

# MODÉLISATION DE SOLS À L'ÉTAT DE SERVICE

Basé sur des concepts de mécanique des sols connus, le modèle HSS permet une approche unifiée pour la modélisation de différents types de sols. Contrairement au célèbre et largement utilisé modèle de Mohr-Coulomb, efficace à la rupture, ce modèle prédit leur comportement à l'état de service. Un exemple sur la H144.

*Stéphane Commend, Rafal Obrzud, Françoise Geiser  
et Philippe Menétrey*

L'efficacité du modèle constitutif HSS (Hardening soil – with small strain extension) pour la modélisation des sols tient à sa capacité à reproduire plusieurs phénomènes qui sont observés tant dans la nature qu'à partir d'essais en laboratoire. Il est ainsi capable de tenir compte (voir encadré p. 29):

- de la variation de la rigidité du sol selon les modes de charge ou de décharge,
- de la dépendance de la rigidité du sol en fonction du niveau de contrainte,
- de la grande rigidité (« dynamique ») des sols dans le domaine des petites déformations,
- du phénomène de préconsolidation,
- de l'apparition de déformations plastiques avant l'état limite.

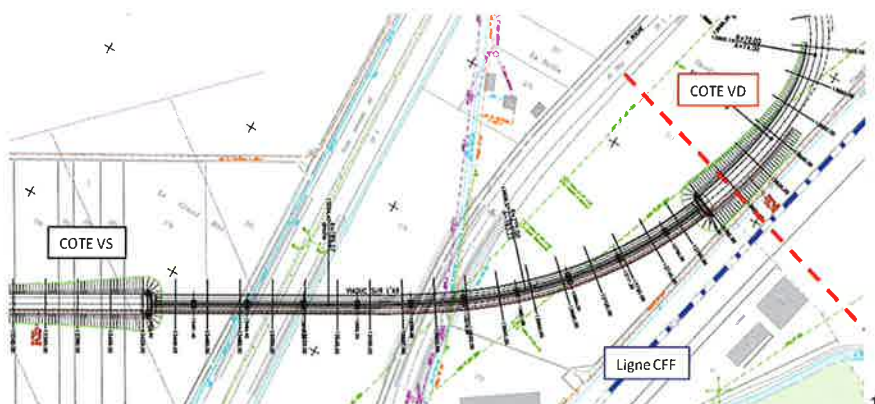
## Prédiction des tassements

Sur la H144, le remblai d'accès au viaduc sur la A9 (lire article p. 32) côté VD se trouve à proximité de la ligne CFF Genève-Simplon (fig. 1 et 2). Craignant que sa construction n'engendre des déplacements excessifs des rails, il a été décidé de procéder à une estimation de ces déplacements à partir de calculs par éléments finis sur une coupe 2D. Lors des premiers calculs, le modèle HSS n'était pas encore disponible dans le logiciel et une loi de comportement élastique parfaitement plastique de Mohr-Coulomb a été utilisée pour toutes les couches de

sol (dépôts fluvio-lacustres). Les paramètres (résistance et déformabilité) de la loi ont alors été choisis en admettant des valeurs prudentes issues du rapport géotechnique (fig. 3).

Ce premier calcul prédisait un déplacement vertical maximal de l'ordre de 15 cm sous le remblai et un tassement de 4 à 5 cm au droit des voies CFF (fig. 4, courbe 0). Ces valeurs étant hors des limites acceptables, différentes options ont été envisagées (utilisation d'un remblai allégé, « bourrage » sous les voies CFF, etc.), mais toutes étaient passablement coûteuses.

Comme les conditions géotechniques étaient sensiblement les mêmes de chaque côté du viaduc et que le remblai du côté VS devait être réalisé en premier, il a été proposé d'y observer les tassements qui y seraient engendrés : ceux-ci n'ont pas dépassé 1 à 2 cm. Le modèle côté VS a été modifié en accroissant fortement le module élastique E utilisé pour les dépôts lacustres à partir de 25 m de profondeur (E = 200 MPa), une valeur choisie afin que les tassements prédits correspondent aux observations. Cet « artifice » a ensuite été appliqué au modèle côté VD, et a conduit à la prédiction de tassements notoirement plus faibles (environ 5 mm) au niveau des voies CFF (courbe 1). La culée Vaud a aussi été instrumentée et les déformations maximales mesurées au pied du remblai après sa construction ont finalement été de l'ordre du centimètre, confirmant les prédictions du modèle adapté.



< Situation et position de la coupe de calcul pour l'approche par éléments finis



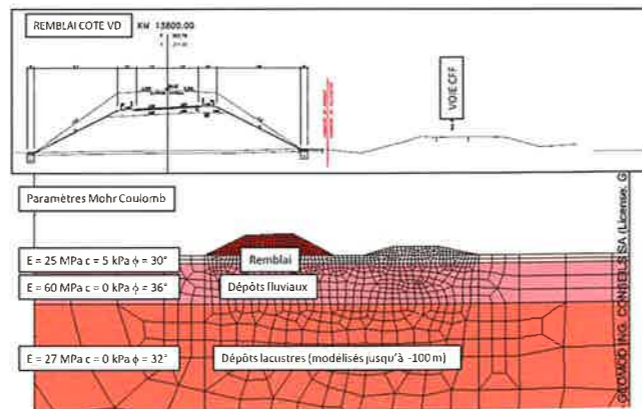
2

La prédiction initiale (courbe 0) était donc largement trop pessimiste. Cela s'explique probablement d'une part par l'utilisation de paramètres « prudents », mais aussi par l'utilisation d'une loi constitutive (Mohr-Coulomb) peu adaptée à la prédiction de déplacements à l'état de service. Si le modèle côté Vaud « calé » grâce à la comparaison avec les mesures côté Valais a fourni une prédiction fiable (courbe 1), aucune explication autre que l'utilisation de mesures en vraie grandeur ne permet de justifier l'usage d'un module aussi élevé à partir de 25 m de profondeur.

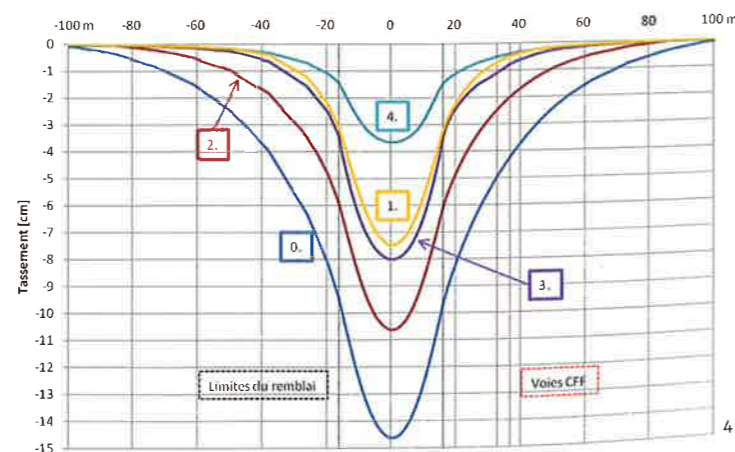
Afin d'en avoir le cœur net, il a été décidé de reprendre le maillage du modèle initial et, tout en gardant les mêmes paramètres géotechniques ( $c, \phi, E_{M-C}$ ), d'apporter les améliorations suivantes (fig. 4) :

- Courbe 2 Modèle de Mohr-Coulomb avec augmentation linéaire de  $E$  en fonction de la profondeur pour les dépôts lacustres, proche de celle admise dans le modèle HSS soit :
  - $E = E_{M-C} = 27 \text{ MPa}$  à  $-12 \text{ m}$  (toit de la couche)
  - $E = 78.3 \text{ MPa}$  à  $-100 \text{ m}$  (limite du modèle)
- Courbe 3 Modèle HSS avec :
  - $E_{50} = E_{M-C}$
  - $E_{ur} = 4 \times E_{50}$
  - $E_0 = 10 \times E_{50}$  avec extension « small-strain »
  - sans consolidation

(Les rapports entre  $E_{50}$ ,  $E_{ur}$  et  $E_0$  sont issus de la « boîte à outils » citée plus haut, soit sur des relations tirées de l'évidence géotechnique.)
- Courbe 4 Modèle HSS avec :
  - $E_{50}$ ,  $E_{ur}$  et  $E_0$  identiques courbe 3
  - avec surconsolidation des deux premières couches superficielles.



3



4

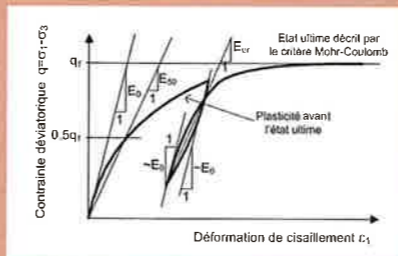
## ÉLÉMENTS PRIS EN COMPTE PAR LE MODÈLE HSS

### Différenciation de la rigidité du sol selon les modes de charge ou de décharge

Sans cette caractéristique, il est impossible d'effectuer une modélisation correcte des problèmes typiques du génie civil comme les excavations profondes, les tranchées couvertes ou le creusement des tunnels. La distinction entre les modules de charge et de décharge permet par exemple de prédire correctement les déformations des parois moulées et la convergence des tunnels.

Paramètres à considérer (fig. ci-dessous) :

- Module sécant  $E_{50}$  (module correspondant aux déformations plastiques dues à la charge)
- Modules de décharge/recharge  $E_{ur}$  (module correspondant aux déformations élastiques dues à la décharge) et  $E_0$  (module initial utilisé lors de l'initiation de la décharge/recharge)

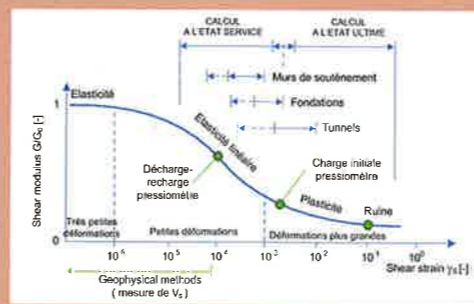


### Grande rigidité (rigidité « dynamique ») dans le domaine des petites déformations

Le domaine de déformation dans lequel le sol peut être considéré véritablement comme matériau élastique est très petit. Une fois un certain seuil dépassé, une forte dégradation de la rigidité est observée (élasticité non-linéaire), causée par l'augmentation des déformations de cisaillement.

Paramètres à considérer (fig. ci-dessous) :

- Module initial  $E_0$  (maximal ou dynamique), correspondant au module initial de cisaillement  $G_0$  (les cas présentés dans cet article et dans celui p. 19 montrent l'influence prépondérante du paramètre  $E_0$  sur la qualité des prédictions)



### Rigidité du sol dépendant de l'état de contrainte (et donc de la profondeur)

Les observations faites en laboratoire montrent que la rigidité du sol dépend de la pression de confinement appliquée pendant un essai triaxial de cisaillement. La rigidité d'un sol dans une couche « homogène » varie ainsi selon la profondeur, mais aussi en fonction des charges appliquées sur le domaine.

Paramètre à considérer :

- Exposant  $m$  décrivant une loi de type exponentiel pour l'évolution des trois modules de rigidité :

$$E = E^{ref} \left( \frac{\sigma_3 + c \cdot \cot \phi}{\sigma_{ref} + c \cdot \cot \phi} \right)^m$$

avec  $E^{ref}$  le module correspondant au niveau de contrainte défini par  $\sigma_{ref}$ ,  $\sigma_3$  le niveau de contrainte mineure à une profondeur donnée,  $c$  la cohésion et  $\phi$  l'angle de frottement.

### Préconsolidation

On observe généralement (tests in situ) une tendance à la surconsolidation des couches de sols superficielles, due tant à l'histoire des contraintes (érosion, fonte des glaciers) qu'à différents phénomènes naturels (dessiccation, non-saturation).

Paramètre à considérer :

- Pression de pré-consolidation  $q_{pop}$  ou coefficient de sur-consolidation OCR

### Occurrence de déformations plastiques avant l'état limite

Les courbes expérimentales de cisaillement dans des conditions triaxiales démontrent une relation fortement non-linéaire entre la contrainte et la déformation. Ce type de comportement est observé bien avant l'état ultime et commence tout au début du chargement. L'introduction d'un mécanisme d'écroûssage déviatoire dans le modèle permet de reproduire correctement cette courbe non-linéaire.

Paramètres à considérer :

- $\phi, c$  (état ultime, paramètres de Mohr-Coulomb)

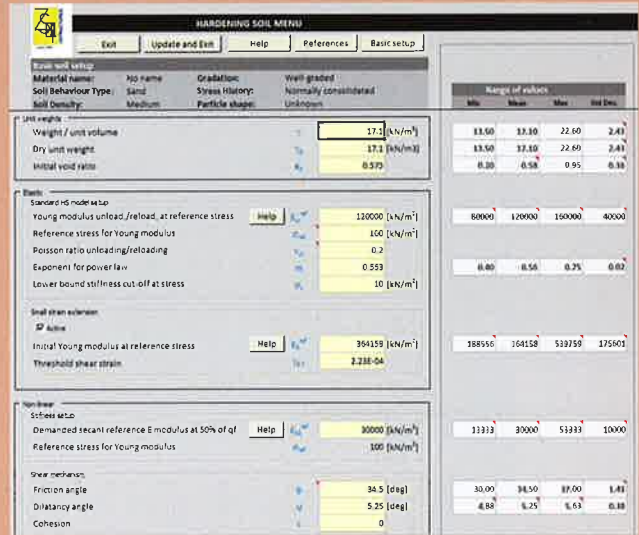
- 2 Le talus vaudois et les piles lors de leur construction
- 3 Coupe, maillage 2D et caractéristique géotechniques
- 4 Comparaison des tassements obtenus avec les différents modèles aux éléments finis

## ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE HSS

Un des avantages du modèle HSS est que tous ses paramètres peuvent être déterminés de manière précise à partir d'essais en laboratoire (triaxial et œdomètre). Dans la pratique, les analyses géotechniques ne se reposent malheureusement pas toujours sur de tels essais, ce qui rend souvent nécessaire l'estimation de certains paramètres. Afin de palier à cet inconvénient, une « boîte à outils » interactive capable de fournir à l'ingénieur une estimation des paramètres du modèle HSS a été implémentée directement dans le logiciel de modélisation par éléments finis ZSOIL.PC 2012.

Si on ne dispose que d'une connaissance essentiellement descriptive des sols (par exemple « sable normalement consolidé de densité moyenne », fig. 5), l'outil fournit des fourchettes estimatives des valeurs à utiliser pour les paramètres du modèle, et propose des valeurs moyennes basées sur une base de données comprenant environ 170 corrélations concernant différents types de sols (fig. 6). Cette base de données est d'ailleurs actualisée à chaque nouvelle mise à jour du logiciel.

Il est ensuite possible d'affiner l'estimation des paramètres et réduire les incertitudes sur la base d'informations supplémentaires issues du rapport géotechnique (essais in situ, par exemple N-SPT, ...). Finalement, il est aussi possible d'introduire d'éventuelles courbes issues des tests effectués en laboratoire dans l'outil afin qu'elles y soient analysées automatiquement pour aboutir à une détermination précise des paramètres du modèle.

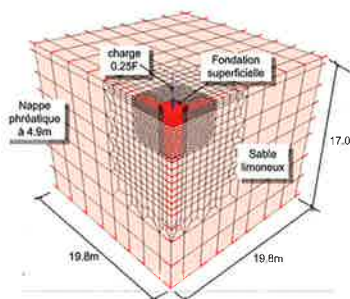
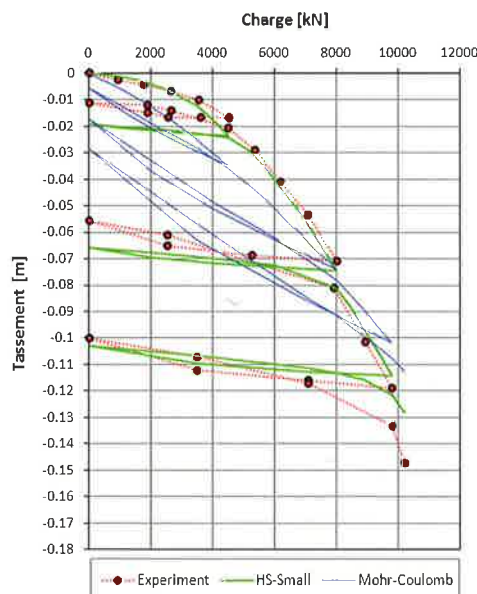


L'augmentation de  $E$  avec la profondeur réduit logiquement les tassements prédits par le modèle initial d'un facteur 2 (courbe 2). Mais ce n'est qu'avec l'utilisation du modèle HSS avec extension « small-strain » (courbes 3 et 4) que la prédiction se rapproche de manière satisfaisante du modèle de Mohr-Coulomb calé ( $E = 200$  MPa dès 25 m de profondeur, courbe 1) et de la réalité, en particulier : les faibles tassements au droit des voies CFF.

Le même constat peut d'ailleurs s'effectuer sur un test consacré aux tassements observés sous une fondation superficielle reposant sur un sable du Texas, lors de cycles de charge et de décharge appliqués sur la fondation (fig. 7 et 8). Les prédictions du modèle HSS (courbe verte) sont bien plus proches de la réalité (mesure in situ, en rouge) que celles du modèle de Mohr-Coulomb (courbe bleue).

L'utilisation du modèle HSS devrait donc redonner confiance aux ingénieurs souhaitant effectuer des prédictions de déplacements au moyen de modèles aux éléments finis, à l'aide d'un modèle constitutif robuste et fiable. Ces prédictions seront d'ailleurs d'autant plus fiables si les paramètres du modèle HSS sont déterminés à partir de courbes provenant de tests en laboratoire.

Stéphane Commend, Rafal Obrzud et Françoise Geiser travaillent chez GeoMod ingénieurs conseils SA à Lausanne. Philippe Menétray travaille comme ingénieur dans le bureau INGPPI SA à Lausanne.



- 5 Interface utilisateur « simple » pour l'estimation des paramètres du modèle HSS (sol granulaire)
- 6 Valeurs proposées par l'interface et fourchettes (extrait)
- 7 Comparaison des différents tassements modélisés ou mesurés
- < Maillage 3D pour le test « fondation superficielle » (Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs.)

1 D'autres exemples confirmant l'efficacité de la loi HSS peuvent être consultés dans le mode d'emploi de ZSOIL.PC 2012.