



Journée scientifique et technique du 1<sup>er</sup> Juin 2022  
Restitution du GT Modélisation numérique

## Chapitre 6 : Stratégie de modélisation

Laëtitia Pavel (Arcadis)  
Martin Cahn (Terrasol)

# Sommaire

- I) Introduction
- II) Construction du modèle
- III) Choix des lois de comportement
- IV) Phasage
- V) Couplage hydromécanique
- VI) Exploitation des résultats

## I) Introduction §6.1

### ➤ Nécessité d'avoir une stratégie de modélisation pour réussir une modélisation

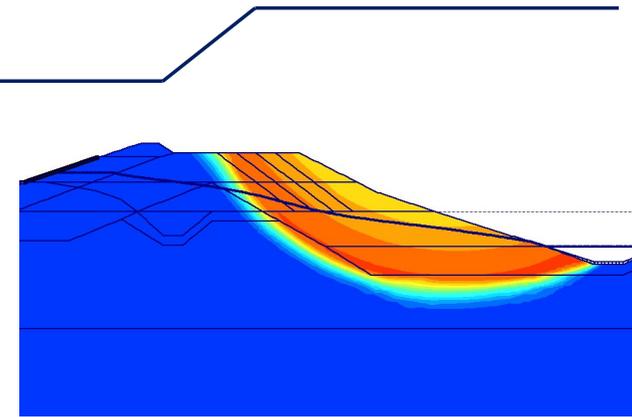
- Définition des données d'entrée
  - Construction du modèle
  - Interaction sol-structure
  - Lois de comportement
  - Phasage de calcul
  - Couplage hydrodynamique
- Traitement des résultats
  - Ordre de grandeur des résultats
  - Analyse spécifique

<b>6</b>	<b>STRATÉGIE DE MODÉLISATION .....</b>	<b>60</b>
6.1	INTRODUCTION.....	60
6.2	CONSTRUCTION DU MODÈLE .....	60
6.3	CHOIX DES LOIS DE COMPORTEMENT.....	68
6.4	PHASAGE .....	79
6.5	GESTION PRATIQUE DES COUPLAGES HYDRO-MÉCANIQUES .....	82
6.6	EXPLOITATION DES RÉSULTATS.....	88
6.7	RÉFÉRENCES.....	92

## II) Construction du modèle

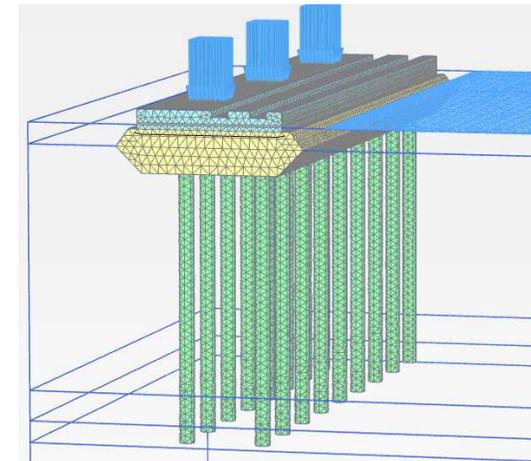
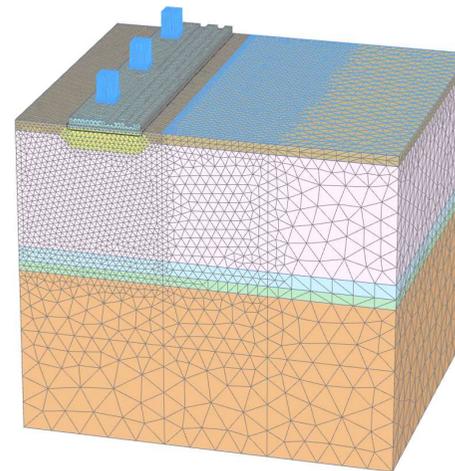
### ➤ Définition d'une géométrie adaptée §6.2.1

- Géométrie de l'ouvrage lui-même et des ouvrages avoisinants
- Validité d'un modèle en déformation plane ou axisymétrique et adaptation des hypothèses
- Possibilité de simplification des modèles ?



### ➤ Définition du maillage

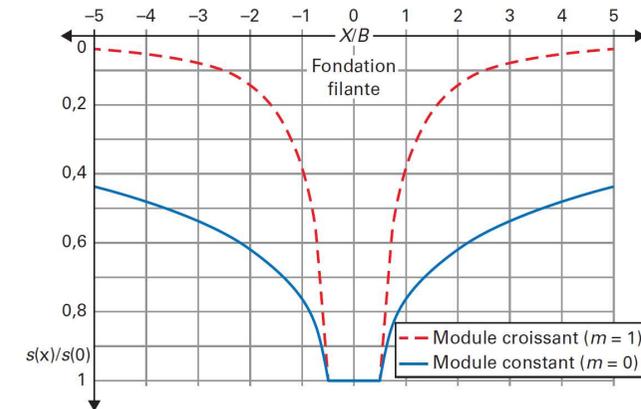
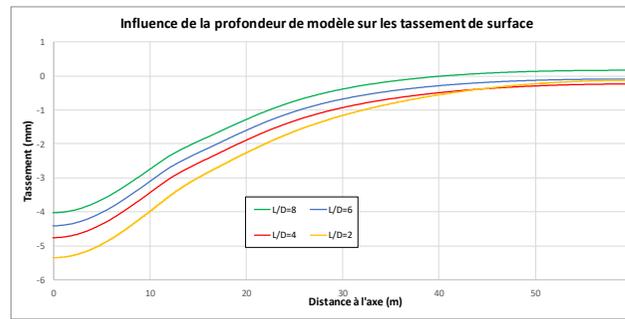
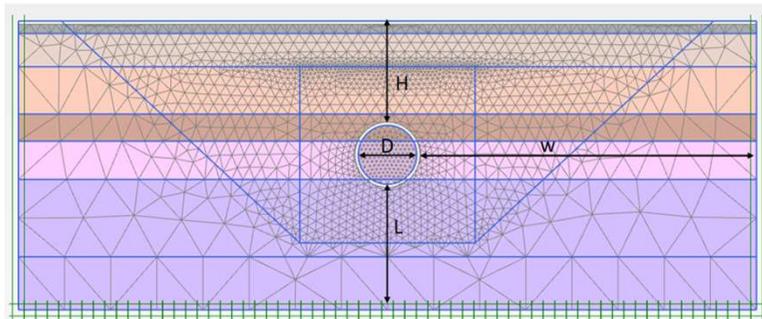
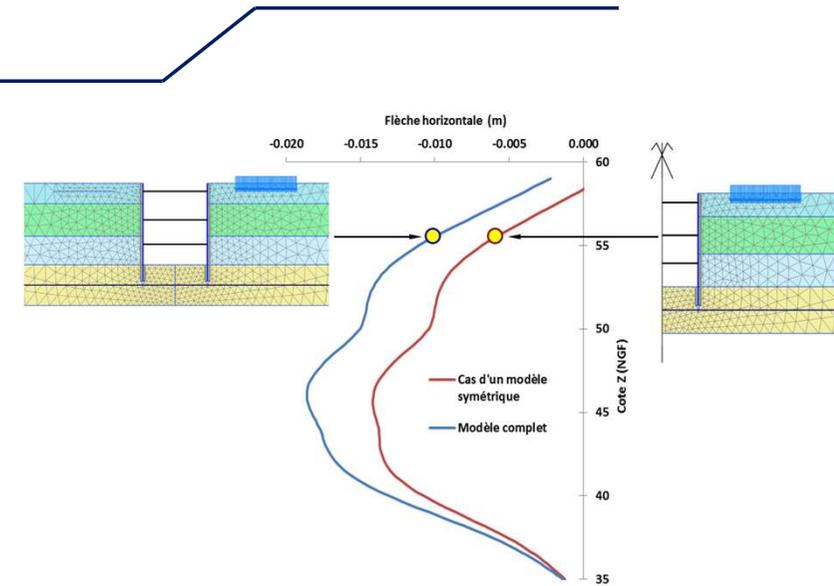
- Finesse du maillage adaptée, en particulier dans les zones se déformant le plus
- Etendue du maillage suffisante (zone de rupture par ex)



## II) Construction du modèle

### ➤ Quelles conditions limites ? §6.2.2

- Frontières latérales : plan de symétrie ou non ?
- Profondeur du modèle : a une influence significative sur les résultats de tassement  
→ Intérêt de considérer une loi de comportement adaptée



## II) Construction du modèle

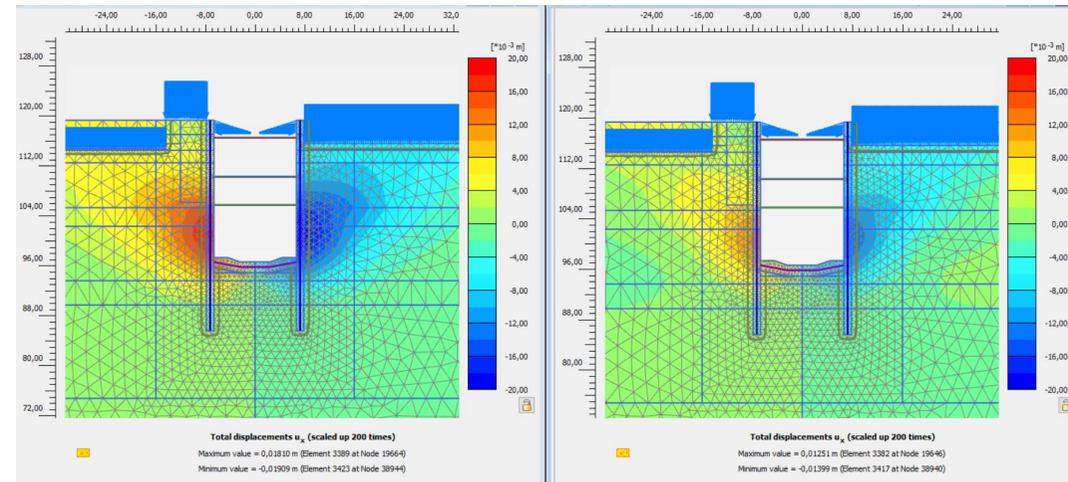
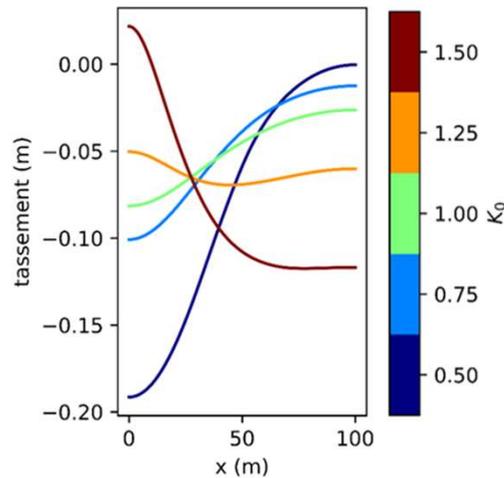
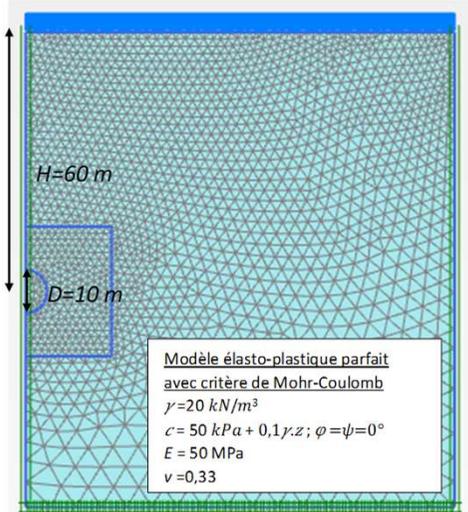
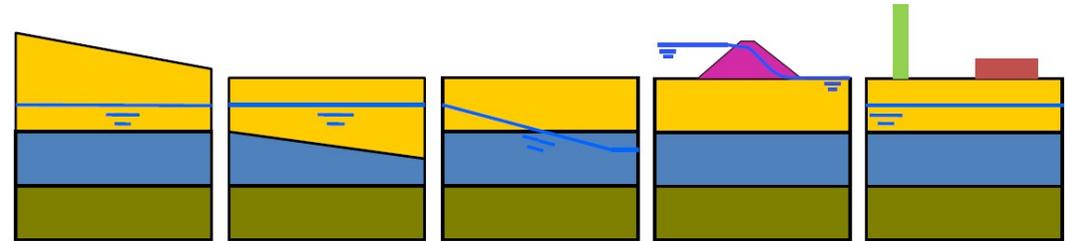
### ➤ Etat initial des contraintes §6.2.3

- Initialisation des contraintes :

Prise en compte de  $K_0$   $\sigma'_{h0} = K_0 \sigma'_{v0}$

Chargement gravitaire  $\sigma'_{h0} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma'_{v0}$

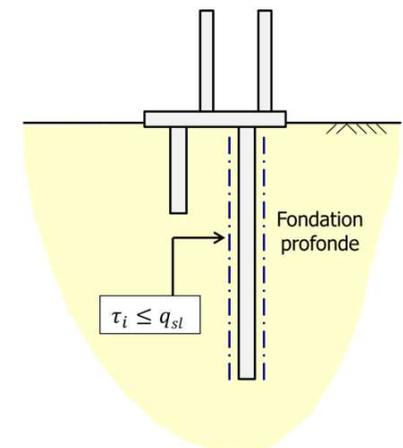
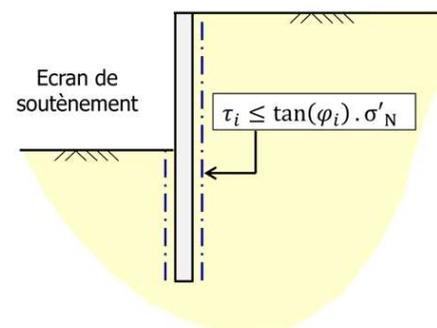
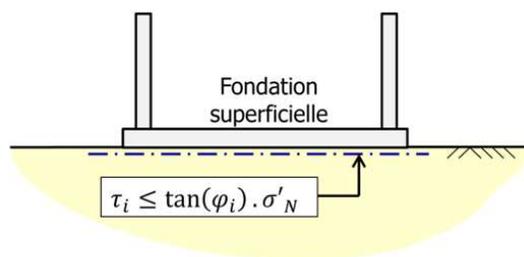
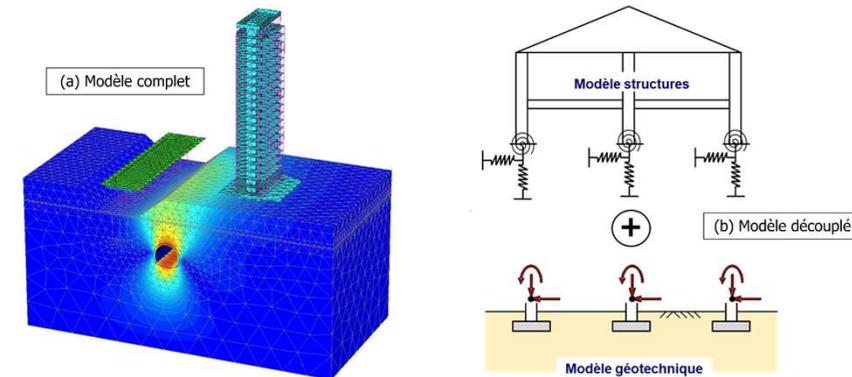
- Influence de  $K_0$



## II) Construction du modèle

### ➤ Interaction sol-structure §6.2.4

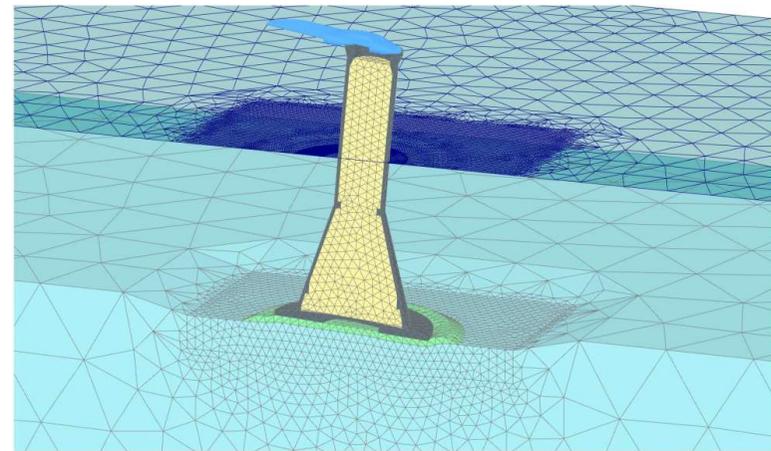
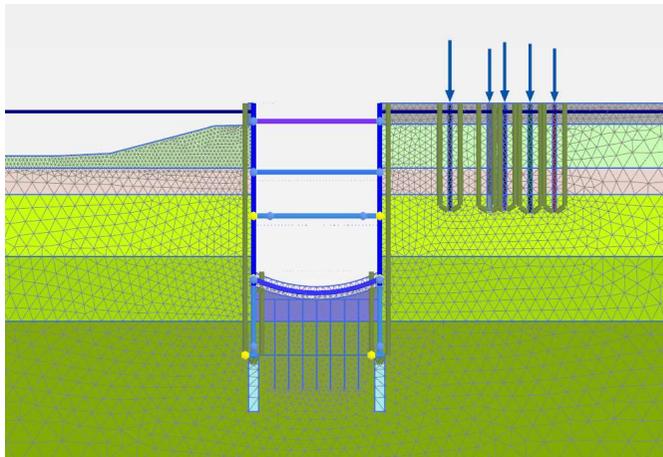
- Usuellement seuls les ouvrages géotechniques sont modélisés
- Modélisation des éléments structuraux en éléments volumiques ou surfaciques  
→ Adaptation selon les besoins et spécificités du projet
- Conditions d'interface : quel cisaillement à l'interface sol-structure



### III) Choix des lois de comportement

#### ➤ Pourquoi recourt-on à la modélisation numérique? §6.3.1

- Fiabilisation de l'estimation des déplacements
- Fiabilisation des sollicitations résultants des interactions entre l'ouvrage et le sol avoisinant

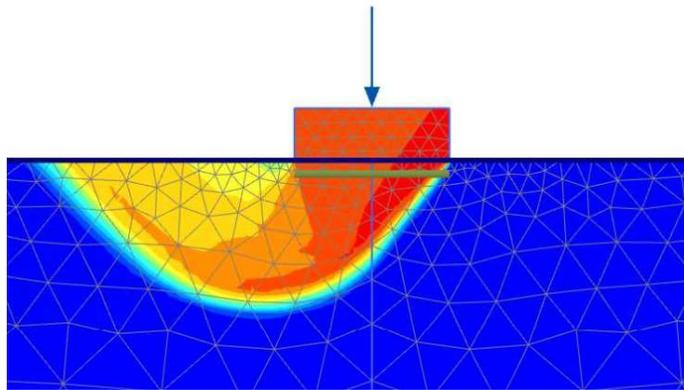


**La pertinence des résultats est directement liée à celle de la loi de comportement du terrain**

- Vise à rendre compte de la déformabilité du terrain et suivant les cas:
- Déformations d'origine élastiques ;
  - Déformation d'origine élastiques et plastiques.

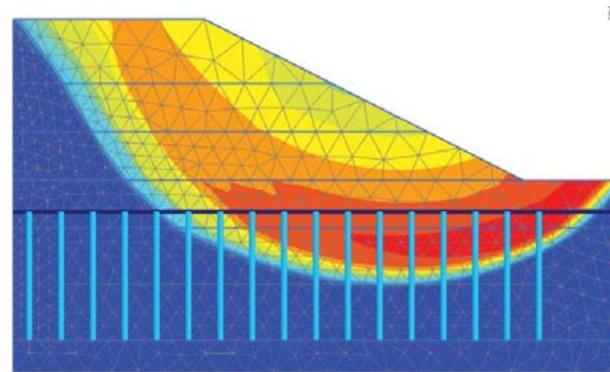
### III) Choix des lois de comportement

➤ « Ingrédients » des lois de comportement fonction du type d'ouvrage §6.3.1



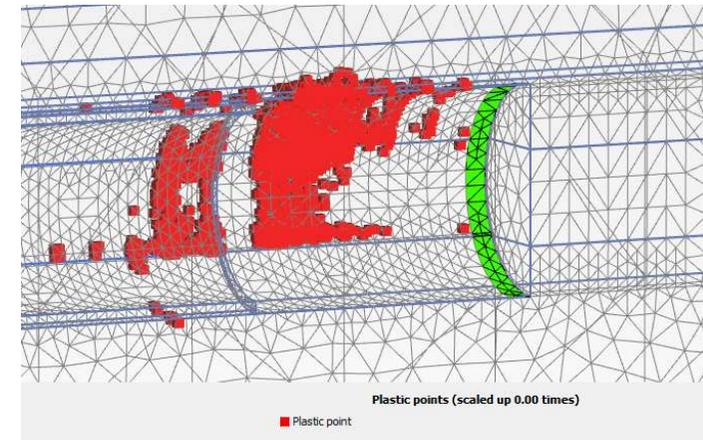
#### Fondations

Marges de sécurité usuelles 2 à 3  
déformations principalement  
d'origine élastique



#### Remblais

Marges de sécurité usuelles 1,3 à 1,5  
Déformations d'origine élastique et  
plastiques

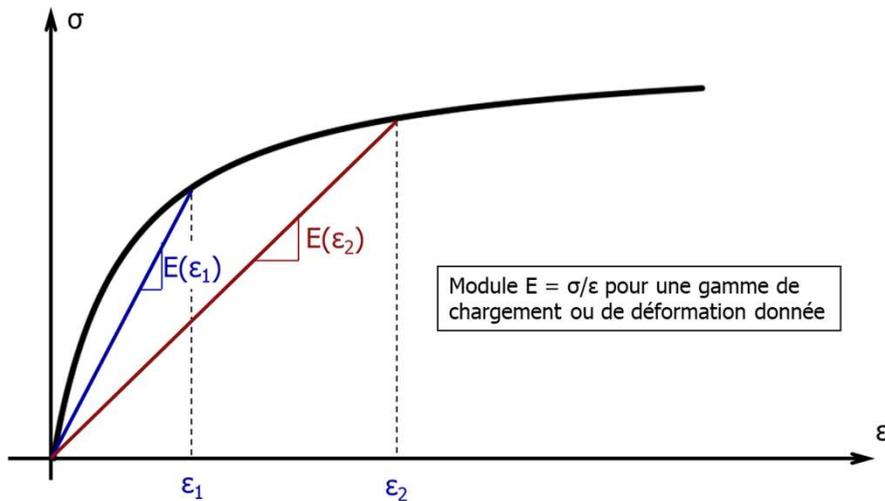


#### Excavations

Développement de plasticité autour des  
ouvrages. Déplacements incluent une  
part importante de déformations  
plastiques

### III) Choix des lois de comportement

#### ➤ Choix des modules §6.3.2

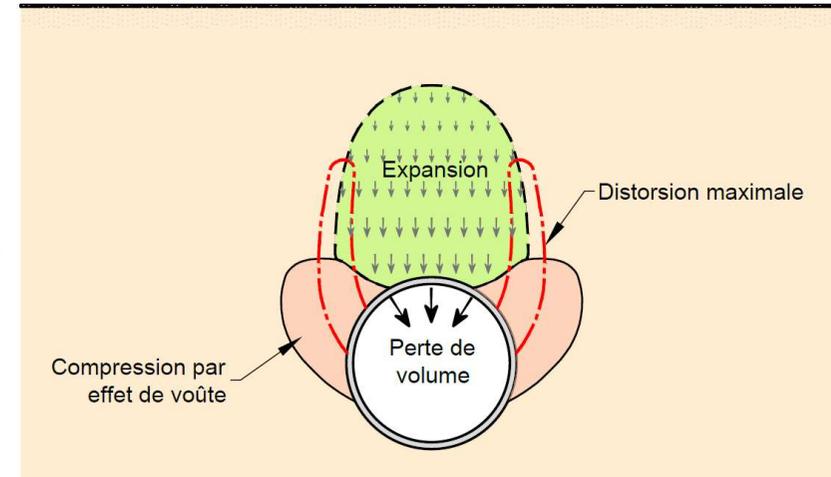
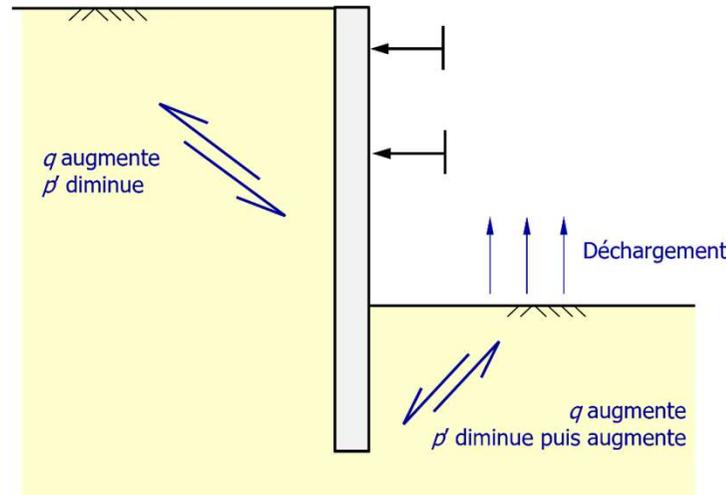
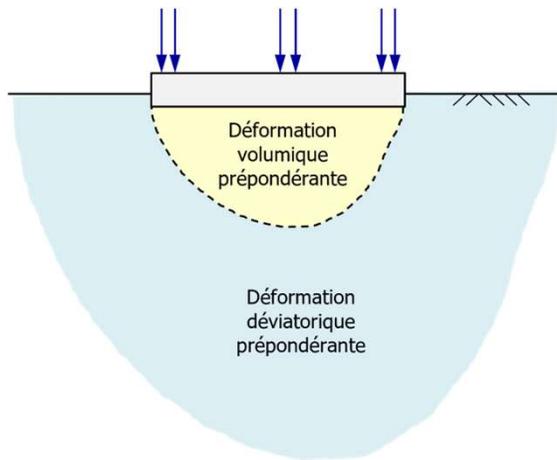


Ouvrage	Gamme de déformation	Déformation prépondérante
Remblais sur sol compressible	$10^{-2}$ à $10^{-1}$	Volumique et/ou déviatorique
Radiers et dallages	$10^{-3}$ à $10^{-2}$	
Tunnels	$10^{-3}$ à $10^{-2}$	
Semelles et pieux isolés	$\sim 10^{-3}$	Déviatorique
Ecrans et murs de soutènement	$10^{-4}$ à $10^{-3}$	
Sollicitations sismiques ( $PGA \leq 0,3g$ )	$10^{-5}$ à $10^{-4}$	
Fondation de machines vibrantes	$10^{-6}$ à $10^{-5}$	

➔ Compte tenu du caractère non-linéaire du comportement des sols, le module de déformation caractérise une rigidité apparente du terrain pour un niveau de chargement ou de déformation donné

### III) Choix des lois de comportement

➤ Choix des modules §6.3.2

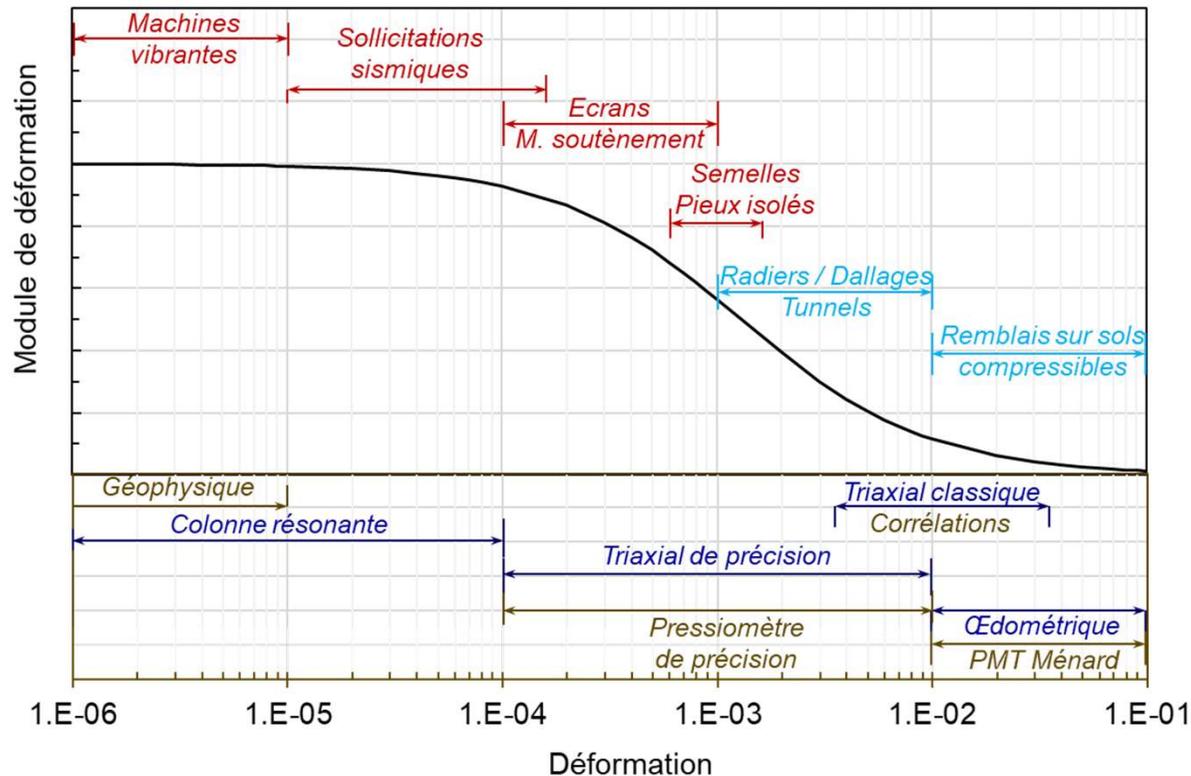


➔ Zones de déformations principales et chemins de contraintes variables suivant le type d'ouvrage et les configuration géotechniques

### III) Choix des lois de comportement

#### ➤ Choix des modules §6.3.2

Déformation prépondérante  
*Déviatorique*  
*Volumique et/ou déviatorique*



Type d'essai  
*Sur le terrain*  
*Laboratoire*

➤ **Loi de comportement élastique ou élastoplastique:** Assurer la cohérence entre le module mesuré, le chemin de chargement et la gamme de déformation

### III) Choix des lois de comportement

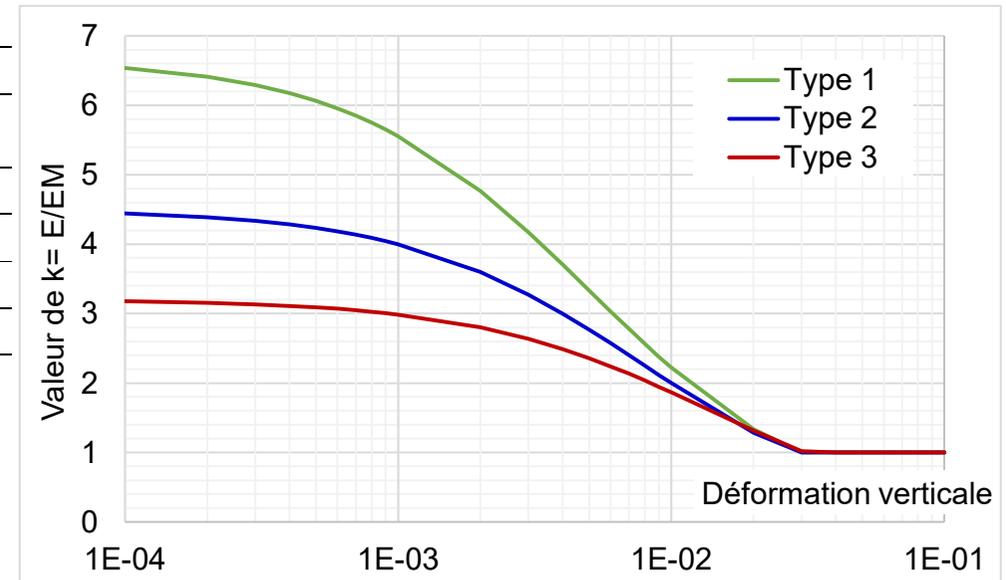
#### ➤ Choix des modules, lien avec essais §6.3.2

→ Ordre de grandeur du rapport  $E/E_M$  pour loi élastoplastique parfaitement plastique avec critère Mohr-Coulomb

Ouvrage	Gamme de déformation	Rapport $E/E_M$	
		Limons et Argiles	Sables et Graves
Radiers et dallages	$10^{-3}$ à $10^{-2}$	2 à 4	3 à 6
Semelles et pieux isolés	$\sim 10^{-3}$	3 à 4	4 à 6
Ecrans de soutènements	$10^{-4}$ à $10^{-3}$	3 à 8	4 à 12
Tunnels	$10^{-3}$ à $10^{-2}$	2 à 4	3 à 6

#### Calages entre:

- Modélisation numérique et semi-empiriques;
- Modélisation numérique et mesures sur ouvrages;



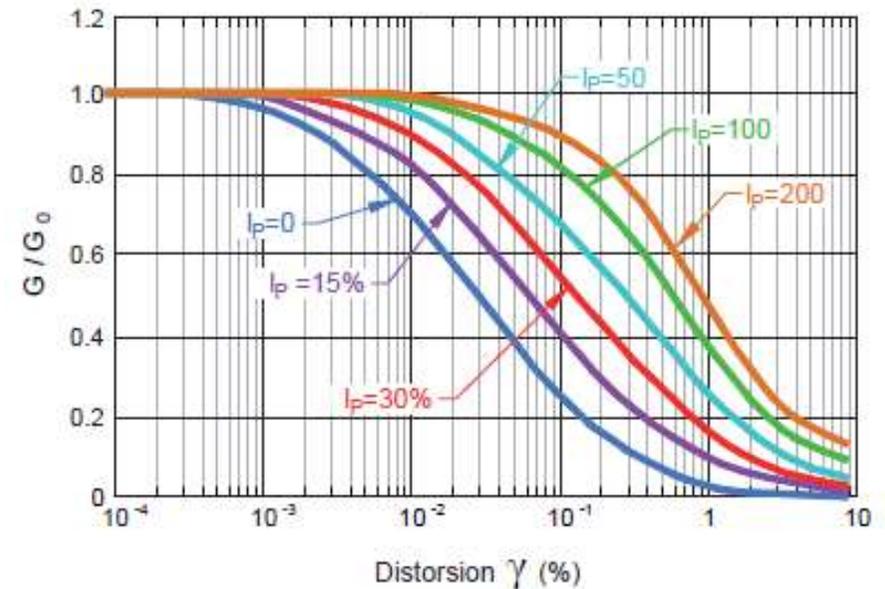
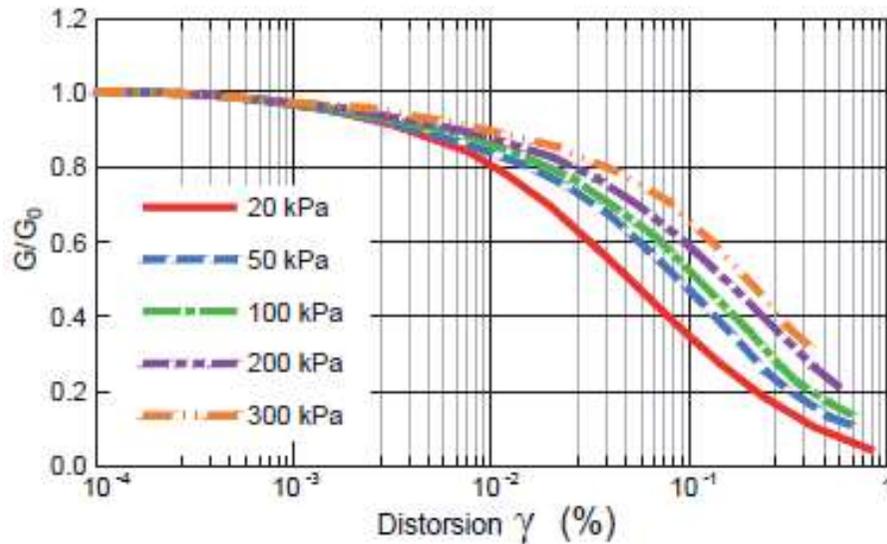
*Extrait du PN ARSCOP*

### III) Choix des lois de comportement

#### ➤ Choix des modules, lien avec essais et élasticité non linéaire §6.3.2 & §6.3.3

→ Essai type Cross-Hole permettant l'obtention d'un module élastique à très faible niveau de déformation ( $\sim 10^{-6}$ )

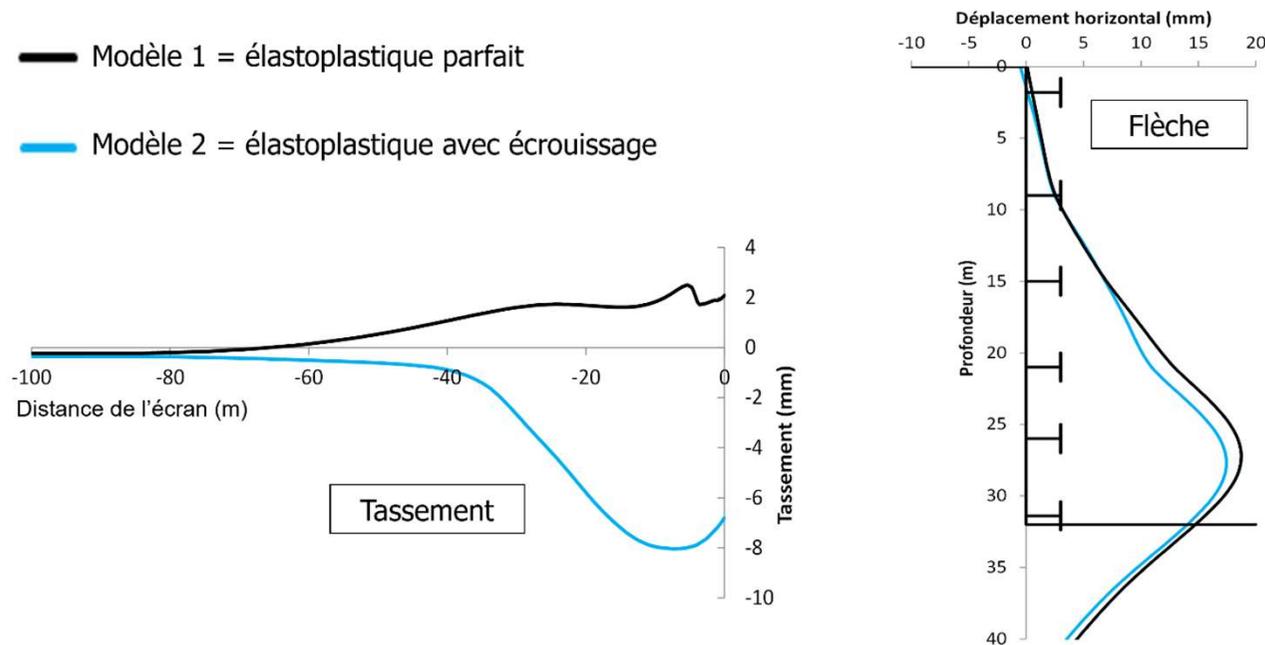
$$G_0 = \rho V_s^2$$



➤ **Élasticité non linéaire:** Module ( $G$ ,  $E$  ou  $K$ ) actualisé en fonction de la gamme de déformation

### III) Choix des lois de comportement

#### ➤ Cas des excavations et importance de l'utilisation de l'élastoplasticité §6.3.4



*Réf: Thèse Khadija Nejjar*

- De manière à compenser les soulèvements générés par les forces de déconfinement, choix d'une loi de comportement permettant une entrée rapide en plasticité et règlement d'écoulement conduisant à de la contractance : loi type Hardening-Soil

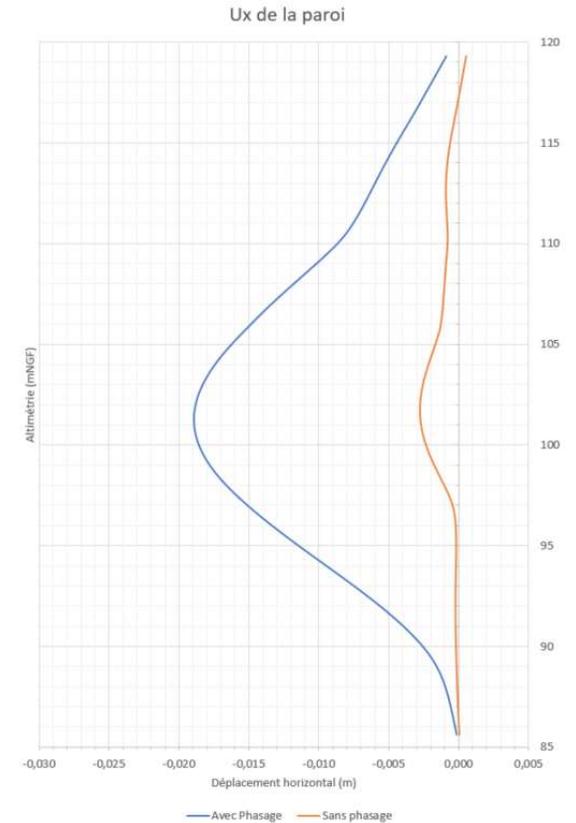
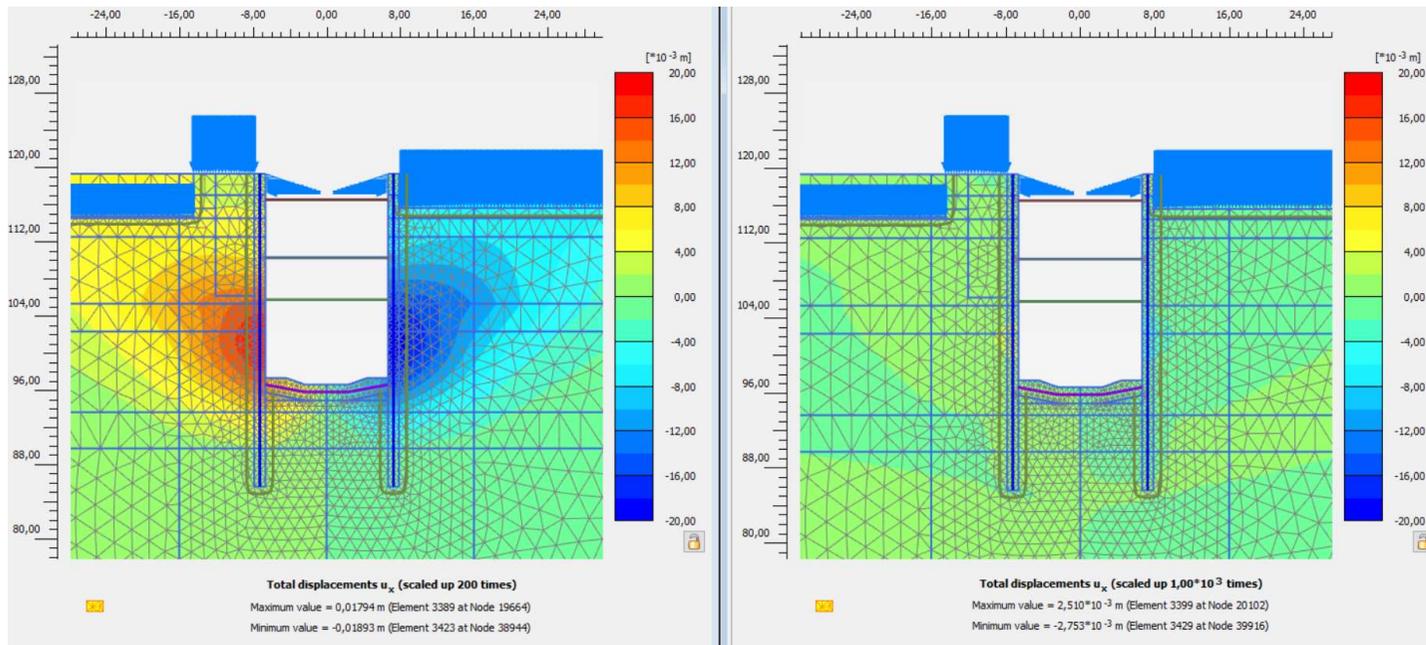
### III) Choix des lois de comportement

#### ➤ Quelle loi de comportement pour quel ouvrage? §6.3.6

Ouvrage type	Loi élastique linéaire ou non linéaire	Loi élastoplastique	
		Plasticité parfaite	Plasticité avec écrouissage
Semelles, radiers, dallages, pieux et inclusions rigides sous charge verticale	Recommandé	Optionnel	Superflu
Pieux et Inclusions rigides chargés transversalement	Insuffisant	Recommandé	Optionnel
Soutènements, excavations, tunnels	Insuffisant	Peut être suffisant dans certains cas	Recommandé
Remblais sur sol compressible	Insuffisant	Insuffisant	Recommandé

## IV) Phasage de calcul

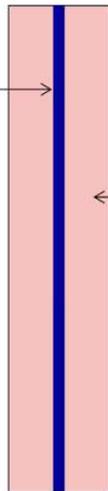
- Utilité de modéliser l'histoire de chargement et le phasage de construction §6.4.1



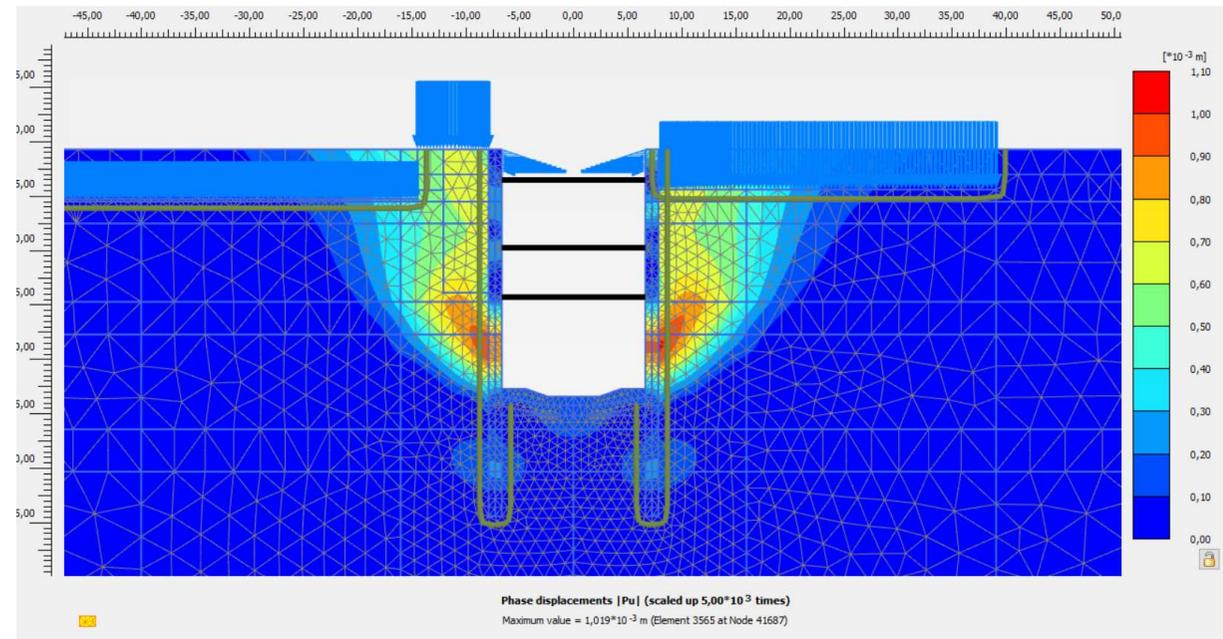
## IV) Phasage de calcul

- Modification des rigidités des structures §6.4.2
  - Calcul avec la nouvelle rigidité de la paroi moulée
  - Ne correspond pas au fluage du terrain

Eléments de plaque dont les rigidités ES, EI et GS' sont calculées avec  $E_{\text{plaque}} = E_{\text{CT}} - E_{\text{LT}}$



Eléments de volume caractérisés par  $E_{\text{volume}} = E_{\text{LT}}$



## IV) Phasage de calcul

### ➤ Cas des tunnels §6.4.3

- Bonne connaissance des méthodes de réalisation (méthode conventionnelle et mécanisée)
- Adaptation ou simplification des modélisations selon les types d'ouvrages (excavation pleine section, en sections divisées, ouvrages complexes) et les objectifs du calcul

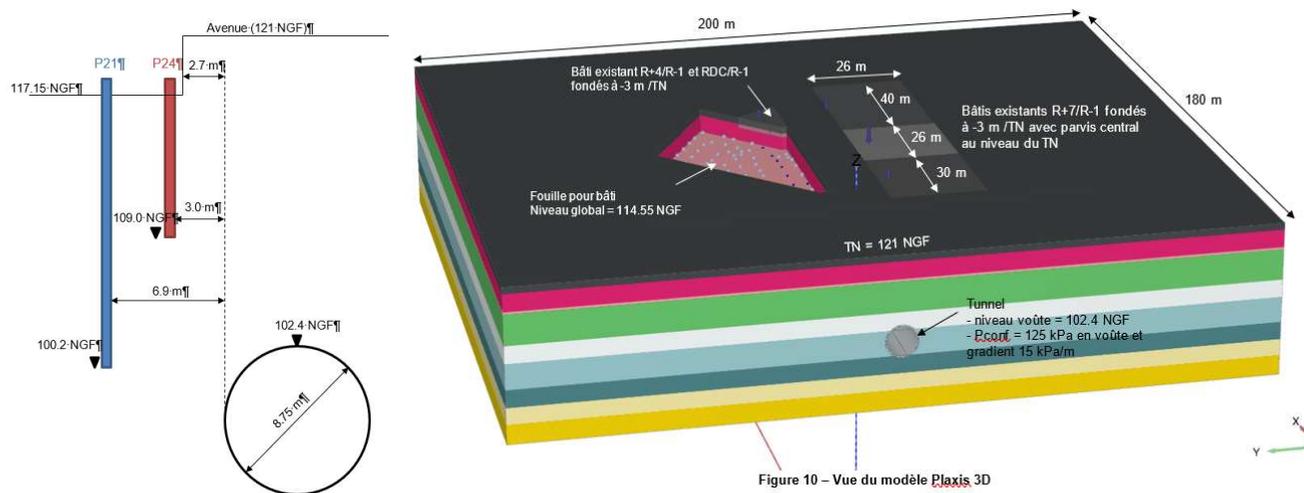
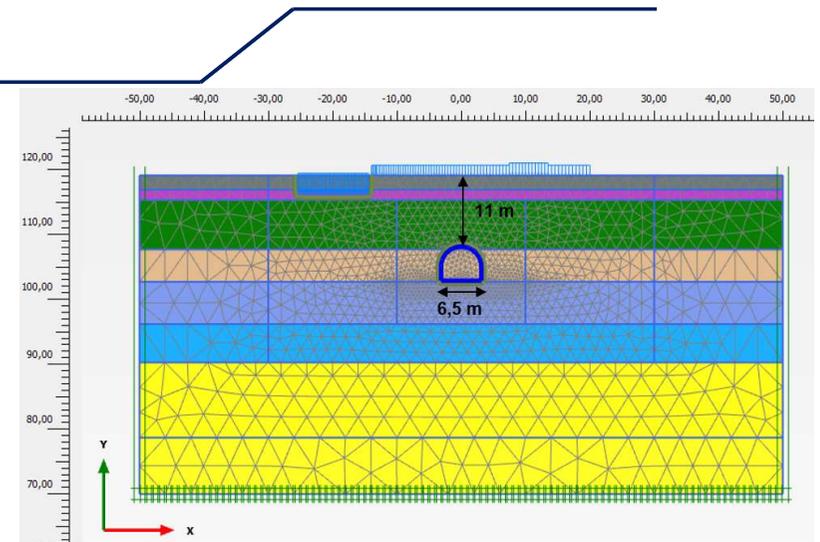
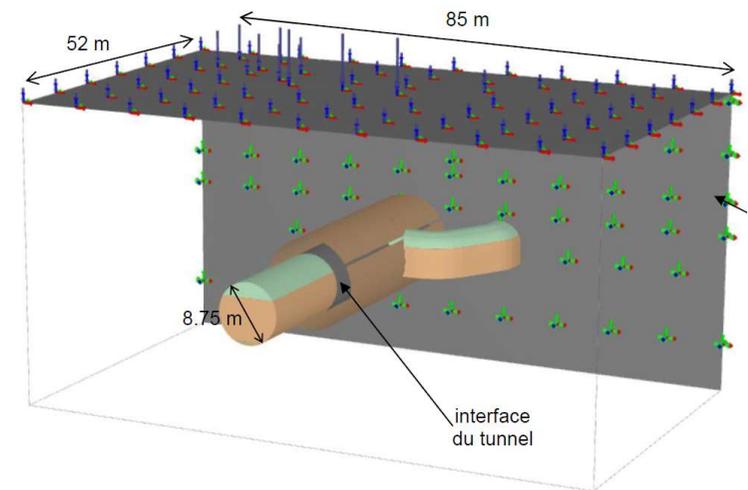


Figure 10 - Vue du modèle Plaxis 3D



## V) Couplage hydromécanique

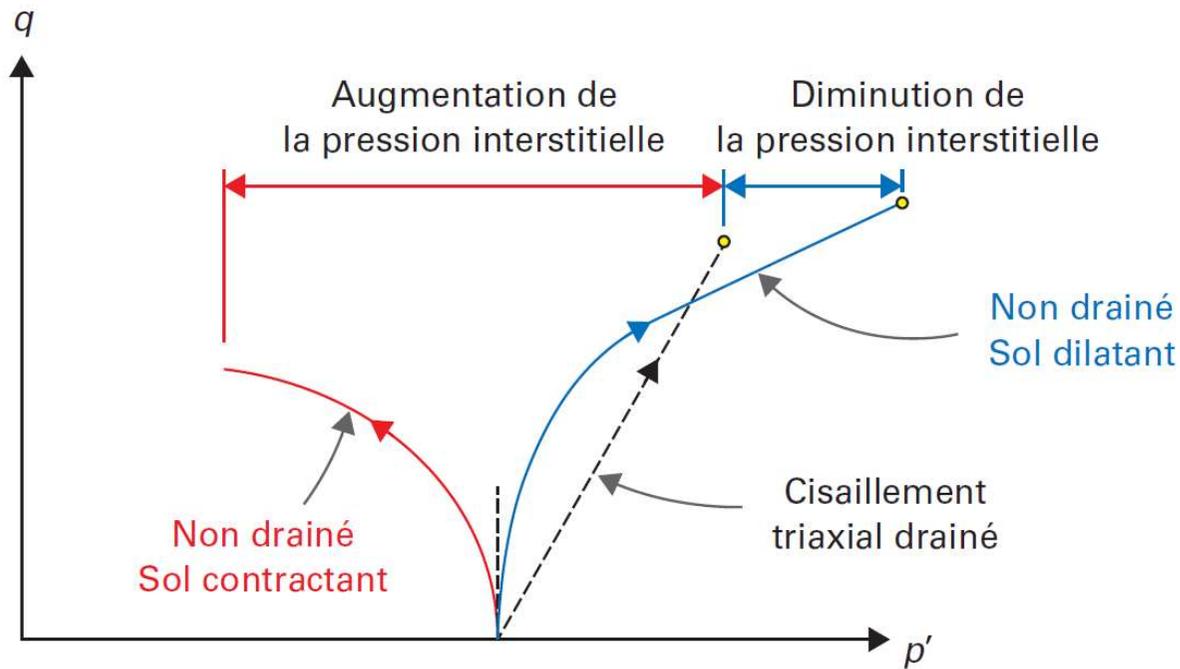
### ➤ Choix de l'approche de couplage entre écoulement et déformation §6.5.2

→ *Le champ de charge hydraulique évolue dans l'espace ou dans le temps et l'on souhaite tenir compte de l'influence de ces variations sur les déformations ou sur la stabilité du massif.*

- A) Approche complètement couplée:** Recherche simultanée du champ de pression et le champ de déplacement. Difficultés théoriques et numériques nombreuses (par exemple choix du pas de temps en fonction du maillage et des déformations plastiques?).
- B) Approche semi-couplée:** Résolution du problème mécanique et hydraulique indépendamment l'un de l'autre. Détermination de la charge hydraulique dans un premier temps et expression en termes de contraintes effectives en second temps.
- C) Approche en contrainte totales:** Évolution rapides des sollicitations et massif peu perméable, traduction du comportement non drainé avec un calcul en contrainte totale avec module élastique « non drainé », cohésion « non drainée » et angle de frottement nul. Nécessite grande prudence car l'effet de la consolidation sur évolution de la résistance ignoré.

## V) Couplage hydromécanique

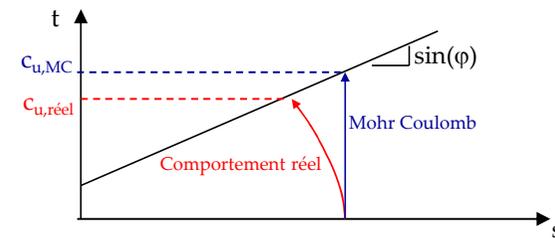
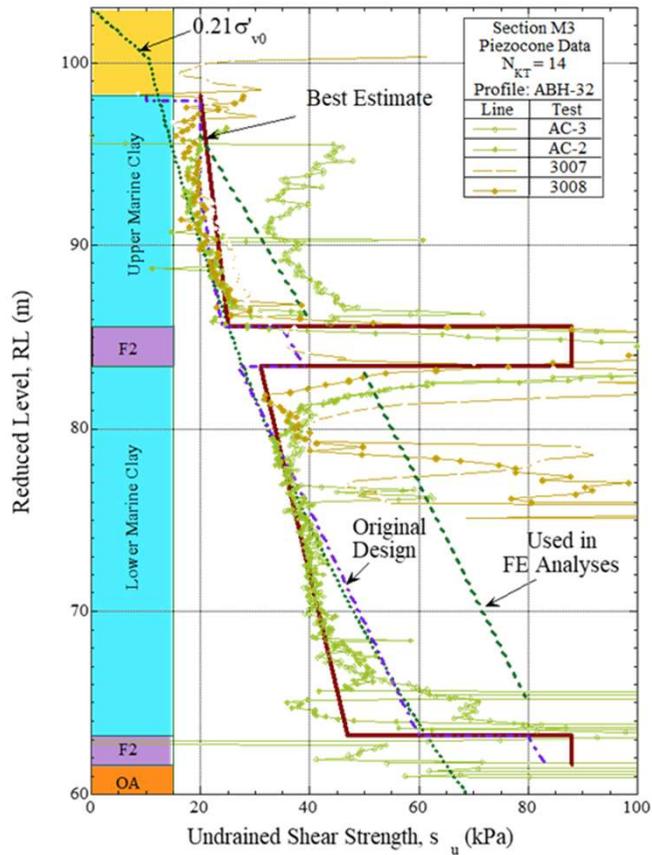
### ➤ Comportement non drainé §6.5.1



**Piège potentiel** : modélisation inappropriée du comportement non drainé du terrain peut conduire à surestimer largement la résistance apparente et la stabilité de l'ouvrage.

# V) Couplage hydromécanique

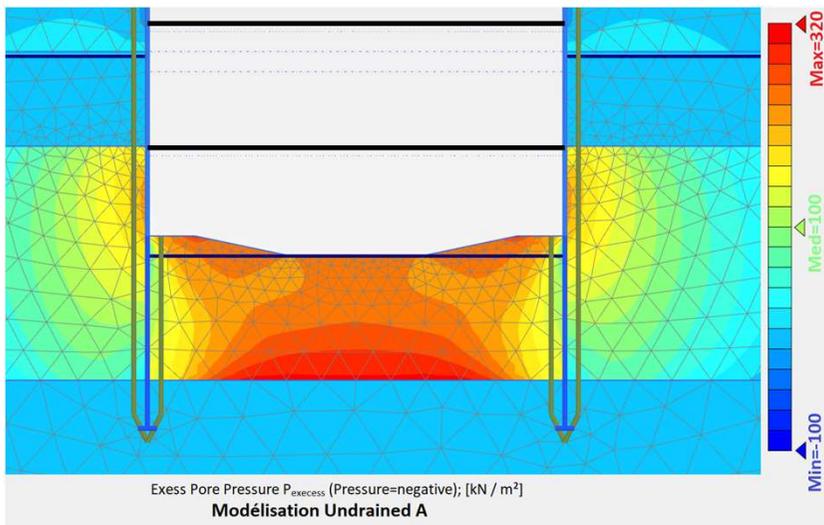
## ➤ Comportement non drainé et rôle du modèle de comportement §6.5.3



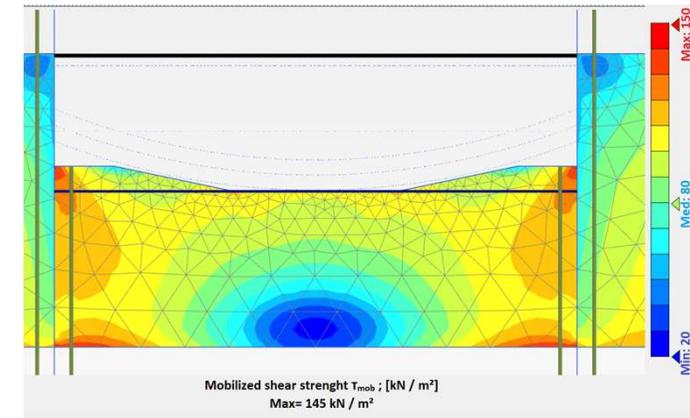
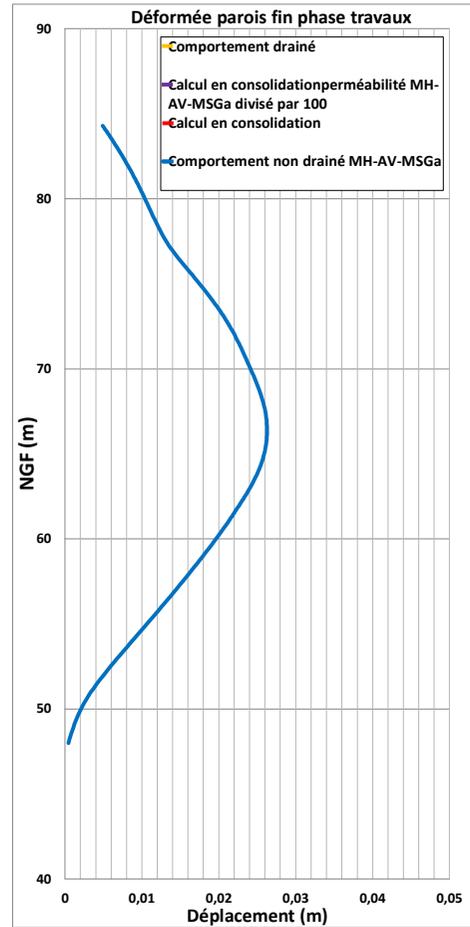
Retour d'expérience de Nicoll Highway

# V) Couplage hydromécanique

## ➤ Comportement drainé ou non drainé? §6.5.5



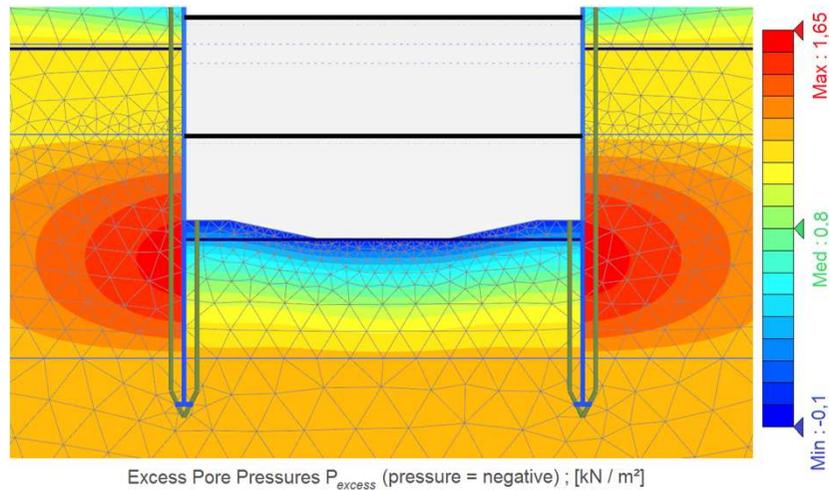
Suppression interstitielles négatives dans les zones de diminution de contraintes moyennes: en fond de fouille et dans les zones de poussées



Vérification à posteriori du cisaillement mobilisé à l'étape la plus sollicitante

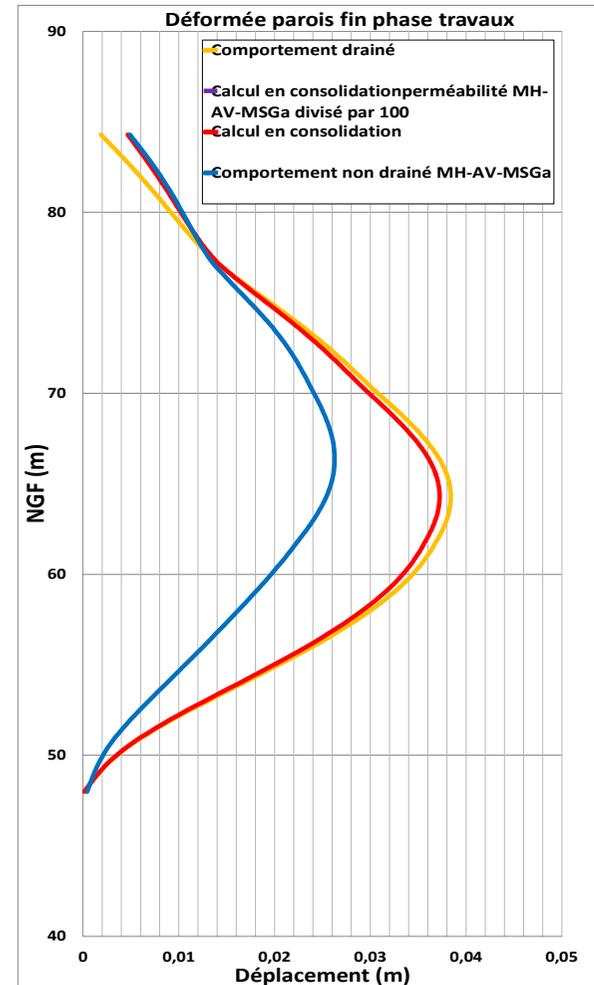
# V) Couplage hydromécanique

## ➤ Comportement drainé ou non drainé? §6.5.5



Undrained A + Consolidation

Avec l'introduction du temps de construction dans un calcul en consolidation, **le comportement de l'ouvrage est plus proche du comportement drainé que non drainé:**  
 → dissipation quasi-totale des surpressions interstitielles



## V) Couplage hydromécanique

### ➤ Comportement drainé ou non drainé? §6.5.5

suggestion de Vermeer & Meier (1998)

$T < 0.10$  ( $U < 10\%$ ) → analyse non drainée

$T > 0.40$  ( $U > 70\%$ ) → analyse drainée

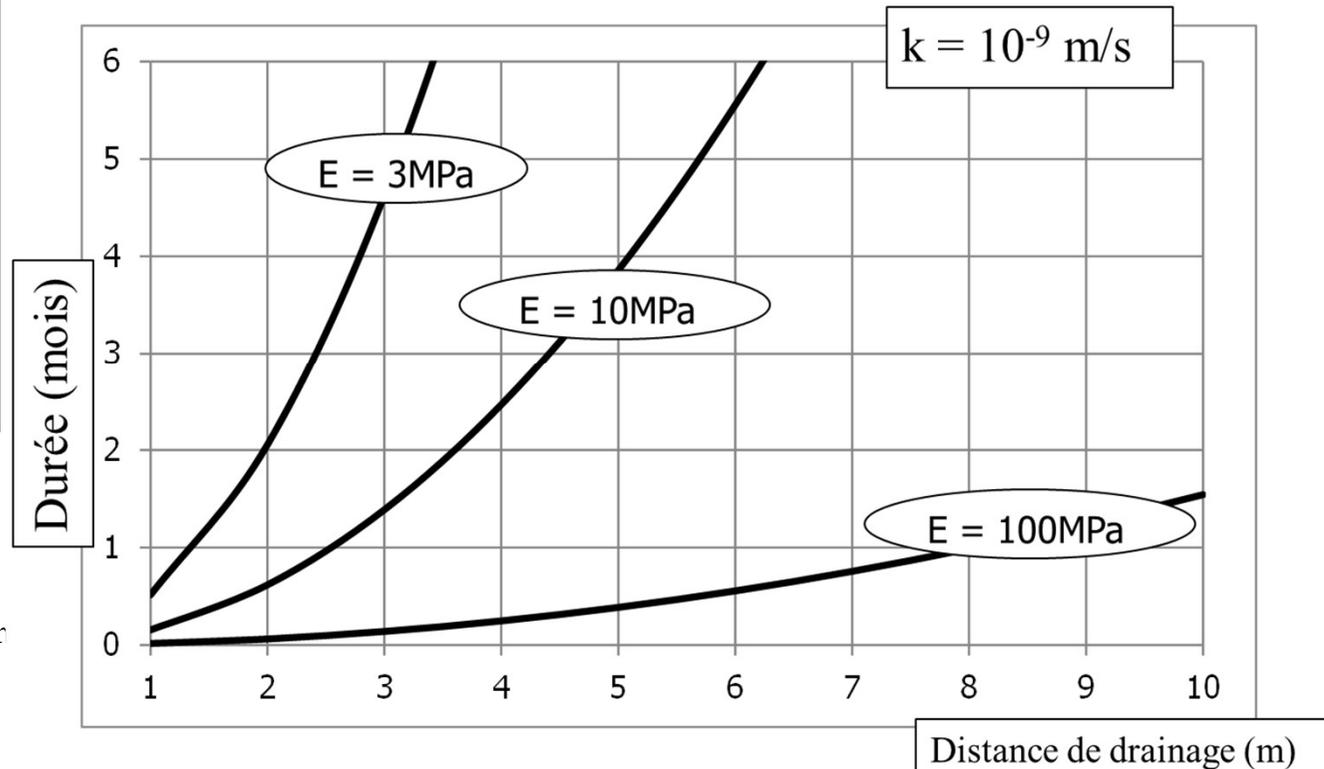
$$T = \frac{kE_{oed} t}{\gamma_w D^2}$$

$k$  = perméabilité  
 $E_{oed}$  = module œdométrique  
 $\gamma_w$  = poids volumique de l'eau  
 $D$  = distance de drainage  
 $t$  = durée de construction  
 $T$  = facteur de temps sans dimension  
 $U$  = degré de consolidation

Dans les cas des excavations, les modules sont grands (faibles niveaux de déformation et rechargement) et les distances de drainage relativement faibles : la dissipation des pressions interstitielles est rapide

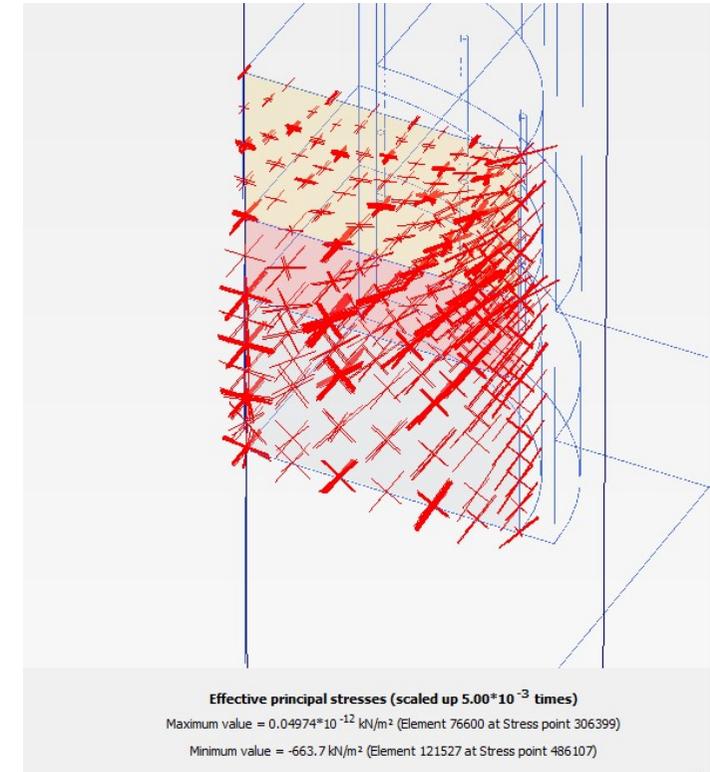
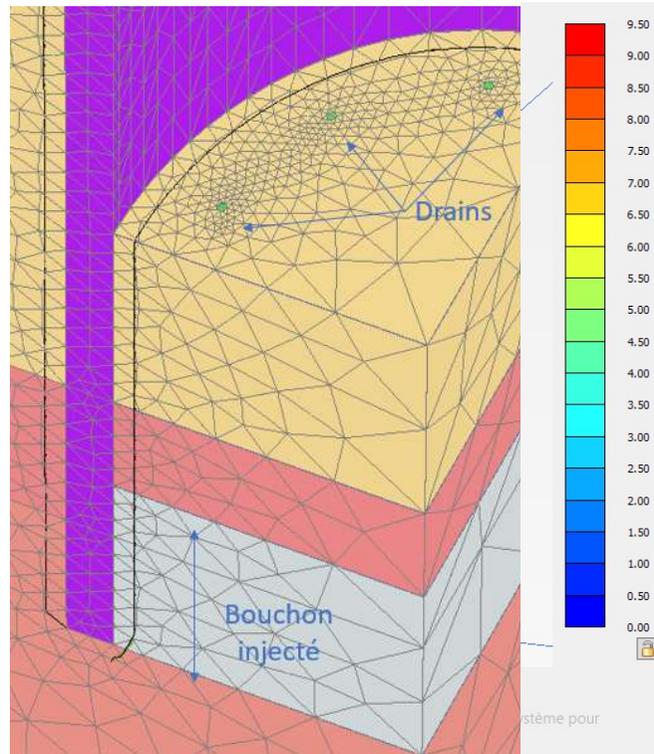
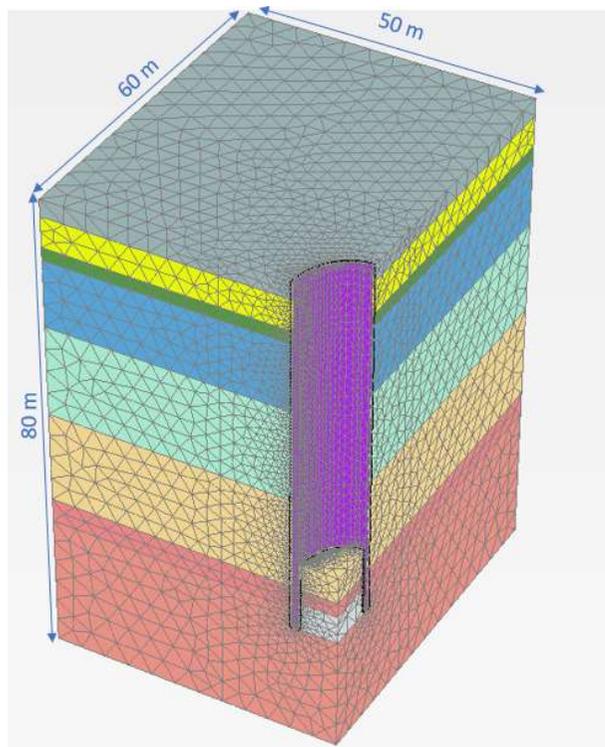
→ Proche du comportement drainé

Temps de consolidation pour  $U > 70\%$



## V) Couplage hydromécanique

### ➤ Calcul d'écoulements §6.5.5

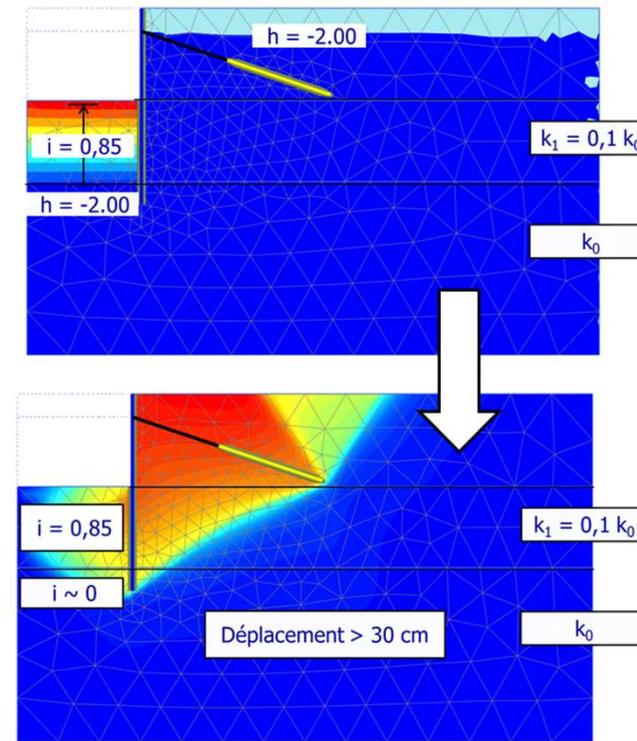
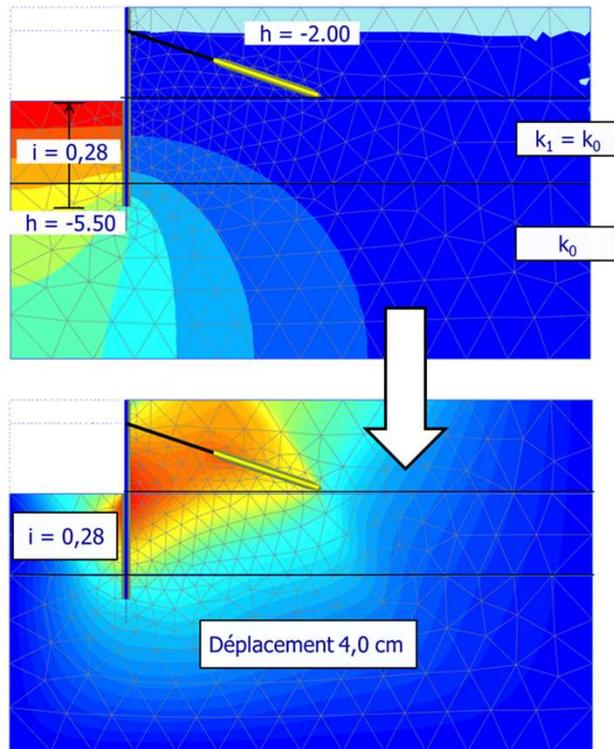


#### **Conditions limites:**

Difficiles à intuiter. A baser sur des essais de pompages ou des relations empiriques

## V) Couplage hydromécanique

### ➤ Calculs d'écoulements §6.5.5



### **Contrastes de perméabilité:**

Attention aux homogénéisations: les contrastes de perméabilité génèrent des forces d'écoulements pouvant être sources d'instabilités

## VI) Exploitation des résultats

### ➤ Grandeurs à analyser §6.6.1

- *Déplacements*
  - Comportement général de l'ouvrage, zone d'influence
  - Déplacements incrémentaux du dernier incrément de charge → Cinématiques de rupture
- *Déformations*
  - Mécanismes gouvernant le comportement de l'ouvrage et zones les plus sollicitées
  - Déformations déviatoriques et volumiques à étudier séparément
- *Contraintes*
  - Contraintes principales: effets de voûtes, report de charges ou rotation de contraintes
  - Incréments de contraintes effectives  $\Delta p'$  ou  $\Delta \sigma_v'$ , cisaillement mobilisé  $\tau_{mob}$ , et chemin de contraintes
  - Zones de plastifications y compris celles de mise en traction
- *Efforts dans les éléments de structure*
  - Sollicitations internes (N,M,V), pressions normales et déplacements relatifs à l'interface
- *Pressions interstitielles*
  - Si écoulement, lignes d'équipotentiels et pertes de charges,
  - Rayon d'action calculé et gradients.

## VI) Exploitation des résultats

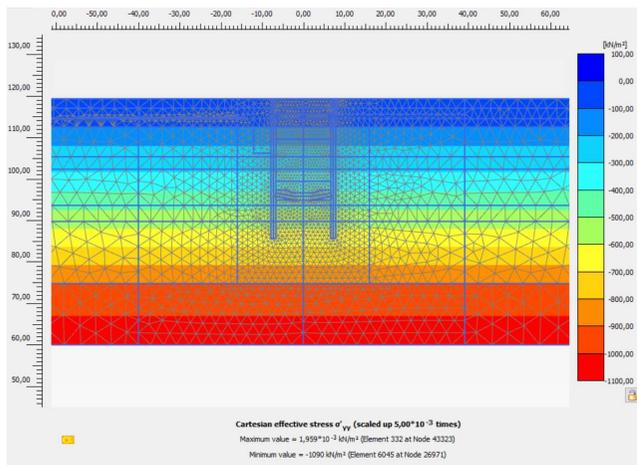
### ➤ Contrôle de cohérence §6.6.2

- *Ordres de grandeur*
  - Comparaison à des modèles empiriques ou semi analytiques
- *Limites du modèle*
  - Limites latérales: champs de déplacement vertical et incrément de déplacement horizontal
  - Limite inférieure: incrément de contrainte verticale
  - Limites hydrauliques: orientation des équipotentielles et/ou lignes de courant
- *Déformations*
  - Amplitude des déformations permet de contrôler la validité des choix de modules
- *Efforts dans les éléments de structure*
  - Compatibilité des sollicitations internes (N,M,V) avec la résistance structurale
- *Contraintes*
  - Si modélisation non drainée: contrôle de  $\tau_{mob}$  et compatibilité avec la « cohésion non drainée »
- *Pressions interstitielles*
  - Amplitude et signe des surpressions interstitielles. Puits de pompage, débit < débit critique
  - Cohérence des gradients et vitesses d'écoulement vis-à-vis des critères de stabilité hydraulique

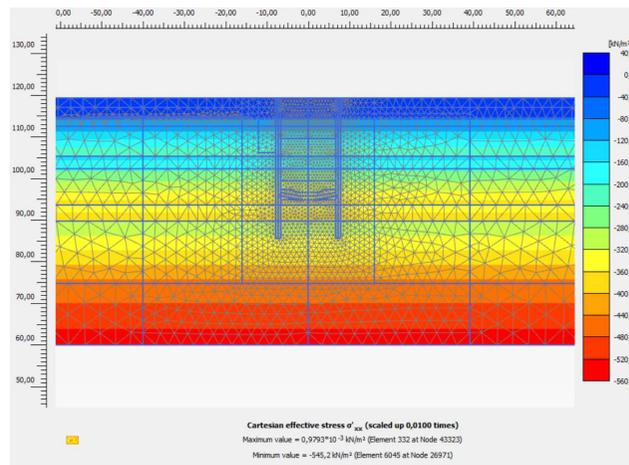
# VI) Exploitation des résultats: ex d'une paroi

- *Vérification des contraintes initiales*

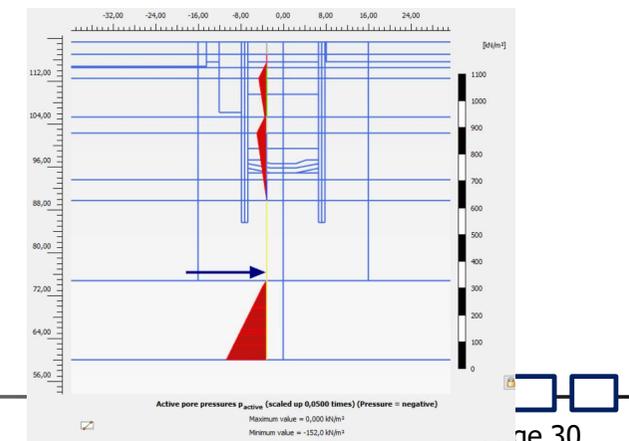
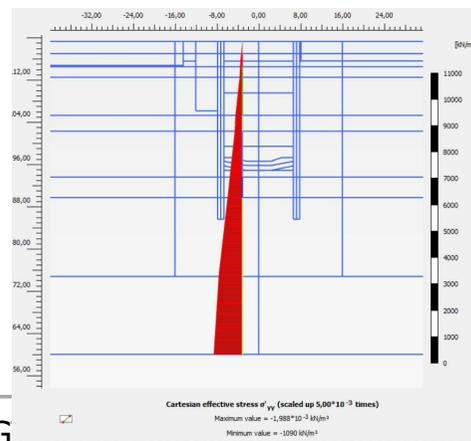
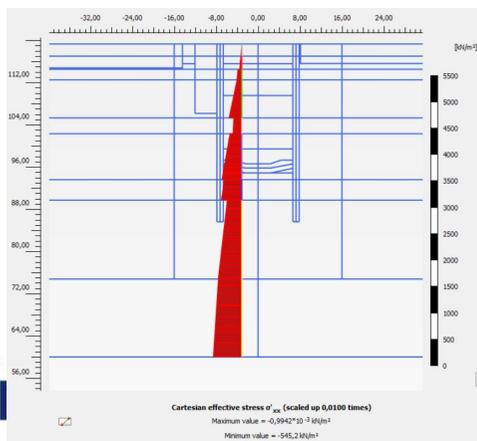
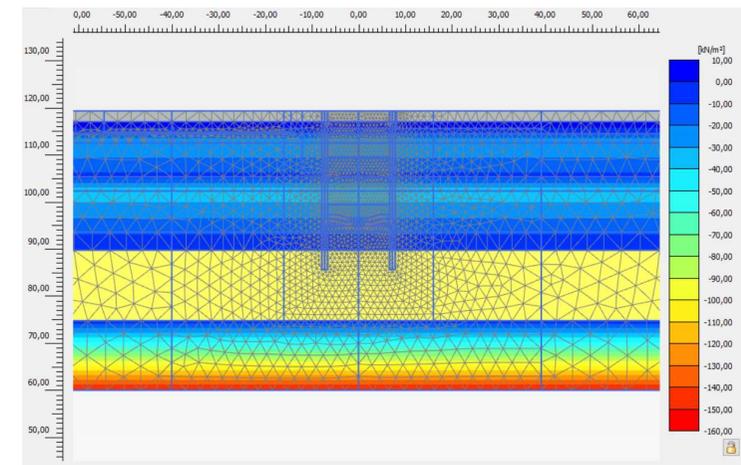
Contraintes verticales



Contraintes horizontales



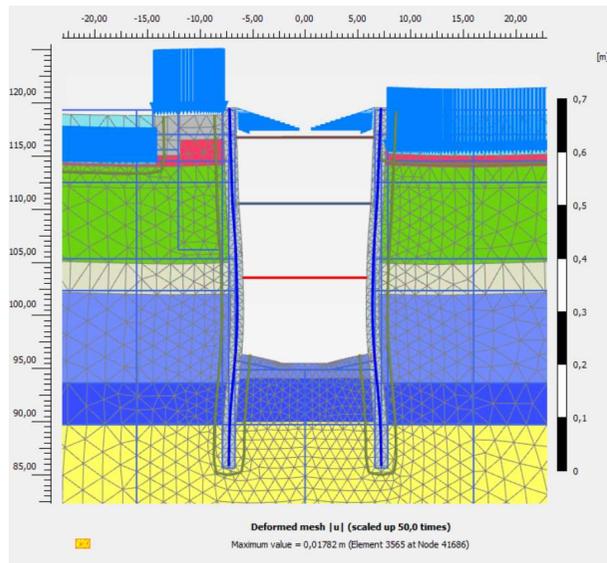
Pressions hydrostatiques



## VI) Exploitation des résultats: ex d'une paroi

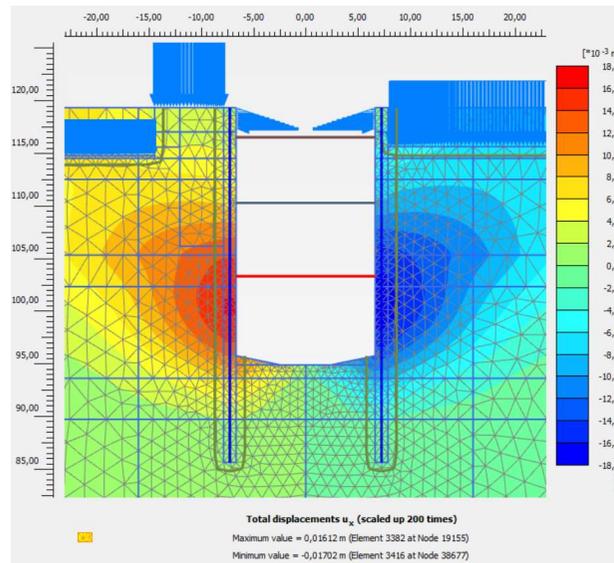
- *Vérification des déplacements*

Maillage déformé



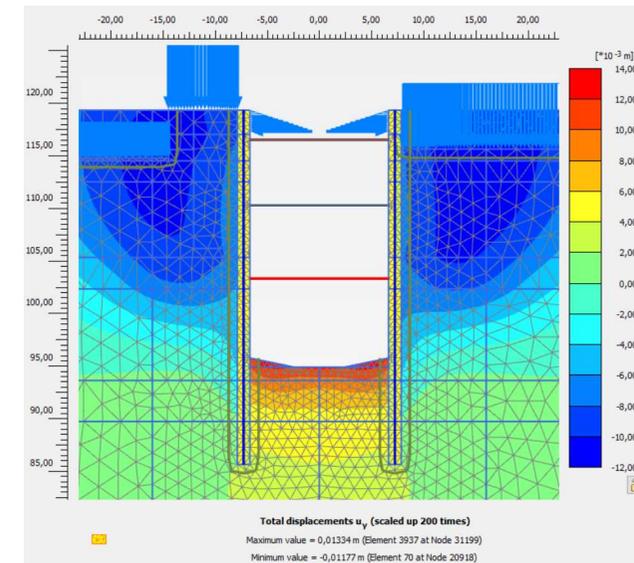
Déplacements prédominants en ventre  
Fiche suffisamment ancrée  
Peu de soulèvement en fond de fouille

Déplacements horizontaux



Déplacement horizontal de l'ordre de 1,5cm  
en cohérence avec ce type d'ouvrage  
compatible avec les sites urbains

Déplacements verticaux

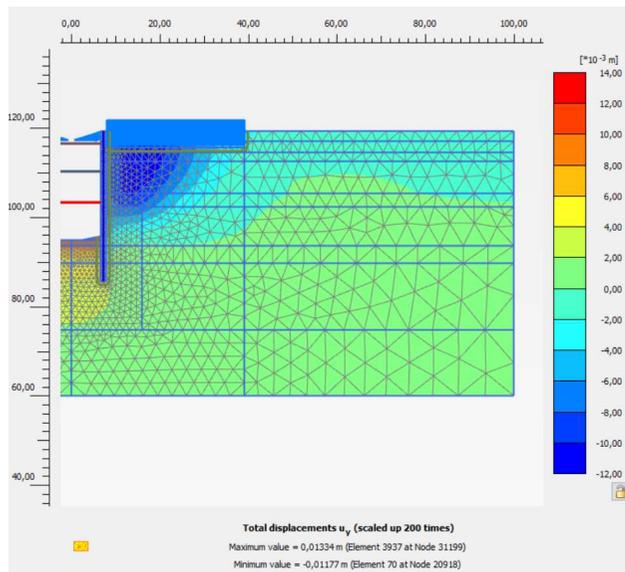


Tassements de l'ordre de 1cm  
Soulèvement de l'ordre de 1cm  
En cohérence avec les déformées  
de paroi

## VI) Exploitation des résultats: ex d'une paroi

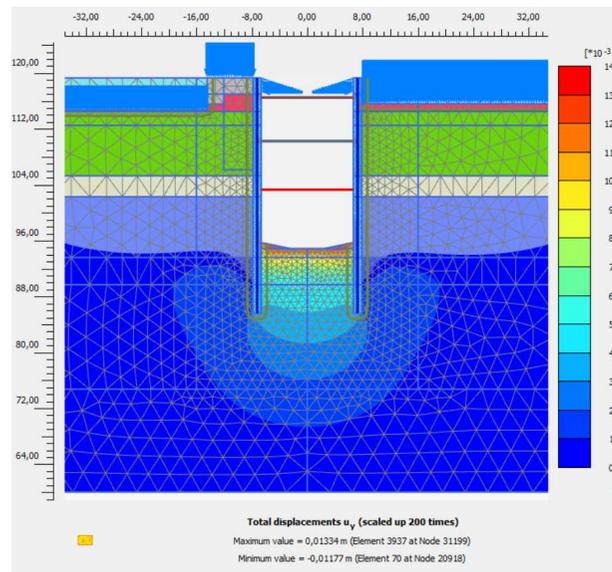
- *Vérification des conditions limites*

Largeur du modèle

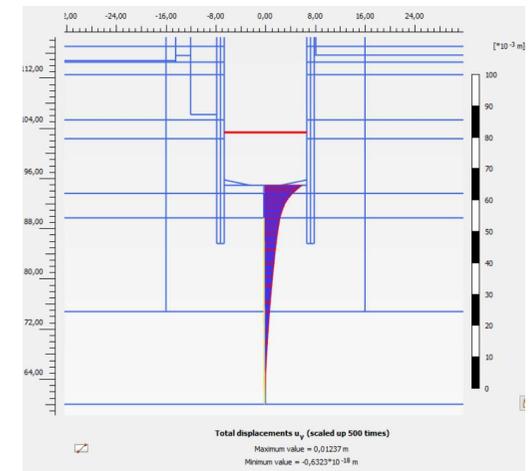


Déplacements négligeables en extrémité de modèle

Profondeur du modèle



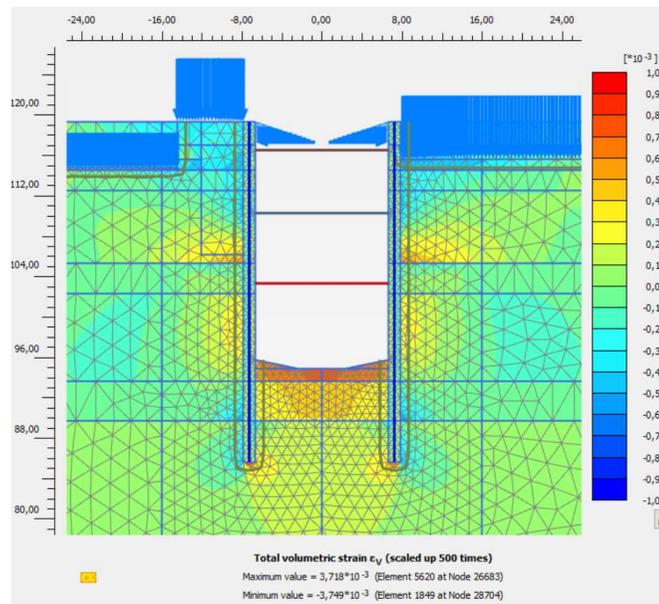
Soulèvement dans les couches de plus faible raideur en fond de fouille  
 peu de soulèvement sous la base des parois



## VI) Exploitation des résultats: ex d'une paroi

- Niveaux de déformations

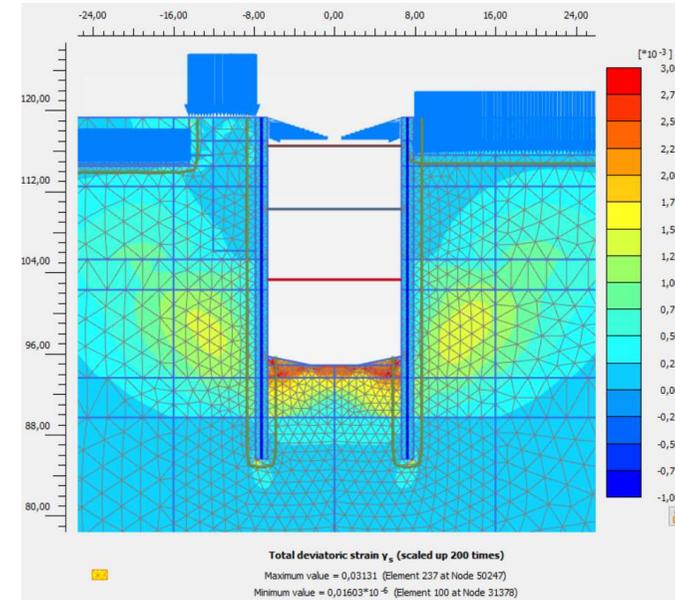
### ➤ Déformations volumiques



$$\epsilon_v \sim 10^{-4}$$

Déformation volumique essentiellement en fond de fouille

### Déformations déviatoriques

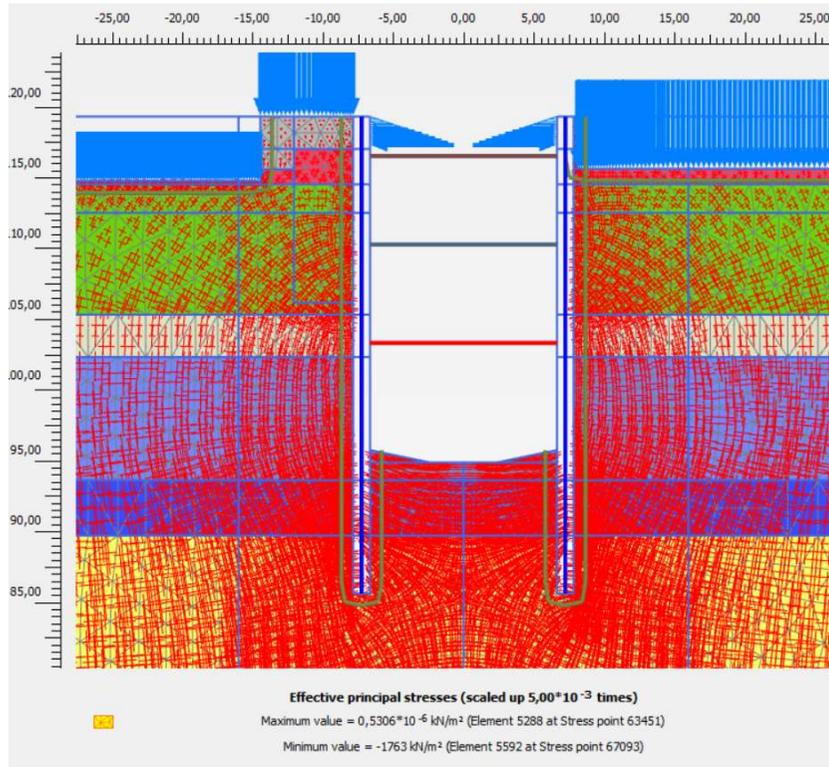


$$\gamma_s \sim 10^{-3}$$

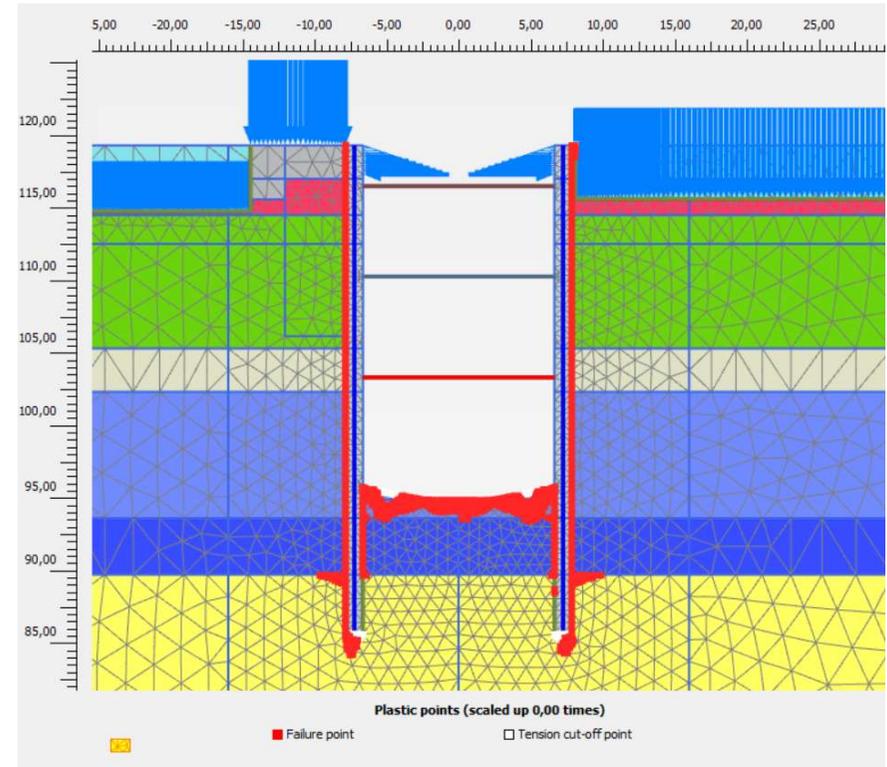
Déformation prépondérante

## VI) Exploitation des résultats: ex d'une paroi

- *Analyse des contraintes et des zones de plastification*



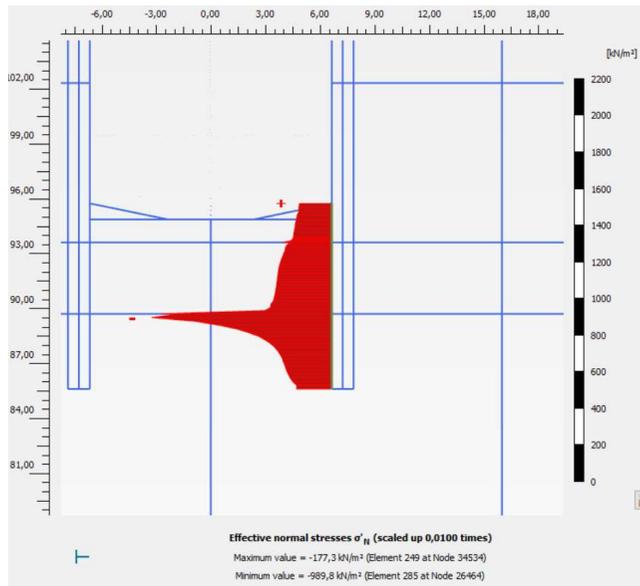
Orientation des contraintes



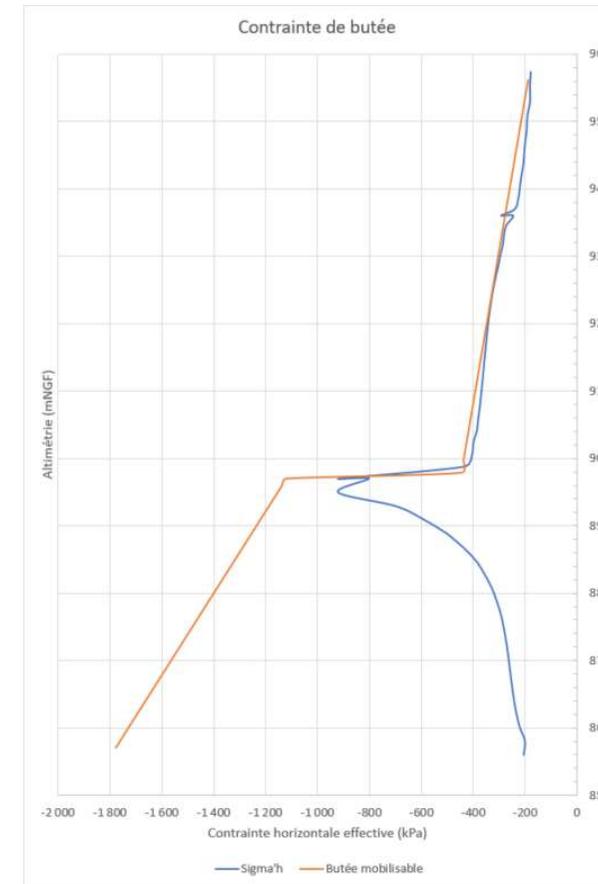
Zones de plastification

## VI) Exploitation des résultats: ex d'une paroi

- *Contrainte de butée*

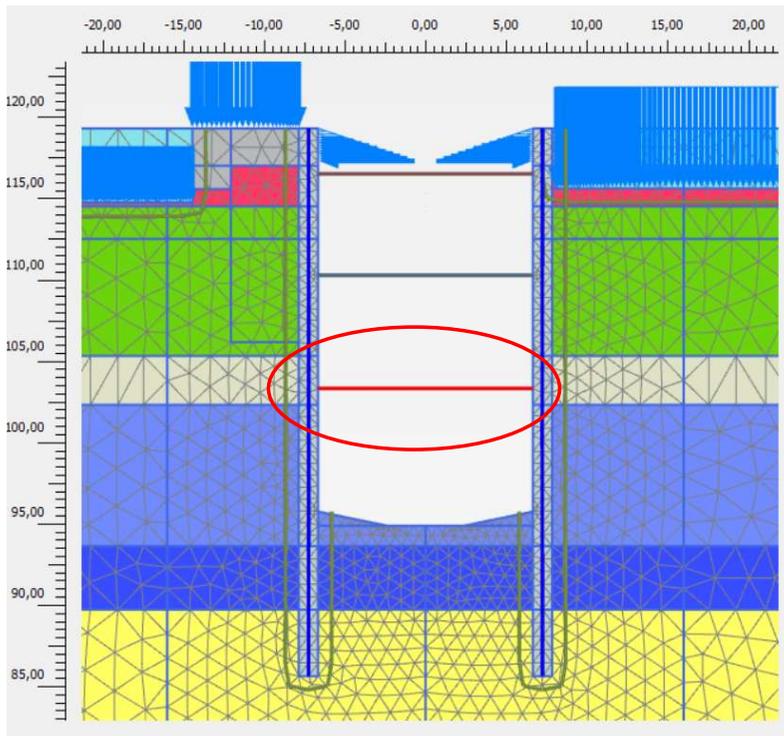


Comparaison des contraintes horizontales en butée avec la butée mobilisable



## VI) Exploitation des résultats: ex d'une paroi

- *Efforts dans les structures*



### Vérification de la résistance structurelle du buton

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N <sub>min</sub> [kN]	N <sub>max</sub> [kN]
NodeToNodeAnchor_2_1	20885	1	-6,650	103,300	-1005,311	-1005,311	0,000
Element 7-7 (Node-to-node anchor)	40894	2	6,650	103,300	-1005,311	-1005,311	0,000