



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Restitution GT gonflement des terrains argileux

Ecrans de soutènement

Paul VIDIL
Soletanche Bachy

JOURNÉE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU 25 AVRIL 2024

Restitution du GT gonflement des terrains argileux - ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

➤ Chapitre 4

Paul VIDIL



© Cédric Helsy – Soletanche Bachy

Restitution du GT gonflement des terrains argileux - ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

➤ Sujets abordés

Le chapitre 4 concerne les écrans de soutènement couramment utilisés dans les ouvrages enterrés, de type paroi moulée, pieux sécants ou tangents, palplanches.

Il est ici question de stabilité horizontale des soutènements,
et non de la stabilité verticale (-> conséquences des chapitres « radier » et « fondations profondes »),

Restitution du GT gonflement des terrains argileux - ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

➤ Retours d'expérience

Absence de pathologies avérées sur des soutènements de grande hauteur dans de nombreux terrains gonflants saturés : Argiles plastiques, Stampien marseillais, Argiles des Flandres, etc.

➡ L'incidence d'éventuelles poussées de gonflement additionnelles est donc négligeable.

L'instrumentation d'ouvrages sur le long terme est relativement rare, mais :

- les phases travaux où se produisent le gonflement mécanique de déchargement ainsi qu'une première partie du gonflement hydrique sont en revanche généralement instrumentées, et il n'a pas été rapporté d'incidence du gonflement sur les écrans de soutènement dans les sols saturés ;
- il n'a pas été décelé de désordres sur les soutènements et leurs appuis pendant la durée de vie des ouvrages liés à un gonflement hydrique de sols saturés.

Restitution du GT gonflement des terrains argileux - ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

Dans la littérature, il existe plusieurs articles sur des ouvrages réels ou des modèles en vraie grandeur traduisant le fait que le gonflement a conduit à une majoration importante de la poussée sur les soutènements, mais il s'agit uniquement de cas de terrains secs ou non saturés potentiellement gonflants, sous un apport d'eau naturel (montée du niveau de la nappe, effet barrage, arrêt du pompage) ou accidentel (rupture d'une canalisation).

Restitution du GT gonflement des terrains argileux - ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

➤ Aspects normatifs

La norme d'application de l'Eurocode 7 pour les écrans de soutènement NF P 94-282 "Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement – Écrans" indique qu'en règle générale, des actions particulières dues au gonflement du terrain ne sont à considérer que lorsque plusieurs conditions sont réunies :

- la présence d'une couche épaisse de sol pouvant « gonfler » fortement ;
- la présence d'eau.

➡ L'incidence éventuelle du gonflement sur le soutènement n'est donc a priori à étudier que pour les terrains dont la susceptibilité au gonflement est forte, et dont l'épaisseur est significative.

Restitution du GT gonflement des terrains argileux - ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

Tableau 1. Critères d'évaluation de la susceptibilité au gonflement d'un sol selon le BRGM (norme NF P94-282)

Tableau K.2.1 - Barème pour évaluer la susceptibilité d'une formation géologique au gonflement	
$N_{Rg}^{(a)}$	Susceptibilité au gonflement
≤ 2	Faible
$2 < N_{Rg} \leq 3$	Moyenne
> 3	Forte

$$^{(a)} N_{Rg} = (N_l + N_m + N_g) / 3$$

Tableau K.2.2 - Barème en fonction de la nature lithologique de la formation géologique		
Type de formation	Susceptibilité	$N_l^{(a)}$
Formation non argileuse mais contenant localement des passées ou des poches argileuses	Faible	1
Formation présentant un faciès argileux non prédominant (couche de type calcaire argileux ou sable argileux)	Moyenne	2
Formation à dominante argileuse (<3m), présentant un terme ou une passée non argileuse ou très mince	Forte	3
Formation essentiellement argileuse ou marneuse, d'épaisseur > 3m et continue	Très forte	4

^(a) La nature lithologique des sols et leurs épaisseurs sont les deux paramètres pris en compte pour définir la valeur de N_l .

Zoom sur annexe K de la norme NF P94-282 :

Tableau K.2.3 - Barème en fonction de la minéralogie de la formation géologique		
% moyen de minéraux gonflants	Susceptibilité	$N_m^{(a)}$
< 25%	Faible	1
25 à 50%	Moyenne	2
50 à 80%	Forte	3
> 80%	Très forte	4

^(a) La valeur de N_m est basée sur le pourcentage moyen de minéraux gonflants (smectites et interstratifiées) présents dans la formation argileuse. La fraction phylliteuse des échantillons est déterminée par diffractométrie des rayons X.

Tableau K.2.4 - Barème en fonction de I_p et de V_{BS} de la formation géologique			
$I_p^{(a)}$	$V_{BS}^{(a)}$	Susceptibilité	$N_g^{(a)}$
< 12	< 2,5	Faible	1
12 à 25	2,5 à 6,0	Moyenne	2
25 à 40	6,0 à 8,0	Forte	3
≥ 40	> 8,0	Très forte	4

^(a) La valeur de N_g est basée sur la valeur d'indice de plasticité I_p , la valeur de bleu V_{BS} de la formation géologique.

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

- ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

Les mesures (par exemple d'indice de plasticité) ne concernent qu'une frange de la couche, et qu'il y a donc lieu de multiplier les prises d'échantillons à des profondeurs différentes avant de statuer sur le potentiel de gonflement.

La norme NF P94-282 précise que, bien que la quantification du phénomène de gonflement passe usuellement par des essais œdométriques, la procédure normalisée pour ces essais (déformation latérale nulle – XP P 94-091) ne s'applique pas pour définir les efforts de poussée sur l'écran susceptible d'être générés par le gonflement d'une couche de terrain (contraintes verticales « constantes », déformation latérale « non nulle »).

➔ au vu des chemins de contraintes subis par les sols en interaction avec les parois de soutènement et des conditions en déplacement imposés par l'environnement de ces terrains, le recours aux essais de gonflement œdométriques ne suffit pas pour obtenir les paramètres additionnels nécessaires pour le dimensionnement des ouvrages de soutènement.

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

- ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

➤ Spécificités de la réalisation des parois moulées

Il est reconnu que le procédé de réalisation des parois moulées n'apporte normalement pas d'hydratation aux terrains, étant donné la composition de la boue bentonitique de forage, et le fait qu'un « cake » se crée sur le pourtour de l'excavation.

Cela dépend aussi de la nature des terrains : dans les sols perméables, il y a pénétration de la boue avant formation du cake, et dans les sols argileux, il n'y a ni pénétration ni formation réelle de cake.

Le guide « Support fluids for deep foundations » (DFI EFFC, 2019) apporte une aide à la décision pour le choix du fluide de forage en fonction du type de sol rencontré, et évoque le cas des argiles gonflantes, sans être conclusif.

En France la pratique usuelle est l'utilisation d'une boue bentonitique : pour éviter une forte augmentation de la viscosité dans les passages argileux, une évaluation des risques doit être menée au cas par cas, et peut mener à l'emploi d'additifs (par exemple à l'ajout d'un agent dispersant, d'un polymère réducteur de filtrat à la bentonite).

A l'étranger, certains types particuliers d'argile peuvent conduire à l'utilisation de polymère pur comme fluide de forage, afin de limiter l'hydratation du terrain par la boue.

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

- ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

Le temps d'ouverture des panneaux n'est pas abordé dans cette première édition du guide DFI EFFC, mais il est clair que les risques de fluage, resserrement et d'éboulement sont aggravés par le temps d'ouverture du panneau.

A titre d'exemple, les différents plots d'essais menés dans le cadre du Grand Paris dans les Argiles plastiques, ont montré que les parois de forage d'un panneau de paroi moulée resté ouvert sans action mécanique et sans recyclage de boue :

- ne présentaient pas ou peu de resserrement (< 1 cm) sur les premières 24h suivant l'excavation du panneau ;
- se resserraient jusqu'à 48-72h suivant la taille du panneau, avec un resserrement d'environ 1/10^{ème} de la largeur du panneau ;
- au-delà de 72 h, des éboulements importants se manifestent (dans le cas d'un des plots d'essai sur 7 jours, des sur-excavations de l'ordre de 75 cm de part et d'autre du panneau se sont produites avec un dépôt en fond de forage sur une dizaine de mètres).

En cas d'ouverture prolongée d'un panneau, un recurage est donc recommandé.

Dans le cas des terrains gonflants (et généralement surconsolidés), il est donc important de bétonner les panneaux excavés rapidement après équipement, pour éviter le resserrage des parois de l'excavation, limiter la longueur d'ouverture des panneaux et prévoir si besoin un enrobage supplémentaire des cages d'armatures.

Ce resserrement provient vraisemblablement de la relaxation des contraintes et non de l'hydratation des terrains in situ.

Restitution du GT gonflement des terrains argileux - ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

➡ Dimensionnement des écrans

Compte tenu du retour d'expérience et de l'absence de pathologie, **il n'y a** dès lors **pas lieu d'appliquer des pressions horizontales additionnelles de gonflement sur les écrans de soutènement.**

Cela vient bien sûr du fait que ces terrains sont saturés, mais aussi du fait que les phases de construction génèrent généralement un déchargement horizontal de faible ampleur :

➡ le faible déconfinement change très peu la contrainte sphérique totale dans les sols ; à comparer à la situation d'un terrain en fond de fouille, suite à un terrassement de grande hauteur entraînant un important déchargement et une succion (ou variation de pression interstitielle négative) induite.

Restitution du GT gonflement des terrains argileux - ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

➡ Quid de la poussée à long terme ?

Il est parfois considéré que le gonflement pourrait être susceptible, à terme, de ramener la poussée à un état au repos (poussée horizontale K_0), d'où un calcul mené de manière sécuritaire en phase service à long terme ; ce cas pourrait faire l'objet d'un calcul à un Etat Limite de Service (caractéristique) et/ou à un Etat Limite Ultime (durable et transitoire, ou accidentel).

Cela rejoint l'approche préconisée dans les recommandations de l'AFTES « Réflexions sur les méthodes usuelles de calcul du revêtement des souterrains » (GT7R2F1, 1976). Cette approche simplificatrice est considérée comme maximaliste pouvant induire des efforts très conséquents. Elle caractérise sans doute également un phénomène de fluage des terrains.

➡ Cette approche ne semble néanmoins pas indispensable au regard des premiers retours d'expérience de réalisation d'ouvrages profonds dans les formations argileuses du Bassin parisien.

Restitution du GT gonflement des terrains argileux - ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

En ce qui concerne la butée des terrains, il convient de rappeler que la butée ne peut pas revenir à son état initial ; par conséquent, il est recommandé de ne pas modifier la butée à long terme à cause du gonflement.

En tout cas, le Maître d'Ouvrage doit définir le type d'approche retenu (prise en compte du K_0 à long terme ou pas) qui doit être retranscrit dans le Cahier des Clauses Techniques Particulières et/ou le rapport d'étude géotechnique de conception (G2) qui devront préciser la nature des vérifications à mener à long terme.

Restitution du GT gonflement des terrains argileux - ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

➤ Rappel des fondamentaux

Il est fondamental de mener les calculs de stabilité horizontale avec les bonnes caractéristiques de sol. Cela ne concerne bien sûr pas uniquement les sols gonflants, mais c'est d'autant plus important dans le cas de terrains potentiellement gonflants.

En particulier, il convient de considérer :

- les **pressions au repos** K_0 , tenant compte de la surconsolidation ;

Plusieurs formules sont disponibles. La norme NF P94-282 en recommande la suivante, tout en conseillant de ne pas l'utiliser pour les valeurs élevées du rapport de surconsolidation R_{oc} .

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

- ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

- les **caractéristiques de cisaillement** non drainées ($c_u, \varphi_u = 0$, avec le cas échéant un gradient de cohésion avec la profondeur, et une poussée minimale du sol) et drainées (c', φ') ; la norme NF P94-282 indique que les valeurs des pressions des terres qui agissent sur un écran doivent être déterminées en tenant compte du plus défavorable des comportements drainé et non drainé des terrains.
- les **pressions d'eau** : la norme NF P94-282 stipule, dans une démarche sécuritaire, que pour les écrans soutenant des sols de perméabilité moyenne ou faible (limons et argiles), en l'absence d'expérience comparable représentative ou de système de drainage fiable ou de mesures prises pour empêcher les infiltrations d'eau, il faut tenir compte d'une poussée d'eau hydrostatique derrière l'écran correspondant à une nappe dont le toit est à la surface du massif soutenu. Il est également possible de recourir à des mesures de cellules de pressions interstitielles.

Restitution du GT gonflement des terrains argileux - ECRANS DE SOUTÈNEMENT -

➤ **Merci pour
votre attention**

