

# Quelques aspects de la modélisation numérique des excavations

Sébastien Burlon  
Journée technique du CFMS  
Le 16 mars 2011



IFSTTAR

# Les enjeux liés au dimensionnement d'une excavation

Nécessité d'estimer et  
maîtrise des  
déplacements du terrain

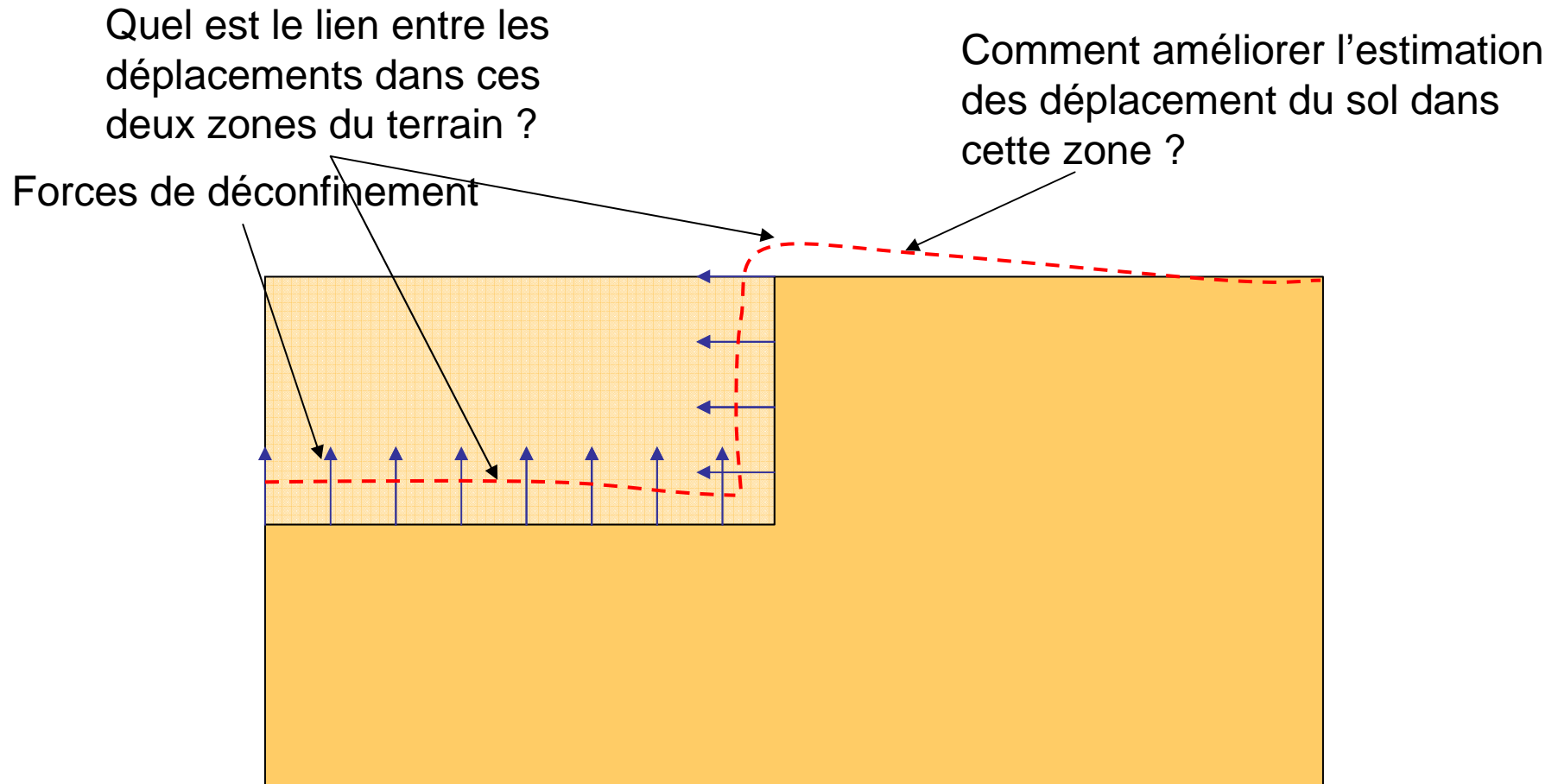


→ Comment approcher plus  
finement les déplacements du  
terrain en vue d'optimiser les  
soutènements ?

*La modélisation numérique  
constitue une des réponses*



# Comment un problème d'excavation est-il modélisé ?



→ Quels sont les paramètres intervenant dans le schéma de calcul ?

→ Quelles sont les voies possibles d'amélioration ?



# Les paramètres intervenant au cours du calcul ?

- Les dimensions du modèle :

- Elles doivent être suffisamment importantes pour éviter que des zones plastiques ne se développent aux frontières du modèle
- Elles ne doivent pas être trop importantes pour exagérer le soulèvement élastique en fond de fouille

- L'état initial des contraintes :

- Il détermine l'amplitude des forces de déconfinement
- Comment peut-il être modifié par le processus de réalisation ou de mise en place de l'écran ?

- Le comportement du sol :

- Drainé ou non drainé
- Quels sont les chemins de contrainte « caractéristiques » ?
- Comment modéliser le déchargement du sol ?

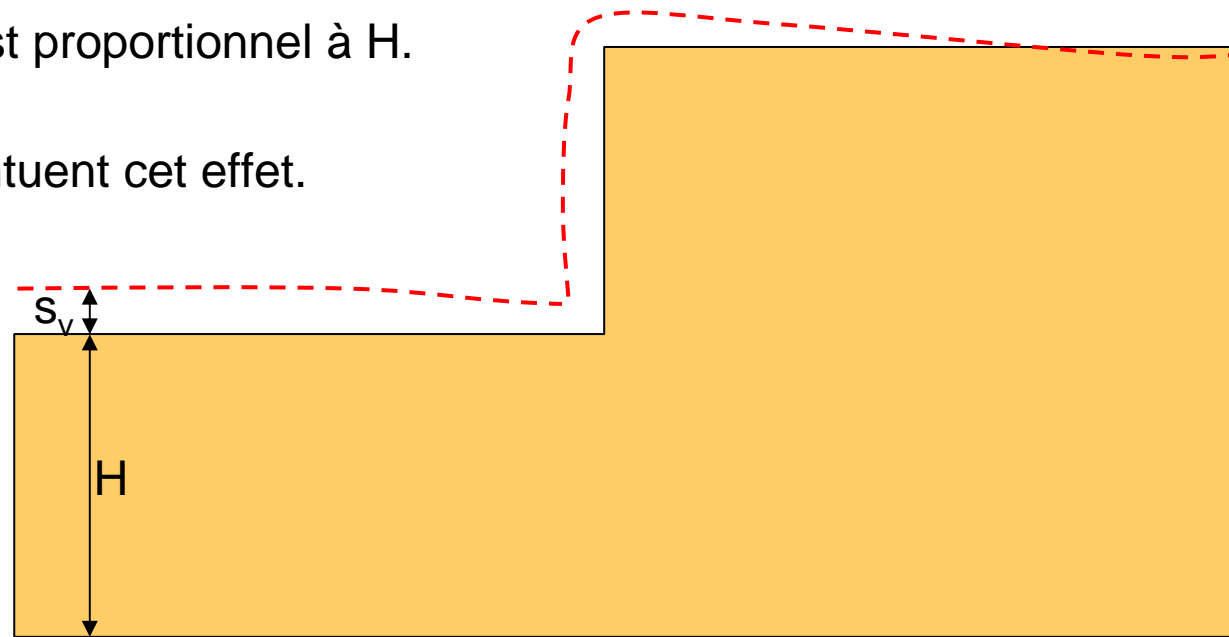
- Les conditions d'interface entre le sol et l'écran



## Les dimensions du modèle

Le soulèvement  $s_v$  est proportionnel à  $H$ .

Les calculs 2D accentuent cet effet.

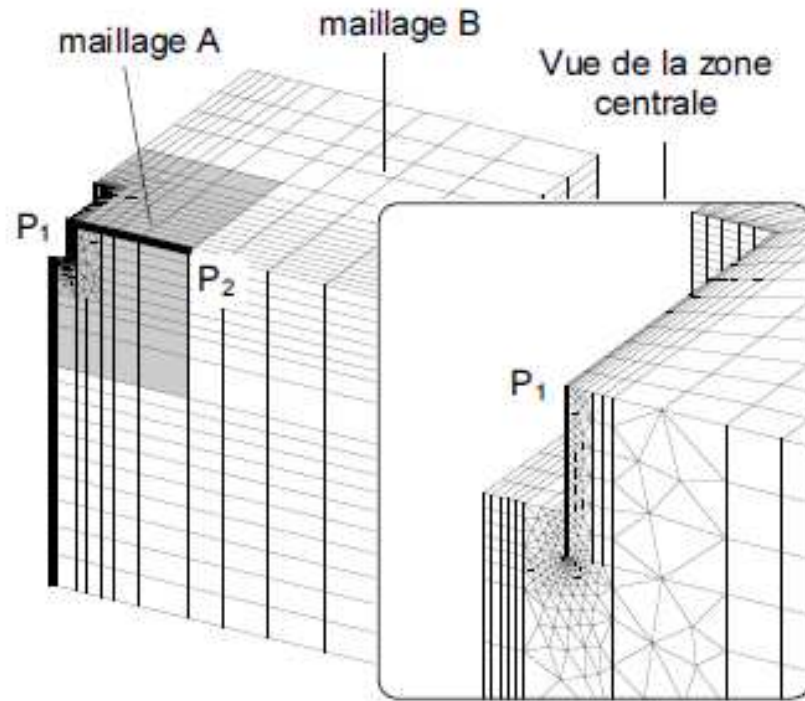


→ Utilisation de conditions aux limites analytiques (P. Corfdir et E. Bourgeois)

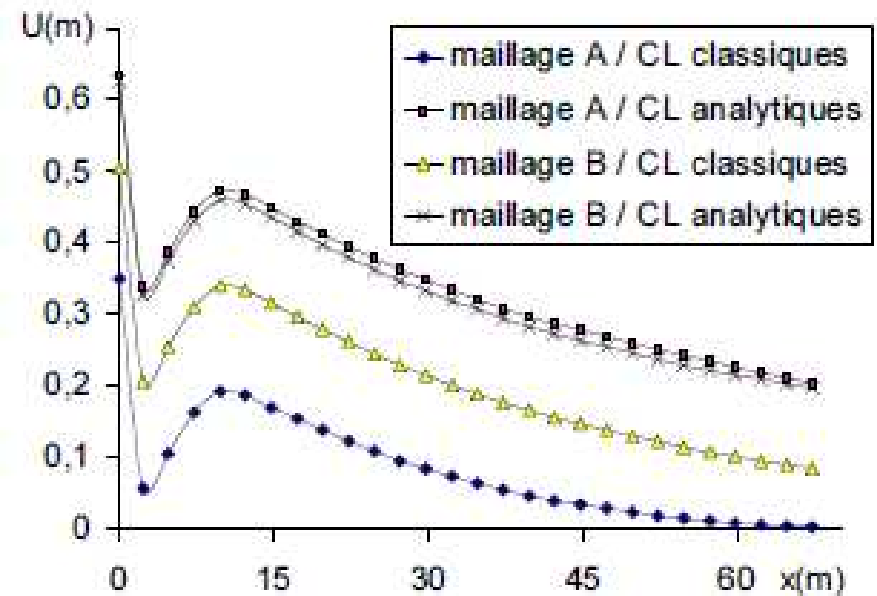
- L'idée est d'imposer des conditions aux limites en déplacement résultant d'un calcul de type Boussinesq
- Pour une excavation modélisée en 3 dimensions, la correction consiste à venir superposer à la solution numérique la solution analytique obtenue avec une charge ponctuelle  $P$  égale au poids de terrain excavé.



# Les dimensions du modèle



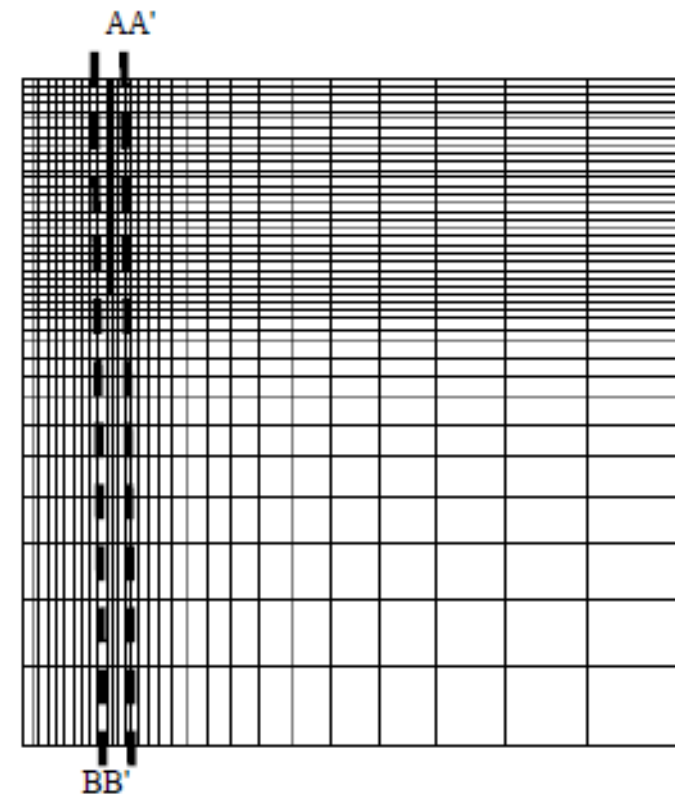
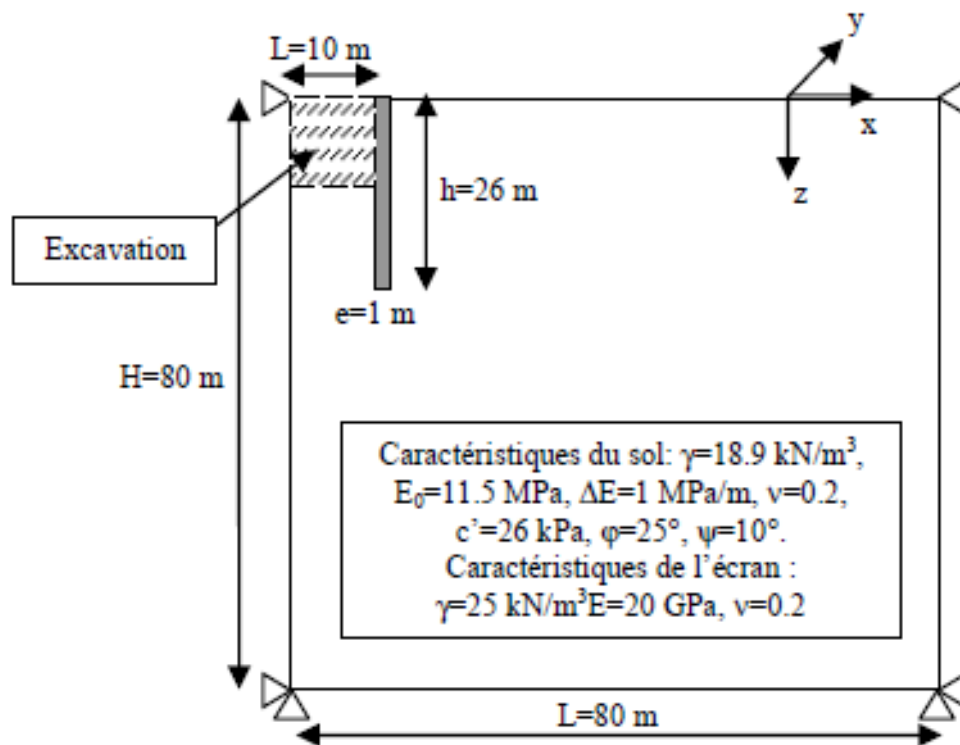
Contributions à la maîtrise des mouvements liés aux travaux urbains,  
LCPC, ERLPC, GT85



# L'état initial des contraintes

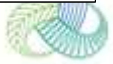
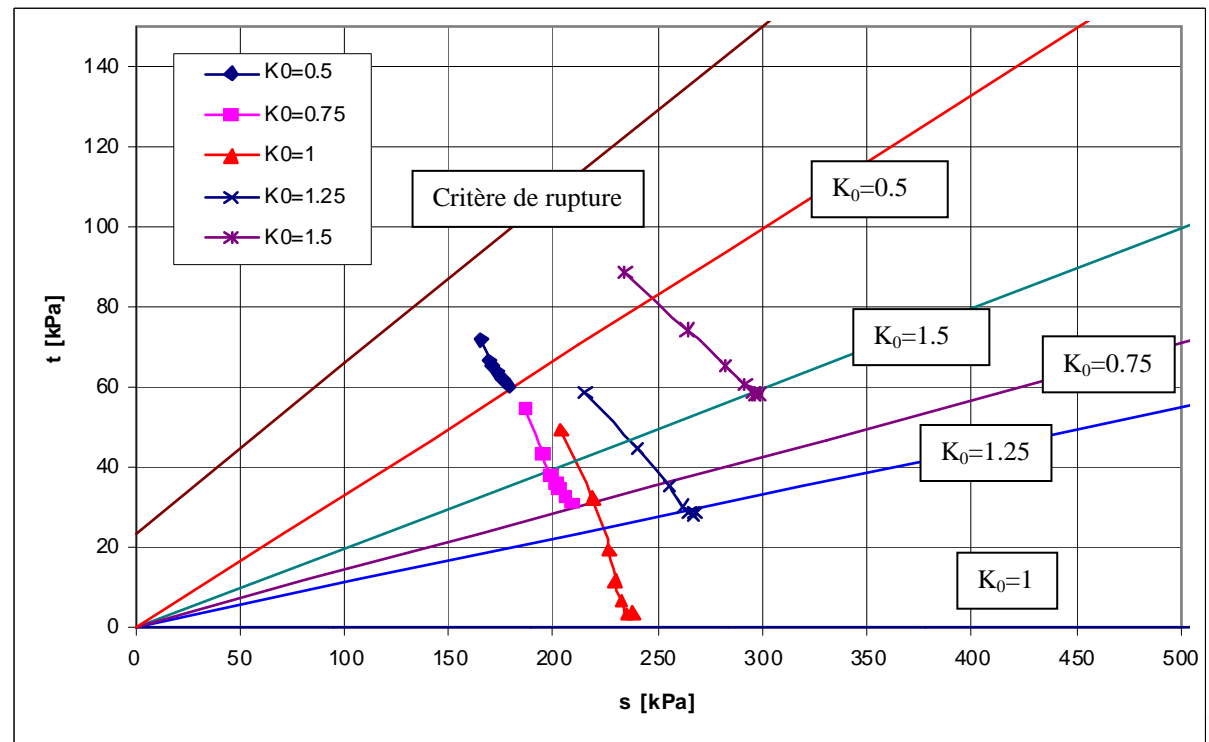
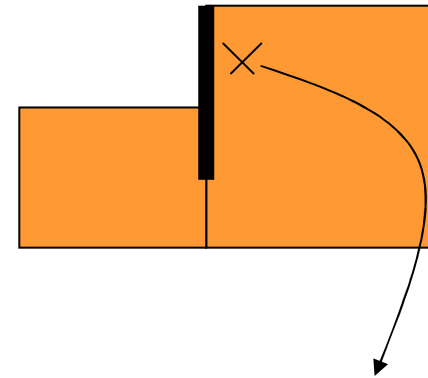
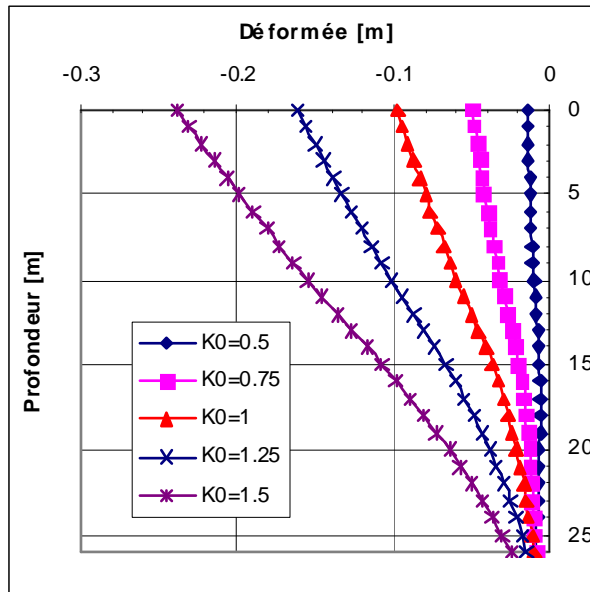
L'état initial des contraintes défini par le coefficient de pression des terres au repos intervient à deux niveaux :

- L'état initial : contrainte moyenne, déviateur
- Les forces de déconfinement





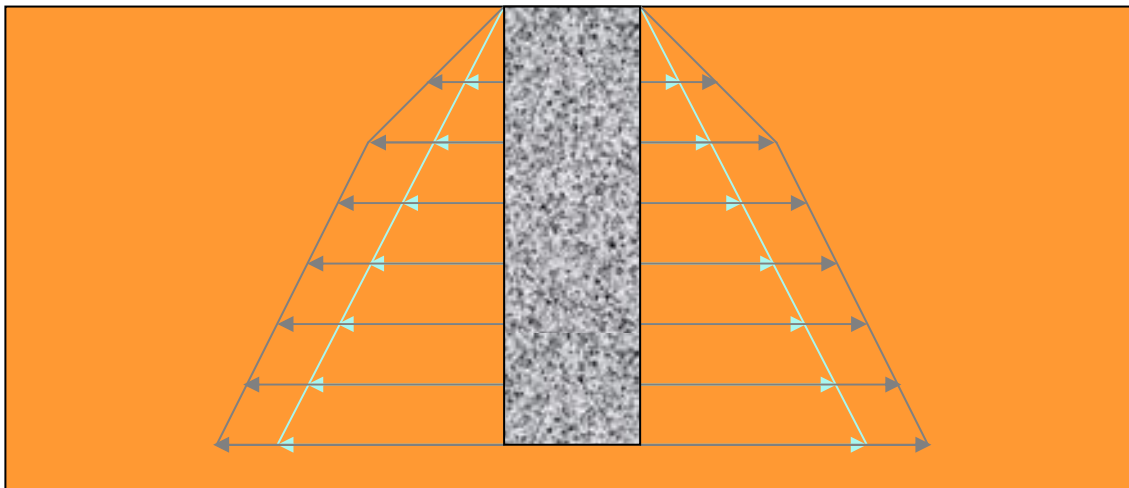
# L'état initial des contraintes





# Tentative de prise en compte du processus de réalisation d'une paroi moulée

## Analyse du processus de mise en place de la paroi moulée



- Phase 1 : excavation sous boue de bentonite
- Phase 2 : réalisation de la paroi – béton liquide
- Phase 3 : séchage du béton constituant la paroi



# Tentative de prise en compte du processus de réalisation d'une paroi moulée

## Modélisation de la réalisation de la paroi :

- Méthode WIP (« wished in place»)
- Méthode WIM (« wall installation modelled »)

### •Phase 1 :

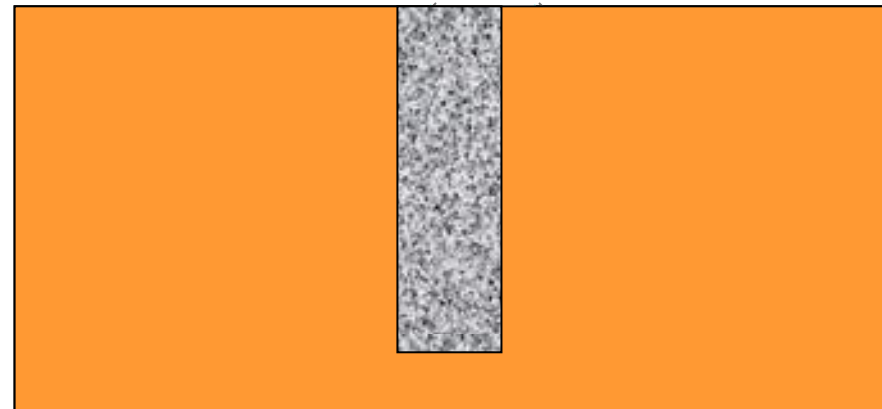
- déconfinement des éléments massifs à l'emplacement de la paroi
- application d'un champ de contraintes modélisant la bentonite

### •Phase 2 :

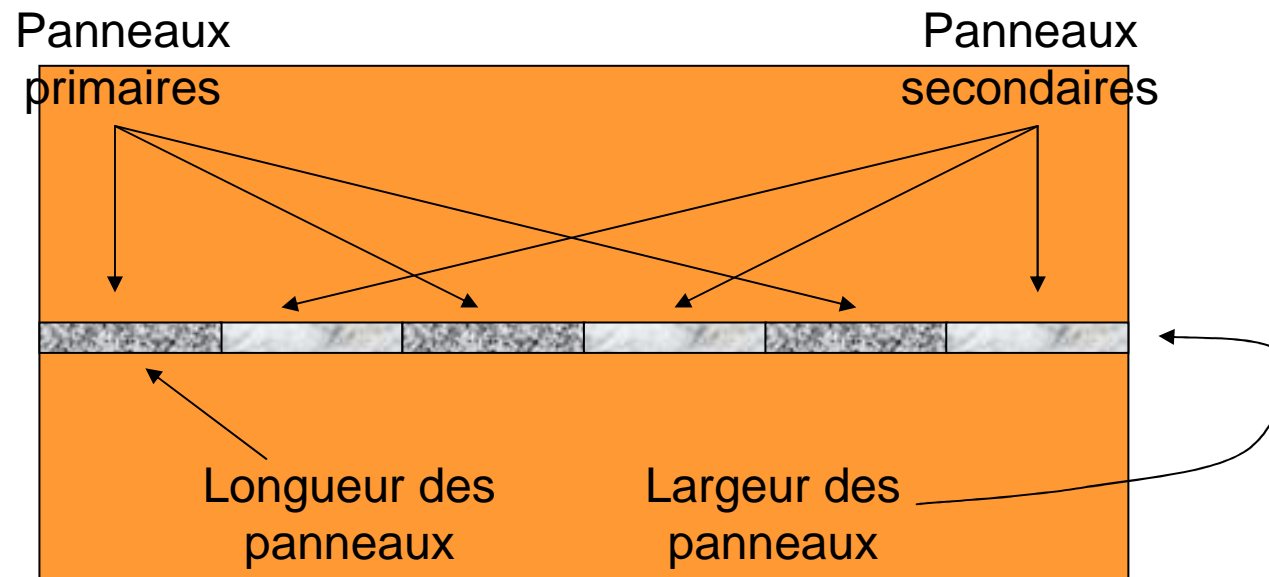
- application d'un champ de contraintes modélisant le béton liquide

### •Phase 3 :

- activation d'éléments massifs modélisant la paroi
- annulation du champ de contraintes modélisant le béton liquide

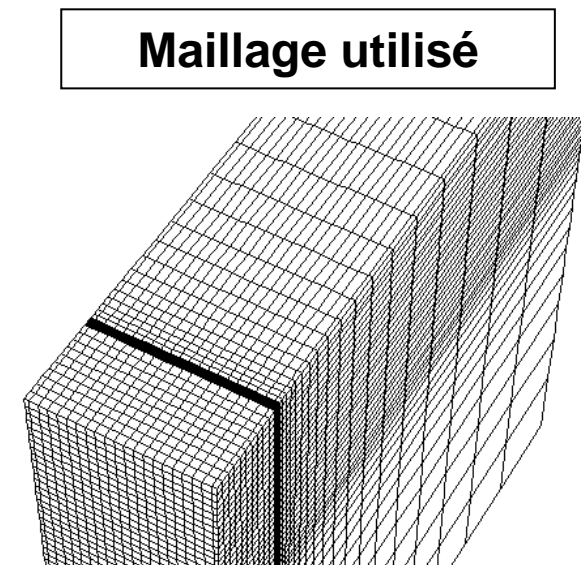
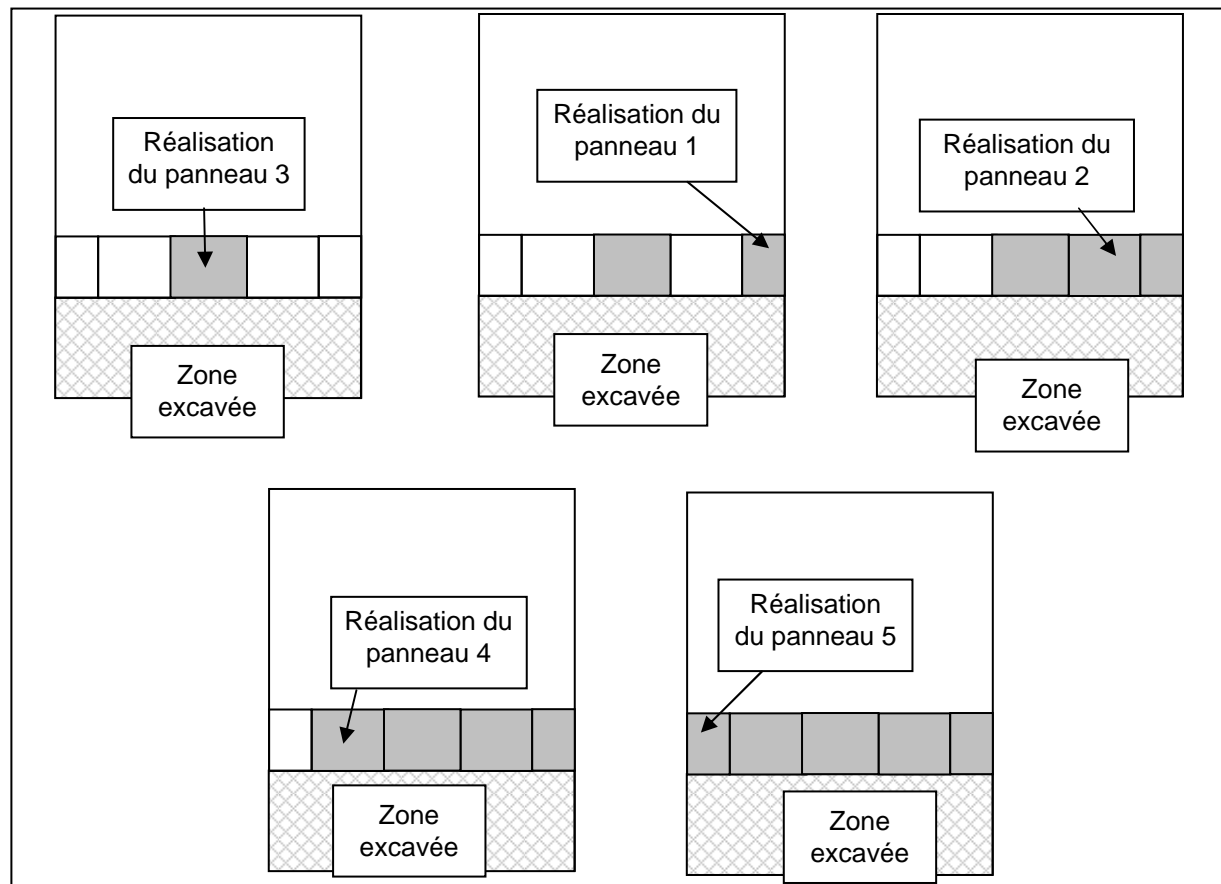


# Tentative de prise en compte du processus de réalisation d'une paroi moulée



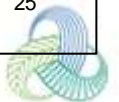
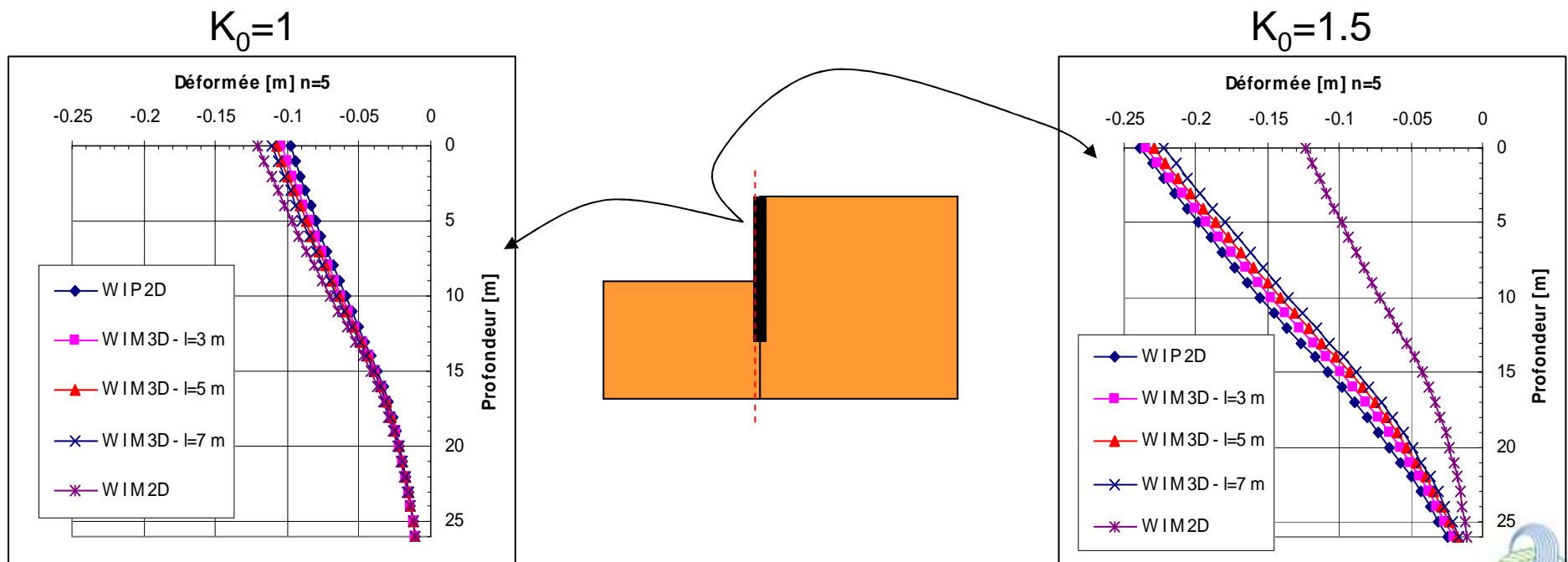
# Tentative de prise en compte du processus de réalisation d'une paroi moulée

Exemple de phasage pour la modélisation de la réalisation de 5 panneaux



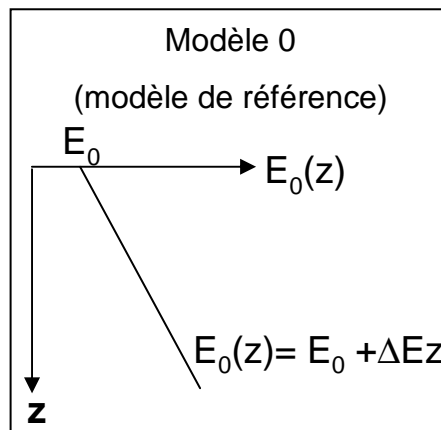
# Tentative de prise en compte du processus de réalisation d'une paroi moulée

Influence sur la cinématique de l'excavation : les déplacements horizontaux



# Prise en compte du déchargement du sol - Influence d'une élasticité non linéaire

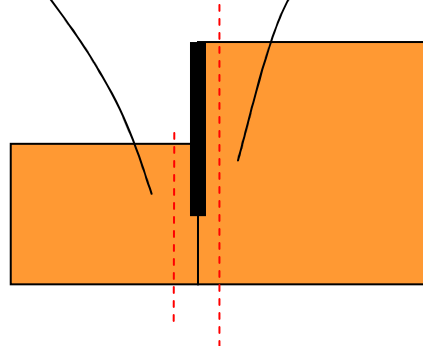
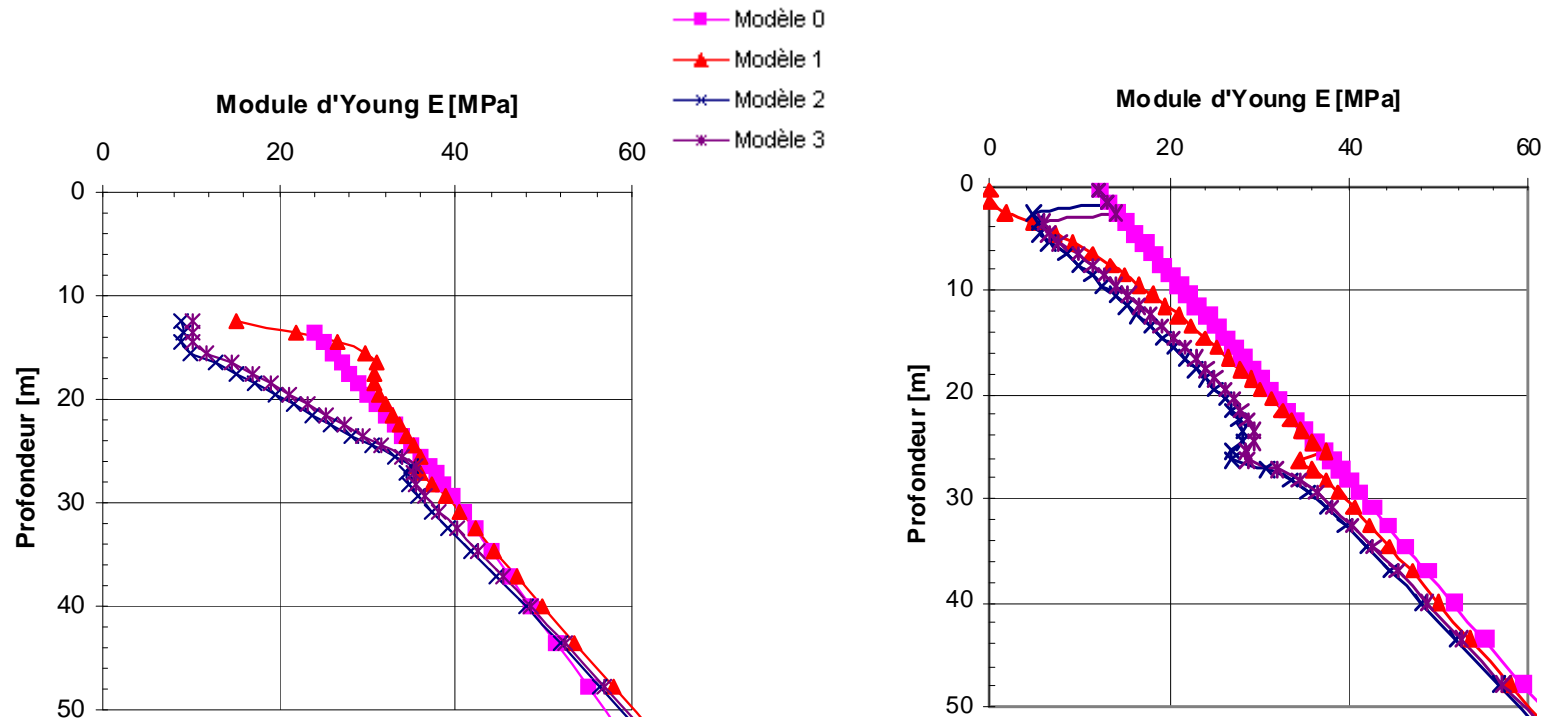
Prise en compte de l'élasticité non linéaire à partir du champ de contraintes



Description de la partie élastique des différents modèles	
Modèle 1	$E(z, p) = E_0(z) \times \left( \frac{p}{p_0} \right) \text{ si } p > 0 \text{ et } E(z, p) = E_0(z) \text{ si } p < 0$ $\text{avec } p_0(z) = \gamma z \frac{(1 + 2K_0)}{3}$
Modèle 2	$E(z, J_2) = E_0(z) \left( 1 - R_f \left( \frac{J_2}{J_{2\max}} \right)^{0.5} \right) \text{ avec } R_f = 0.9 \text{ si } p > 0 \text{ et } E(z, J_2) = E_0(z) \text{ si } p < 0$
Modèle 3	$G(z, J_2) = G_0(z) \left( 1 - R_f \left( \frac{J_2}{J_{2\max}} \right)^{0.5} \right) \text{ si } p > 0 \text{ et } G(z, J_2) = G_0(z) \text{ si } p < 0$ $\nu(z, J_2) = \left( \frac{\left( 1 + \nu_0 - (1 - 2\nu_0) \frac{G(z, J_2)}{G_0(z)} \right)}{2(1 + \nu_0) + (1 - 2\nu_0) \frac{G(z, J_2)}{G_0(z)}} \right)$ $K(z) = K_0(z)$

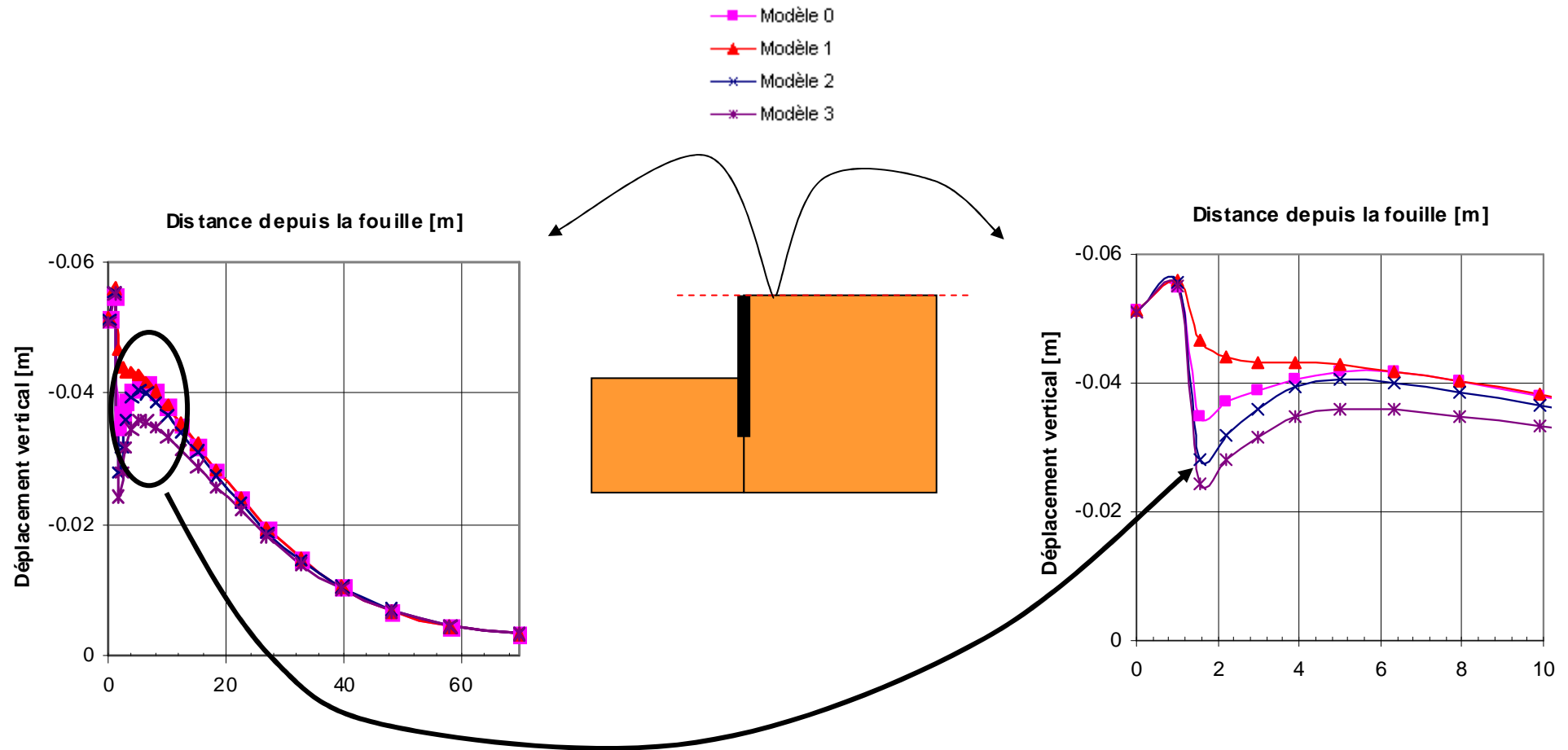


# Élasticité non linéaire – Variations du module d'Young





# Élasticité non linéaire – Analyse du champ de déplacements



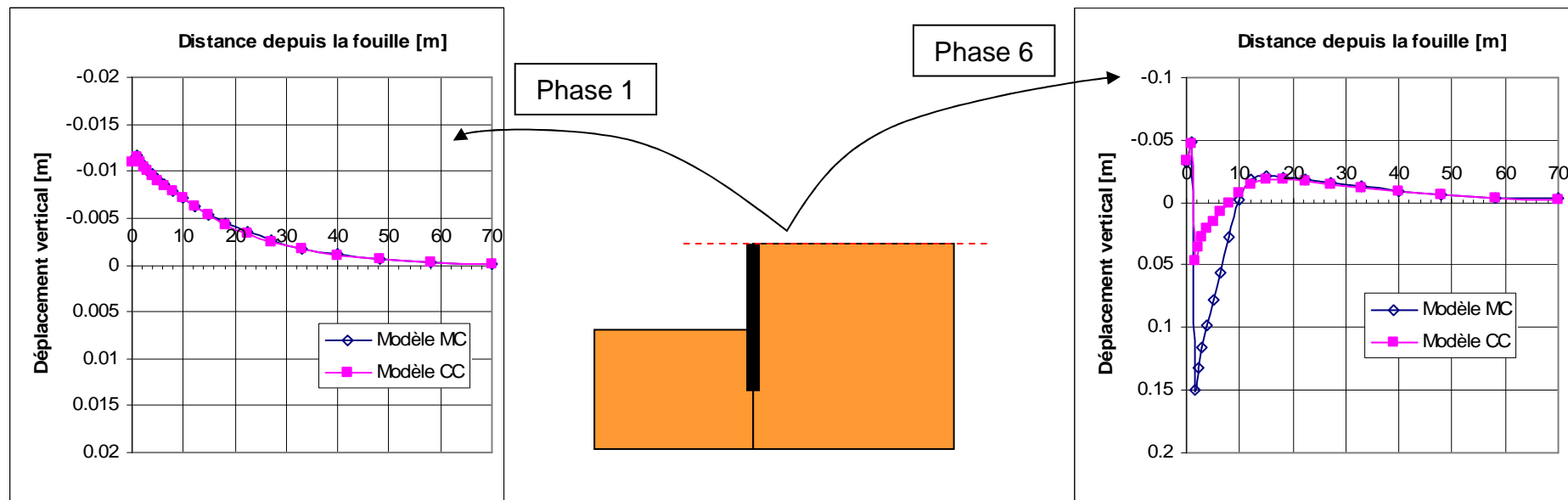
→ Les modèles présentant une élasticité non linéaire se révèlent peu performants



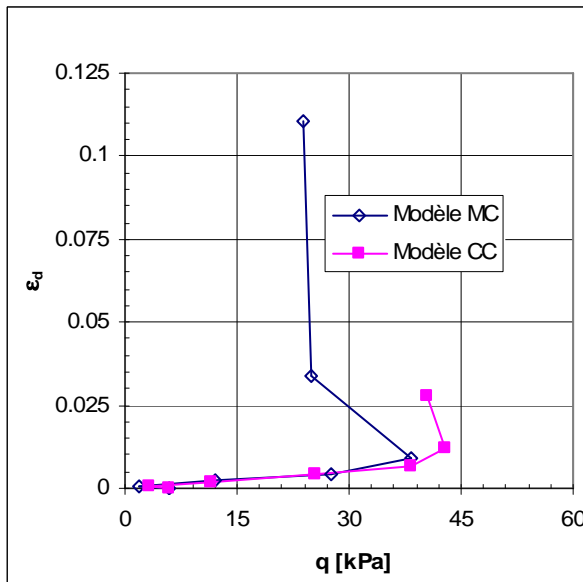
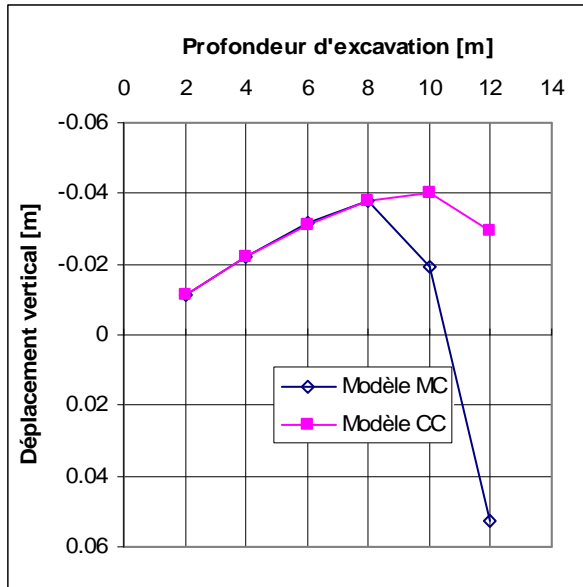
# Prise en compte de la plasticité – Analyse des chemins de contraintes

## Comparaison entre un modèle de type Mohr-Coulomb et un modèle de type Cam-Clay :

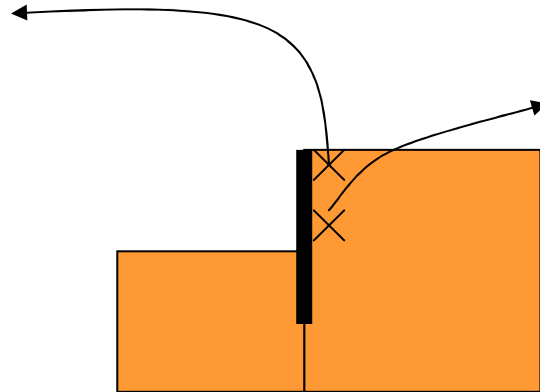
- possibilité de reproduire un caractère contractant du matériau en plasticité
- parties élastiques équivalentes pour les deux modèles



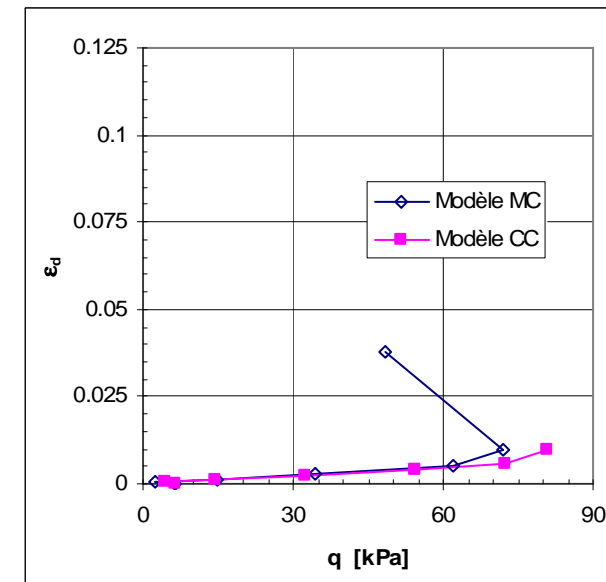
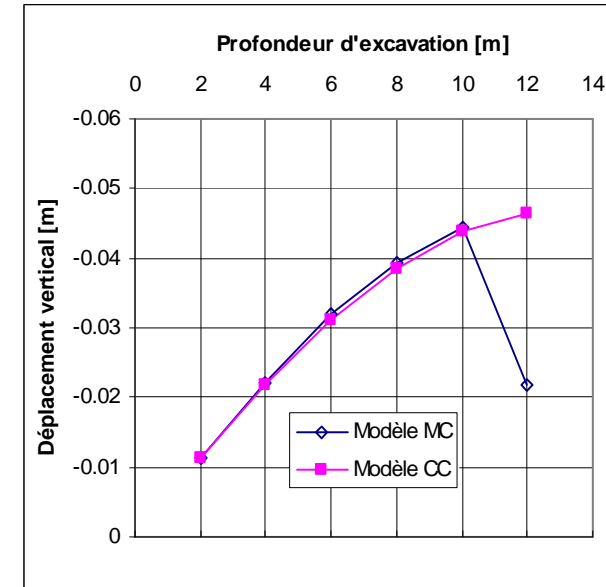
# Prise en compte de la plasticité – Analyse des chemins de contraintes



## Résultats

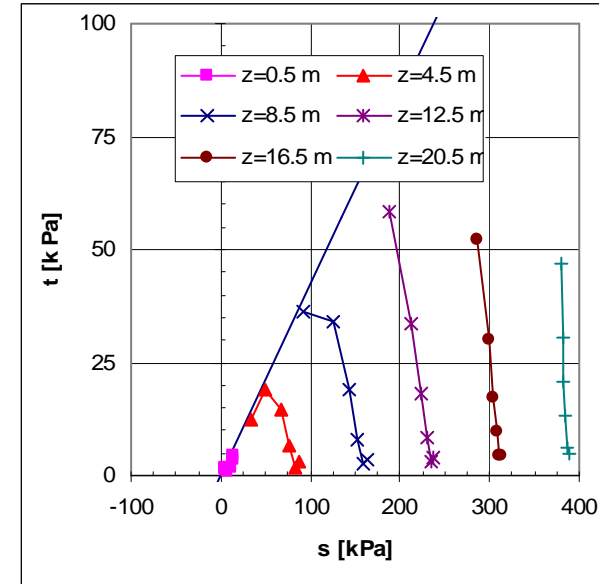
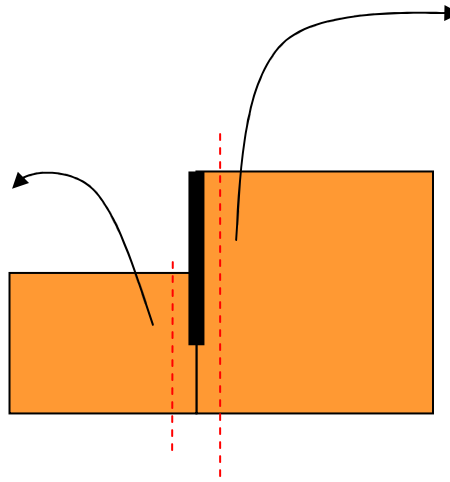
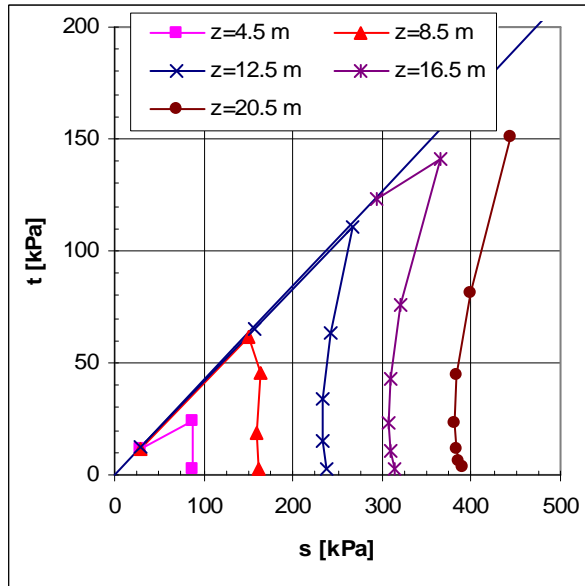


→ Vers des modèles associant un écoulement isotrope déviatorique et un domaine contractant



# Analyse des chemins de contraintes

Comparaison des chemins de contraintes dans un repère (s,t) pour un critère de Mohr-Coulomb :



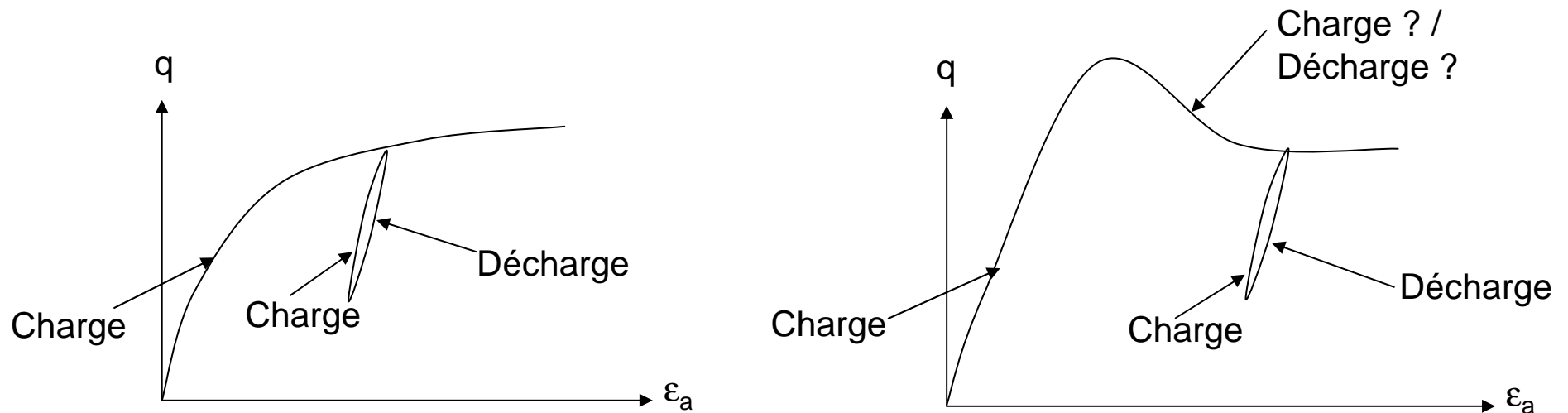
→ Les chemins de contraintes en poussée et en butée sont similaires. La seule dépendance vis-à-vis de l'état de contrainte s'avère donc inutile en considérant seulement les invariants  $p$  et  $q$  ( $s$  et  $t$ )

→ Il est nécessaire de pouvoir identifier les zones en charge et en décharge à partir d'un critère intégrant la totalité du tenseur des contraintes.



# Concept de charge et de décharge

Comment définir qu'un volume de sol est en charge ou décharge ?



**→ L'évolution des contraintes n'est pas suffisante pour identifier les zones de charge et de décharge**

→ Doit-on considérer les variations de contraintes ?

→ Doit-on considérer les variations de déformation ?

→ Doit-on considérer des aspects énergétiques ?



# Concept de charge et de décharge

Pour une excavation, le problème est complexe car en général l'histoire de chargement/déchargement du matériau est fixée a priori : définition du coefficient  $K_0$  ou chargement gravitaire.

Quelques propositions :

→1/ Adopter des modèles plus complexes : les modèles à écrouissage cinématiques destinés aux calculs sous sollicitations cycliques et sismiques. En fonction de la direction de chargement, la réponse du modèle est plus ou moins raide.

*Les paramètres sont nombreux à caler et la gestion de la loi de comportement à l'échelle d'un ouvrage reste complexe. Ces modèles nécessitent de connaître l'histoire du matériau.*

→2/ Suivre l'évolution des déformations au cours du calcul pour détecter les inversions de chargement.

*Ces modèles nécessitent de connaître l'histoire du matériau.*

→3/ Utiliser le travail du 1<sup>er</sup> ordre comme indicateur :  $dW = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$  (N.Arafati)

*Ce critère permet de localiser les zones qui sont en charge ( $dW > 0$  et  $W = W_{max}$ ), en décharge ( $dW < 0$  et  $W \leq W_{max}$ ) et en recharge ( $dW > 0$  et  $W \leq W_{max}$ ). En fonction du signe de  $dW$ , le module d'élasticité est modifié pour rendre compte d'un comportement plus raide lors d'un déchargement*



# Conclusions

Malgré la large diffusion des méthodes numériques, la modélisation des excavations reste un problème complexe :

- Nombreux paramètres en interaction (y compris les interfaces non abordées dans cette présentation)
  - Géométrie / Aspects tridimensionnels
    - État initial des contraintes
  - Aspects rhéologiques (charge / décharge)
    - Les problèmes hydrauliques

**→ L'utilisateur de méthodes numériques doit donc mesurer sur son calcul les effets de ces différents aspects et des interactions entre chacun**





# Merci pour votre attention

**Ifsttar**

Cité Descartes

Boulevard Newton

77420 Champs-sur-Marne

Tél. +33 (0)1 40 43 50 00

Fax. +33 (0)1 40 43 54 98

[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)

[communication@ifsttar.fr](mailto:communication@ifsttar.fr)



**IFSTTAR**