

FONDATEMENTS DE LA NOUVELLE E.N.S. CACHAN – PRISE EN COMPTE DU GONFLEMENT PAR INTERACTION SOL STRUCTURE

NEW E.N.S. CACHAN – CONCEPTION AND DESIGN OF FOUNDATIONS ON SWELLING MATERIALS BASED ON SOIL STRUCTURE INTERACTION

Alexandre BEAUSSIER¹, Fahd CUIRA², Olivier CANAT³

¹ Terrasol (Groupe Setec), Lyon, France

² Terrasol (Groupe Setec), Paris, France

³ AIA Ingénierie, Lyon, France

RÉSUMÉ – A travers la nouvelle ENS Cachan sur le plateau de Saclay, cet article présente la prise en compte du gonflement des terrains dans la conception et le dimensionnement de fondations superficielles. Partant de l'identification des terrains gonflants, passant par la caractérisation mécanique de ce gonflement, il présentera une méthodologie d'Interaction Sol Structure pouvant être mise en œuvre dans le dimensionnement des radiers.

ABSTRACT – Based on new ENS Cachan case study, this paper shows how swelling effect can be considered on shallow foundation conception and design. First this paper remains how swelling material could be identified, then how mechanically swelling can be quantize, and finally, it will present a simplicist Soil Structure Interaction method that can be used for raft foundation design.

1. Introduction

Le gonflement des sols est la propriété de certains géo-matériaux à réagir à l'effet d'une variation mécanique et/ou hydrique par le développement *d'importantes déformations présentant généralement un caractère différé*, pouvant être à l'origine d'effets délétères sur les ouvrages : création de déplacements différentiels entre appuis, induction de sollicitations parasites dans les infrastructures...

Ainsi, dans le cadre d'une conception géotechnique d'ouvrage, il apparaît nécessaire en premier lieu d'identifier les terrains potentiellement gonflants puis de caractériser l'amplitude du phénomène et ses impacts sur les éléments structurels.

2. Description du projet

La nouvelle ENS Cachan sur le plateau de Saclay est un ensemble architectural de huit bâtiments d'une emprise totale au sol 20 000m² venant s'inscrire au sein d'une parcelle de 225 x 135 m² (Figure 1).

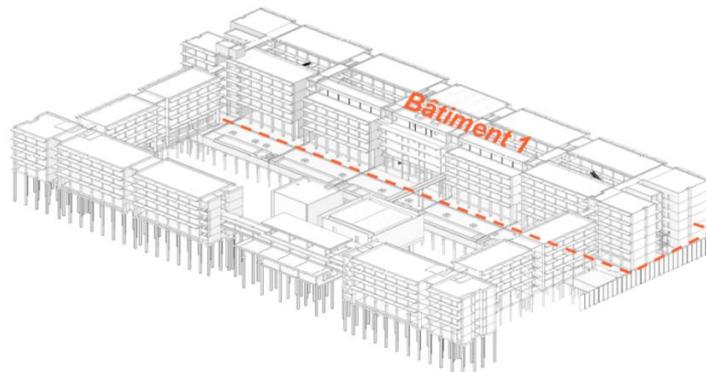
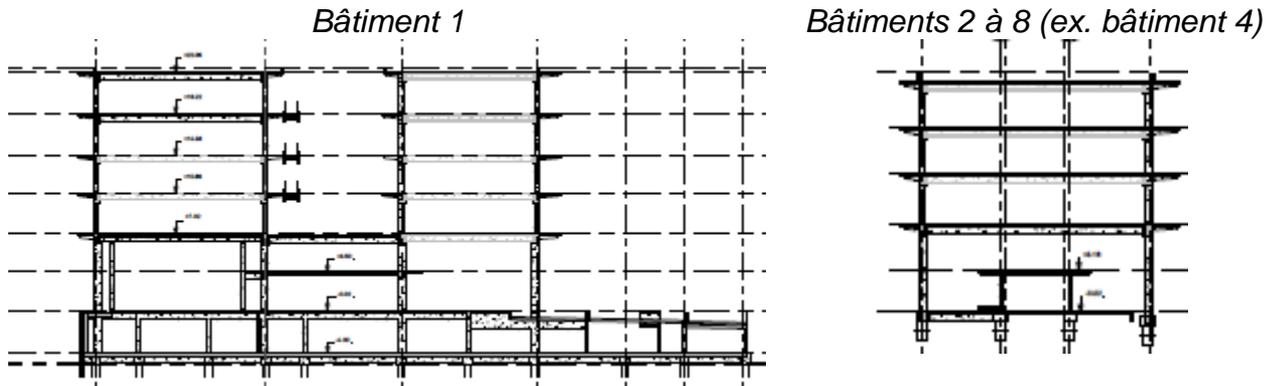


Figure 1. Bâtiments de la nouvelle ENS Cachan

D'un point de vue structurel (Figure 2), les bâtiments composant cet ensemble peuvent être répartis en deux types :

- *Le bâtiment principal (bâtiment 1)*. Ce bâtiment, d'emprise au sol 225 x 60 m² présente un niveau d'infrastructure de 4 m. Il est constitué de 4 files d'appuis qui descendent l'ensemble des charges de superstructure, entre lesquelles viennent s'intercaler des files secondaires descendant les charges du R0.
- *Les bâtiments 2 à 8*. De dimensions variées, ces bâtiments exempts de niveaux d'infrastructure possèdent globalement le même schéma structurel : des portiques descendent les charges des superstructures vers des appuis en rive (isolés ou en file), tandis que les charges des mezzanines sont descendues par des porteurs au centre du bâtiment.



3. Contexte géologique et géotechnique

3.1. Géologie générale du site et aléas géotechniques identifiés

Situé sur le plateau de Saclay, l'ouvrage vient s'inscrire dans un contexte géologique relativement homogène à l'échelle de la parcelle, constitué, depuis le terrain naturel situé entre les cotes 156 et 157 NGF, par les formations suivantes :

- *Les limons des plateaux (LP)* : rencontrés sur une épaisseur de 2.5 à 4 m, ces dépôts fins, meubles, à tendance argileuse et parfois sableuse, de teinte ocre à brun rougeâtre forment un horizon globalement peu compact ;
- *Les argiles à meulière (AM)* : rencontrées sur une épaisseur de l'ordre de 13 m, elles se présentent sous forme d'argiles compactes plus ou moins sableuses marrons ocres à grises, qui intègrent des blocs de meulière ou de calcaire noyés de taille décimétrique à potentiellement cyclopéenne dans la matrice argileuse ;
- *Les sables de Fontainebleau (SF)* : sables siliceux fins très compacts, et parfois grésifiés.

De ce contexte géologique général, ont pu être identifiés deux aléas géotechniques majeurs impactant la conception des fondations des ouvrages :

- Un aléa de gonflement au sein des formations de limons des plateaux et des argiles à meulière (BRGM, 2006) ;
- Un aléa de difficulté de réalisation des fondations profondes au sein des argiles à meulières, lié à la présence de blocs très indurés de meulière et de taille potentiellement plurimétrique.

3.2. Caractéristiques pressiométriques – choix des modes de fondation

Si les reconnaissances mettent en évidence une hétérogénéité des déformabilités et résistances au sein des argiles à meulière (suivant que les essais interagissent ou non avec

les blocs de meulière), il n'a pas pu être mis en évidence de régionalisation horizontale des caractéristiques des différentes formations. Ainsi, un modèle géotechnique général a été retenu à l'échelle du site (Figure 3) :

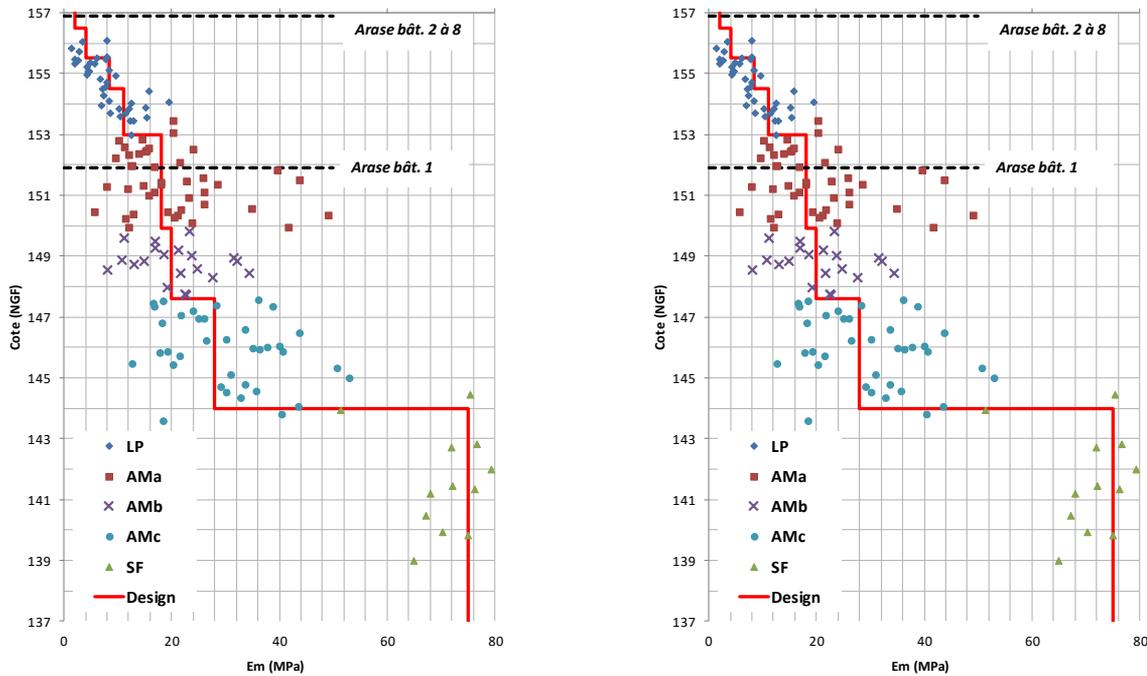


Figure 3. Caractéristiques pressiométriques générales du site

Au vu des caractéristiques mécaniques des terrains aux cotes des niveaux d'infrastructure, un système de fondations superficielles a été envisagé au niveau du bâtiment 1, tandis qu'au niveau des autres bâtiments des fondations profondes sont apparues nécessaires, a minima au droit des pieds de portique de superstructure.

4. Prise en compte du gonflement dans la conception

4.1. Caractérisation mécanique du gonflement

Les essais d'identification limites d'Atterberg ayant confirmé un aléa de gonflement de la fraction fine des limons des plateaux et des argiles à meulières (Figure 4), des essais mécaniques ont été menés pour quantifier l'ampleur des phénomènes.

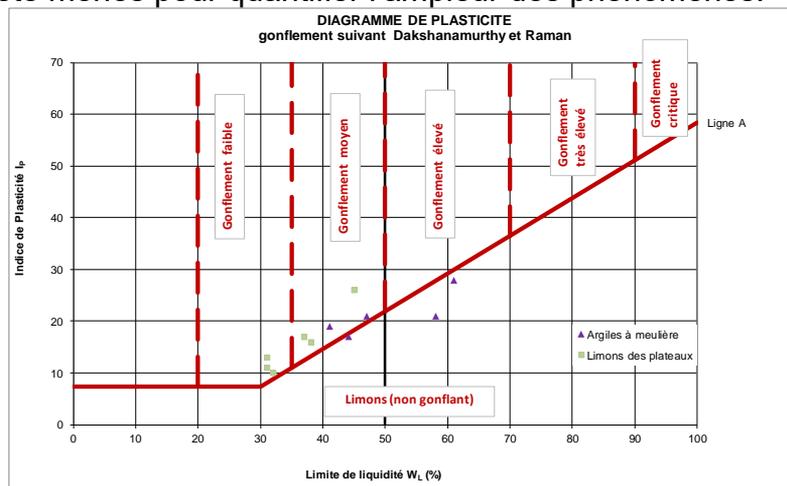


Figure 4. Susceptibilité au gonflement des matériaux fins d'après Dakshanamurthy et al. (1973)

De manière classique (CFMS à paraître) le comportement au gonflement des sols est déterminé sur la base d'essais à l'œdomètre sur des échantillons intacts prélevés en sondage carotté.

Dans le cadre du projet, ces essais ont été menés selon le protocole de la norme d'essais en parallèle (AFNOR 2005), permettant la détermination d'une loi de comportement contrainte-déformation, classiquement idéalisée par un comportement logarithmique :

$$\varepsilon_a = -K_g^* \log\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_{g'}}\right) \quad (1)$$

Où : ε_a est la déformation liée au phénomène de gonflement (>0 pour une extension),
 σ' est la contrainte effective sur le matériau (>0 en compression),
 K_g^* est le potentiel de gonflement (sur la déformation),
 $\sigma'_{g'}$ est la contrainte effective de gonflement (à déformation nulle).

Cette loi de paramètres K_g^* et $\sigma'_{g'}$ traduit un phénomène fondamental dans les problématiques de terrains gonflant : la forte diminution des sollicitations induites par un matériau gonflant avec la déformation qu'il est en mesure d'exprimer.

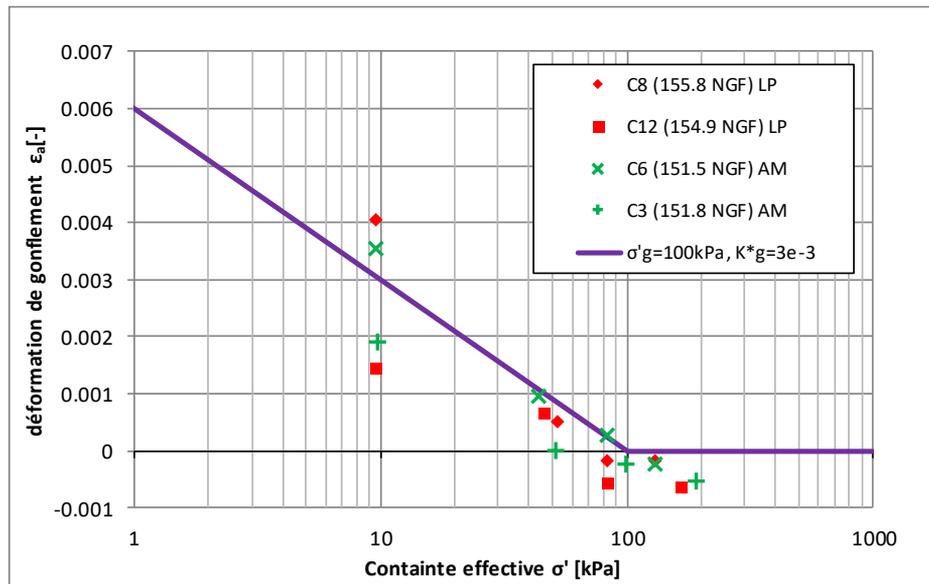


Figure 5. Détermination de la loi de comportement au gonflement des argiles à meulière et limons des plateaux

Les essais ayant mis en évidence des comportements relativement homogènes entre les échantillons prélevés dans les deux faciès potentiellement gonflants, le parti a été pris de considérer une loi de comportement unique (Figure 5) dans les argiles à meulière et les limons des plateaux caractérisée par une contrainte effective de gonflement $\sigma'_{g'}=100$ kPa et un potentiel de gonflement $K_g^*=3.10^{-3}$.

4.2. Prise en compte dans le bâtiment 1

Du fait de la « faible » contrainte effective de gonflement $\sigma'_{g'}$ et de la bonne compacité des terrains situés sous l'arase inférieure des infrastructures, le parti a été pris de fonder le bâtiment 1 sur des fondations superficielles filantes associées à un plancher d'infrastructure porté avec vide sanitaire (Figure 6).

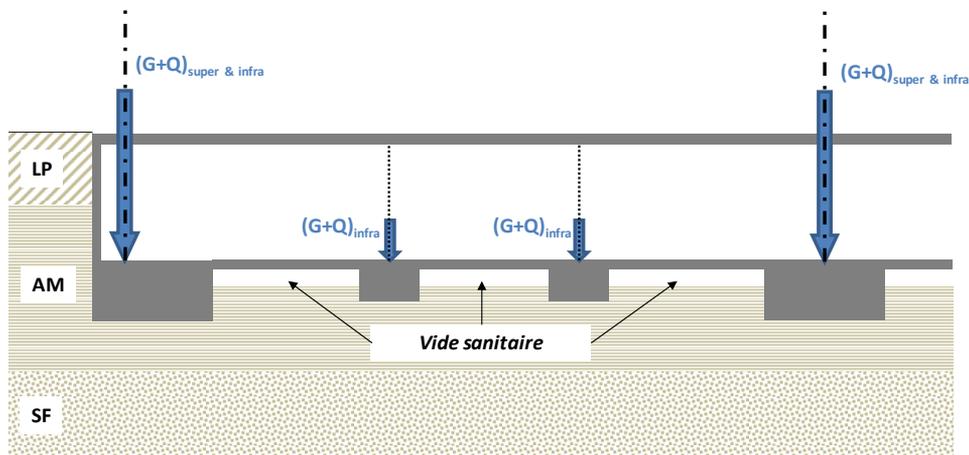


Figure 6. Conception des fondations du bâtiment 1

Les dimensions des fondations ont été définies de manière à :

- respecter les contraintes maximales admissibles au sol ;
- respecter les critères en terme de tassement absolu et différentiels ;
- assurer pour toutes les combinaisons d'actions, une contrainte sous la fondation supérieure à la contrainte effective de gonflement σ'_g permettant d'éviter le gonflement.

L'épaisseur du vide sanitaire, a quant à elle été définie de manière à majorer la hauteur de gonflement libre des terrains, dont le principe de calcul est présenté en Figure 8.

4.3. Prise en compte dans les bâtiments 2 à 8

En raison de l'aléa sur la réalisation des pieux, la conception s'est efforcée à limiter au maximum la quantité de fondations profondes. Ainsi, le parti a été pris (Figure 7) de :

- réaliser des fondations profondes en pied des portiques des superstructures ;
- fonder superficiellement les structures internes, ce qui, du fait de la faible compacité des limons d'assise impose la réalisation d'un « radier » ;
- dimensionner le radier aux effets combinés des charges structurelles et des effets du gonflement.

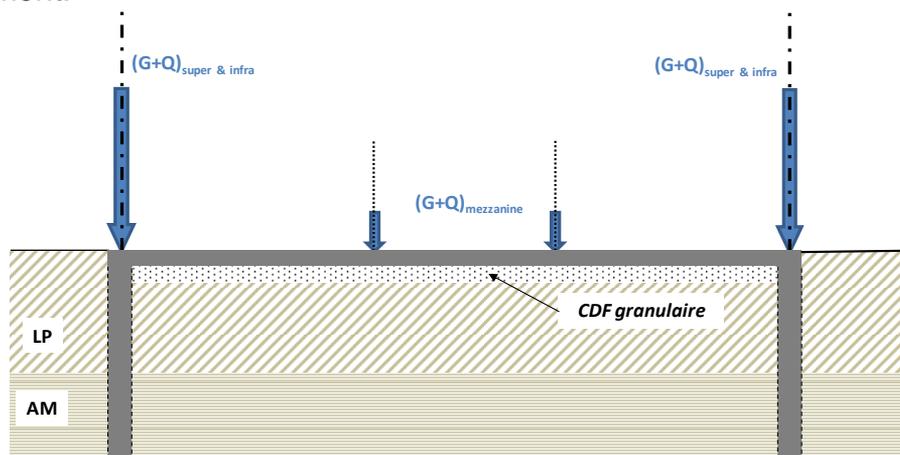


Figure 7. Conception des fondations des bâtiments 2 à 8

La prise en compte des phénomènes de gonflement au niveau du radier a été réalisée par la mise en œuvre d'une méthode de sous structuration sur la base :

- D'un sous modèle « de gonflement », caractérisant les déplacements (de gonflement) du sol en sous face de radier en fonction de la contrainte appliquée par ce dernier,
- D'un sous modèle « structurel », permettant le calcul des contraintes en sous face de radier en fonction des charges de superstructure et des déplacements de gonflement.

4.3.1. Sous modèle gonflement : loi pression en sous face de radier/ déplacement

La loi d'interaction entre contrainte effective en sous face de radier et déplacement (de gonflement) induit présenté en Figure 8 a été définie par intégration sur la hauteur des terrains gonflants de la loi phénoménologique de gonflement (eq.1)

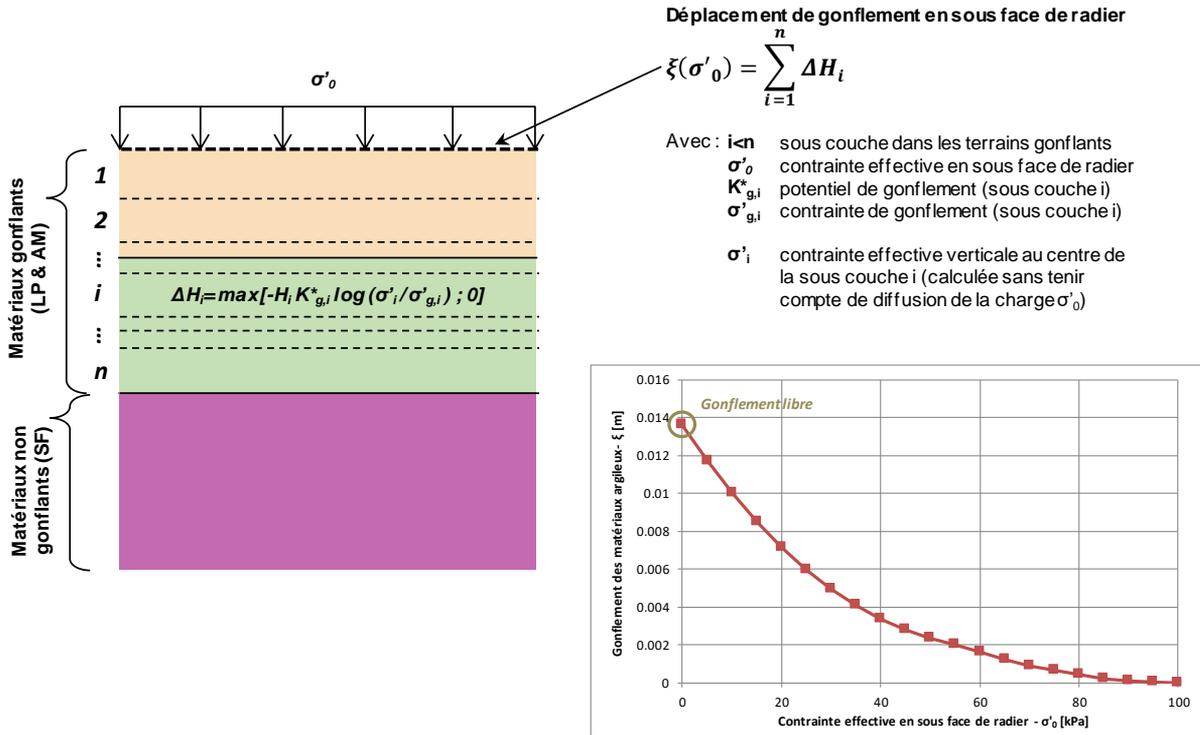


Figure 8. Principe de calcul de la loi d'interaction contrainte effective/ déplacement

Cette méthodologie unidimensionnelle ne tient pas compte la diffusion des charges dans le sol, et ne considère pas la compressibilité des sols sous la base des couches gonflantes. Par rapport à une modélisation plus fine tenant compte de ces phénomènes, l'application d'une telle loi pour le calcul des déplacements de gonflement aura donc tendance à surestimer l'amplitude et la variabilité latérale du déplacement, et donc à maximiser les efforts parasites induits sur les structures.

4.3.2. Sous modèle structurel du radier

Le sous modèle structurel du radier est défini par le biais d'une poutre sur appuis élastiques indépendants représentant l'effet du sol (et des pieux éventuels) sollicité :

- d'une part, par les charges en face supérieure du radier ;
- d'autre part, par les déplacements induits par le gonflement des terrains.

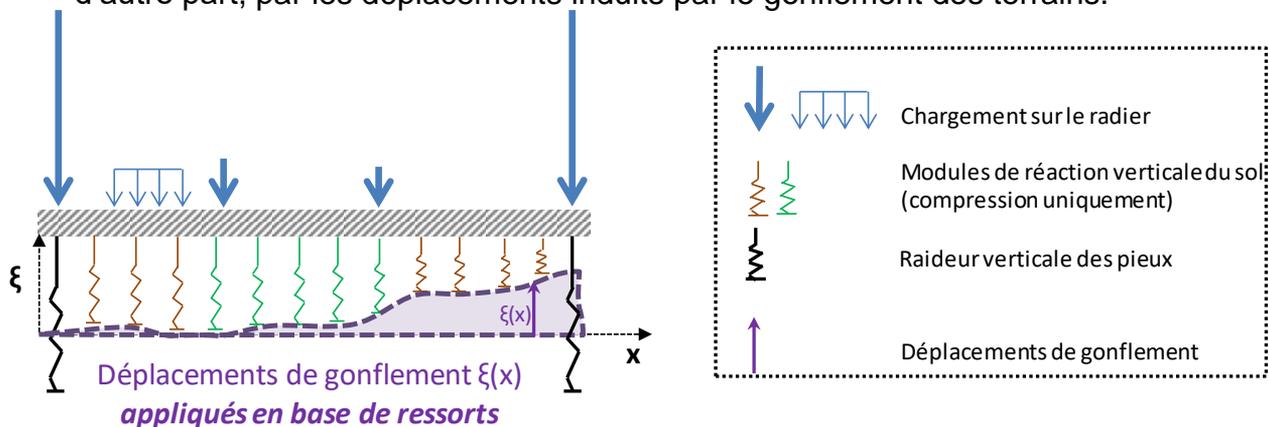


Figure 9. Sous-modèle structurel du radier

De manière classique, les modules de réaction du sol, grandeurs dépendant de la répartition des charges, doivent tenir compte des interactions au sein du sol des effets des charges voisines.

Ils peuvent être déterminés par le biais de calculs éléments finis ou de calculs de poutre sur multicouche élastique comme ratio entre contrainte en sous face de radier et tassement ; ces calculs permettant, en effet, la détermination :

- des sollicitations et déformée du radier avant expression du phénomène de gonflement (ce dernier étant différé) ;
- de la pression en sous face du radier (donnée nécessaire à la première itération entre les sous modèles structurel et gonflement) ;

4.3.3. Définition des effets conjugués des charges structurales et du gonflement

Par le biais d'itérations entre pressions en sous face de radier issues du sous modèle structurel, et déplacements de gonflement issus du modèle de structure (Figure 10), cette méthode permet, à convergence, d'estimer les effets conjugués du gonflement des terrains et des charges structurales.

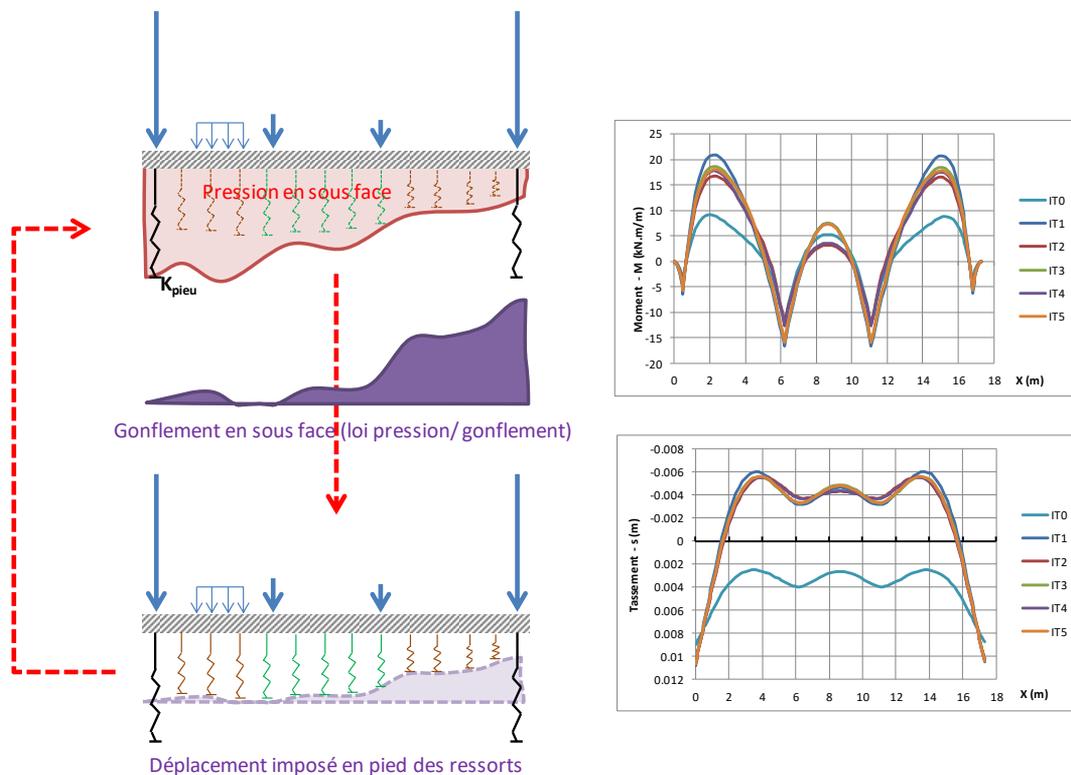


Figure 10. Détermination itérative des effets des charges structurales et du gonflement

4.3.4. Justification des radiers

Du fait de la forte dépendance (non linéaire) entre déplacement de gonflement et pression en sous face de radier (Figure 8), les sollicitations de gonflement sont dépendantes de l'intensité et de la répartition des charges structurales, et nécessiteraient de mener cette interaction Sol Structure pour chaque cas de charge ELS.

Dans le cadre du projet de l'ENS où les charges sont majoritairement permanentes, le parti a été pris de déterminer une action caractéristique de gonflement $(M, T)_{\text{gonfl};k}$ calculée, pour le cas de charge $EL S_{\text{caractéristique}}$ comme différence entre sollicitations calculées sous les effets conjugués des charges structurales et du gonflement et sollicitations calculées sans tenir compte des effets du gonflement (Figure 11).

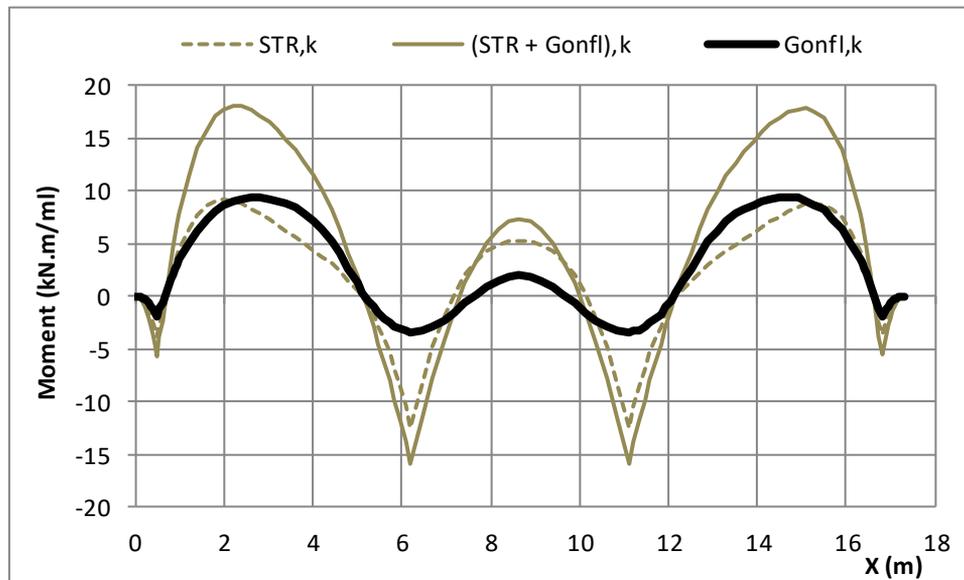


Figure 9. Détermination des effets caractéristiques du gonflement

Cette sollicitation caractéristique a, par la suite, été considérée en tant que sollicitation permanente élémentaire, et utilisée comme telle dans l'ensemble des justifications ELS et ELU de la dalle.

On pourra noter que les effets du gonflement calculés par le biais de cette méthode sont d'un ordre de grandeur d'une dizaine de kN.m/m là où, pour le même radier, un calcul mené en considérant une pression uniforme égale à la contrainte effective de gonflement σ'_g en sous face d'un radier appuyé sur les éléments verticaux, conduit à des moments de l'ordre de 400kN.m/m ce qui remettrait en cause la fondation superficielle.

5. Conclusion

Sur la base de l'exemple de la nouvelle ENS Cachan sur le plateau de Saclay, cette étude détaille une méthode d'appréhension des terrains gonflants dans la conception des fondations, identification, caractérisation mécanique sur la base d'essais courants, et enfin dimensionnement.

Elle met notamment en évidence comment, sur la base d'une méthode simplifiée d'Interaction Sol Structure, les effets du gonflement peuvent être appréhendés sur des radiers et dallages et conduire à adopter des fondations superficielles, là où des analyses sans ISS conduiraient à prévoir des dalles portées sur vide sanitaire.

On pourra néanmoins noter que cette méthode pourrait être améliorée par : la prise en compte de la diffusion des contraintes au sein de la couche gonflante ainsi que de la compressibilité des couches sous-jacentes.

6. Références bibliographiques

- AFNOR (1995). XP P94-091 - sols : reconnaissance et essais - Essai de gonflement à l'oedomètre - Détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes.
- BRGM (2006). Cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement dus aux sous-sols argileux.
- CFMS (à paraître). Recommandations sur la prise en compte du gonflement des terrains argileux dans le dimensionnement des ouvrages d'infrastructure
- Dakshanamurthy V., Raman V. (1973). A simple method of identifying an expansive soil. Japanese Society of Soils Mechanics and Foundation Engineering, Soils and foundations, Vol.13, No.1, pp97-104