

La méthode des éléments finis : intérêt des calculs tridimensionnels

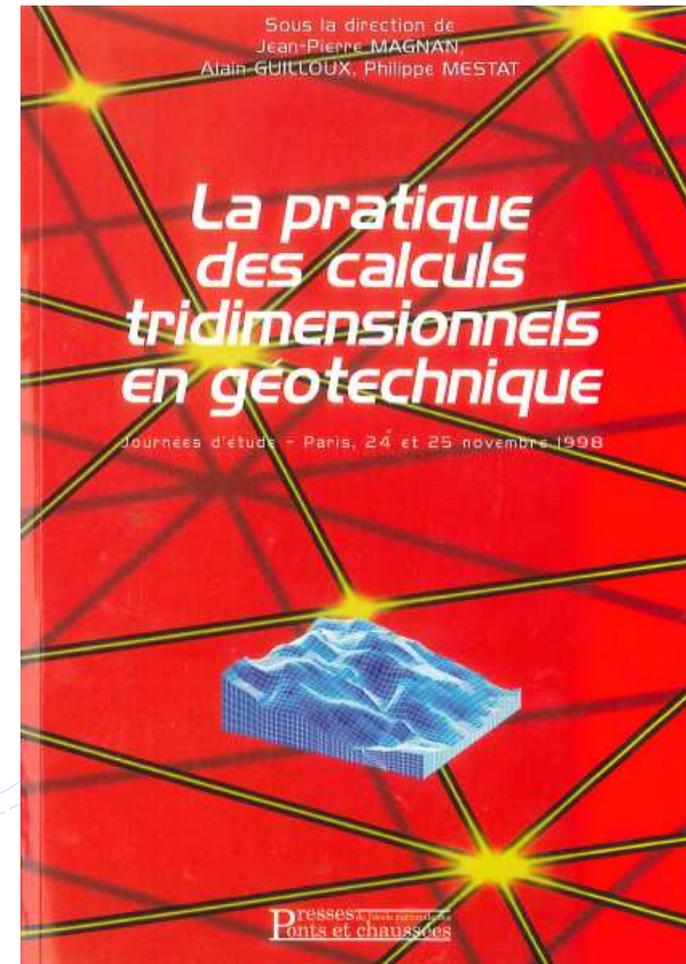
Alain GUILLOUX
Terrasol

Journées d'études « La pratique des éléments finis tridimensionnels en géotechnique » - Paris 1998

« ... l'application de méthodes de calcul complexes nécessite plus de paramètres que ceux que l'on a déterminé au cours du XX^{ème} siècle ... et, dans beaucoup de cas, le calcul tridimensionnel se retrouve tellement simplifié qu'il ne fait guère plus que le calcul bidimensionnel ou l'application d'abaques.

...

Jean Pierre Magnan



Journées d'études « La pratique des éléments finis tridimensionnels en géotechnique » - Paris 1998

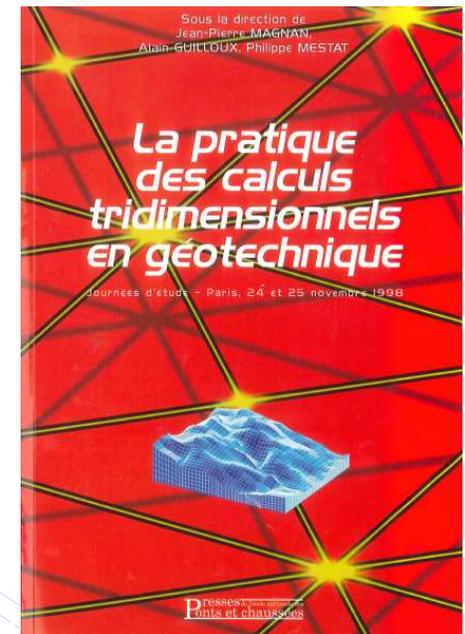
« ... L'avenir du calcul du calcul tridimensionnel dépend pour beaucoup des évolutions :

- *du contenu des reconnaissances ...*
- *des types d'essais qu'il sera possible de réaliser*
- *de la représentativité des résultats de ces essais par rapport au comportement des terrains naturels ...*
- *de la description détaillée du déroulement des travaux de construction ...*

...Validation de toutes les méthodes de calcul par rapport au comportement réel ...

... un tel travail demandera de 5 à 10 années ...

Plus probablement le calcul tridimensionnel restera réservé à la recherche et aux études d'ouvrages complexes et importants ... »



Jean Pierre

Pourquoi pas le 3D ?

- Construction du modèle très lourde
- Nombre de phases parfois très importante
- Exploitation des résultats complexe
- Limitations des lois de comportement des sols
- Représentation des interfaces

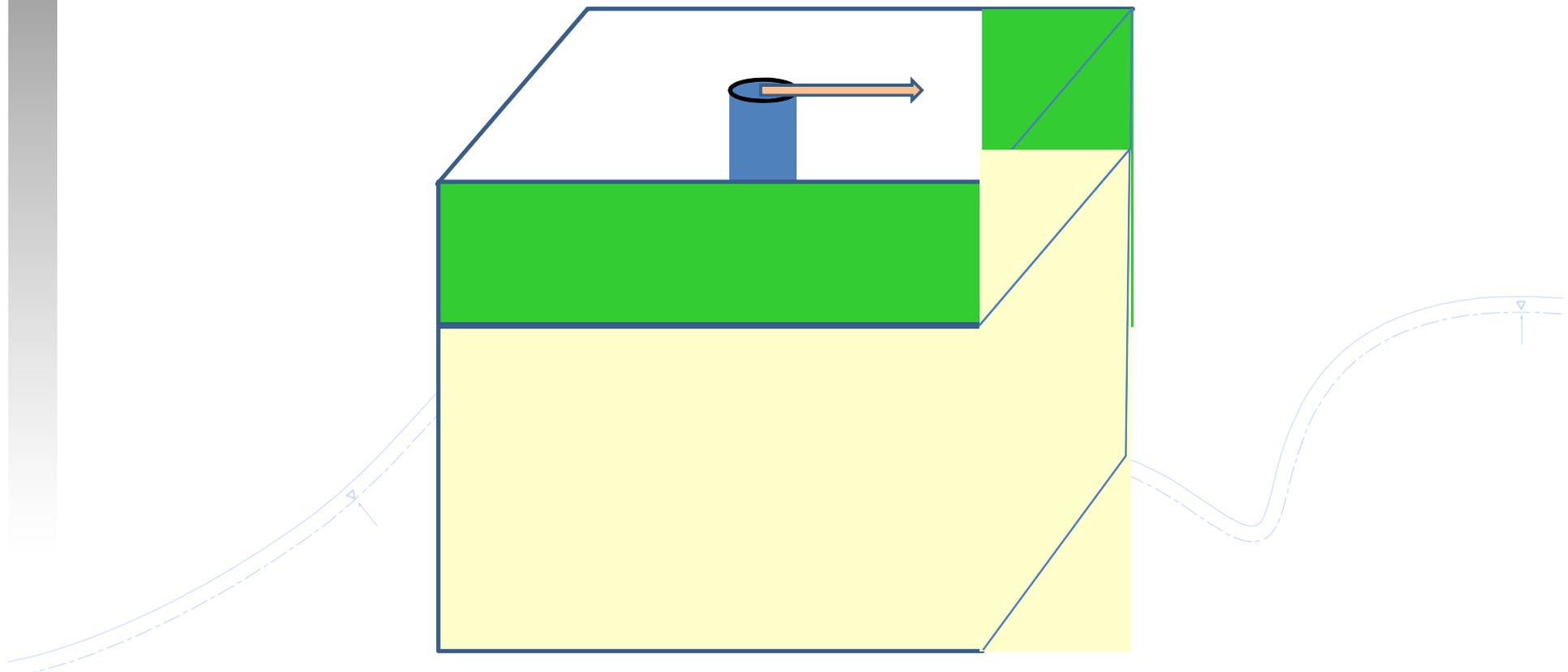
Donc on recherche à modéliser en 2D des problèmes 3D, en simplifiant les problèmes :

- Modèles axisymétriques
- Calculs 2D « croisés » dans plusieurs directions
- Modélisations 2D avec « chargement » tenant compte du phénomène 3D : méthode convergence - confinement en tunnels

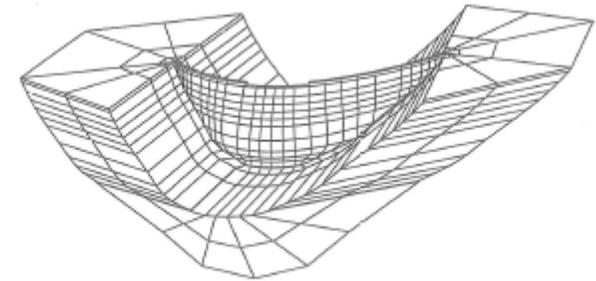
Mais ça ne marche pas toujours ...

Pourquoi le 3D ?

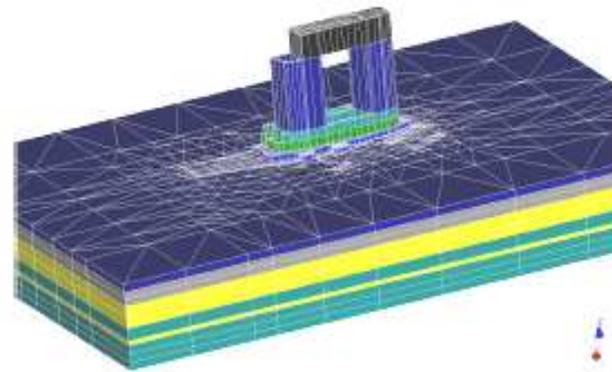
- Chargement « asymétrique » : pieu sollicité horizontalement (si on ne connaît pas les méthodes analytiques !)



- Modélisation proche de la géométrie réelle :
 - Des terrains : hétérogénéités géologiques
 - De l'ouvrage : géométrie 3D (barrages voûtes, intersections puits tunnel ou tunnel/tunnel)
 - Du chargement : charges et raideurs non homogènes (ex : tour avec noyau central et appuis extérieurs)

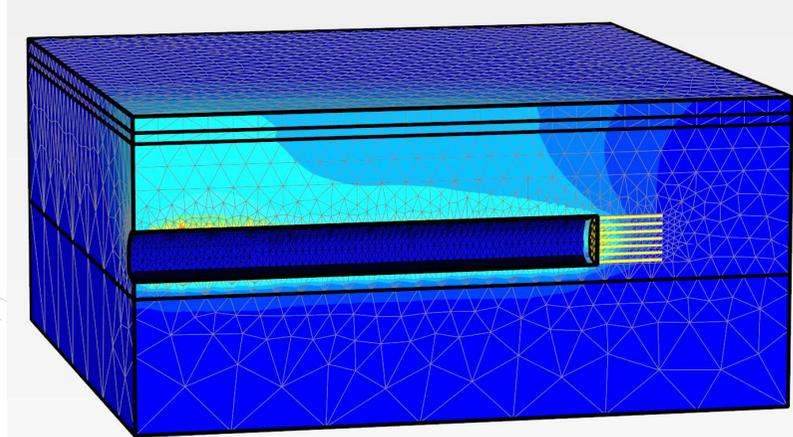
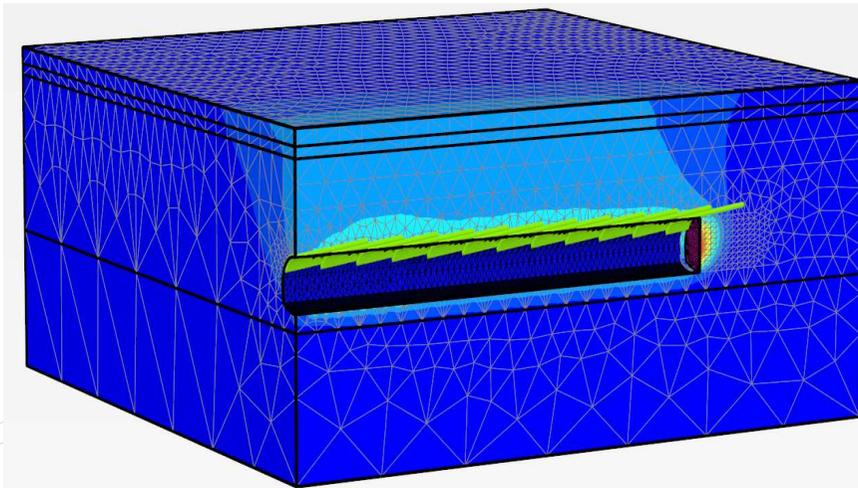
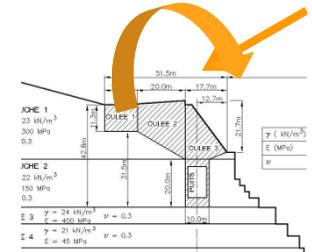
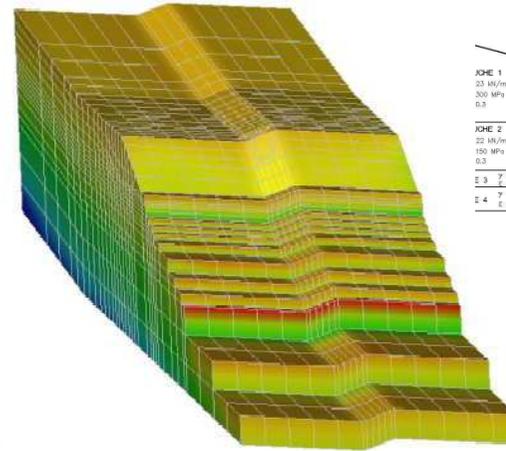


0 100



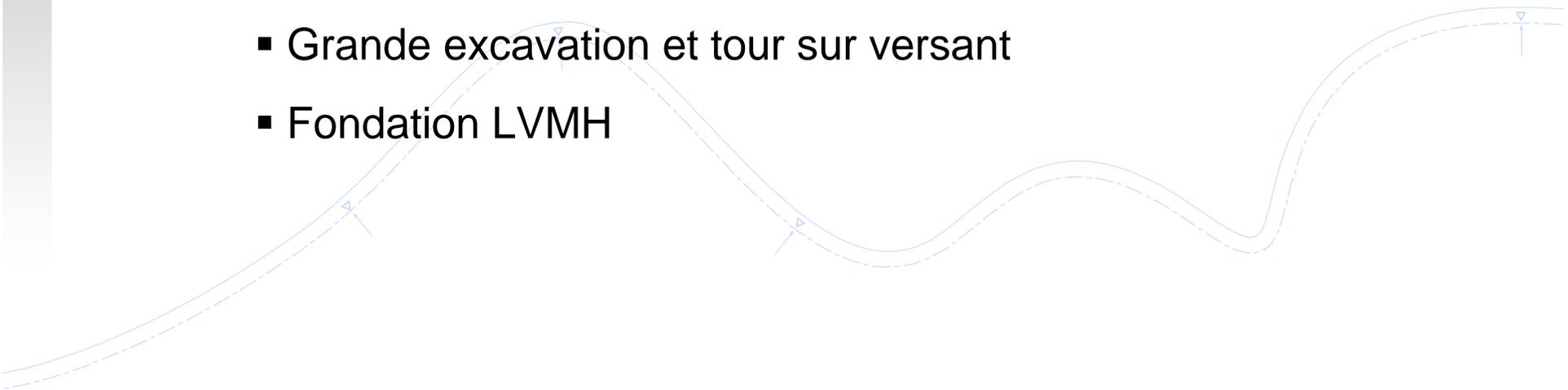
■ Phénomènes à modéliser réellement 3D :

- fondations isolées sur versant
- écoulements hydrauliques vers/à partir de zones localisées
- front de taille de tunnels
- interaction entre éléments de renforcement linéaire et terrain 3D ...



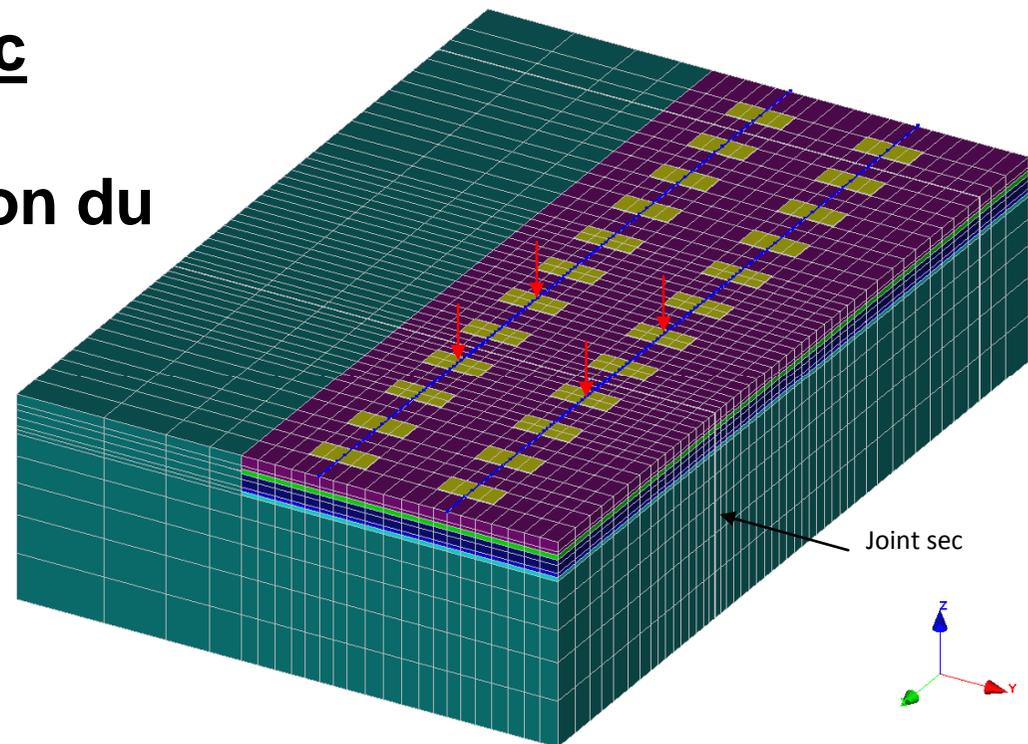
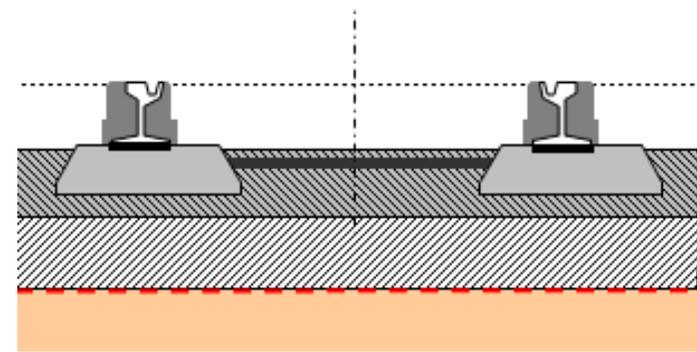
Quelques exemples pour illustrer l'intérêt et les limites des modélisations 3D:

- Plate-forme de voies de tramway
- Excavation de longueur \approx largeur
- Tour à La Défense
- Ouvrages sur cavités
- Grande excavation et tour sur versant
- Fondation LVMH

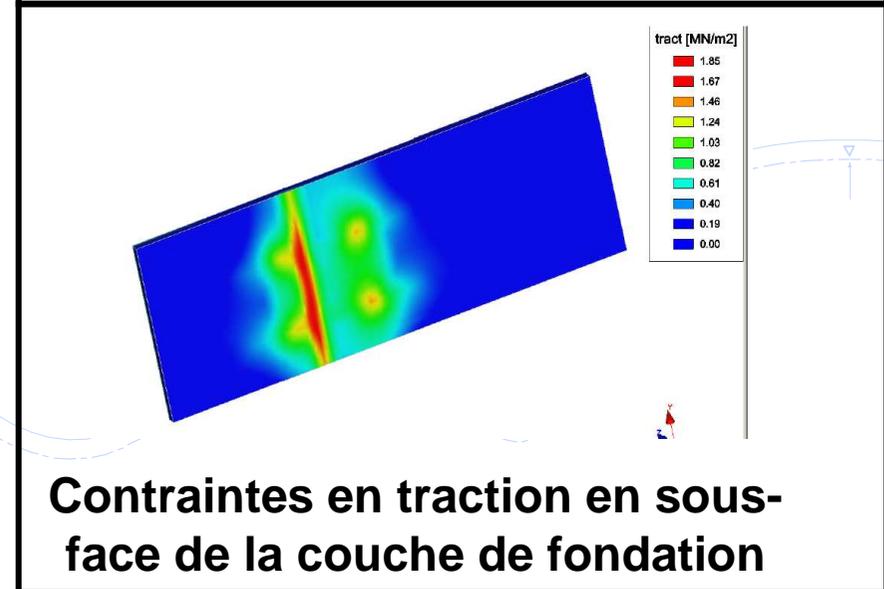
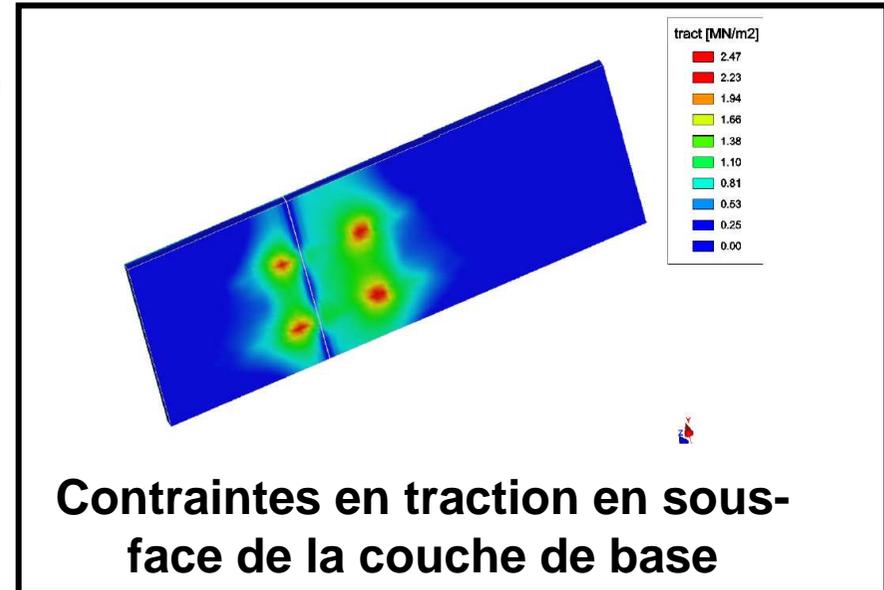
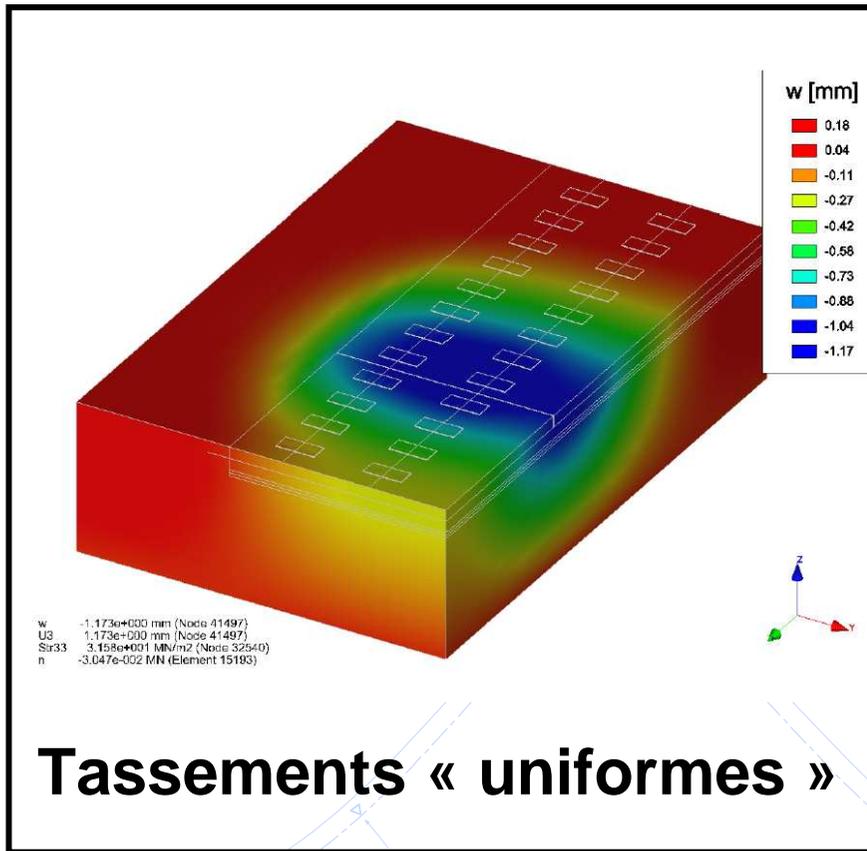


Plateformes de tramway (1)

- Charges/fondations ponctuelles
- Problème géométriquement simple : 2 couches de chaussée « béton » avec joints
- Recherche d'optimisation du dimensionnement



Plateformes de tramway (2)

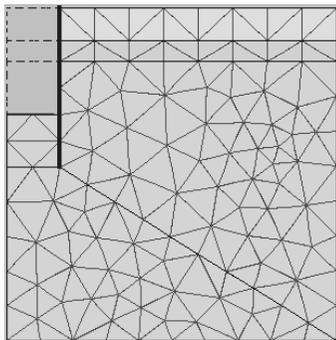


Calculs du soulèvement dû à une excavation

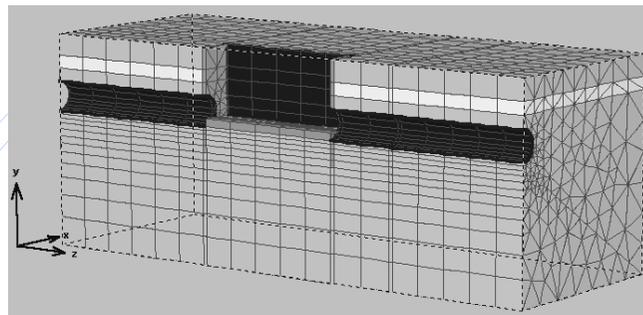
Exemple : extension des stations du métro de Toulouse

Question posée : risque de soulèvement en fond d'excavation lors de l'extension de 15 m d'une station existante de métro de 55 m et effet sur le tunnel existant

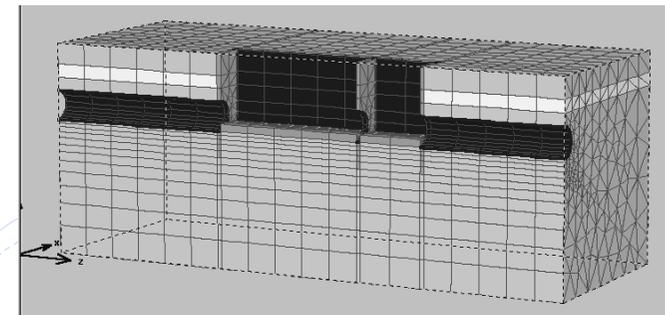
- 3 modèles de calcul : un 2D et deux 3D
- 2 lois de comportement : élastique linéaire Mohr Coulomb et Hardening Soil (élasticité non linéaire et écrouissage) avec $E_{50HS} = 1.1 E_{MC}$ et $E_{ur} = 3 * E_{50HS}$



Calcul 2D ($L = \infty$)



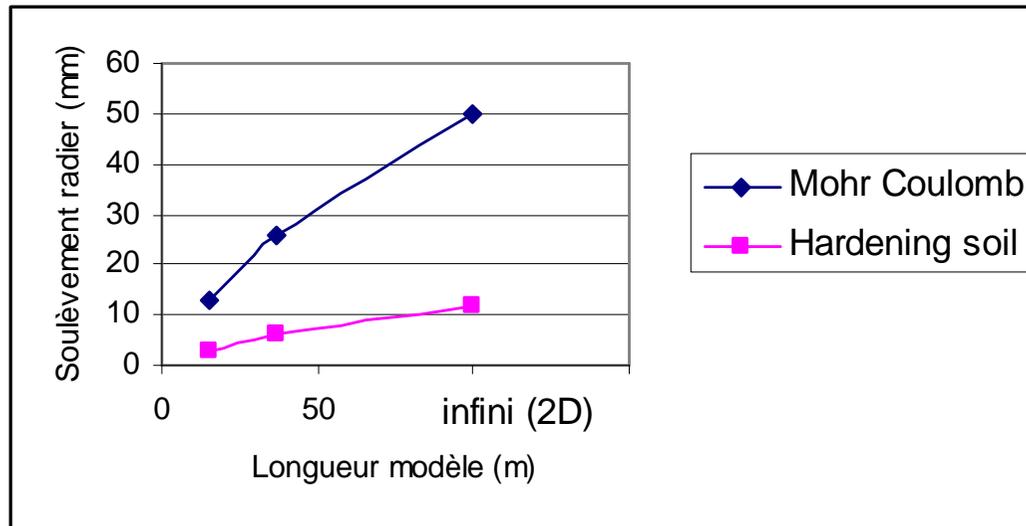
Calcul 3D station existante
($L = 55$ m)



Calcul 3D extension
($L = 55 + 15$ m)

Résultats et apport du 3D :

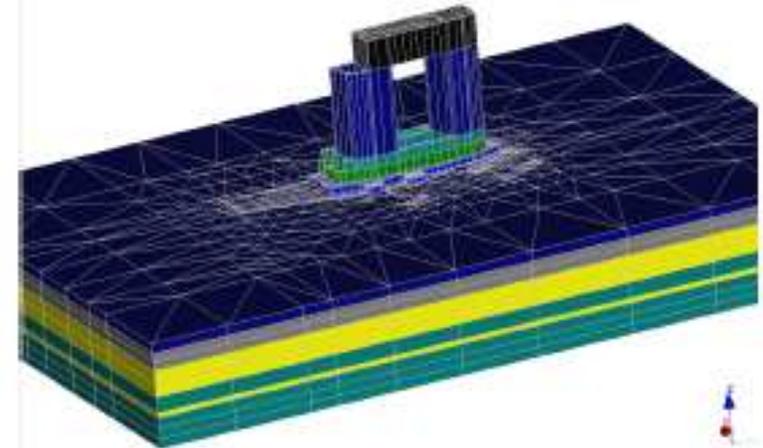
- L'effet géométrique 3D divise par 4 les soulèvements entre un modèle 2D et le modèle 3D « réel »



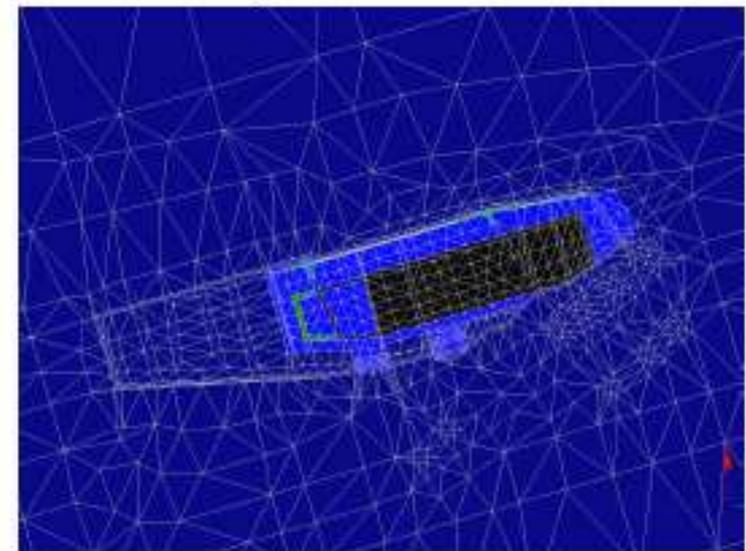
- Et l'effet de la loi de comportement réduit aussi par 4 les soulèvements entre un modèle linéaire et un modèle non linéaire
- Au total une « bonne modélisation » réduit de 17 fois le soulèvement : de 50 à 3 mm !

Tour Phare à La Défense

- **Un modèle EF 3D :**
 - **géométrie complexe de la tour**
 - **terrain stratifié : « dalle » de Calcaire Grossier, horizons argileux profonds**
- **Loi de comportement « simple » mais phasage de travaux et comportement différé pris en compte par passage du CT au LT, des modules appropriés dans les horizons argileux (selon niveau de contraintes)**



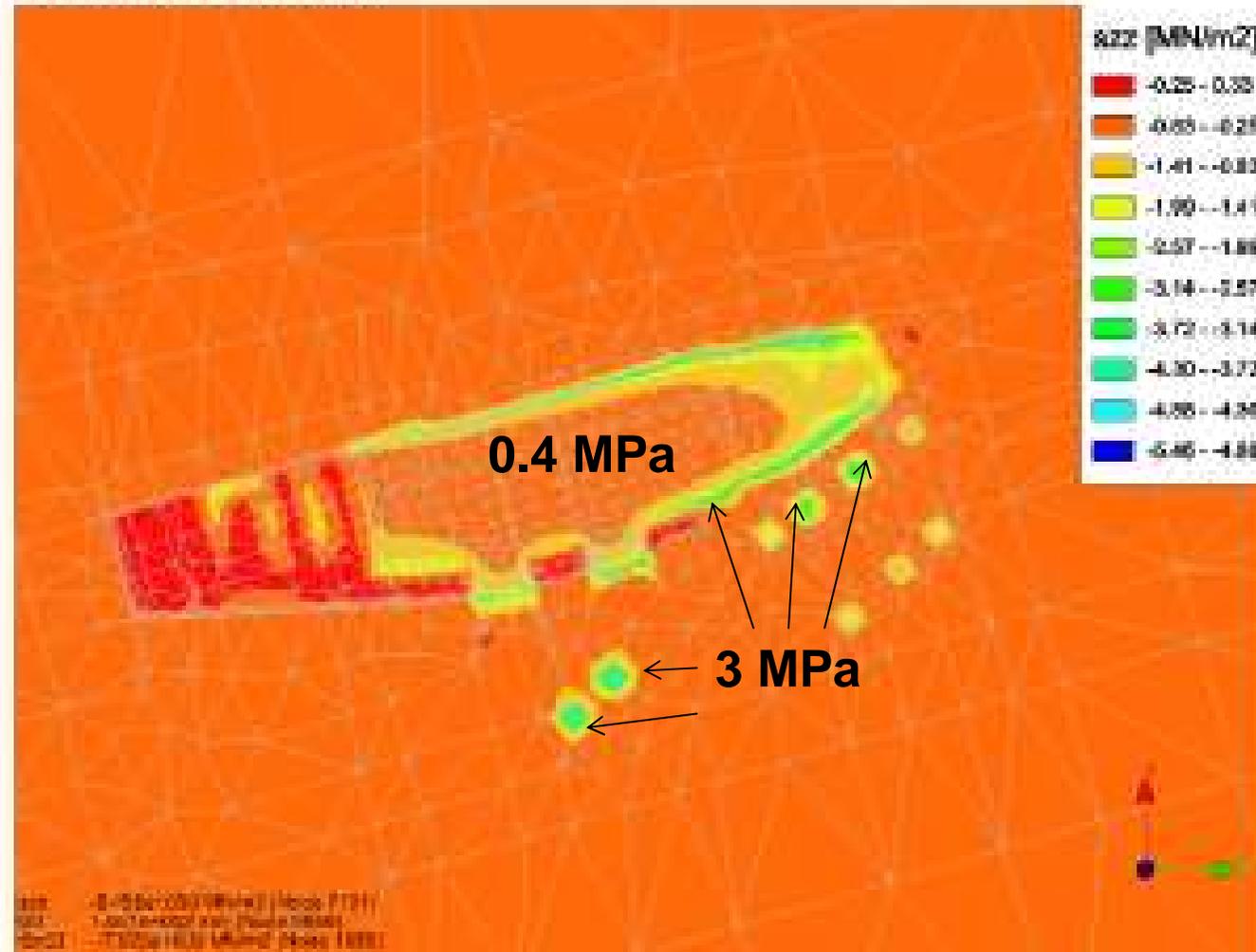
Vue globale du modèle CESAR-3D



Vue de dessus du maillage

Tour Phare : contraintes sous les fondations

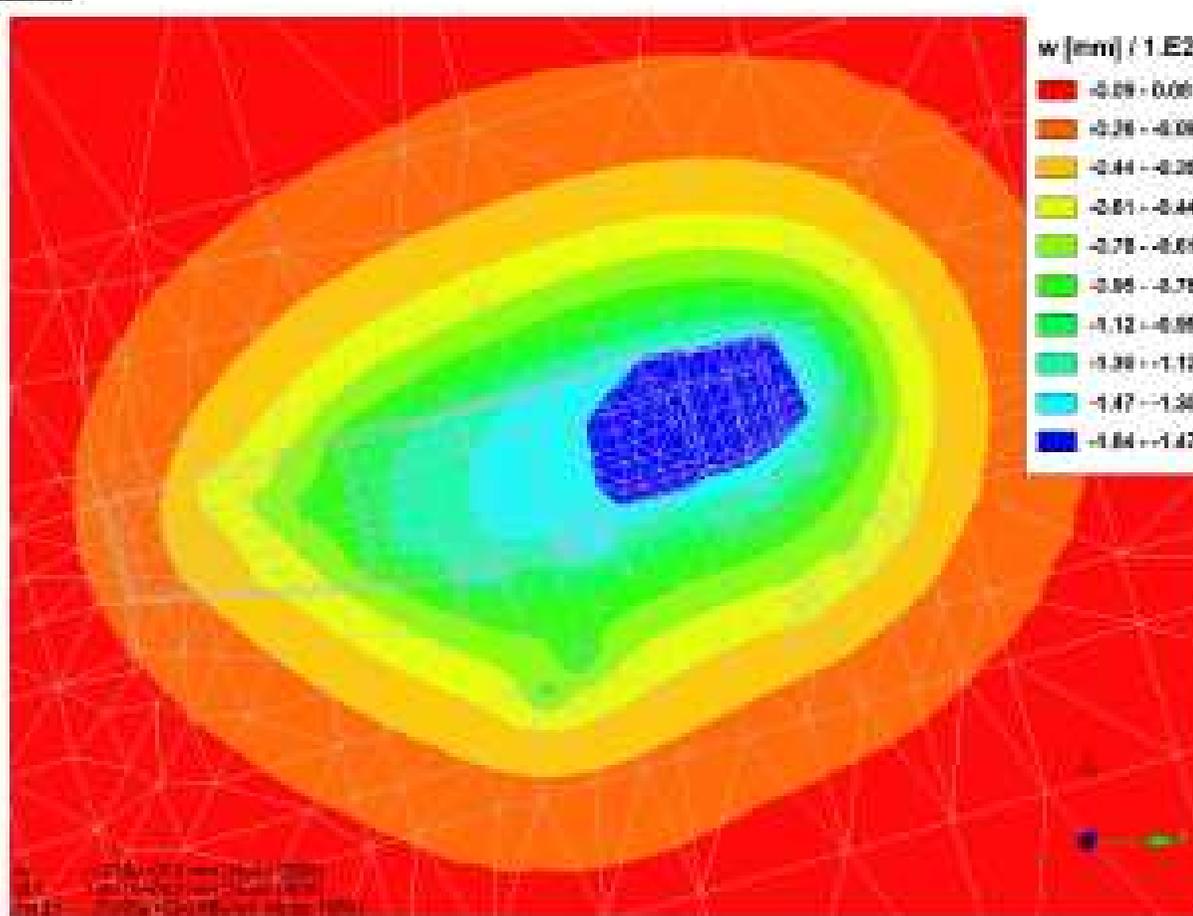
Contraintes effectives verticales



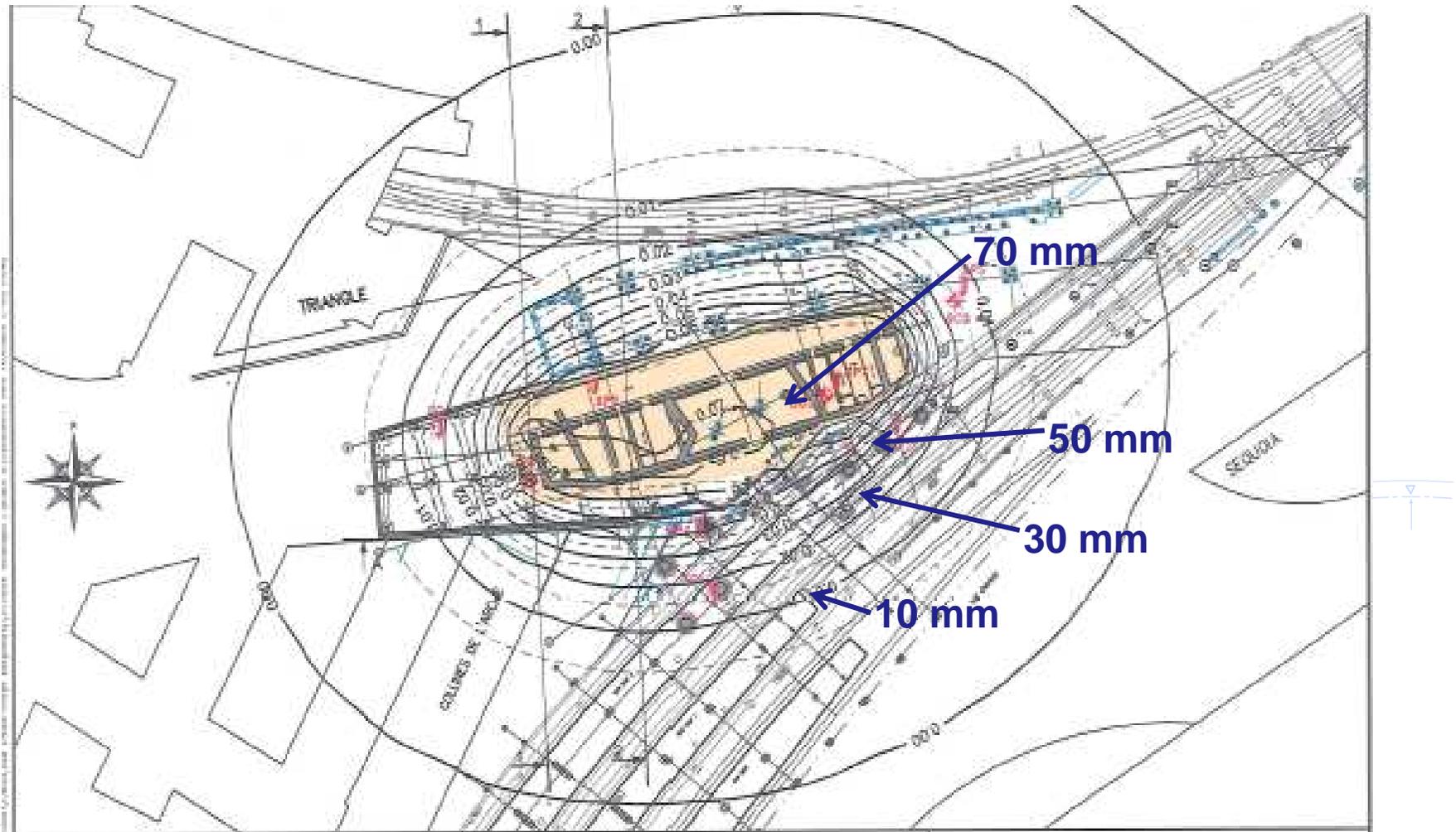
Tour Phare : tassements

... un phénomène de « cuvette globale »

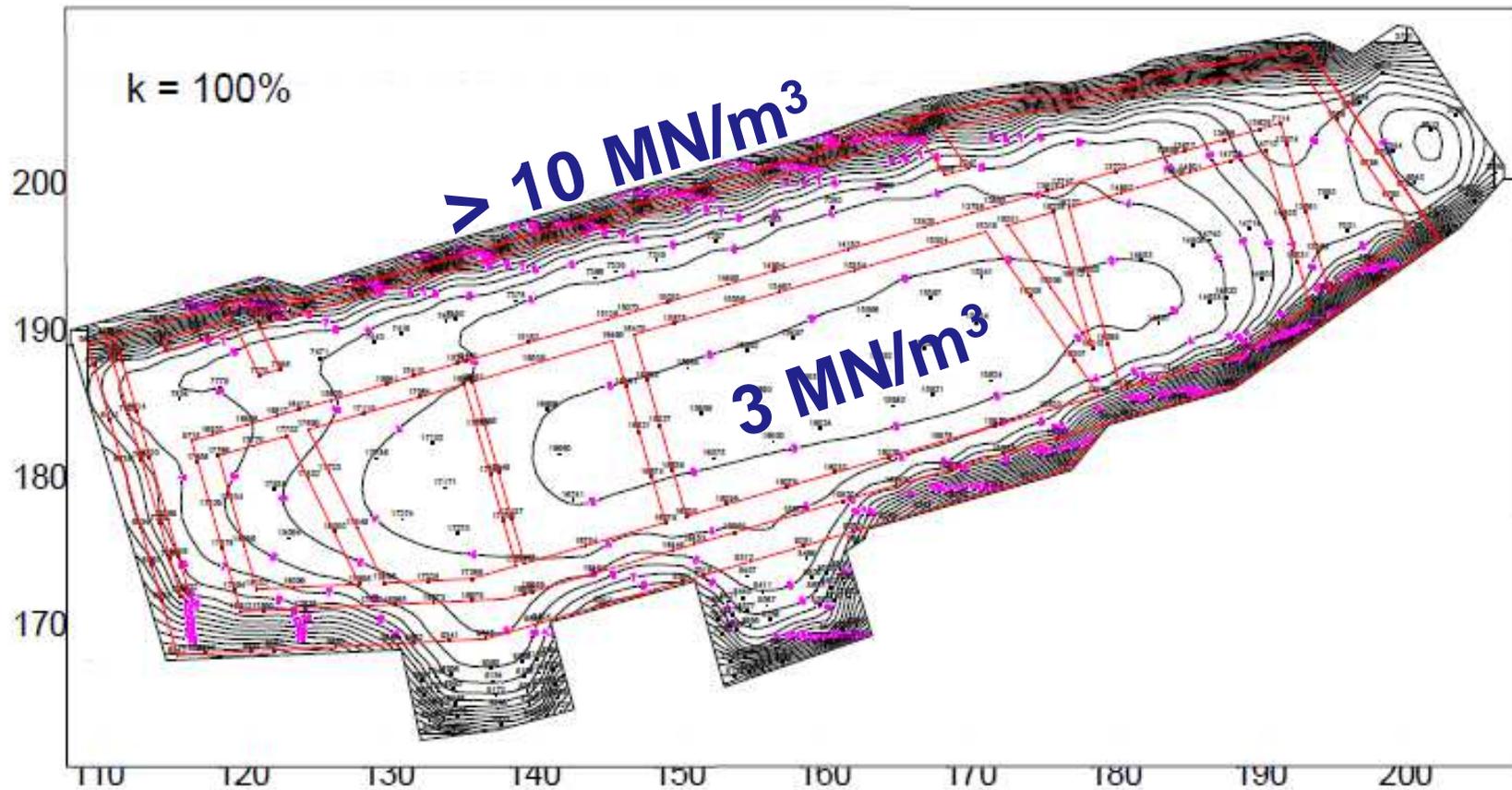
Tassements



Tour Phare : effets sur les avoisinants

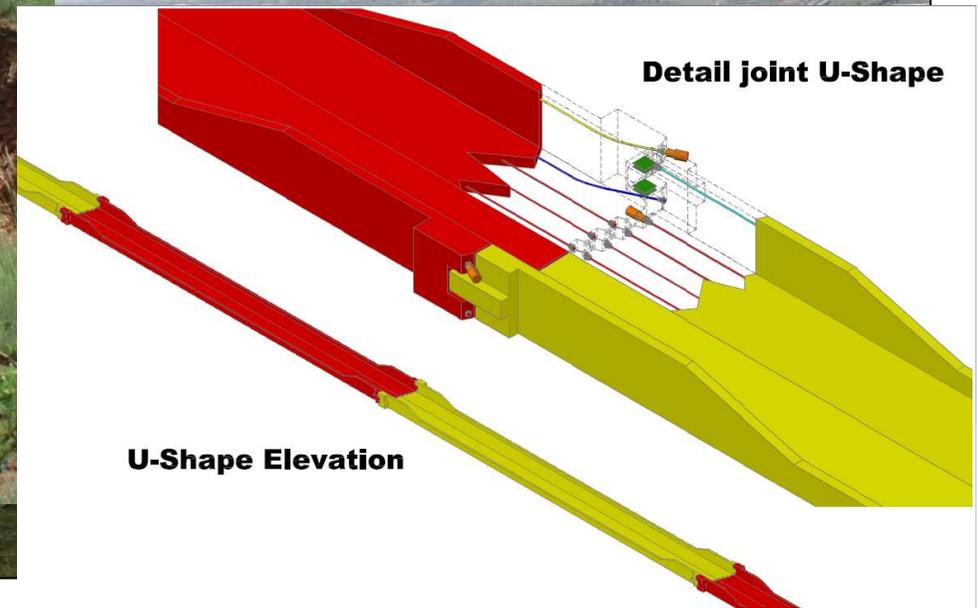


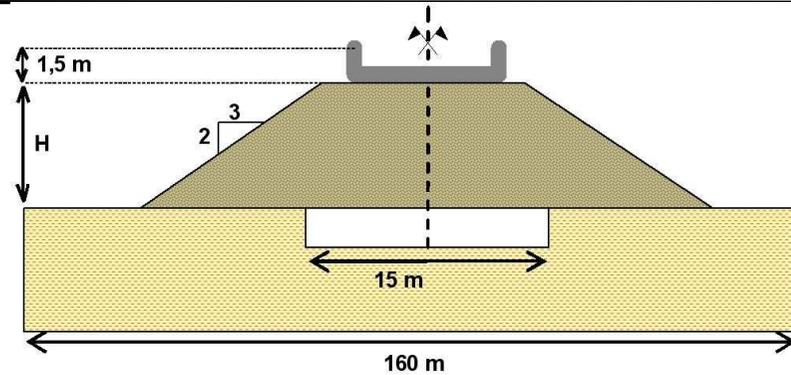
Tour Phare : carte des raideurs pour les calculs structuraux



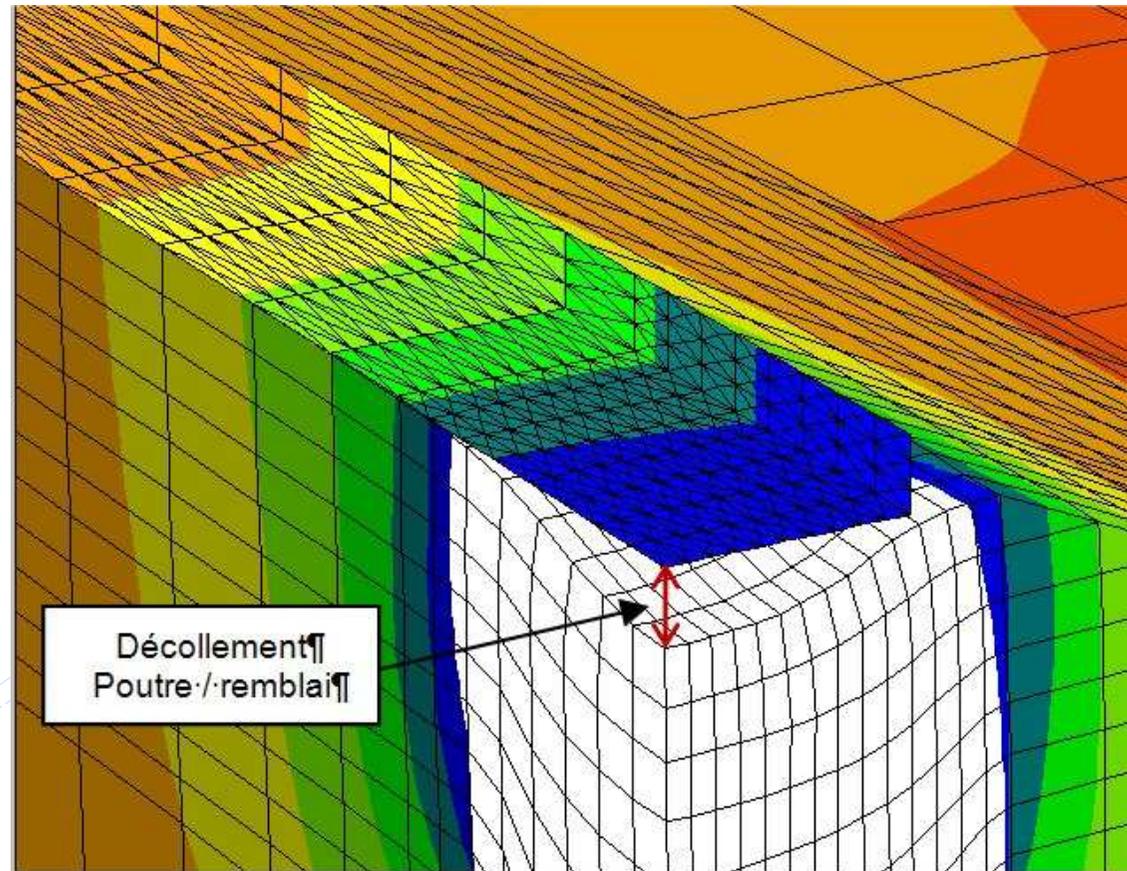
Projet Gautrain (Afrique du sud) en zone karstique

- Fontis de calcul : 15 m de diamètre
- Solution retenue : poutre en U sur remblai (180 m)



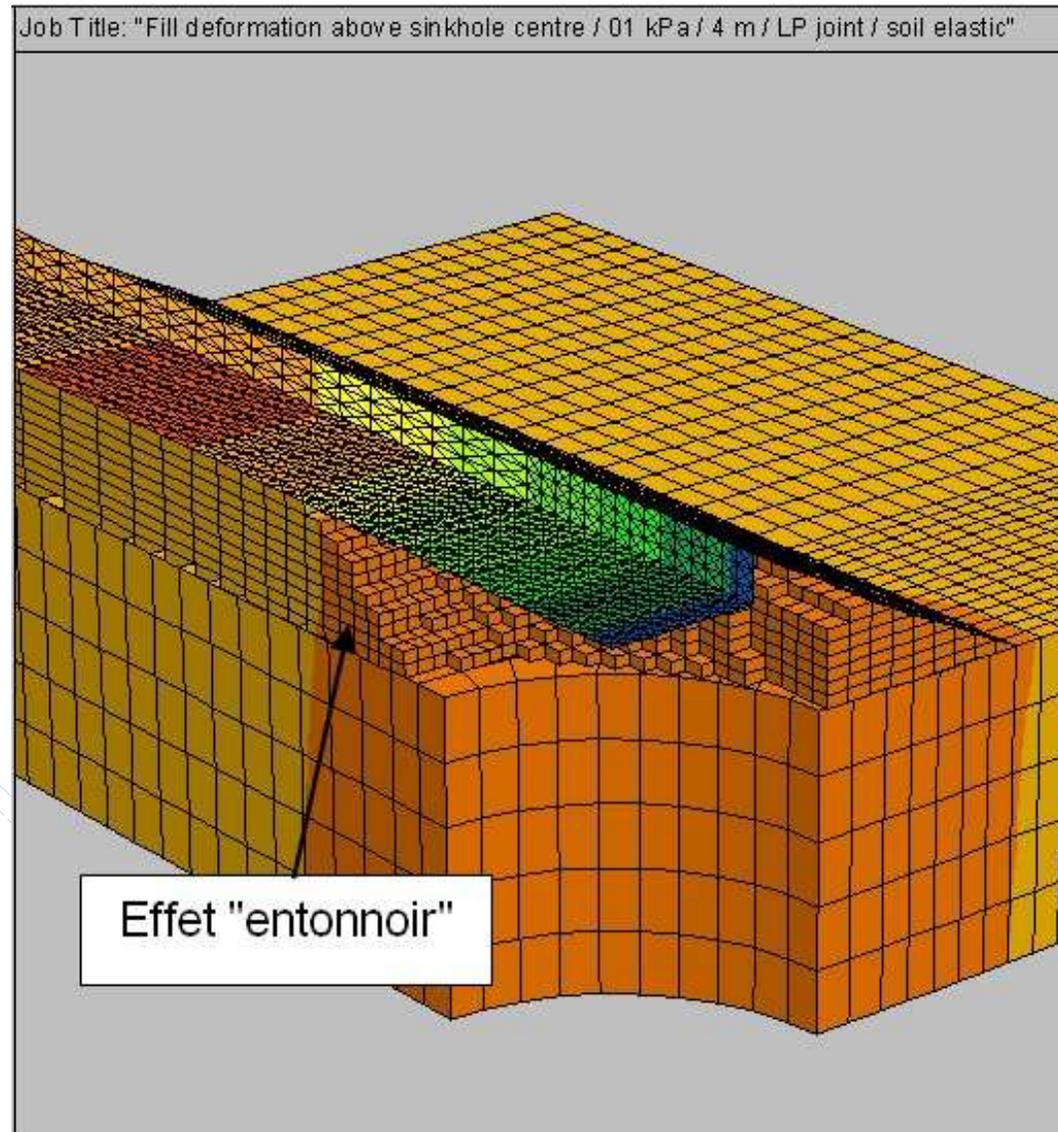


Calcul avec procédure pour
« éliminer » les éléments qui
« tombent » : mise en
évidence du décollement



Résultats et apports du 3D :

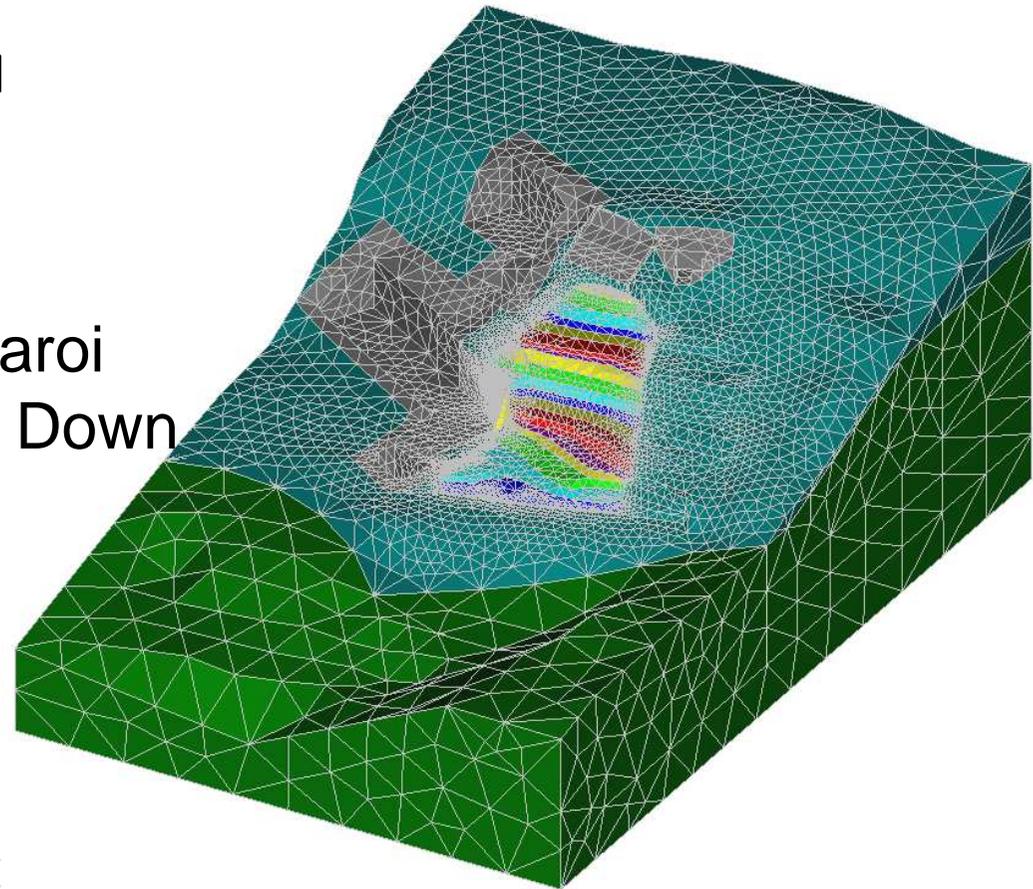
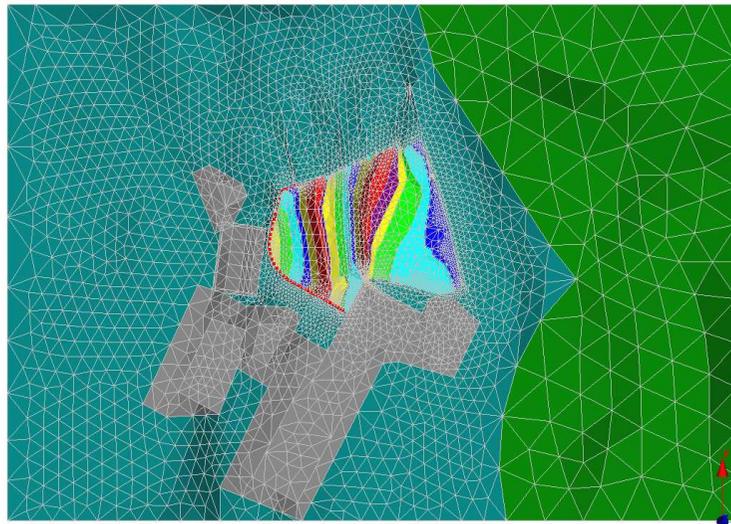
- effet entonnoir asymétrique dans le remblai
- études paramétriques : H remblai, cohésion, raideurs pour le calcul de structure



Monaco : tour Odéon

Un cas extrême :

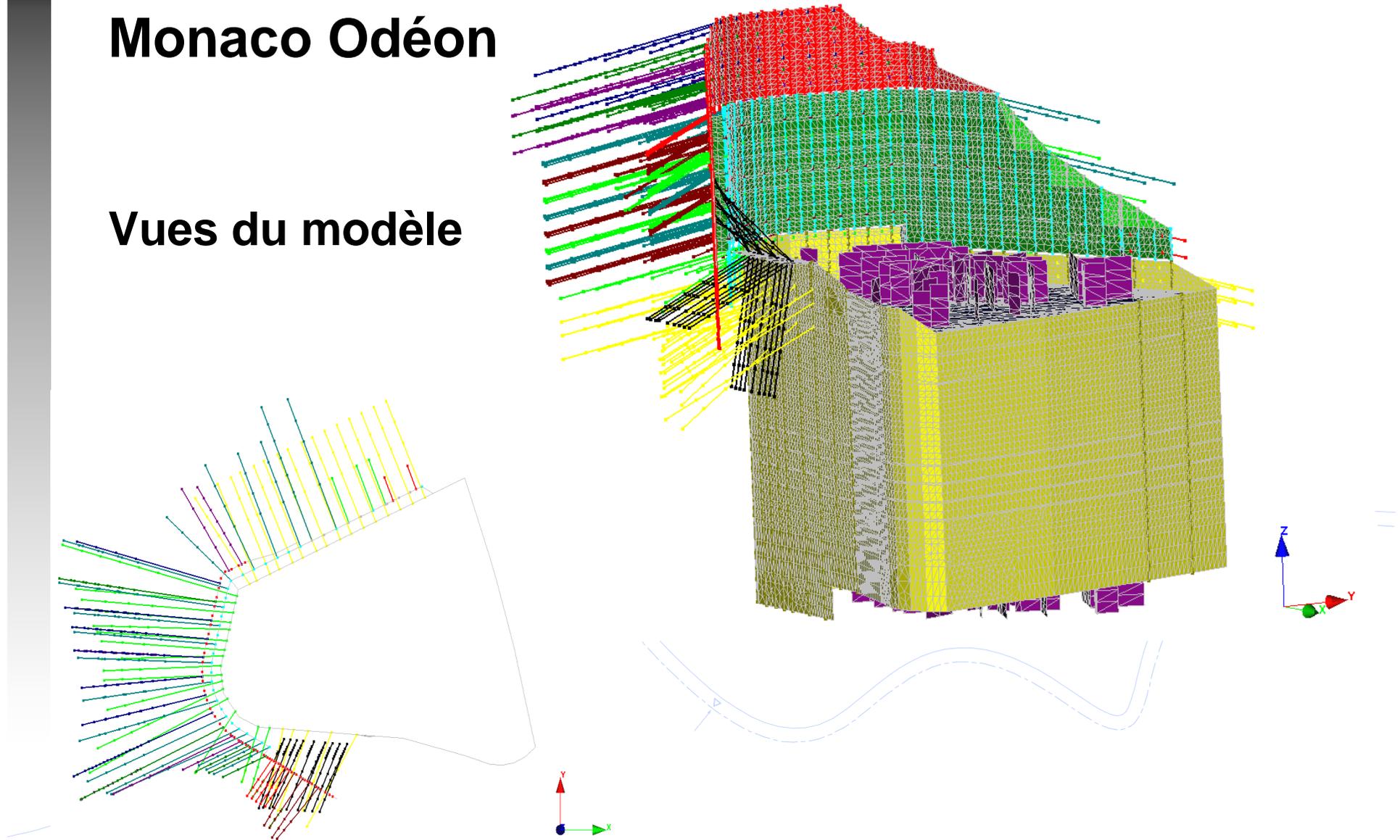
- Excavation de 70 m : berlinoises tirantées et paroi moulée excavation Up & Down
- 57 phases de calcul



- Plus de 500 tirants, pieux et micropieux
- 695 000 éléments, 107 000 nœuds

Monaco Odéon

Vues du modèle



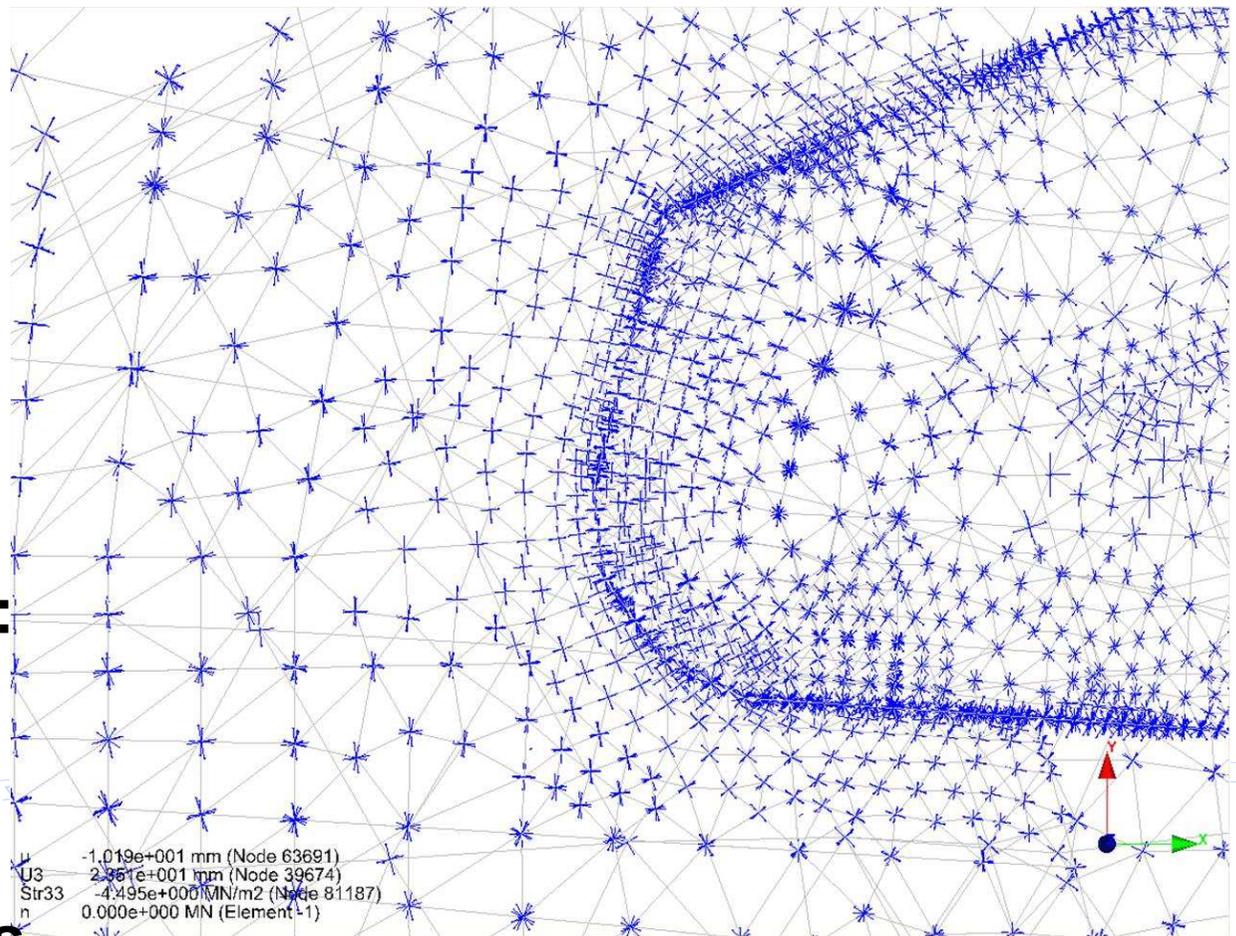
Monaco Odéon

Objectifs du calcul :

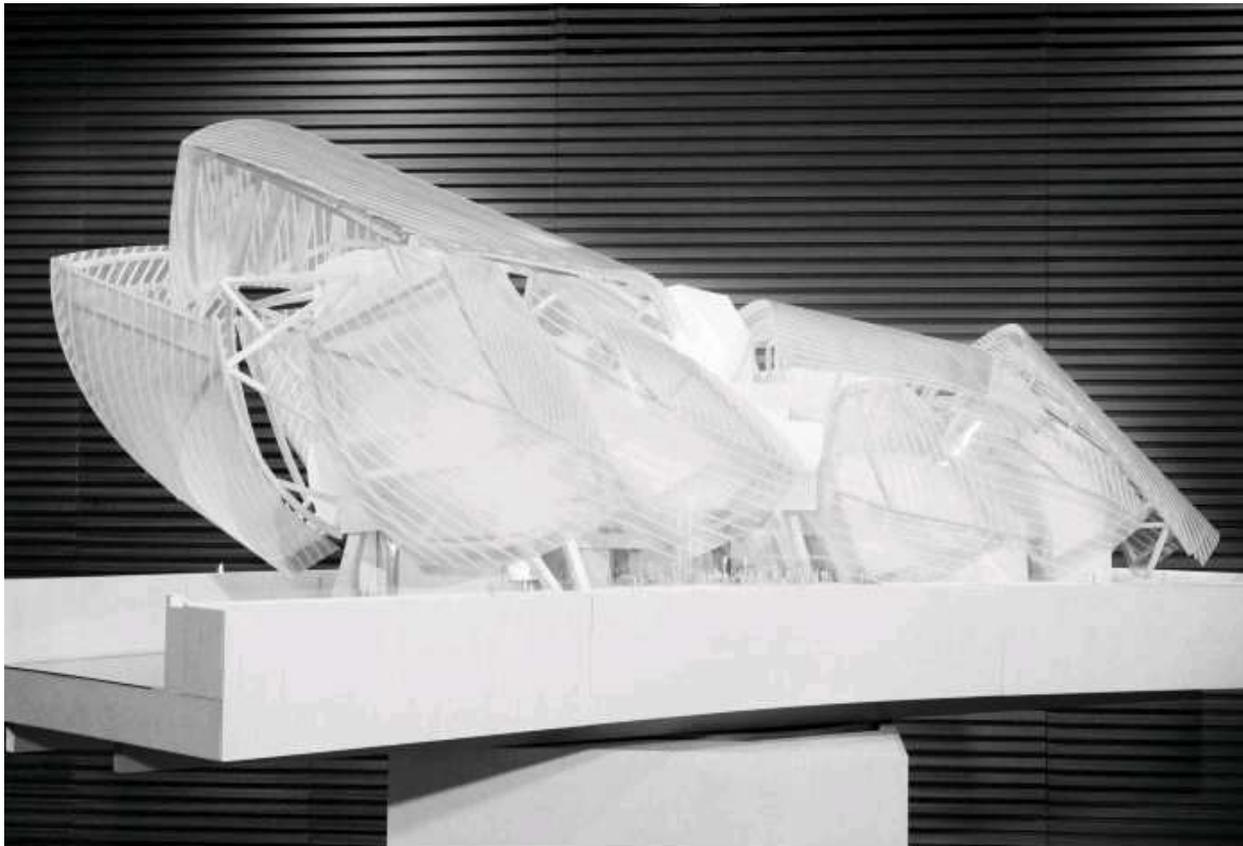
-Déplacements des avoisinants

-Reports de charges autour de l'excavation

-Stabilité générale (3D : effet « pieu »)



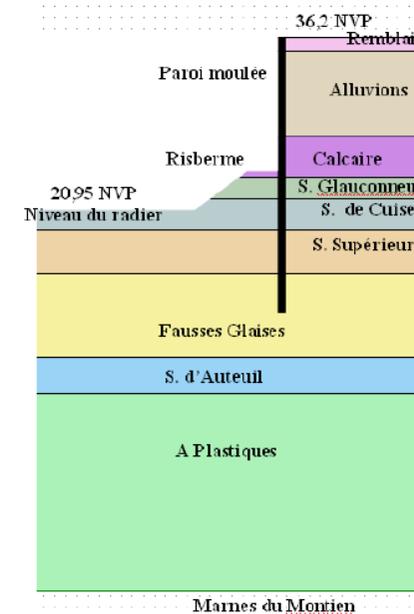
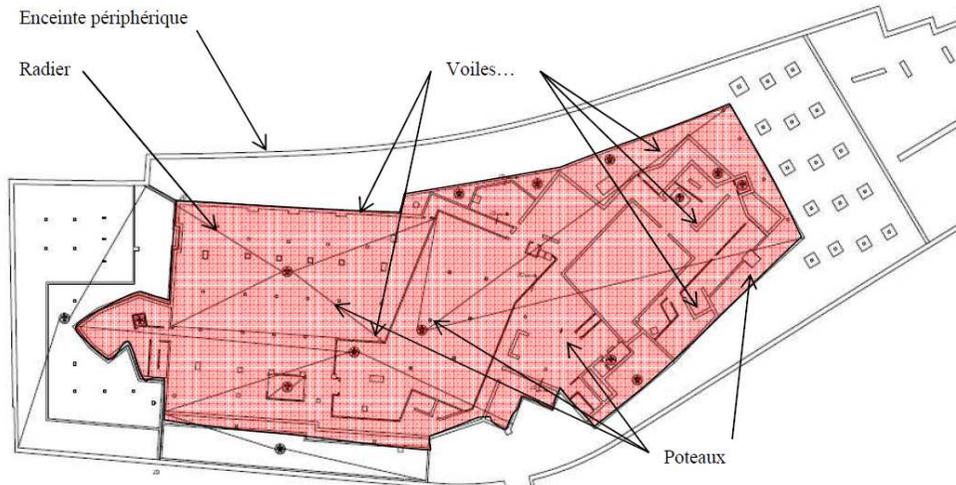
La Fondation LVMH pour la Création



© Emanuele SCORCELLETTI - Fondation Louis Vuitton pour la creation

- Ouvrage 3D
- Déchargement global des sols au droit de l'ouvrage
- Niveaux argileux sous la cote de fondation

Modélisation



Phase PROJET

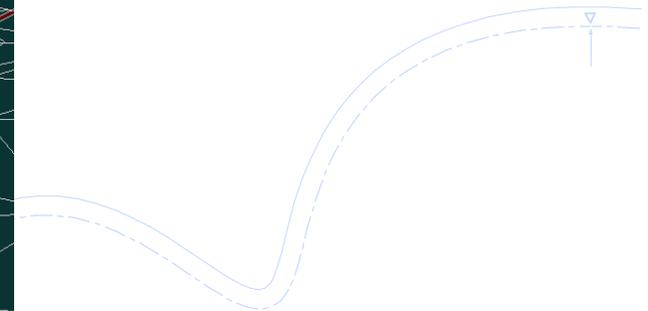
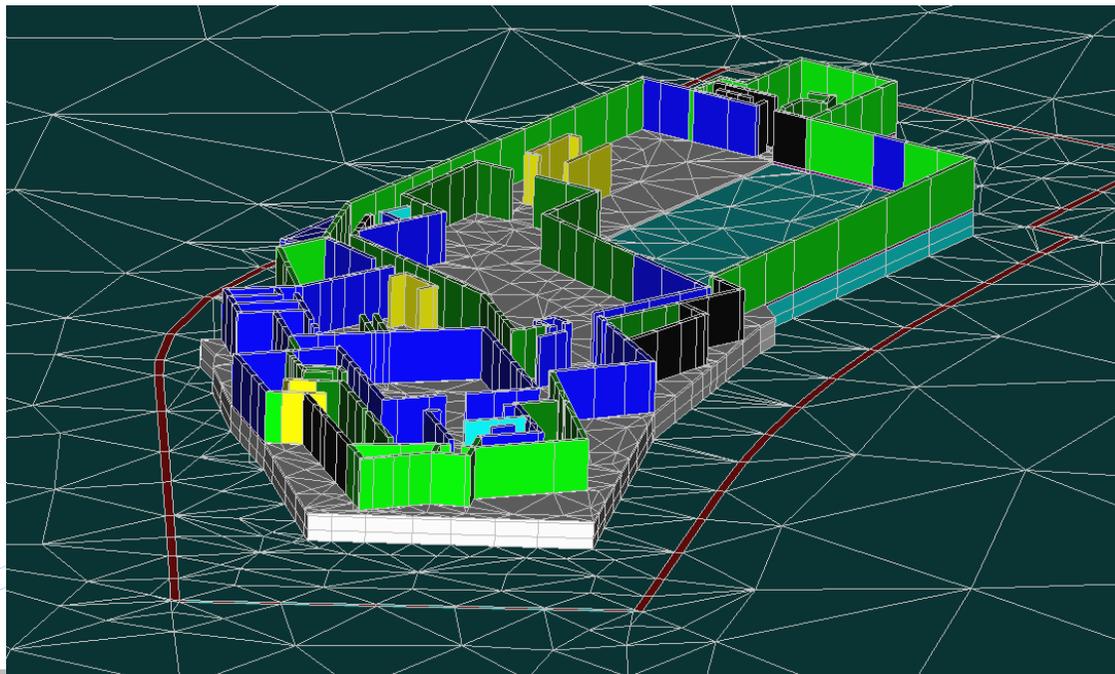
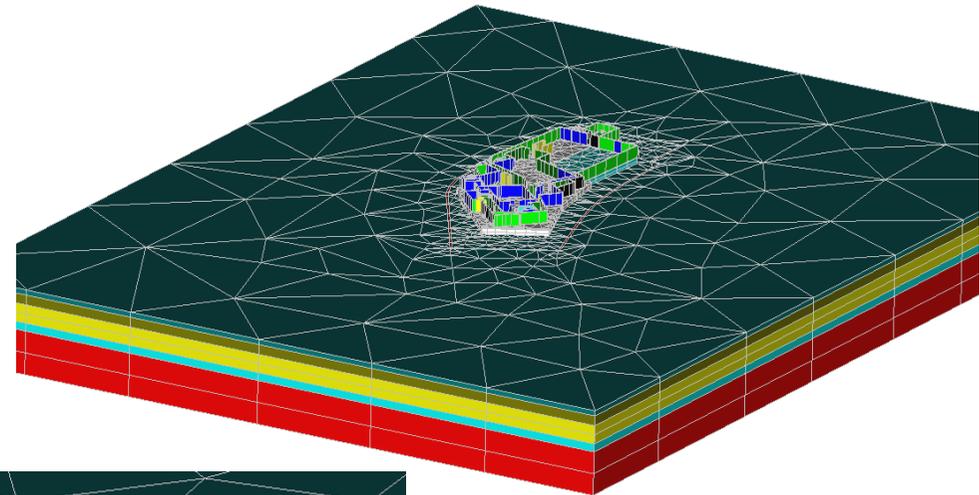
- Modèle EF3D (Cesar LCPC)
- Lois de comportement simples
- Prise en compte « manuelle » de la consolidation

Phase EXECUTION

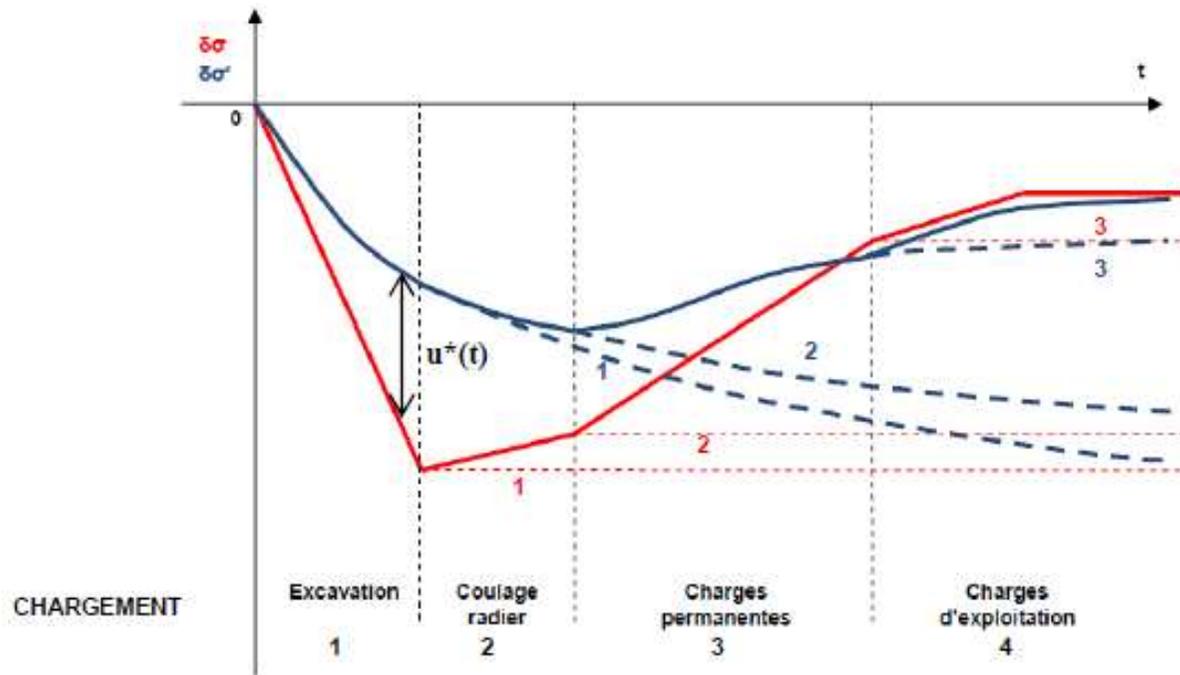
- Lois de comportement avancées
- Modélisations EF2D (Plaxis)

Modélisation 3D

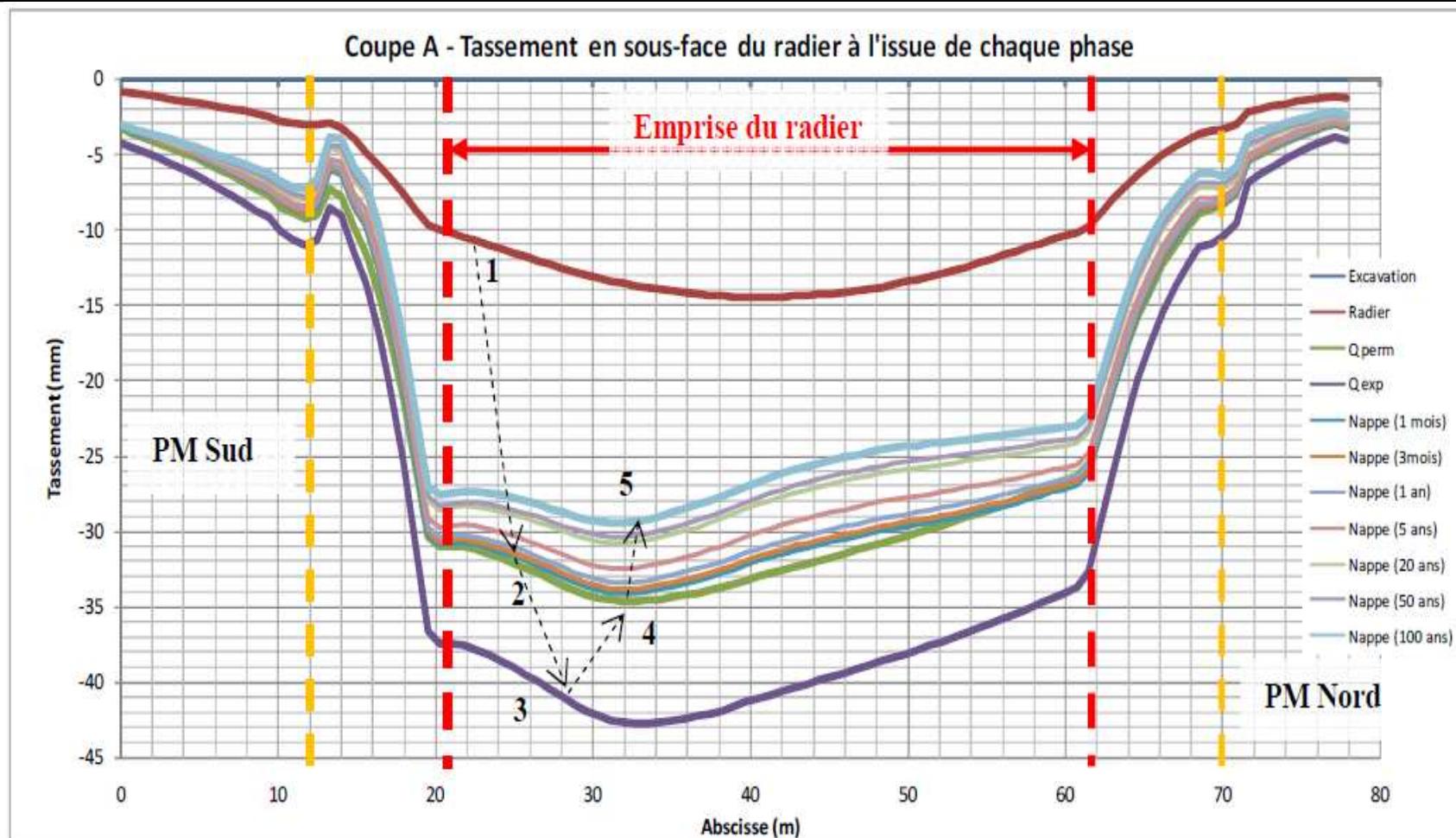
- **Modèle complexe (120 000 Nœuds)**
- **Limitation à des lois de comportement simples:**
 - Elasticité linéaire isotrope
 - Plasticité de Mohr Coulomb



Evolution des contraintes totales et effectives



- Choix des paramètres de la loi Mohr Coulomb : sables à partir des triaxiaux et des pressiomètres et argiles à partir des oedomètres + chargement/déchargement
- Prise en compte du phasage et de la consolidation progressive des couches argileuses



Phase

Durée

Excavation

8 mois

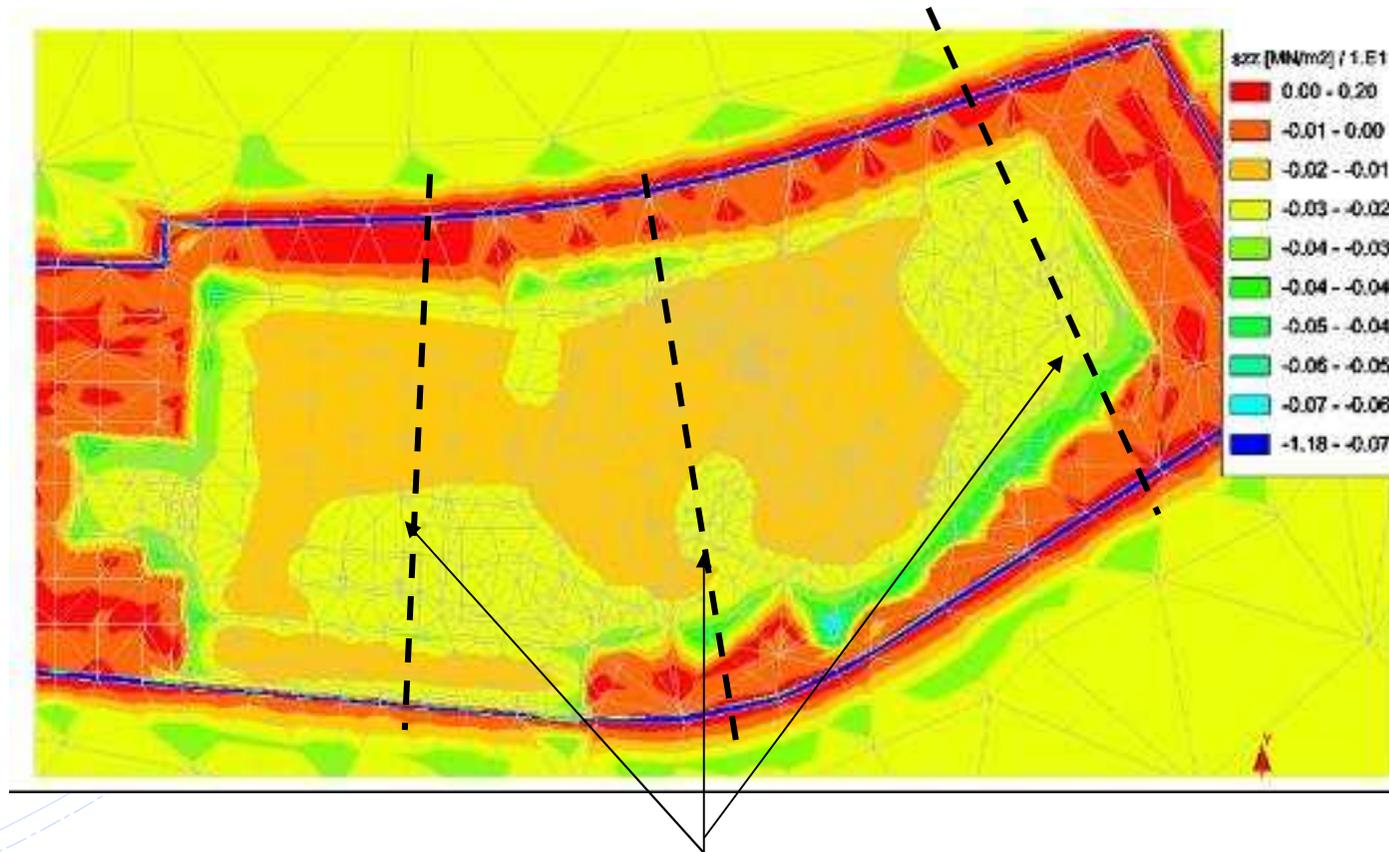
Q_{perm}

2 ans

Q_{exp} + arrêt pompages

3 mois

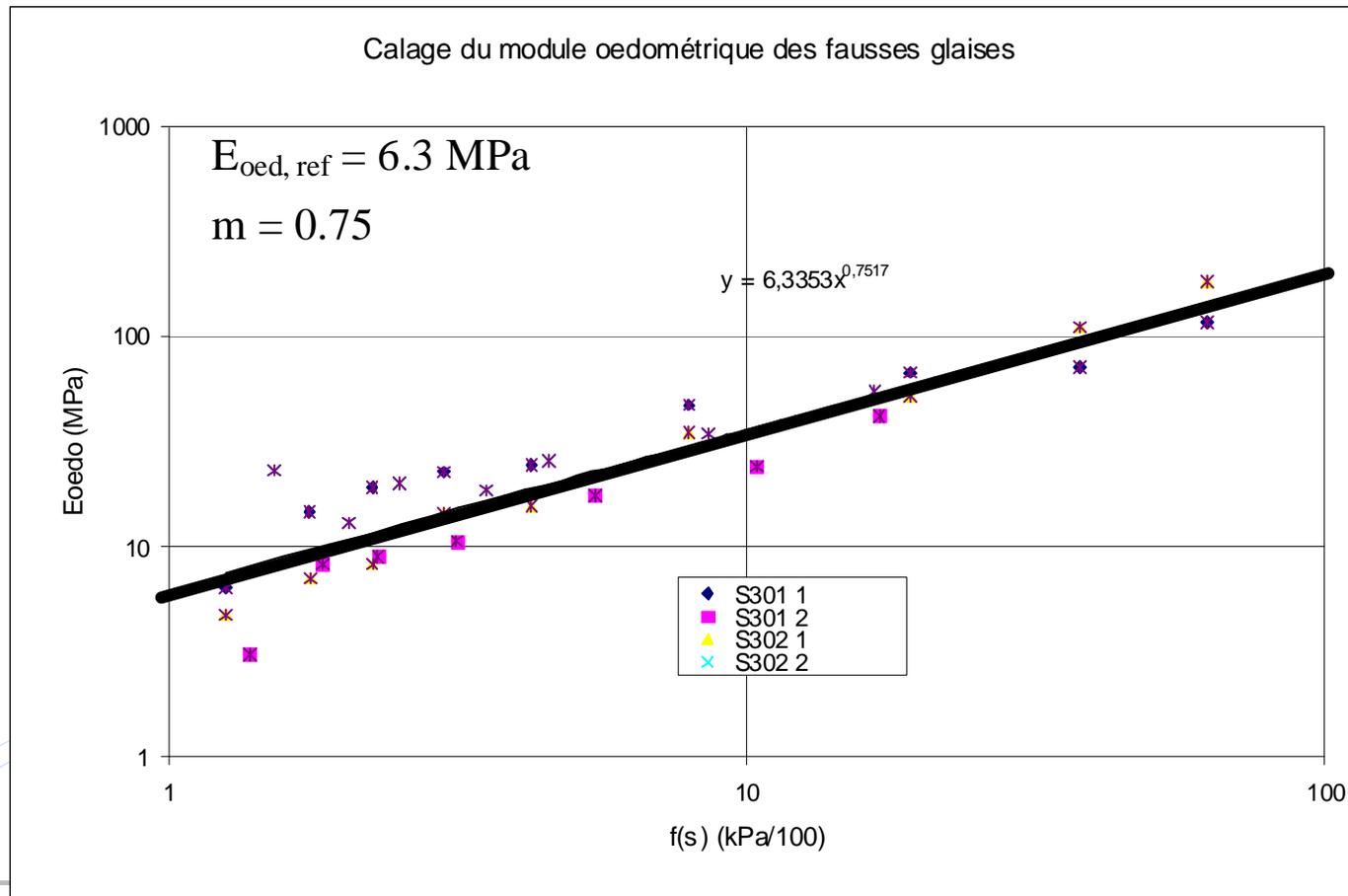
- Pressions sous radier relativement uniformes dans le calcul 3D
- => Phase EXE: modèles 2D avec lois de comportement non linéaires et tenant compte explicitement de la consolidation (PLAXIS - Hard Soils)



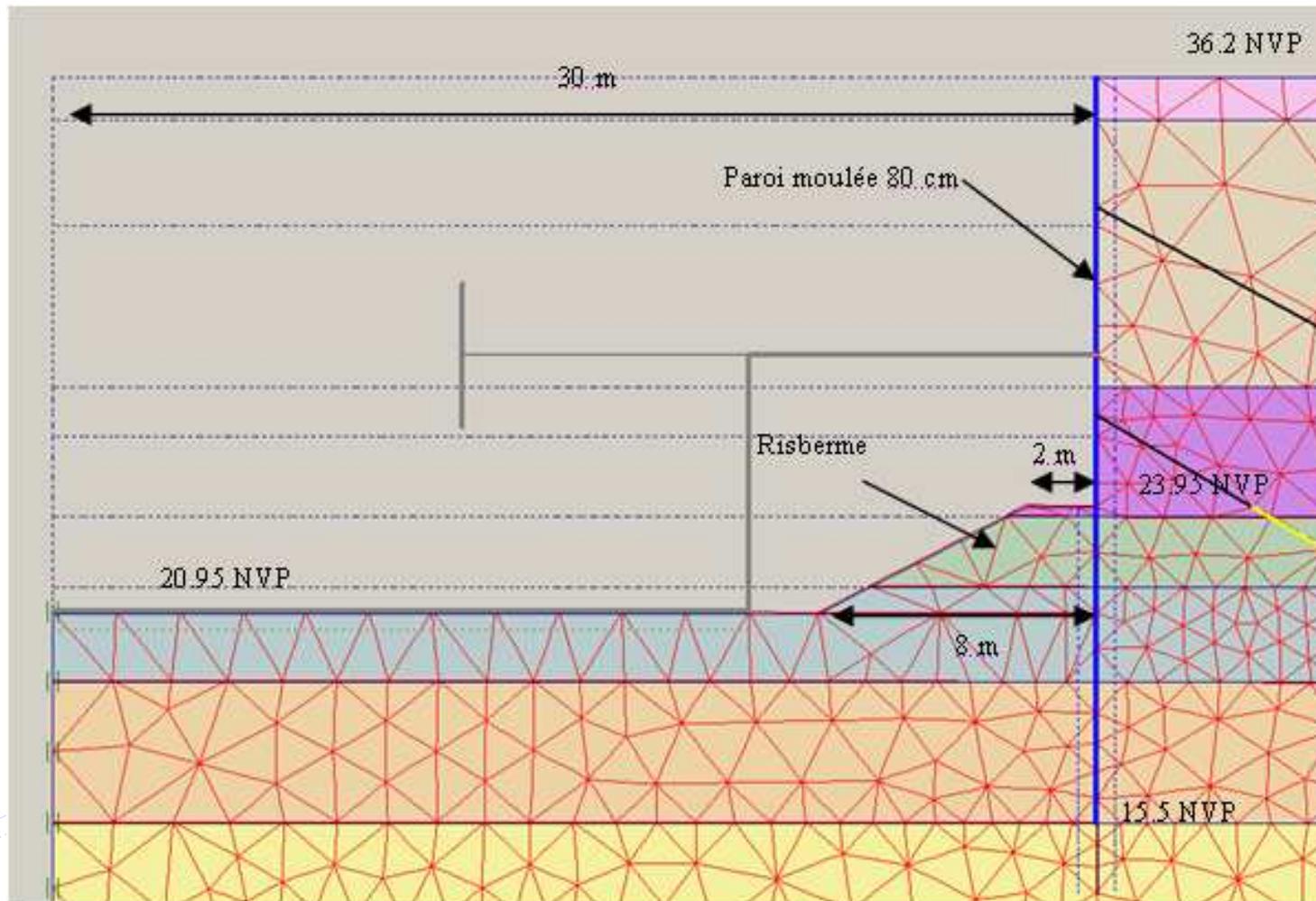
Coupes EXE 2D

- **Détermination des paramètres : E_{oed} et m des Fausses Glaises**
 - Essais œdométriques – 1^{er} chargement

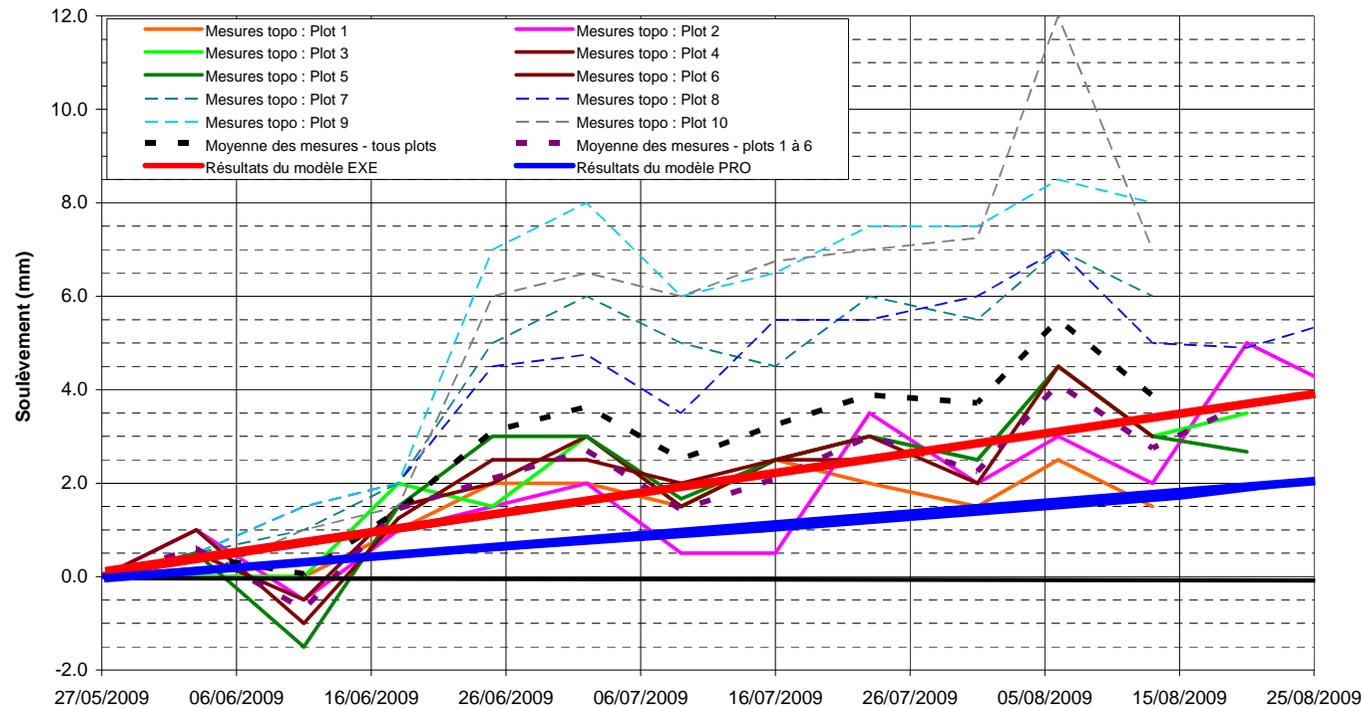
$$E_{oed}(\sigma) = E_{oed,ref} (f(\sigma))^m$$



- **Rétro-analyse du soulèvement des paroi moulées :
Modules * 1.75 + étude de sensibilité**



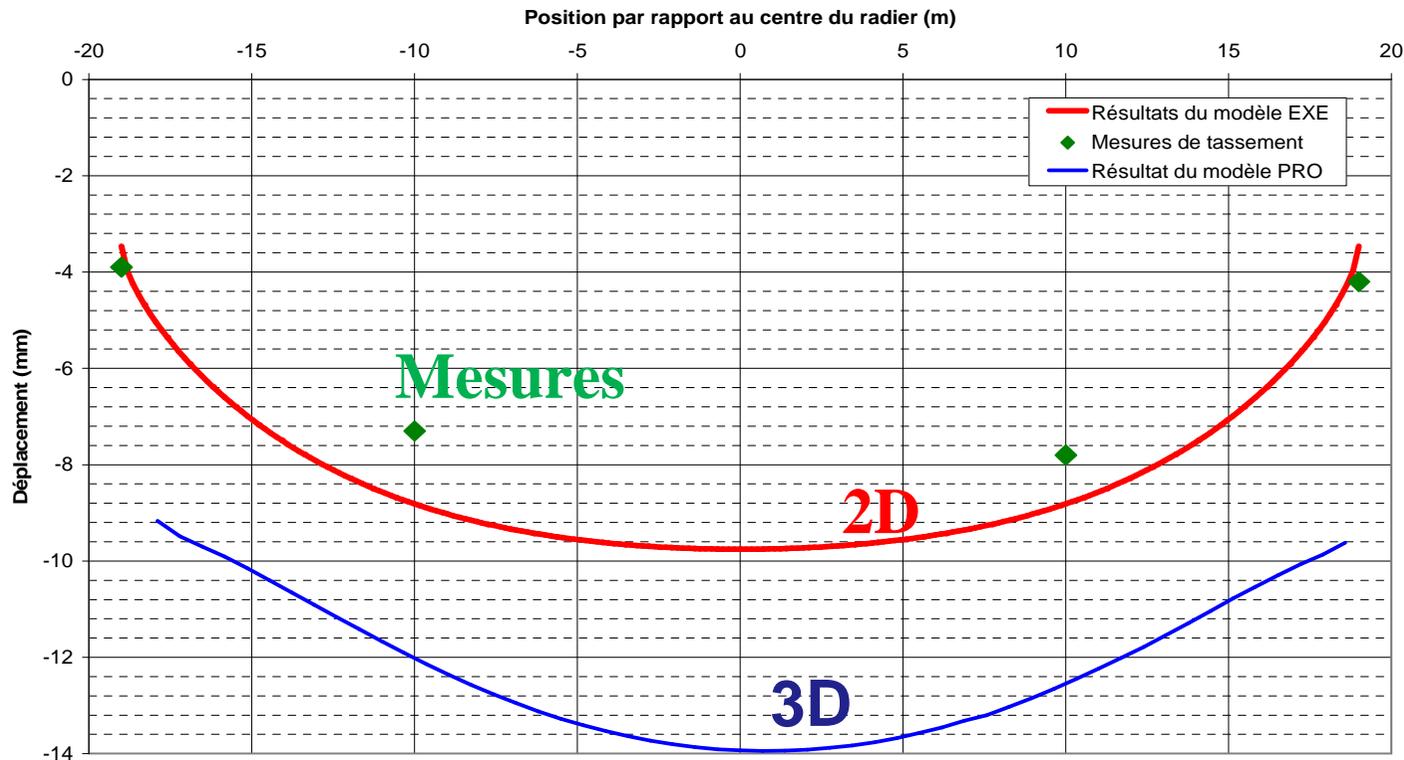
En phase chantier : calage sur mesures de soulèvement du fond d'excavation avant coulage du radier



Plots 7 à 10 non représentatifs (excavation en cours)

- Mesures : 1 mm/mois
 - Calculs 3D : 1.3 mm/mois
 - Calculs 2D : 0.7 mm/mois
- => Bon calage des modèles**

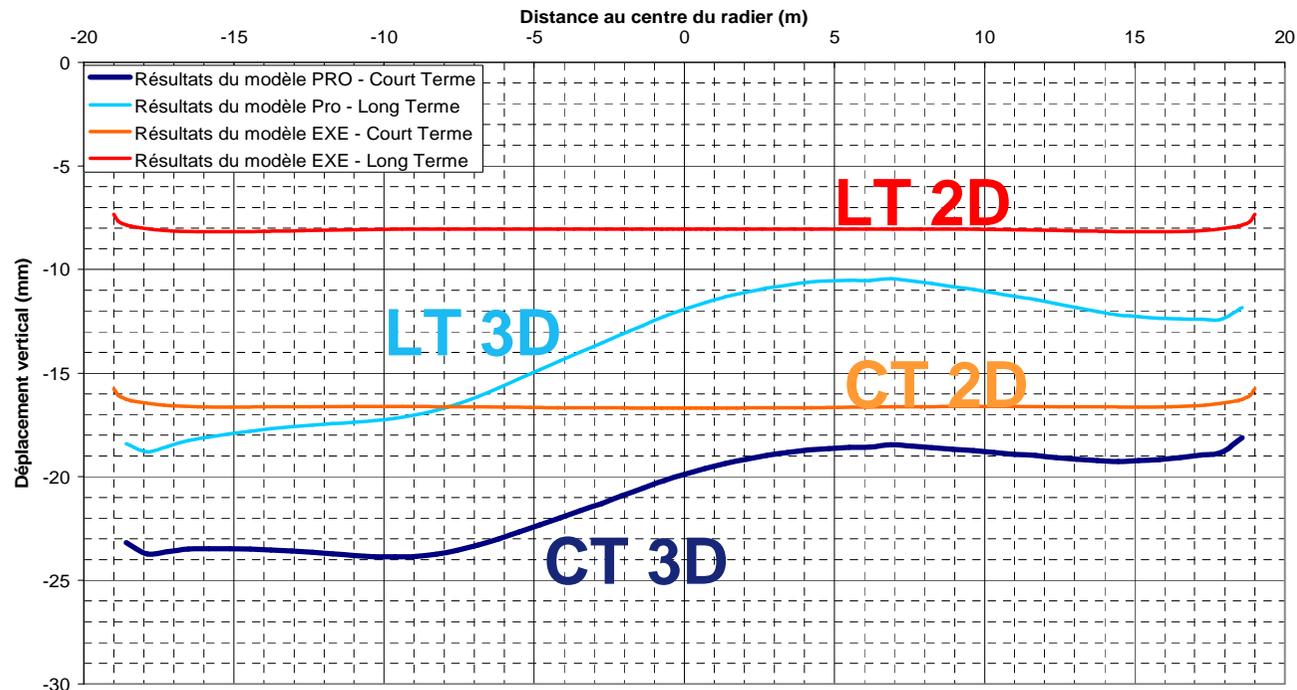
Tassement sous poids propre du radier



- Résultats assez proches (+/- 15 à 20%)
- Modèle 2D plus proche des mesures : situation franchement « 2D » à cette phase

A la fin de la construction de l'ouvrage

■ »



- Pas encore de mesures mais...
- 2 modèles, 2 informations complémentaires
 - Modèle 2D: amplitude des tassements
 - Modèle 3D: forme des tassements

Conclusions

- Outils maintenant tout à fait accessibles
- L'effet d'une bonne loi de comportement peut être au moins aussi important que les effets 3D
- Le 3D est très utiles et « facile d'accès » pour des modélisations « simples » de phénomènes réellement 3D
- Son utilisation est plus « délicate voire discutable » pour modèles extrêmement complexes : ne pas vouloir tout lui faire dire