles et/ou de compatibilités fonctionnelles sur les ouvrages à construire.

Le phénomène étudié ici concerne le gonflement des sols saturés contenant des minéraux argileux. Le gonflement de ces terrains se manifeste par l'augmentation de leur volume due à une augmentation de la teneur en eau. Dans le cas d'une excavation, l'augmentation de volume se traduit aussi par un soulèvement induit par la diminution des contraintes effectives verticales : le déplacement vertical constaté se trouve ainsi être la combinaison d'un gonflement et d'un soulèvement.

Le mécanisme de gonflement des sols argileux trouve son origine à l'échelle des interactions moléculaire des particules argileuses avec l'eau. Cependant, il n'existe pas de moyen fiable de prévoir l'ampleur des manifestations de ce phénomène à uniquement à partir des paramètres d'identification (Johnson & Snethen (1978) cités par Bultel, 2001).

Des lois de comportement spécifiques au cas des sols gonflants existent (Alonso et al. 1990 ; 1999), mais leur application aux problèmes d'ingénierie étudiés est délicate, notamment en raison de la difficulté d'identification des paramètres ou de problèmes numériques associés à la transition de l'état non saturé à l'état saturé.

L'objectif de la présente communication est de proposer une méthode d'interprétation des essais de gonflement au laboratoire, qui traduisent le phénomène de gonflement manière macroscopique et de permettre la détermination des paramètres à introduire dans une modélisation numérique.

2. Essai œdométrique

Les procédures d'essai les plus couramment utilisées sont l'essai de gonflement en parallèle (XP P 94-091), l'essai de gonflement à volume constant et l'essai de gonflement par paliers successifs (ISRM, 1989). La présente communication s'attachera à modéliser analytiquement cette dernière, compte tenu de sa pertinence et de sa large utilisation.

Cet essai (cf. Figure 1) débute par un cycle de chargement-déchargement-rechargement permettant de limiter et évaluer l'importance du remaniement de l'échantillon avant mise en contact avec de l'eau. Après stabilisation, le déchargement est réalisé par paliers successifs, en attendant stabilisation après chaque palier (Huder et Amberg, 1970).

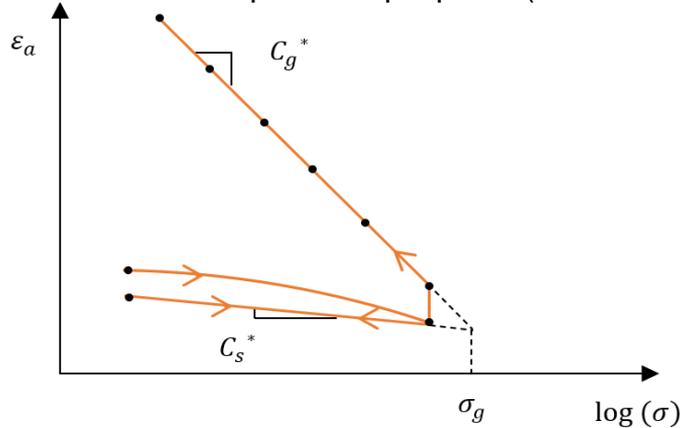


Figure 1 : Essai de gonflement par palier successifs/de Huder-Amberg

À partir des courbes déformation axiale en fonction du logarithme de la contrainte verticale, les paramètres caractérisant la propension d'un sol à gonfler sont déterminés. Il s'agit de :

- La *pression de gonflement* σ'_g qui correspond à l'état de contrainte au-delà duquel le sol ne gonfle plus ;
- L'*indice de gonflement* C_s^* défini par la pente du chargement/déchargement mécanique sans apport d'eau (tassement et soulèvement) ;
- Le *coefficient de gonflement* C_g^* qui correspond à la pente obtenue lors d'un déchargement d'un sol gonflant sous imbibition ;
- La *pente de gonflement* K_g^* pouvant être défini comme la différence entre le coefficient de gonflement C_g^* et l'indice de gonflement C_s^* .

Les coefficients présentés ci-dessus relient la déformation verticale à la contrainte verticale. Il est courant d'utiliser les coefficients C_s , C_g et K_g qui expriment la variation d'indice des vides par rapport à la contrainte verticale. La déformation verticale ε_a de l'échantillon étant liée à l'indice des vides tel que :

$$\Delta e_0 = \varepsilon_a \times (1 + e_0) \quad (1)$$

Les différents coefficients s'expriment alors:

$$C_s^* = \frac{C_s}{1+e_0} \quad ; \quad C_g^* = \frac{C_g}{1+e_0} \quad ; \quad K_g^* = \frac{K_g}{1+e_0} \quad (2)$$

3. Principe de modélisation

Le modèle analytique retenu suppose un apport d'eau suffisant pour mobiliser la totalité du potentiel de gonflement. Dans le repère de l'échantillon, c'est-à-dire avec la première composante dans la direction verticale, et en respectant les conditions œdométriques, les déformations et contraintes résultantes sont :

$$\bar{\bar{\varepsilon}}_a = \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \bar{\bar{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_v \\ \sigma_h \\ \sigma_h \end{bmatrix} \quad (3) \text{ et } (4)$$

Le phénomène de gonflement est simulé par l'ajout d'une déformation $\bar{\bar{\varepsilon}}_g$. La déformation de gonflement apparente $\bar{\bar{\varepsilon}}_a$ qui en résulte est une déformation « vue » qui peut être décomposée en une part de déformation élastique, une part plastique et une part propre au gonflement :

$$\bar{\bar{\varepsilon}}_a = \bar{\bar{\varepsilon}}_{el} + \bar{\bar{\varepsilon}}_{pl} + \bar{\bar{\varepsilon}}_g \quad (5)$$

Lorsque la contrainte verticale effective est inférieure à la pression de gonflement, le sol se déforme selon la loi suivante (Grob, 1972), aussi appelée loi de Grob :

$$\varepsilon_a = -C_g^* \cdot \log \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_g} \right) \quad (6)$$

Cependant, le gonflement s'exprimant de manière volumique, il est envisageable de considérer qu'il dépende de la contrainte moyenne (Serratrice et Soyez, 1996). Cette hypothèse permet de prendre en compte l'influence de la contrainte horizontale sur le gonflement. La loi de gonflement considérée serait alors, avec C_{gp}^* la pente en contrainte moyenne :

$$\varepsilon_a = -C_{gp}^* \cdot \log \left(\frac{p'}{p_g} \right) \quad (7)$$

Le modèle analytique d'un palier de déchargement fonctionne de la manière suivante. La déformation liée au simple déchargement mécanique (avec C_s) est calculée puis, l'effet du gonflement hydrique est simulé. Pour cela, la valeur de $\bar{\varepsilon}_g$ à injecter pour que ε_a suive la loi de Grob est déterminée (cf. Figure 2). À chaque étape l'application de la loi de Hooke permet de déterminer l'état de contrainte et de déformation de l'échantillon.

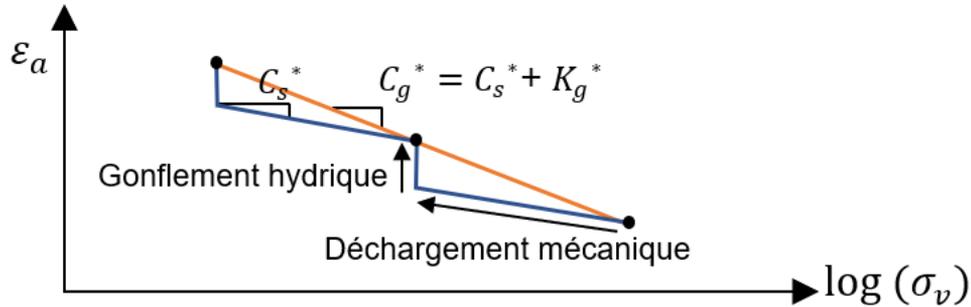


Figure 2 : Principe de la modélisation, sur 2 paliers successifs lors d'un essai

3.1. Déformation de gonflement et anisotropie du gonflement

La déformation de gonflement $\bar{\varepsilon}_g$ est décomposée dans les trois directions à l'aide du facteur d'anisotropie β (compris entre -0,5 et 1). Lorsque $\beta = 0$, la déformation de gonflement s'applique de manière isotrope. Lorsque $\beta = 1$ (resp. $\beta = -0,5$), elle est purement verticale (resp. horizontale).

$$\bar{\varepsilon}_g = \begin{bmatrix} \frac{1+2\beta}{3} \\ \frac{1-\beta}{3} \\ \frac{1-\beta}{3} \end{bmatrix} \times \|\bar{\varepsilon}_g\| \quad (8)$$

4. Prise en compte d'un comportement élastique

En élasticité, la loi de Hooke sur une itération de gonflement s'exprime, avec $\underline{\underline{C}}$ la matrice d'élasticité :

$$\Delta \bar{\underline{\underline{\sigma}}} = \underline{\underline{C}} (\bar{\underline{\underline{\varepsilon}}}_a - \bar{\underline{\underline{\varepsilon}}}_g) \quad (9)$$

4.1. Cas isotrope

L'isotropie se traduit dans la modélisation par un facteur d'anisotropie β nul. La Figure 3 met en lumière les différences entre une modélisation en contrainte moyenne et une modélisation en contrainte verticale.

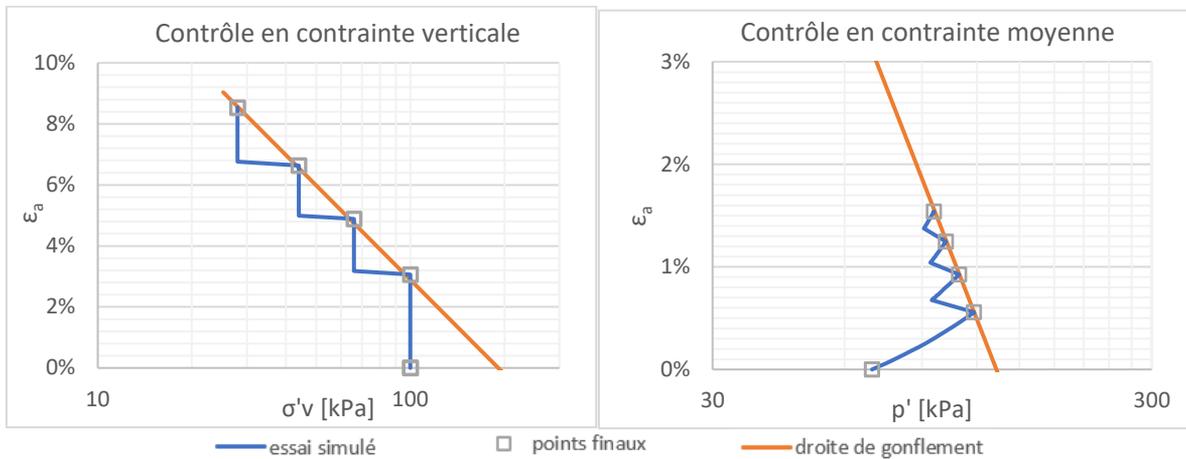


Figure 3 : Comparaison entre les déformations d'une modélisation du gonflement en contrainte verticale (à gauche) et en contrainte moyenne (à droite)

Pour un contrôle en contrainte verticale, l'état de gonflement ne dépend que de cette dernière, maintenue constante par palier. Dans un contrôle en contrainte moyenne, le gonflement va générer une augmentation de la contrainte horizontale, ce qui va contribuer à augmenter la contrainte moyenne. Ainsi lors d'une étape de gonflement la contrainte moyenne augmente, même si la contrainte verticale est maintenue constante. Cette augmentation de la contrainte moyenne limite alors l'amplitude du gonflement.

4.2. Cas anisotrope

Le facteur β permet d'introduire l'anisotropie de déformation de gonflement. Dans le cas où $\beta=1$, le contrôle en contrainte verticale et en contrainte moyenne donnent les mêmes résultats : il n'y a plus d'augmentation de la contrainte horizontale.

4.2.1. Hypothèse de gonflement en contrainte verticale

La valeur du facteur d'anisotropie modifie la répartition du gonflement injecté entre les directions horizontales et verticales. Ceci impacte directement la valeur de la contrainte horizontale, qui n'influence pas le mécanisme si le contrôle se fait en contrainte verticale. Ainsi, quelle que soit l'hypothèse d'anisotropie, on obtient le même chemin avec un contrôle en contrainte verticale.

4.2.2. Hypothèse de gonflement en contrainte moyenne

Avec l'hypothèse d'un contrôle en contrainte moyenne, le facteur d'anisotropie influence le comportement de gonflement de l'échantillon. Lorsque β augmente, la proportion des déformations de gonflement injectées dans la direction verticale augmente. En comparant les chemins des essais (cf. Figure 4), il apparaît que plus le facteur d'anisotropie est grand, plus les déformations verticales vues sont importantes.

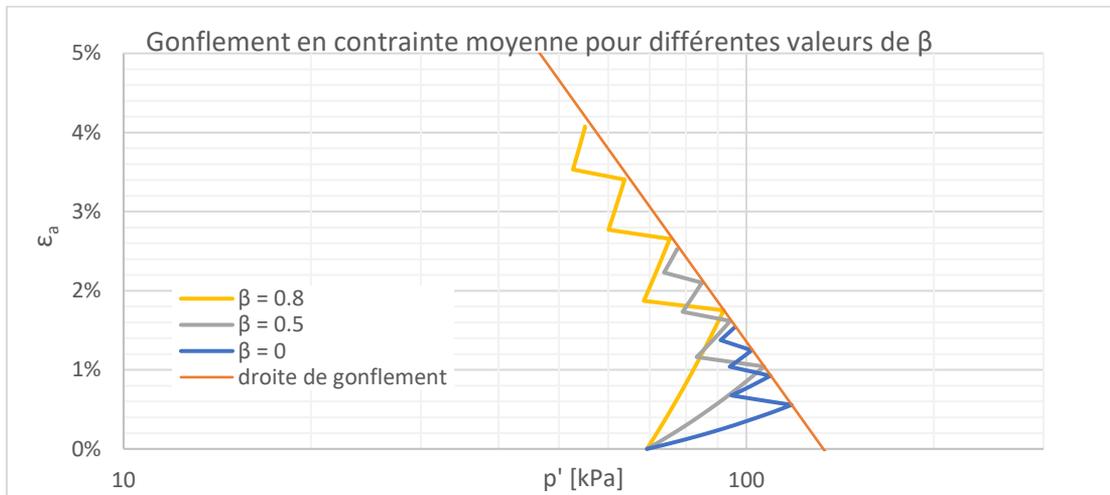


Figure 4: Déformations lors de l'essai pour différentes valeurs du facteur d'anisotropie, avec un contrôle en contrainte moyenne

5. Prise en compte d'un comportement plastique

La plasticité influence la réponse de l'échantillon soumis au gonflement (Serratrice et Soyez, 1996). Avec sa prise en compte, la déformation de l'échantillon s'exprime selon l'équation (5). La loi de Hooke s'applique alors de la manière suivante :

$$\Delta \bar{\sigma} = \underline{\underline{C}} (\bar{\varepsilon}_a - \bar{\varepsilon}_{pl} - \bar{\varepsilon}_g) \quad (10)$$

Le critère de plasticité utilisé est un critère de Mohr Coulomb. Si, pour un état de contrainte donné, ce critère est positif, cela signifie que des déformations plastiques vont se développer au sein du matériau et que le déviateur ne peut plus augmenter. Avec σ_1, σ_3 contraintes principales le critère s'exprime, avec c la cohésion et φ l'angle de frottement:

$$f(\sigma_1, \sigma_3) = \sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3) \times \sin(\varphi) - 2 \times c \times \cos(\varphi) \quad (11)$$

La règle d'écoulement plastique considérée avec ψ l'angle de dilatance est :

$$g(\sigma_1, \sigma_3) = \sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3) \times \sin(\psi) \quad (12)$$

5.1. Contrôle en contrainte verticale avec plasticité

Sous l'hypothèse d'un contrôle en contrainte verticale, l'introduction de la plasticité n'influence pas le résultat de l'essai. Si le comportement est élastique, le gonflement se traduit horizontalement par l'augmentation de la contrainte horizontale. Si le comportement est plastique, la contrainte horizontale est bornée (le déviateur maximal est atteint). Dans les deux cas, la contrainte verticale étant maintenue constante, l'amplitude du gonflement vu n'est pas modifiée.

5.1. Contrôle en contrainte moyenne avec plasticité

La Figure 5 présente deux modélisations pour lesquelles tous les paramètres introduits, sauf la cohésion, sont identiques. Dans le cas où la cohésion est la plus faible, l'échantillon rentre en plasticité lors des deux derniers paliers de gonflement. Dans l'autre cas le comportement de l'échantillon reste en élasticité.

Tant que le critère n'est pas atteint, le comportement des deux échantillons est le même. Une fois que l'échantillon entre en plasticité, l'état de contrainte ne varie plus au sein d'un même palier, or c'est l'augmentation de contrainte moyenne pendant le gonflement qui limite les déformations. Ainsi le gonflement observé est de plus grande ampleur lorsque l'échantillon entre en plasticité.

6.2.2. Contrôle en contrainte moyenne avec les paramètres de gonflement de l'essai

La comparaison entre l'essai expérimental et la modélisation en supposant un contrôle du mécanisme en contrainte moyenne permet d'accéder à des informations intéressantes concernant le comportement du terrain, notamment l'influence de l'anisotropie et de la plasticité (le développement de déformations irréversibles durant le gonflement).

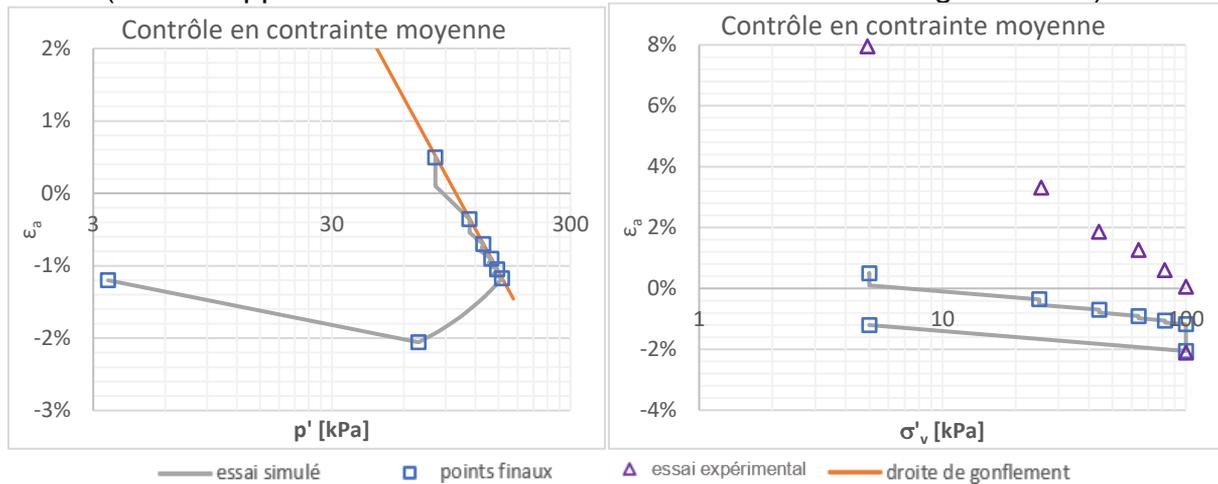


Figure 7 : Contrôle du gonflement en contrainte moyenne.
à gauche : déformation verticale en fonction de la contrainte moyenne
à droite : déformation verticale en fonction de la contrainte verticale

La Figure 7 présente l'essai modélisé avec un contrôle en contrainte moyenne, avec les caractéristiques de gonflement énoncées précédemment. En comparant les points obtenus en contrainte verticale à l'essai expérimental, il apparaît que la modélisation théorique en conservant les pentes et pressions déduites de l'essai ne permet pas un calage adéquat.

Afin de caler la modélisation sur les points expérimentaux, il est nécessaire de modifier les paramètres de gonflement en contrainte moyenne introduits dans le modèle analytique, notamment la pente, la pression et l'anisotropie de gonflement, mais il est également possible d'intervenir sur les paramètres de résistance de l'échantillon.

6.2.3. Calage en contrainte moyenne : paramètres de gonflement comportementaux et apparents

Il convient désormais de distinguer les paramètres suivants :

- les pentes et pressions de gonflement « apparentes », qui sont celles qui relient la déformation verticale vue à la contrainte verticale lors d'un essai de gonflement ;
- les pentes et pressions de gonflement « comportementales » renseignées dans le modèle analytique, qui sont des paramètres qui régissent le mécanisme en contrainte moyenne.

L'objectif ici est de déterminer s'il est possible de trouver des paramètres « comportementaux » permettant d'obtenir des paramètres « apparents » similaires à ceux observés dans l'essai expérimental.

6.3. Résultats

Différents jeux de paramètres ont été introduits dans le modèle, et certains permettent de simuler de façon convenable l'essai. Les paramètres de modélisations qu'il est possible d'ajuster sont les suivants :

- le contrôle du phénomène (en contrainte moyenne ou verticale) ;
- l'hypothèses d'un comportement élastique ou plastique ;
- la pente et la pression de gonflement « comportementale » ;
- le facteur d'anisotropie β ;
- les paramètres de résistance du sol.

L'étude réalisée montre que la démarche pour déterminer les paramètres « comportementaux » n'est pas univoque et qu'il n'existe pas de solution unique pour simuler l'essai de gonflement si celui-ci est considéré contrôlé en contrainte moyenne. À titre d'exemple, les jeux de paramètres suivants (Tableau 1) permettent tous de simuler de façon convenable l'essais étudié.

Tableau 1 : Jeux de paramètres permettant un calage sur l'essai expérimental

Mode de calage de l'essai	Paramètres de gonflement				Paramètres de résistance		N° du jeu
	σ'_{g_comp}	C_{g_comp}	C_s	β	c	ϕ	
Contrôle en contrainte verticale	-250 kPa	0,11	0,012	0	40 kPa	18°	/
Contrôle en contrainte moyenne	-280 kPa	0,5	0,012	0,55	40 kPa	18°	1
	-180 kPa	0,11	0,012	1	40 kPa	18°	2
	-400 kPa	0,14	0,012	0,3	5 kPa	18°	3

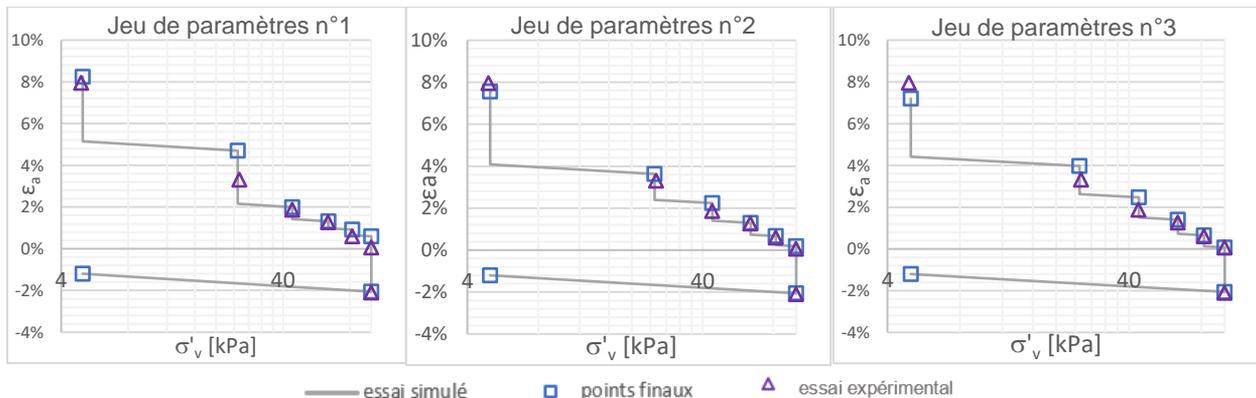


Figure 8 : Exemples de calages

Le calage avec le jeu de paramètres 1 du Tableau 1, proposé en contrainte moyenne, est réalisé en prenant une valeur de C_{g_comp} plus importante que la valeur apparente et avec $\beta=0,55$, c'est-à-dire avec une manifestation du phénomène prépondérante dans la direction verticale.

Le calage fait avec le jeu 2 correspond à un calage en contrainte moyenne avec un gonflement purement vertical. Lorsque $\beta=1$, le gonflement n'induit pas de variation de la contrainte horizontale, et donc pas de variation de la contrainte moyenne. Le gonflement se fait donc de manière équivalente au cas d'un contrôle en contrainte verticale. Le seul paramètre qu'il est nécessaire d'ajuster est la pression de gonflement.

Modifier les paramètres de résistance est également une manière de caler les essais (jeu de paramètres 3). Lorsque l'échantillon entre en plasticité, le gonflement n'introduit plus d'augmentation de contraintes horizontales (elle introduit des déformations plastiques). Or c'est cette augmentation de contrainte qui limite le gonflement. Ainsi le gonflement est de plus grande ampleur lorsque l'échantillon entre en plasticité.

7. Conclusion

La confrontation de simulation d'essais de gonflement à différents essais en laboratoire montre qu'il est possible, moyennant l'introduction de paramètres de gonflement « comportementaux » et l'anisotropie du mécanisme, de considérer que le gonflement est un mécanisme contrôlé par la contrainte moyenne, que l'on soit dans l'hypothèse élastique ou plastique. Nous avons montré ici que différentes hypothèses de simulation du gonflement peuvent aboutir à un calage adéquat d'un essai de gonflement.

La connaissance de l'état de contrainte horizontale lors des différentes étapes de gonflement apparaît essentielle pour chercher à préciser la caractérisation du phénomène. Ce type de dispositifs, encore limité au domaine de la recherche, pourrait être amené à se développer. Les dispositifs qui pourraient permettre de poursuivre ce travail de détermination des paramètres de gonflement sont les essais œdométriques avec mesure de contrainte horizontale, les essais odométriques à bague ou encore les rétro-analyse à l'échelle d'ouvrages. La caractérisation des paramètres de gonflement tridimensionnels reste cependant soumise aux difficultés de prélèvement et de remaniement des échantillons qui perturbent souvent la réalisation des essais de gonflement en laboratoire.

Si un étalonnage de l'essai expérimental est possible avec différents paramètres de gonflement, il apparaît que l'impact sur les ouvrages est grandement limité si l'on considère le mécanisme en termes de contrainte moyenne.

8. Références bibliographiques

- Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405–430.
- Alonso, E. E., Vaunat, J., & Gens, A. (1999). Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, 54(1–2), 173–183.
- Bultel, F. (2001). Prise en compte du gonflement des terrains dans le dimensionnement des revêtements des tunnels. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, tel-00001859.
- CFMS (à paraître/version provisoire V36). Recommandations sur la prise en compte du gonflement des terrains argileux dans le dimensionnement des ouvrages d'infrastructure,
- Grob, H. (1972). Schwelldruck im Belchentunnel. *Proc. Int. Symp. für Untertagebau*, Luzern, 99-119.
- Huder J., Amberg G. (1970). Gonflement des marnes, des argiles à opalines et de l'anhydrite. *Schweizerische Bauzeitung*, vol° 88, N° 43, pp. 975-980.
- ISRM. (1989). Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol. 26, 5, pp. 415-426
- Johnson L.D. & Snethen D.R. (1978). Prediction of potential heave of swelling soils. *Geotechnical Testing Journal*, vol.1, pp. 117–124.
- Serratrice, J.F., Soyez B. (1996). Les essais de gonflement. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°204, p65-85.
- Serratrice J.F. (2017). Terrains gonflants. Essais de gonflement en laboratoire. Analyse dans le cadre du groupe de travail CFMS portant sur ce thème.