

Editorial

Cette année, l'équipe de GeoMod a travaillé sur de nombreux projets, principalement dans le domaine du dimensionnement des géostructures, mais a aussi étendu ses compétences dans des domaines tels que la vérification au séisme de structures complexes (voir ci-après l'exemple d'un viaduc), l'hydrogéologie ou la géothermie. 2010 aura également marqué les 25 ans de Z_SOIL, le logiciel d'éléments finis utilisé dans la plupart des projets menés par GeoMod. Cette année encore, de nouvelles options y ont été ajoutées, rendant par exemple plus aisée l'introduction d'une stratigraphie compliquée (kriegerage), ou la conception d'un radier brosse, avec une distribution de pieux ne dépendant pas du maillage initial. L'implémentation de nouvelles lois constitutives comme le modèle *Hardening Soil-Small Strain* - décrit brièvement en fin de fascicule - permet également de représenter au mieux le comportement réel des sols.



Etude d'un essai de pieu avec bâti de charge

*Maître d'ouvrage : Service des Routes du Canton de Vaud
En collaboration avec Dr Ph. Menétrey, INGPHI SA*

Un essai de pieu a été conduit dans le but d'optimiser la fondation sur pieux d'un viaduc de 350 m en construction pour la route H144 en Suisse (Figure 1). Il s'agit ici de pieux à refoulement de type « Vibrex ». La géologie est composée de dépôts d'inondation, fluviaux et lacustres sur une grande profondeur. Une étude paramétrique a été conduite pour intégrer les caractéristiques optimistes, réalistes et pessimistes fournies par le géotechnicien.

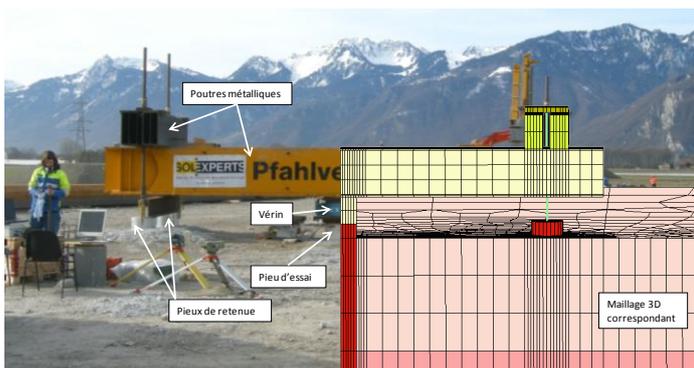


Figure 1. Essai de pieu: vue du dispositif et maillage

Pour modéliser ce genre d'essai, un modèle aux éléments finis 2D axisymétrique est souvent recommandé, puisqu'une analyse en déformations planes ne permet pas de représenter la forme circulaire du pieu.

Cette formulation axisymétrique ne permet néanmoins pas de modéliser le bâti de charge, le vérin d'application de la charge et les pieux de retenue.

Deux types de modèles ont donc été considérés: un modèle 2D axisymétrique et un modèle tridimensionnel incluant le bâti de charge (Figure 2), pour lequel seul un quart du système a été modélisé, au vu des symétries.

Tous les calculs ont été effectués avant l'exécution de l'essai de pieu, afin de déterminer la capacité portante du pieu, dans le but de dimensionner le vérin et de prédire la courbe charge-déplacement du pieu.

D'un point de vue numérique, il était également intéressant de montrer si les résultats du modèle 3D – tenant compte de l'interaction entre les pieux de retenue et le pieu d'essai – différaient des résultats du modèle « simplifié » en 2D.

En ce qui concerne l'application de la charge dans le modèle 2D axisymétrique, une force distribuée est appliquée au sommet du pieu, et est régulièrement accrue. Par contre, l'introduction de la force dans le modèle 3D se fait par le biais d'une augmentation fictive de température (donc d'une dilatation) dans le vérin.

Le maillage est raffiné dans les zones d'interface pieux-sols afin de pouvoir reproduire au mieux le développement des zones plastiques.

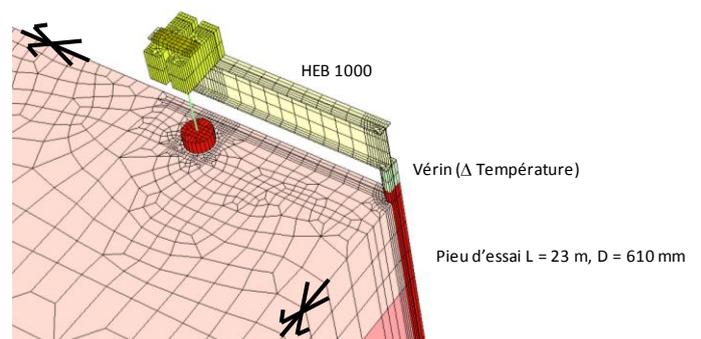


Figure 2. Maillage 3D (1/4) avec bâti de charge

La Figure 3 illustre le niveau de contrainte par rapport à l'état ultime dans le modèle 3D, pour une force de 6'000 kN mesurée en tête de pieu.

Bien que des zones plastiques se développent entre les pieux d'essai et de retenue pour ce niveau de chargement – comme l'indique l'examen de la Figure 3, la courbe charge-déplacement obtenue à l'aide du modèle 3D correspond presque parfaitement avec celle du modèle 2D axisymétrique (voir Figure 4, paramètres réalistes).

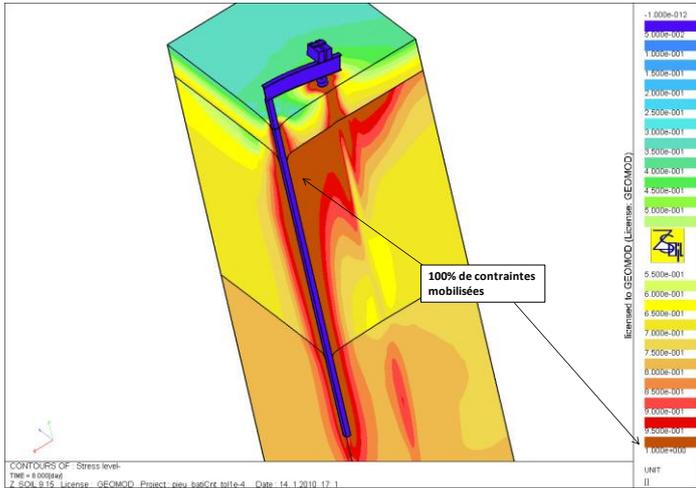


Figure 3. Niveau de contrainte pour une charge de 6'000 kN

De plus, une très bonne correspondance est obtenue entre la prédiction réaliste et les mesures in situ, effectuées après le calcul (Figure 5). Aucun modèle n'a prédit une charge de ruine avant que la charge appliquée n'atteigne 10'000 kN, mais dans la réalité, le vérin s'est rompu avant le pieu, autour de 6'000 kN...

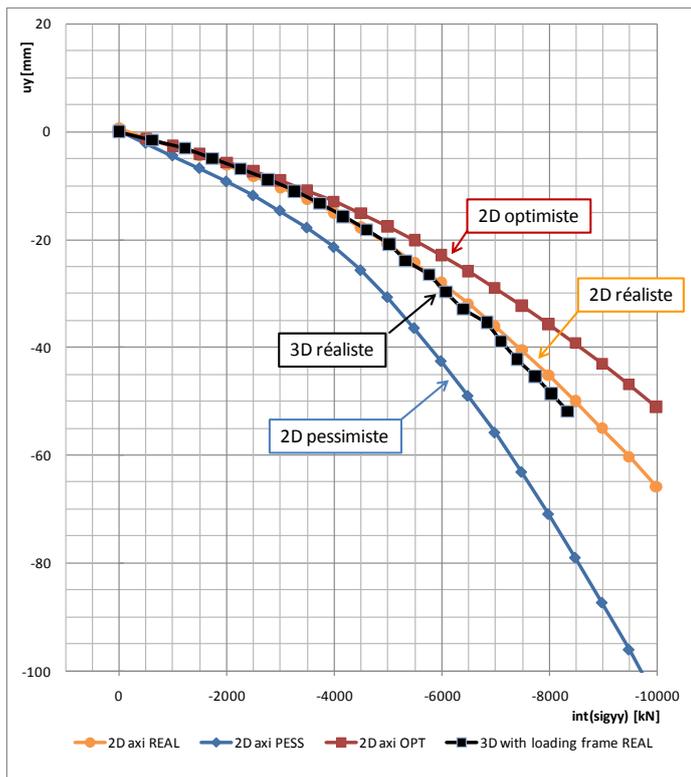


Figure 4. Courbes charge-déplacement

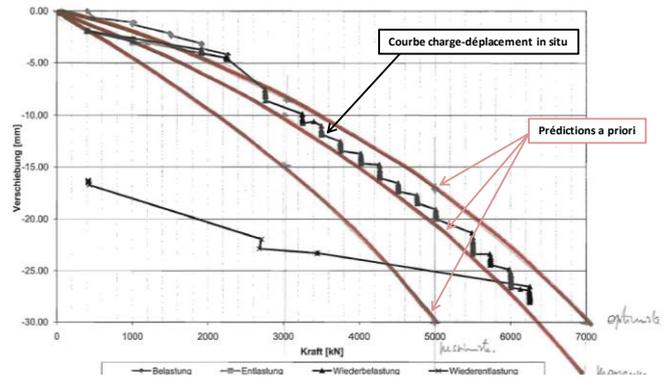


Figure 5. Comparaison calcul a priori – mesures in situ

Viaduc de sortie autoroutière: vérification au séisme « push-over » en 3D

Maître d'ouvrage : Office Fédéral des Routes, Estavayer
En collaboration avec M. Capron, BG ing. conseils SA

La vérification au séisme d'un viaduc de sortie autoroutière situé près de Neuchâtel est menée à l'aide de la méthode basée sur les déformations (push-over), décrite dans le cahier technique SIA CT 2018. Cette méthode, moins conservatrice que la méthode plus classique des forces de remplacement, permet parfois de renoncer à procéder à des renforcements coûteux sur la structure. Les Figures 6 et 7 illustrent respectivement le viaduc et le modèle tridimensionnel utilisé dans Z_SOIL.

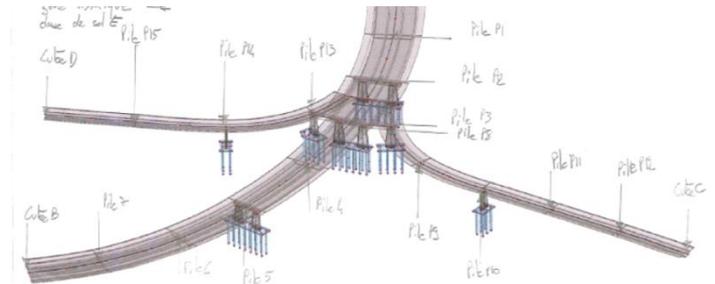


Figure 6. Vue 3D du viaduc de Brena

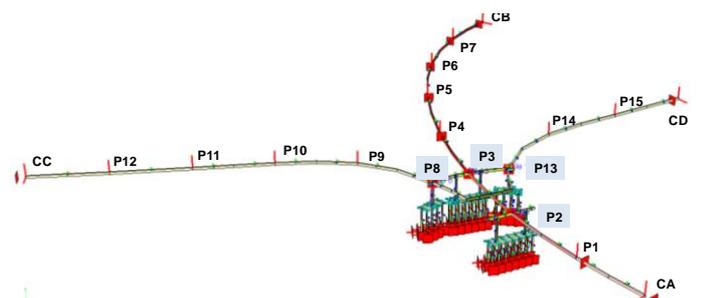


Figure 7. Modèle 3D composé de poutres représentant tous les éléments structuraux (tablier, piles, fondations)

La vérification au séisme se concentre sur les piles P2, P3, P8 et P13. Aussi, seules ces piles sont-elles explicitement modélisées à l'aide de poutres nonlinéaires, avec une limite à la traction et à la compression pour le béton et les aciers d'armature. Les autres piles sont introduites dans le modèle par des conditions de bord, et le tablier au moyen de poutres linéaires (Figure 8). Le modèle considéré est uniquement structural: l'interaction sol-structure n'est pas prise en compte, et les pieux supportant les piles sont admis encastres dans la moraine.

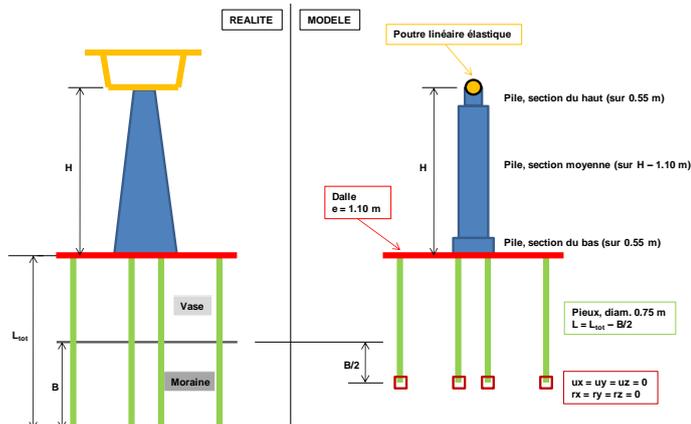


Figure 8. Différences entre la réalité et le modèle

Selon le cahier technique SIA CT 2018, le facteur de conformité α_{eff} est défini comme le rapport entre la capacité de déformation de la structure w_{Rd} et la déformation due à l'action sismique w_d . α_{eff} est ensuite comparé aux facteurs de réduction α_{min} et α_{adm} , dans le but d'évaluer la nécessité d'intervenir sur la structure. Ces facteurs de réduction dépendent de la classe d'ouvrage et de la durée de vie de la structure.

D'une part, la capacité de déformation w_{Rd} peut être calculée selon la SIA CT 2018 en fonction de la portée de cisaillement de la pile considérée, et de la courbure nominale de plastification de sa section. De plus, comme les méthodes basées sur les déformations ne peuvent être appliquées en cas de rupture fragile, un facteur de conformité réduit est calculé, tenant compte de la résistance effective de la section à l'effort tranchant.

D'autre part, une distribution de force (unitaire ou modale) est appliquée au modèle structural tridimensionnel et régulièrement augmentée. Une courbe de capacité est alors obtenue en reportant l'intégrale de l'effort tranchant à la base des piles en fonction du déplacement du tablier du pont. Cette courbe est ensuite exprimée pour un oscillateur à un degré de liberté équivalent, puis bi-linéarisée, donnant naissance au spectre de capacité.

L'action sismique est quant à elle représentée sous la forme d'un spectre de demande. Ce spectre dépend de la classe d'ouvrage, des sols de fondation et de la zone dans laquelle l'ouvrage est construit. Il est exprimé sous la forme d'un spectre de réponse accélération-déplacement (ADRS).

La superposition des spectres de capacité et de demande permet alors de déterminer un déplacement cible pour l'oscillateur à un degré de liberté w_d^* , puis le déplacement cible de la structure réelle w_d , représentant le déplacement horizontal maximal qui serait subi par la structure au cours d'un tremblement de terre dont l'intensité correspondrait au spectre de demande ADRS.

Ce déplacement cible w_d est calculé pour les quatre piles considérées, dans deux directions (longitudinale et transversale).

La Figure 9 schématise pour l'exemple le calcul de w_d effectué par Z_SOIL pour l'analyse de la pile 2 dans la direction longitudinale, avec une distribution de force modale.

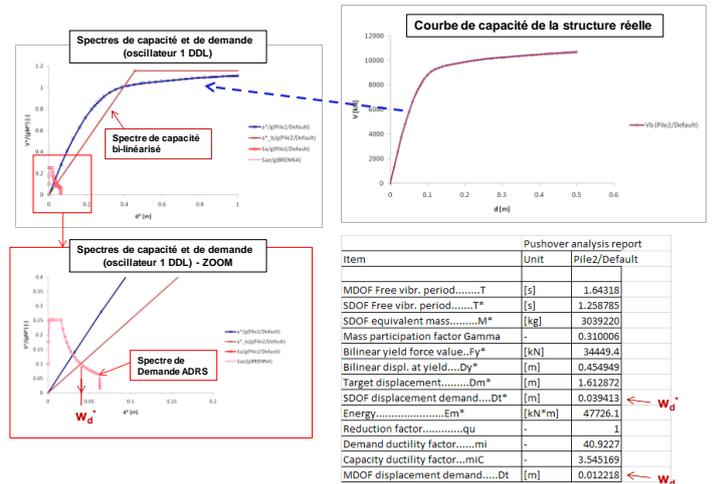


Figure 9. Calcul du déplacement cible longitudinal, pile 2

Après l'étude de toutes les piles, il résulte que $\alpha_{eff} > \alpha_{adm}$ pour chacune d'entre elles, et la sécurité au séisme de l'ouvrage est ainsi garantie.

De l'usage du modèle *Hardening Soil Small Strain* dans la géotechnique courante

En collaboration avec Prof. Th. Zimmermann, Zace Services Ltd

Les ingénieurs intéressés par une prédiction fiable et réaliste de l'interaction d'un système sol-structure devraient être conscients que, en appliquant une loi de comportement linéaire-élastique (par exemple Mohr-Coulomb), les déformations du terrain prédites peuvent être erronées pour certaines applications. Cela peut aussi influencer l'amplitude des efforts qui sont calculés dans les éléments structuraux.

Le modèle *Hardening Soil-Small Strain* (HS) reproduit de manière aussi réaliste que possible les déformations du sol au moyen d'une relation contrainte-déformation élastoplastique non-linéaire (Figure 10). En effet, contrairement à d'autres modèles comme le « Cap » ou le « Modified Cam-Clay » (sans parler des modèles sans écrouissage de type Mohr-Coulomb), les déformations du sol peuvent être modélisées avec plus de précision en intégrant quatre modules différents de rigidité: le module maximal (ou dynamique) E_0 , le module sécant E_{50} , le module de décharge/recharge E_{ur} et le module oedométrique E_{oed} , permettant de contrôler l'ordre de grandeur des déformations plastiques.

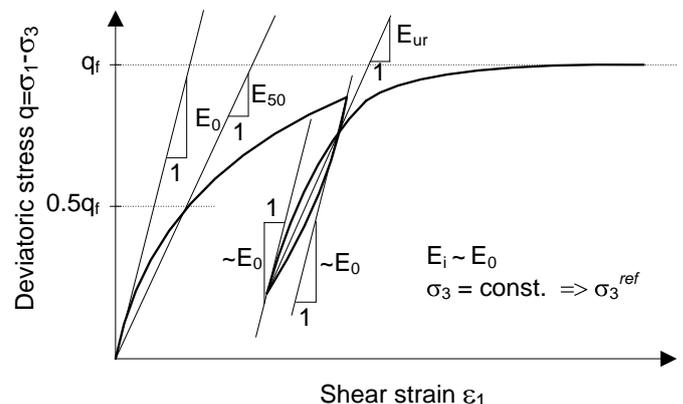


Figure 10. Courbe triaxiale contrainte-déformation et définition de trois des modules de rigidité du modèle HS

Selected soil models implemented in Z_Soil	Type of analysis	SANDS	SILTS		CLAYS	
			Dilatant, Low compressible	Non-dilatant, Compressible	Degree of Overconsolidation	
					High Stiff clays	Low Normal, Soft clays
Mohr-Coulomb (Drucker-Prager)	SLS					
	ULS					
CAP	SLS					
	ULS					
Modified Cam-Clay	SLS					
	ULS					
HS-Standard HS-Small Strain	SLS					
	ULS					

Figure 11. Recommandations pour le choix du modèle en fonction des types de sol et d'analyse (ULS – état limite, ELS – état de service)

La formulation du modèle comporte deux mécanismes d'érouissage – déviatoire et isotrope, ce qui permet d'adapter cette loi à la fois pour la modélisation des sols granulaires et des sols surconsolidés où l'on observe une domination des déformations plastiques de cisaillement, mais aussi pour la modélisation des sols mous pour lesquels les déformations dues à la compression volumique sont dominantes (Figure 11).

Compte tenu du fait que l'utilisateur peut spécifier le module du sol intact E_0 , le modèle HS est également capable de reproduire une forte variation de la rigidité pour de très petites déformations. Cela a une grande importance pour la modélisation de l'interaction sol-structure. De tels modèles, qui prennent en compte une grande rigidité dans le régime des très petites déformations, concentrent le développement des déformations à proximité de la sollicitation, ce qui est généralement observé dans la réalité.

Malgré la complexité mathématique du modèle HS, ses paramètres sont explicites au sens physique et ils peuvent être déterminés par des essais en laboratoires standards comme les tests triaxiaux ou oedométriques. Seul le module dynamique doit être théoriquement déterminé par des essais sismiques ou géophysiques, mais des corrélations entre les modules peuvent être trouvées dans la littérature.

Le modèle HS est capable de générer une approximation plus exacte et fiable des déplacements pour la modélisation de problèmes où des zones en décharge cohabitent avec des zones en charge, par exemple les fouilles ou l'excavation de tunnels.

L'exemple d'une modélisation tridimensionnelle d'une fouille ancrée d'une quinzaine de mètres de profondeur est présenté en Figure 12. Le grand nombre d'éléments continus et d'éléments structuraux (coques et tirants d'ancrage) n'empêche pas d'utiliser la loi de comportement Hardening Soil et d'obtenir des résultats dans des délais satisfaisants sur un PC classique. Les Figures 13 et 14 comparent les déplacements verticaux obtenus au droit d'une coupe 2D (identifiée sur la Figure 12) pour deux modèles constitutifs : Mohr-Coulomb et Hardening Soil-Small Strain. On peut remarquer que l'utilisation du modèle HS permet une modélisation réaliste de tassements du sol derrière la paroi de l'excavation, ainsi qu'une domination des déplacements horizontaux de la paroi moulée sans effet de soulèvement parasite de mur, ce qui n'est pas le cas pour le modèle de type Mohr-Coulomb.

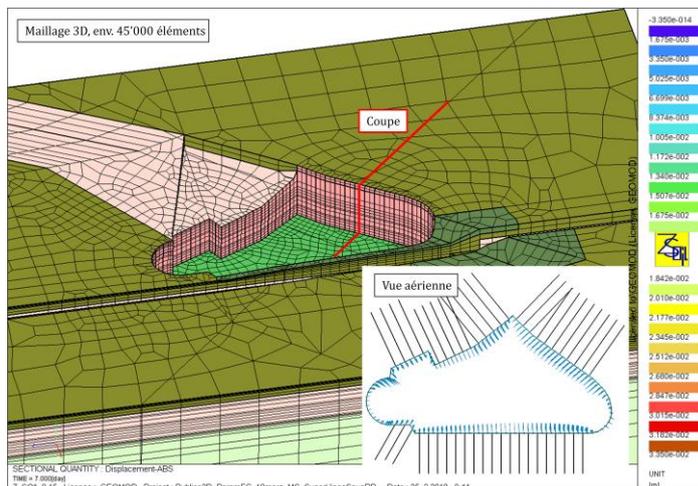


Figure 12. Modèle 3D d'une excavation

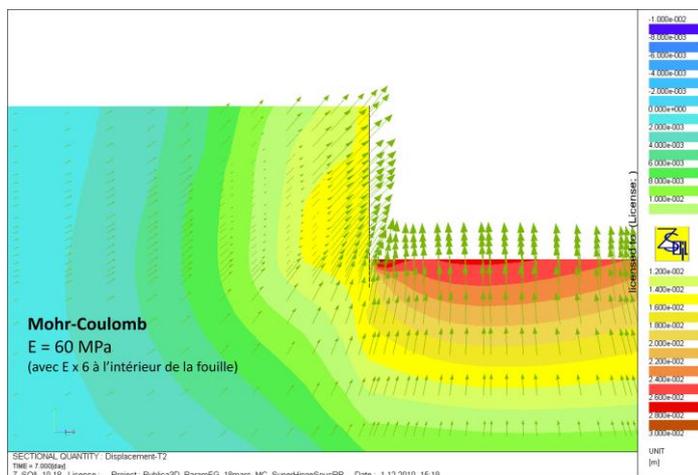


Figure 13. Déplacements verticaux et vecteurs déplacements dans la coupe, modèle Mohr-Coulomb

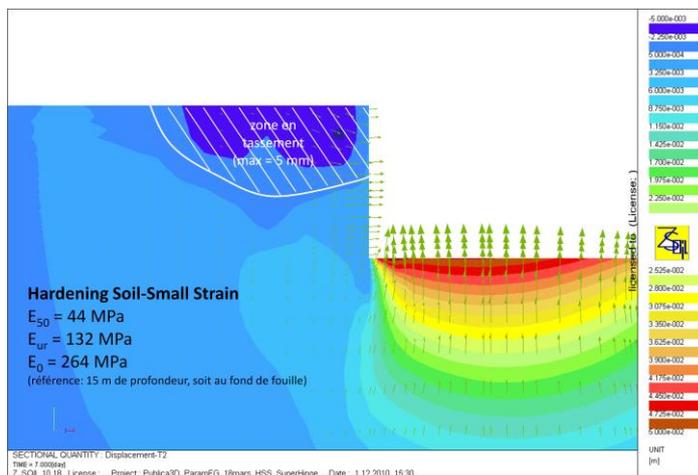


Figure 14. Déplacements verticaux et vecteurs déplacements dans la coupe, modèle HS-Small Strain



GeoMod ingénieurs conseils SA
 Av. des Jordils 5
 CH-1006 Lausanne
 T : +41 21 311 34 30
 www.geomod.ch
 info@geomod.ch