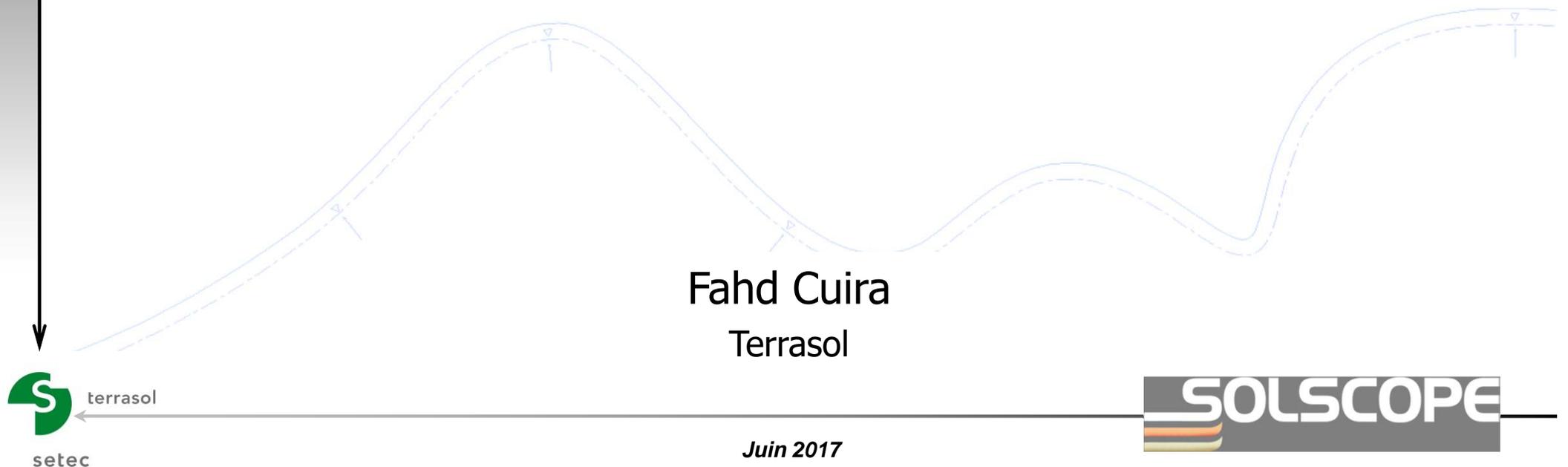


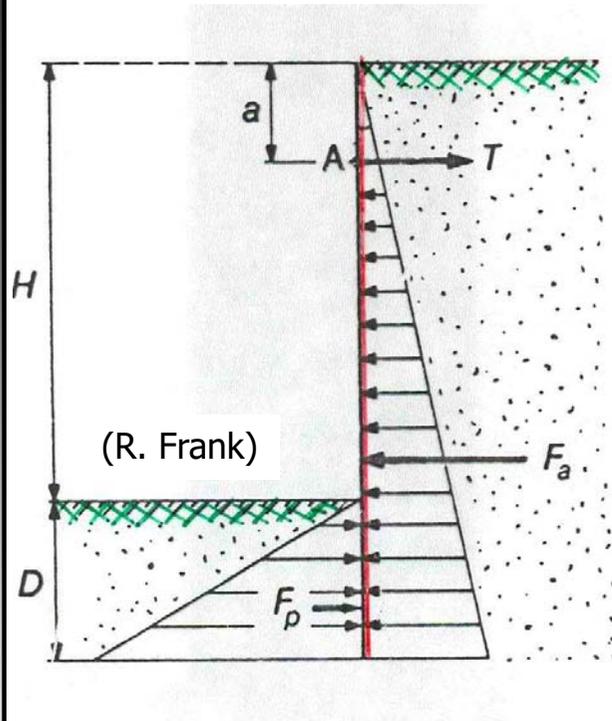
Le défi de l'ingénierie géotechnique face à la généralisation des modèles numériques



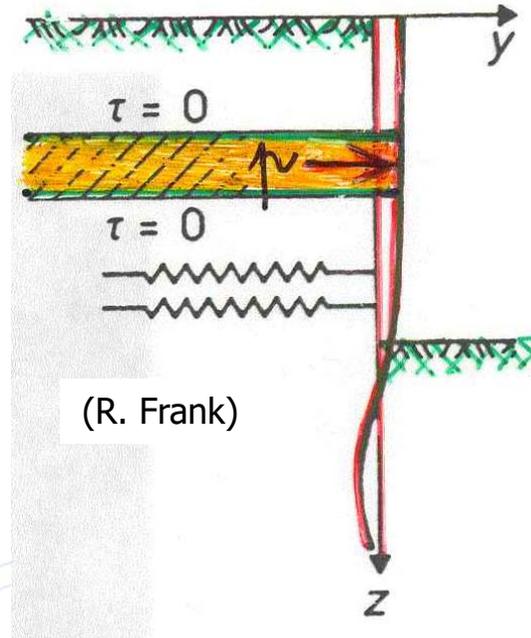
- Apports des modèles numériques dans l'identification des mécanismes de ruine et d'interaction
- Choix des paramètres : la question des modules
- Les couplages hydro-mécaniques
- Quels modèles pour l'avenir ?

Apports des modèles numériques

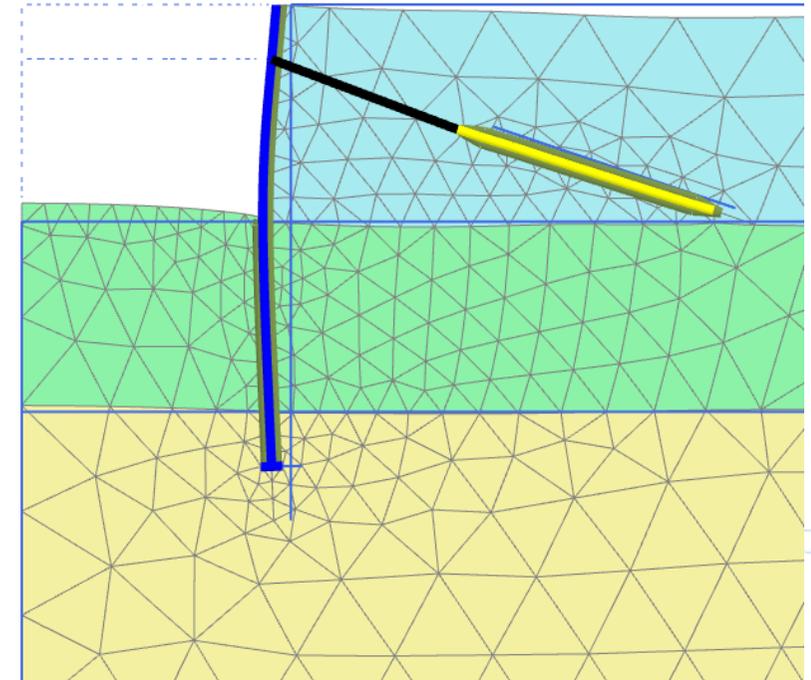
⇒ Massif de sol « explicitement » pris en compte



Modèle aux équilibres limites



Modèle aux coefficients de réaction

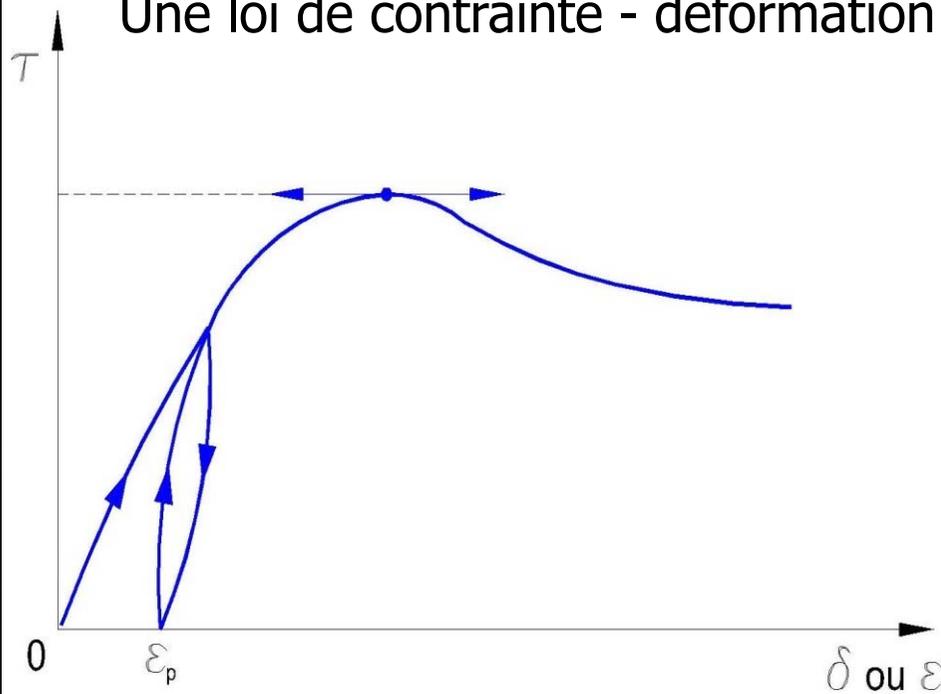


Modèle numérique
Éléments/différences fini(e)s

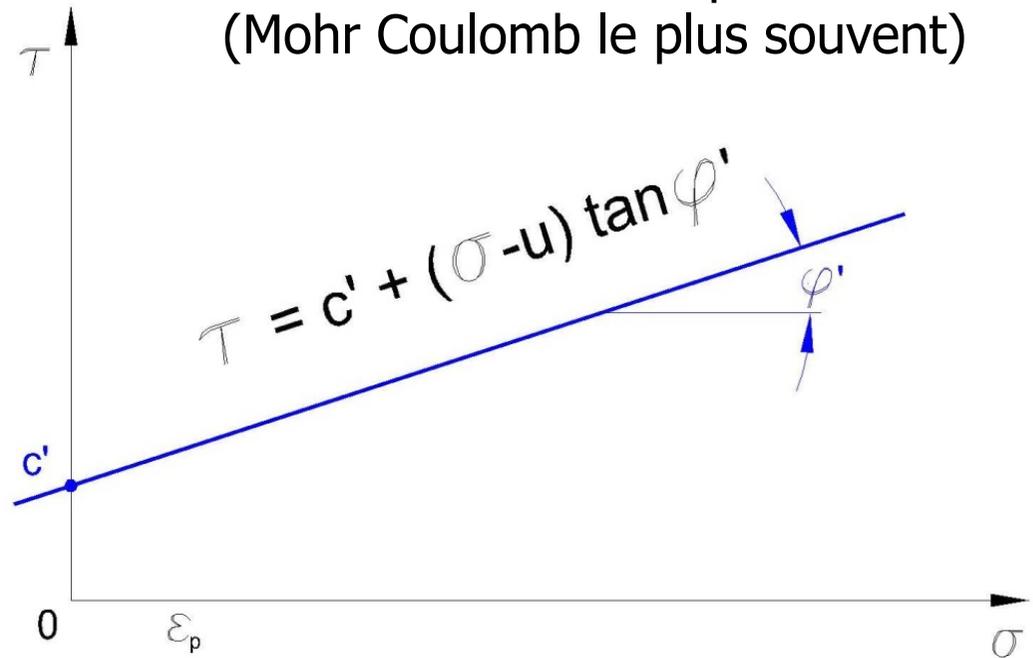
Apports des modèles numériques

⇒ Requiert la définition d'une loi de comportement « locale »

Une loi de contrainte - déformation

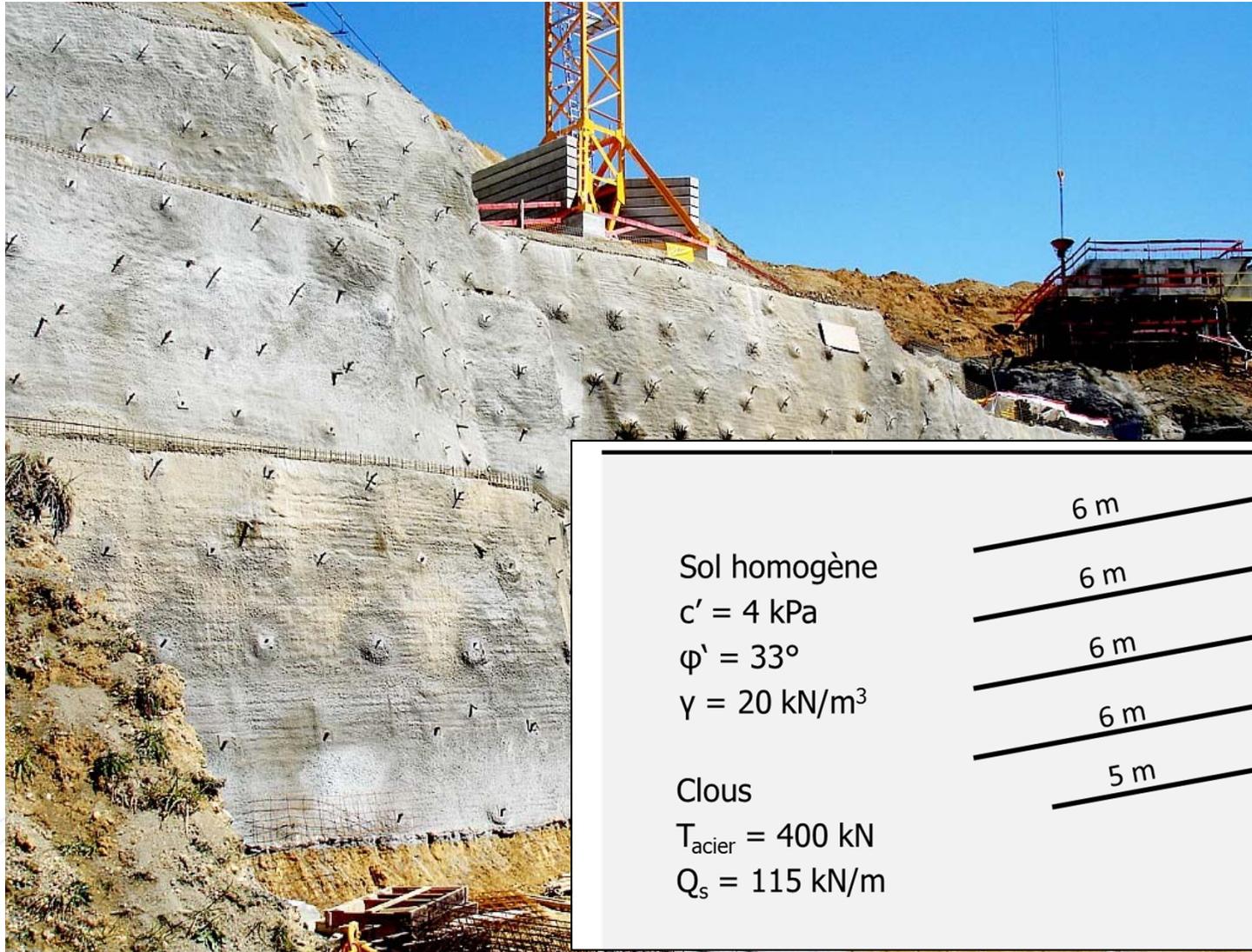


Un critère de rupture
(Mohr Coulomb le plus souvent)



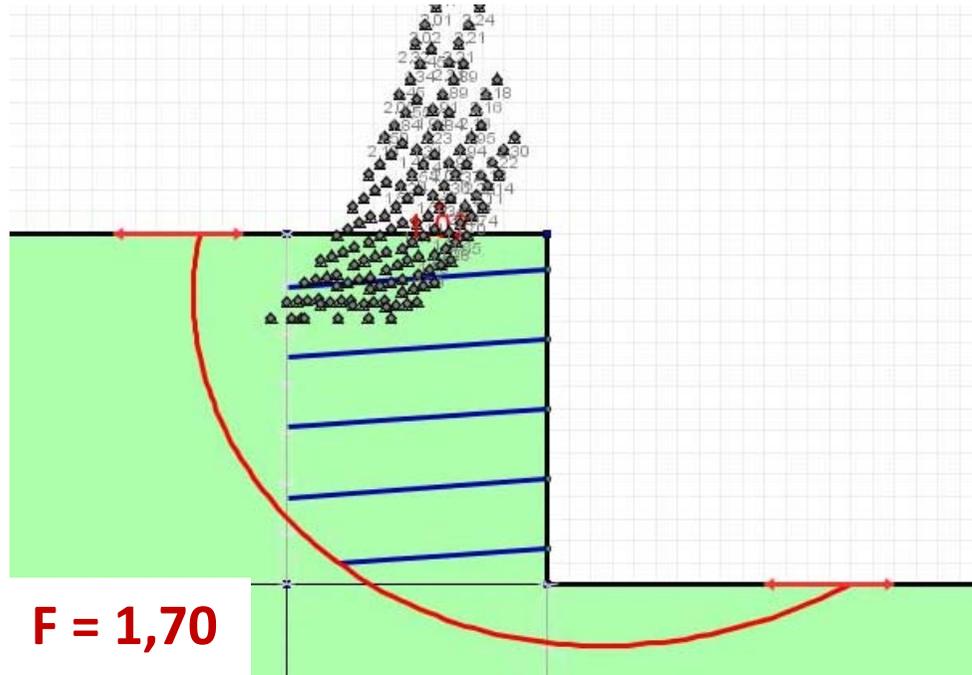
Faire découvrir le mécanisme de ruine

⇒ Exemple d'une paroi clouée

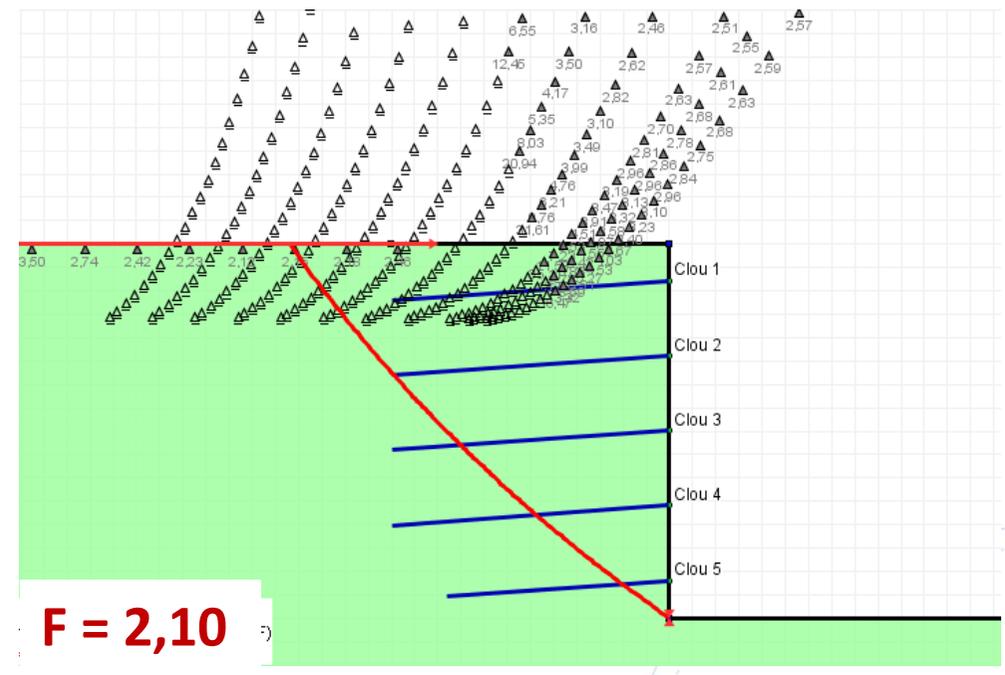


Faire découvrir le mécanisme de ruine

⇒ Exemple d'une paroi clouée : analyse de stabilité « classique »



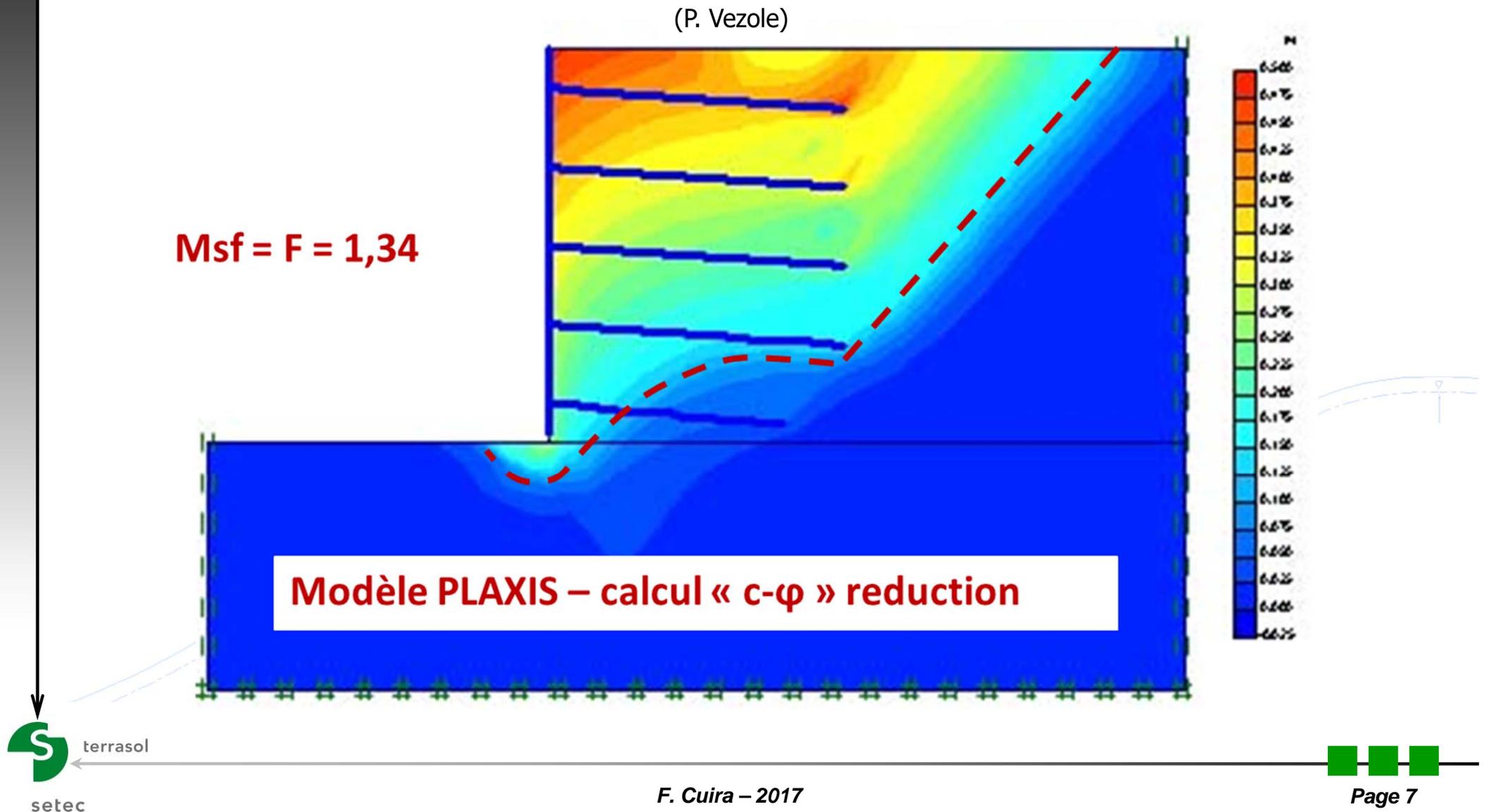
Stabilité générale



Stabilité mixte –
mécanisme classique
(1 seul bloc)

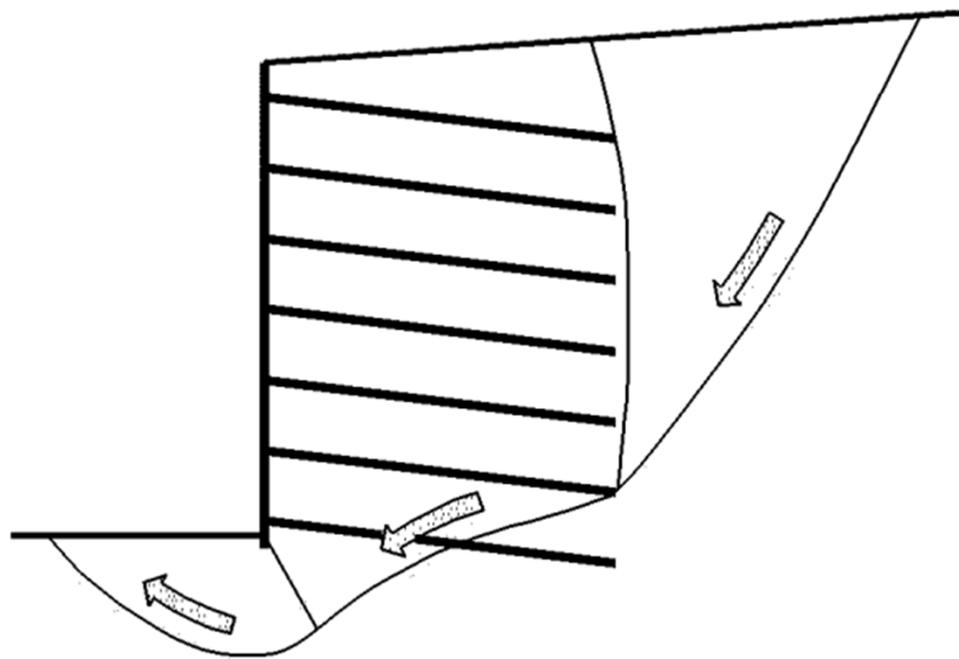
Faire découvrir le mécanisme de ruine

⇒ Exemple d'une paroi clouée : analyse de stabilité par éléments finis

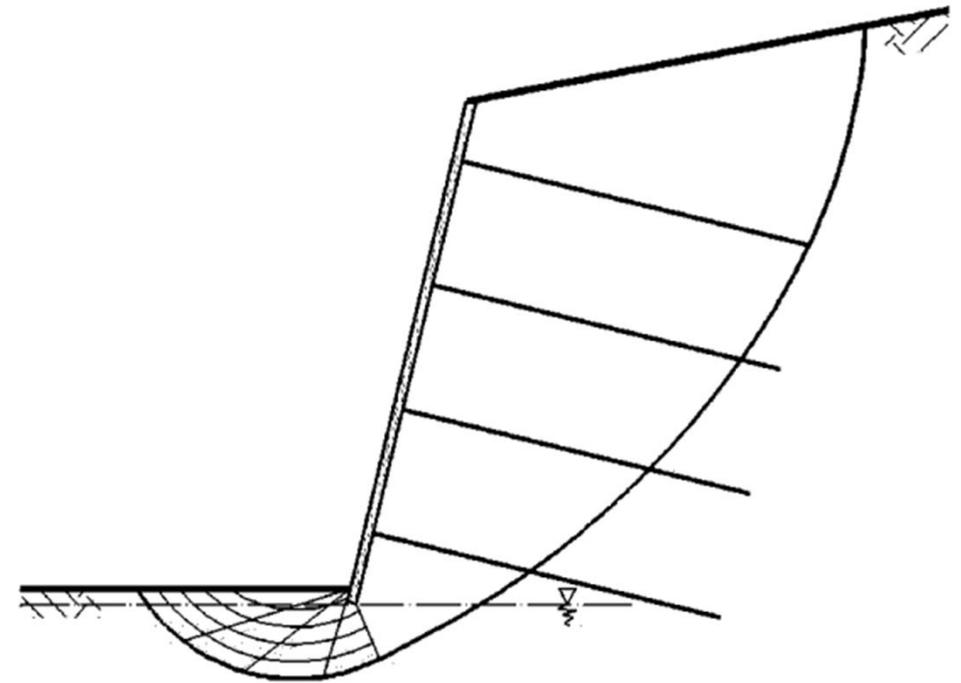


Faire découvrir le mécanisme de ruine

⇒ Exemple d'une paroi clouée : mécanismes multi-blocs



Mécanisme à trois blocs

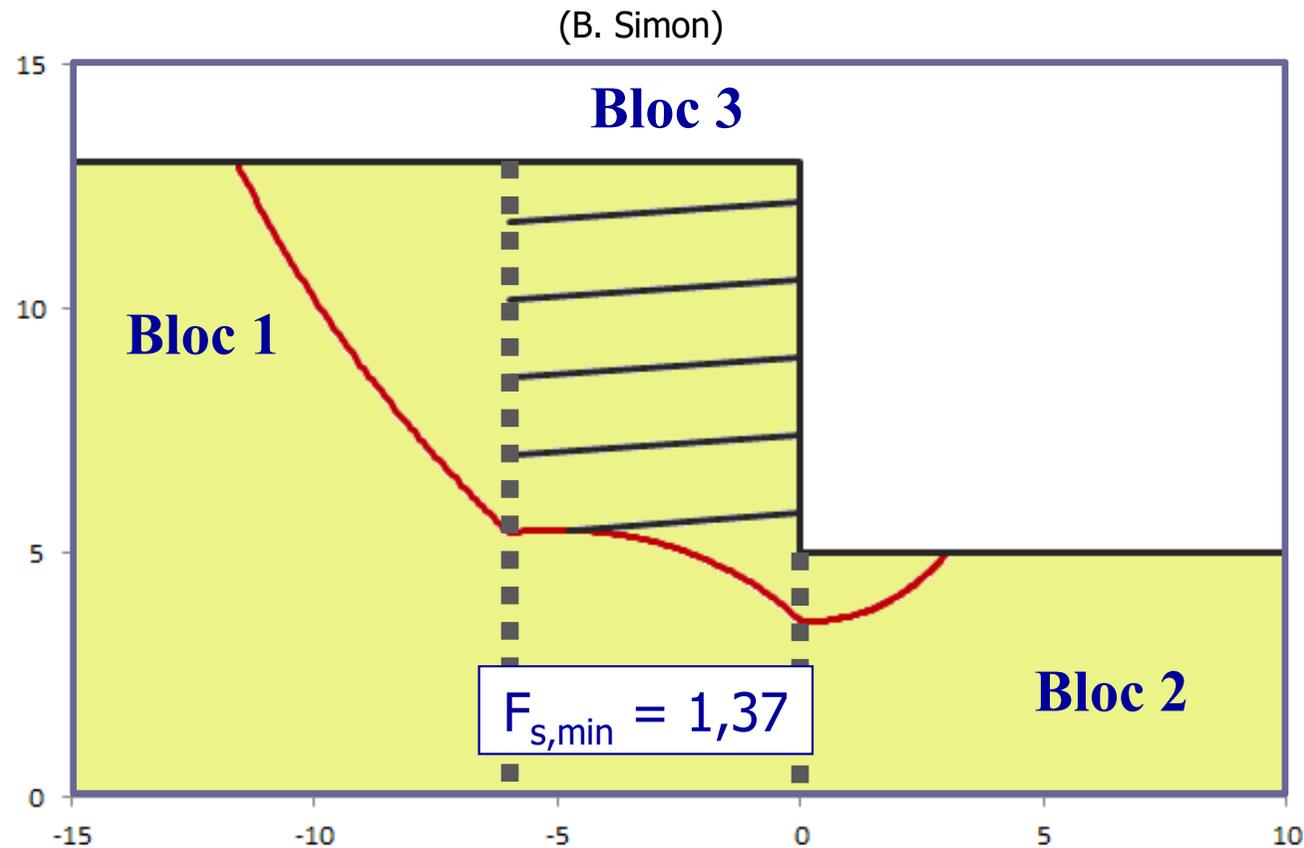


Mécanisme à deux blocs

NF P 94 270

Faire découvrir le mécanisme de ruine

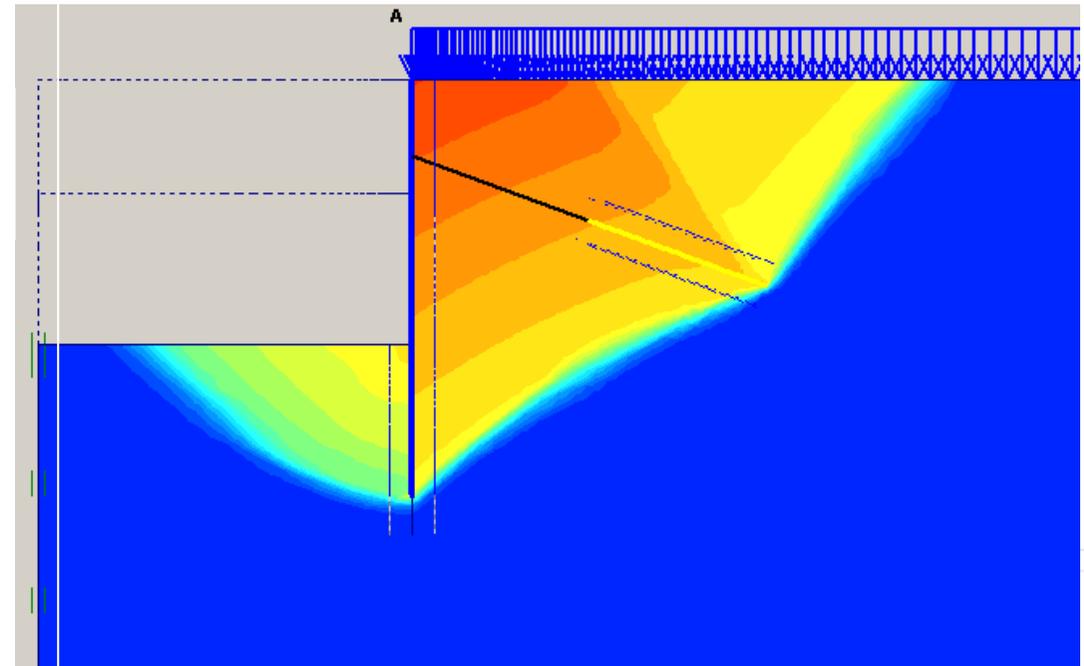
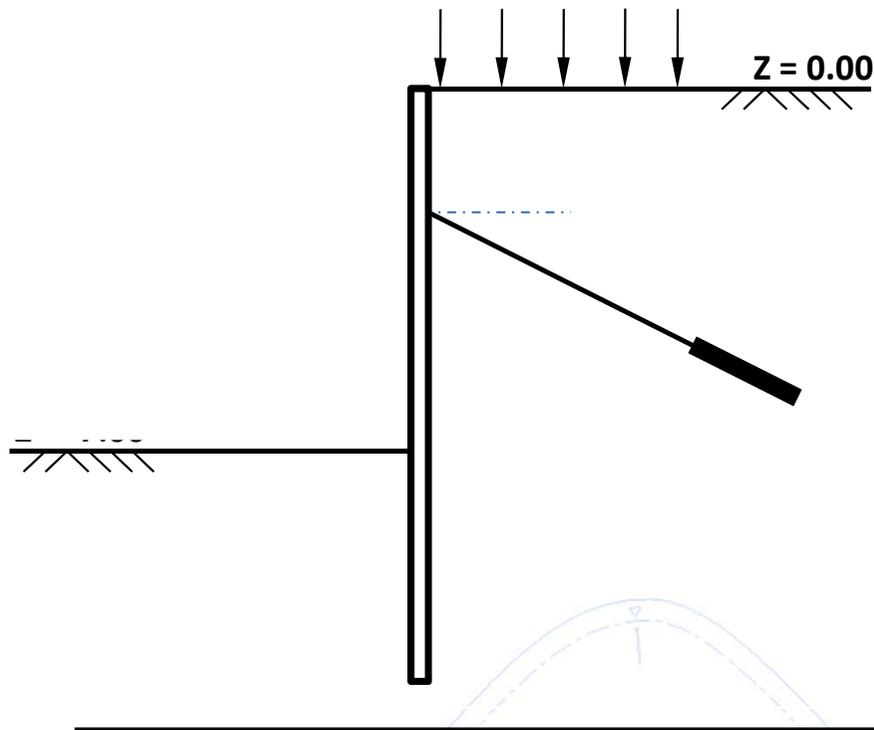
⇒ Exemple d'une paroi clouée : calcul à la rupture multi-blocs



Mécanisme à trois blocs : résistance blocs 1 et 2 représentés respectivement par poussée et butée limites calculées pour $|\delta/\varphi| = 1$

Faire découvrir le mécanisme de ruine

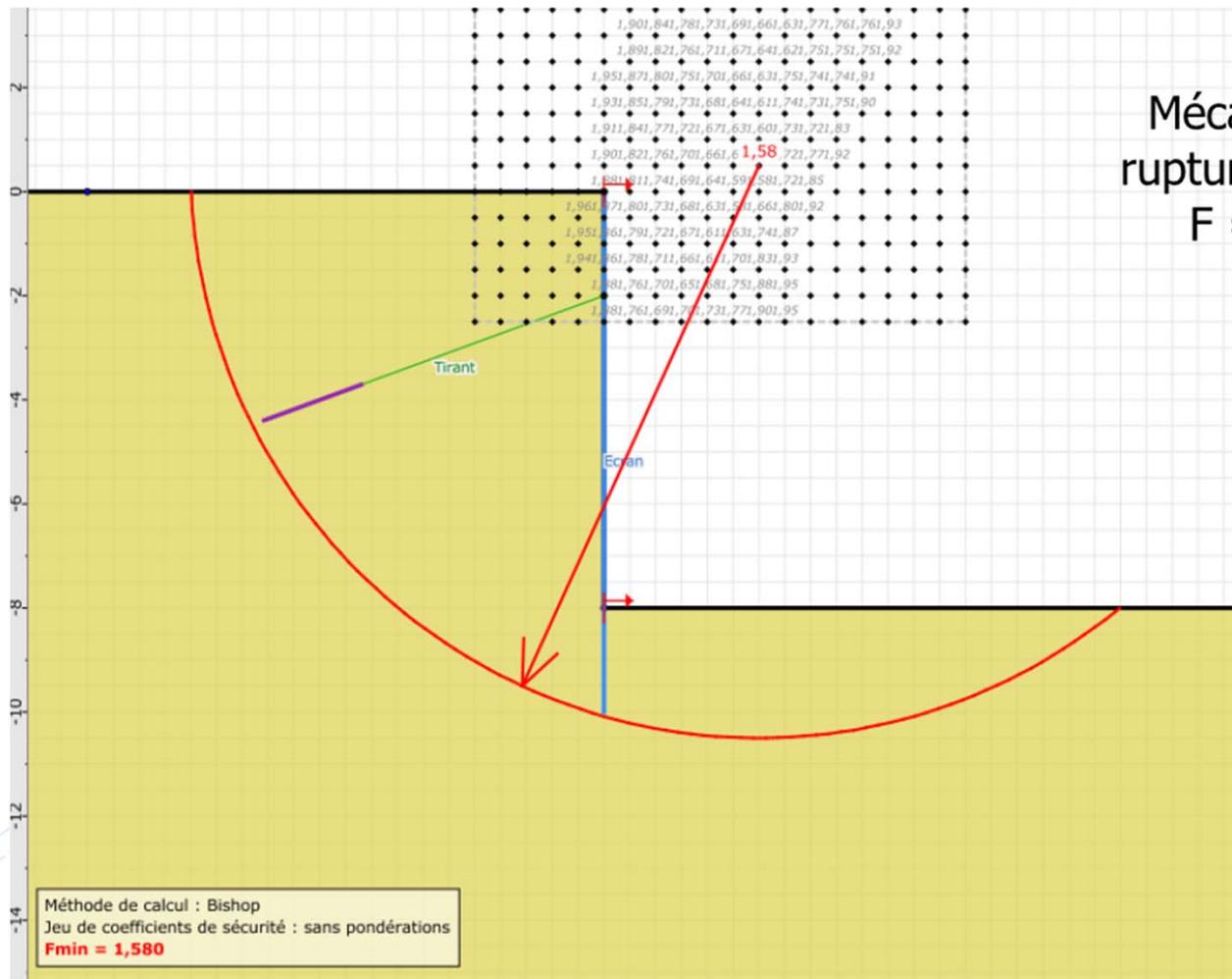
⇒ Stabilité du massif d'ancrage d'un écran tiranté



Longueur libre	F_{kranz}	Modèle aux éléments finis	Modèle aux coefficients de réaction
15 m	3,0	~1,8 cm	~1,3 cm
10 m	1,4	~2,2 cm	~1,2 cm
5 m	1,1	~15 cm	~1,0 cm

Faire découvrir le mécanisme de ruine

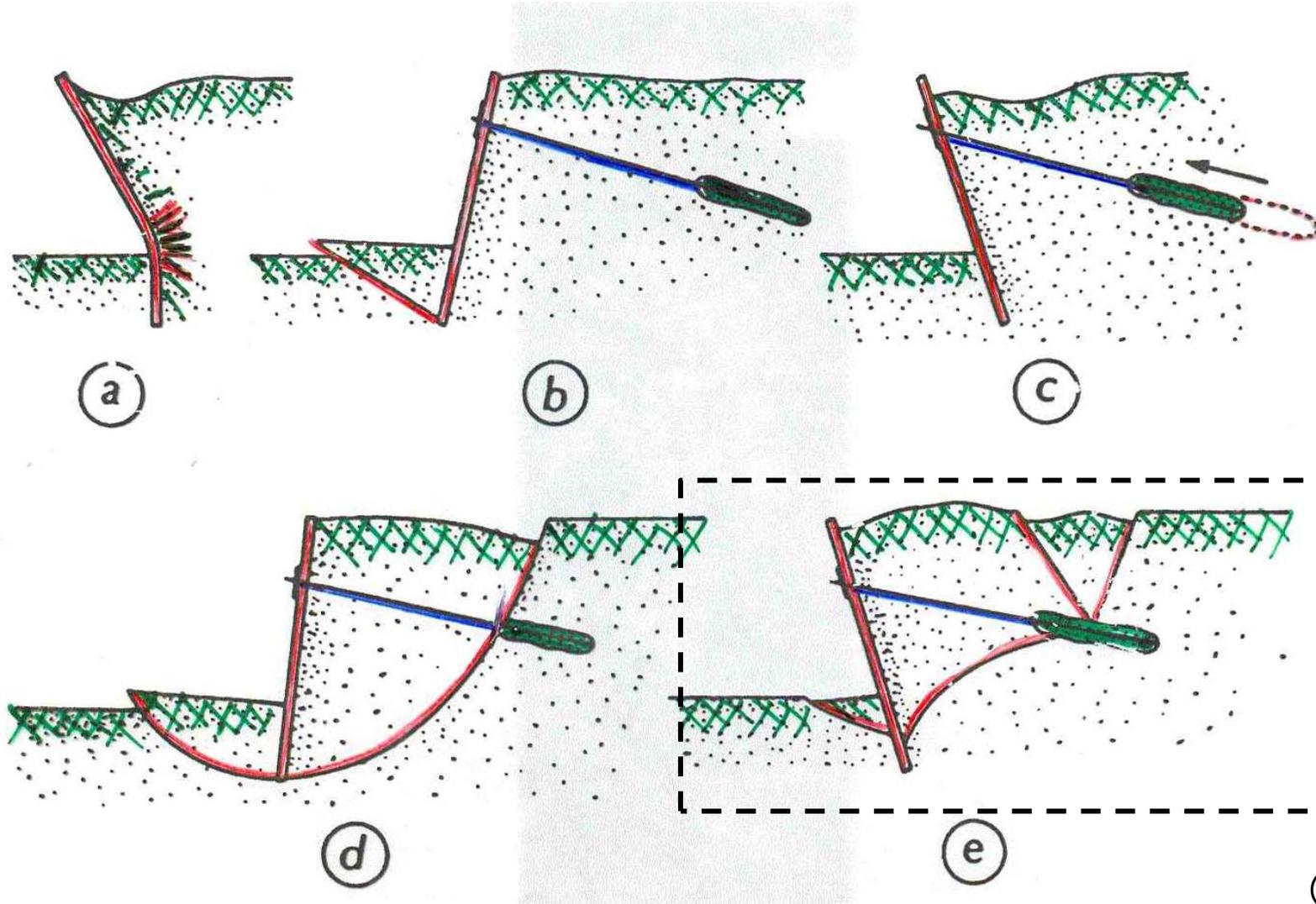
⇒ Stabilité du massif d'ancrage d'un écran tiranté



Mécanisme de rupture circulaire
F = 1,58 !

Faire découvrir le mécanisme de ruine

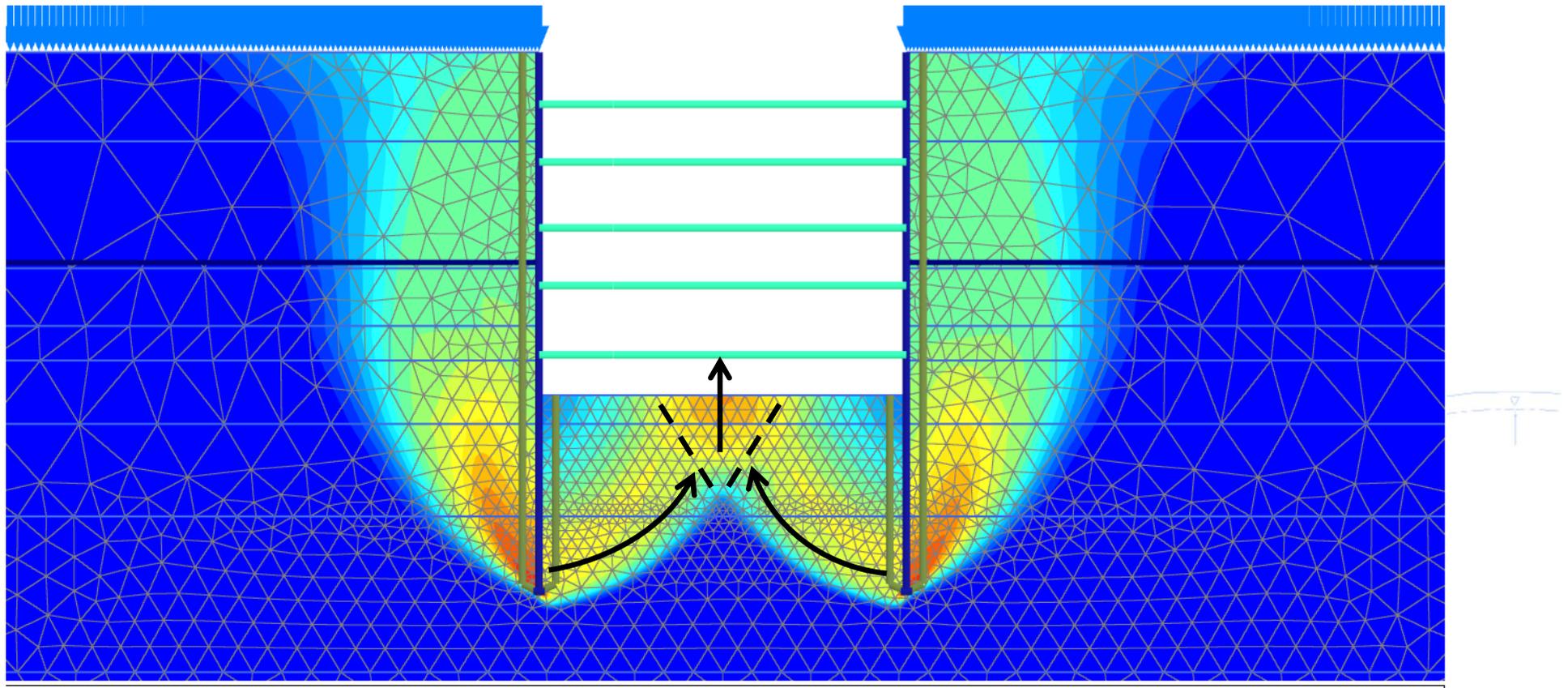
⇒ Stabilité du massif d'ancrage d'un écran tiranté



(R. Frank)

Faire découvrir le mécanisme de ruine

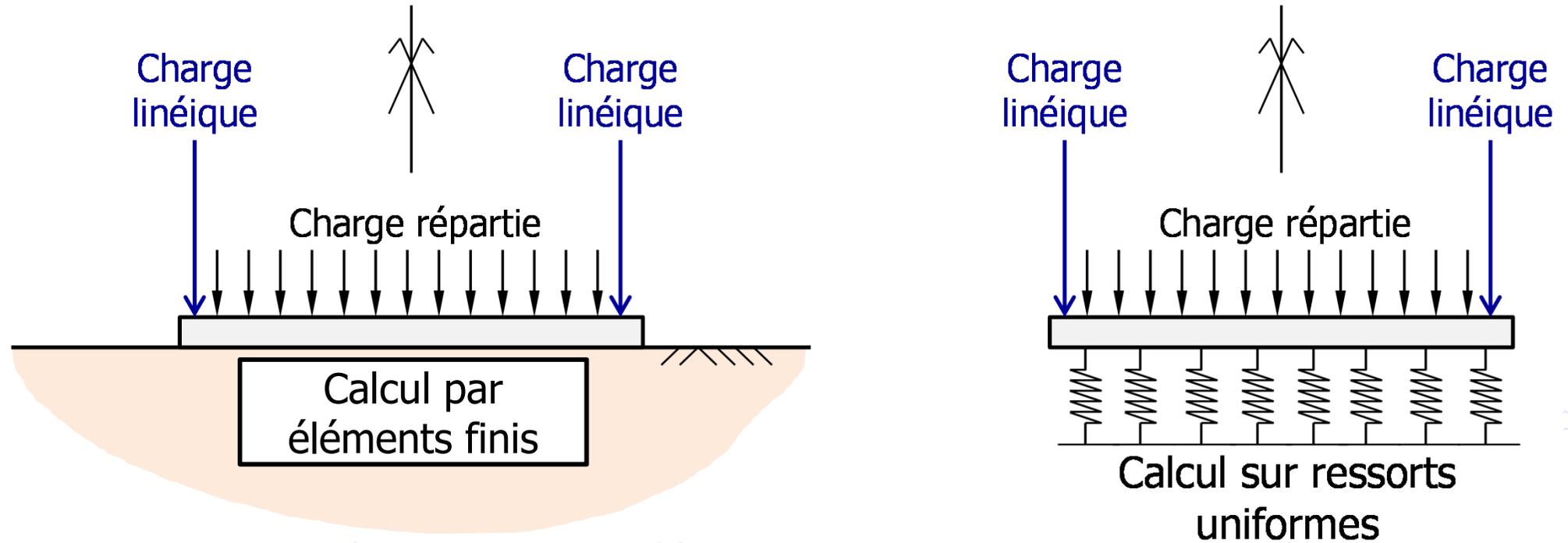
- Fouille butonnée : prise en compte de l'interaction des « cônes » de butée



Mécanisme mixte : rotation + translation

Appréhender les mécanismes d'interaction

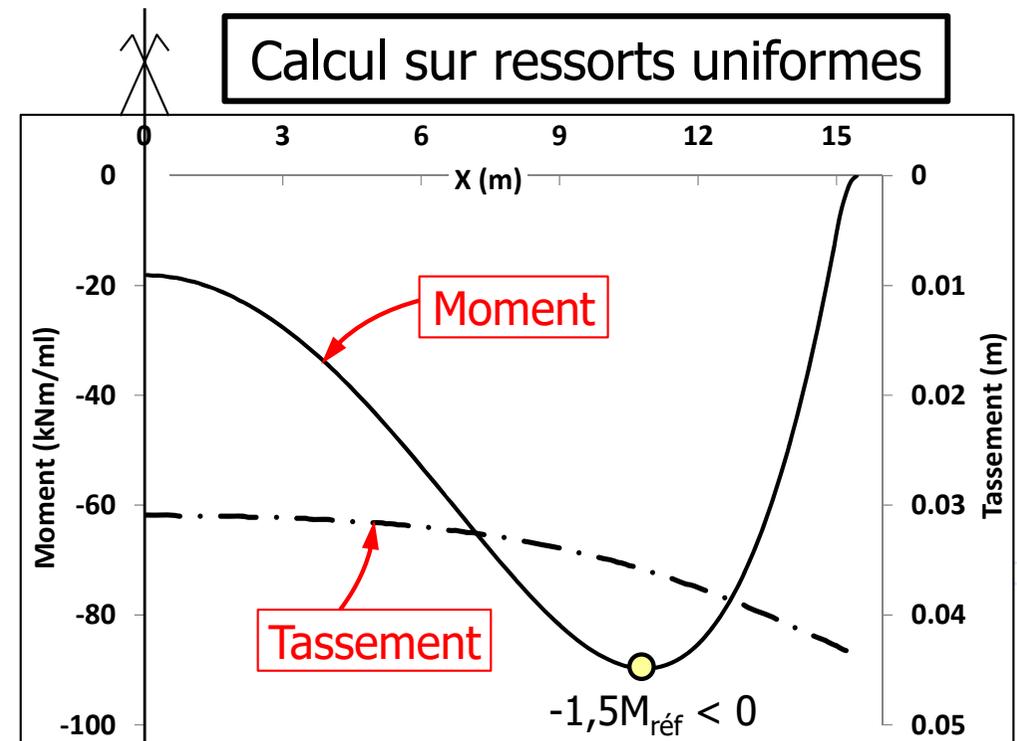
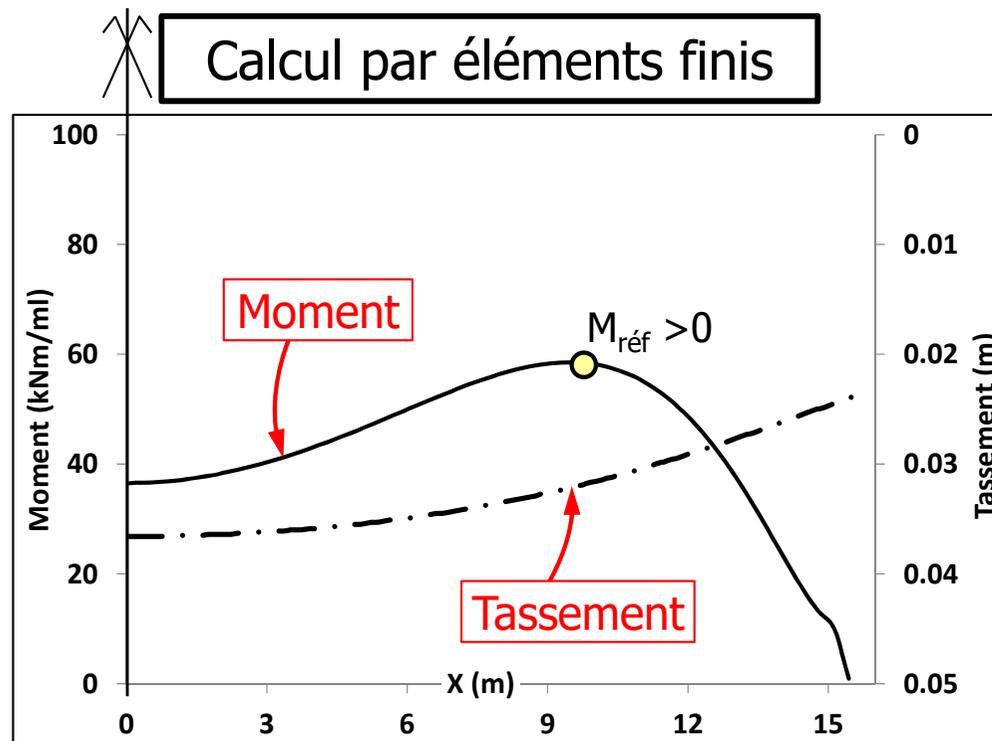
- Représentation réaliste des effets d'interaction sol/fondation



Exemple d'un bassin circulaire : l'approche usuelle consiste à déterminer un jeu de ressorts uniforme pour le calcul « structure »

Appréhender les mécanismes d'interaction

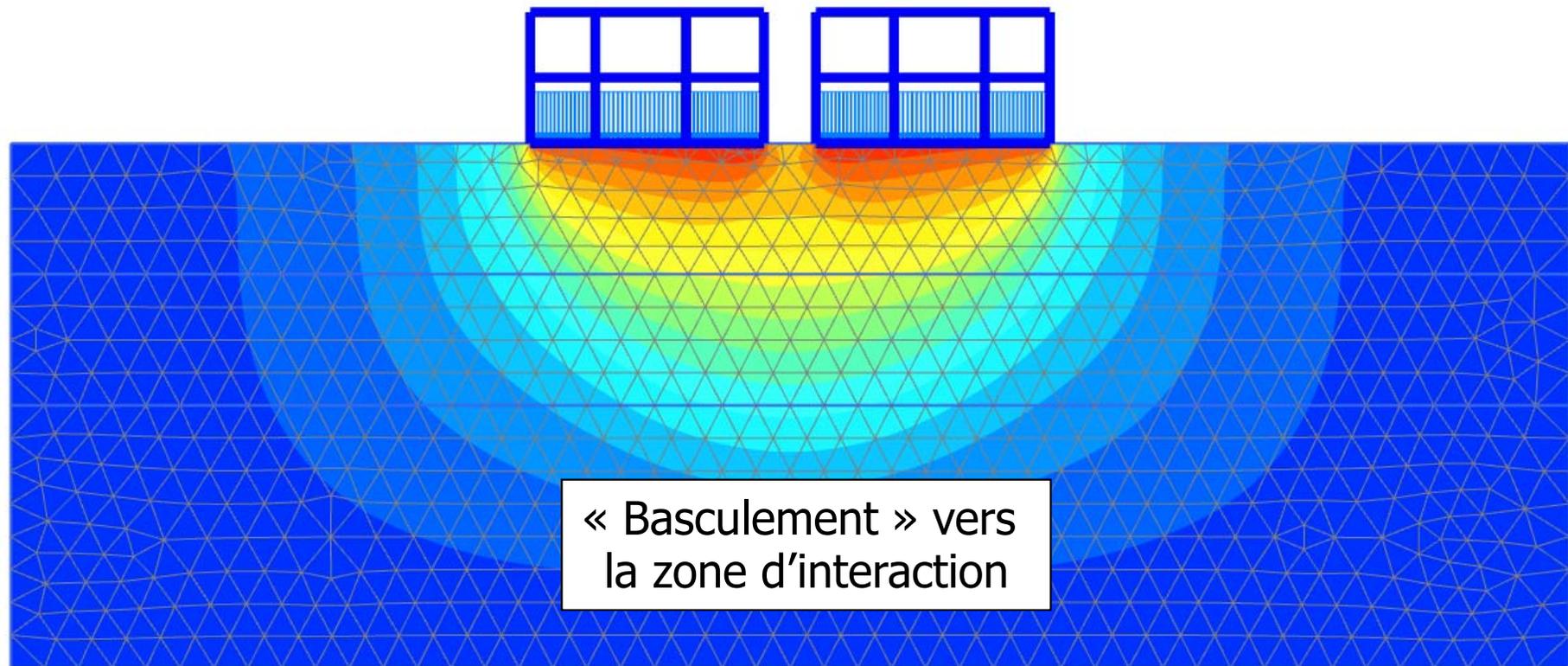
- Représentation réaliste des effets d'interaction sol/fondation



Un calcul sur ressorts uniformes conclurait à la nécessité de ferrailler la fibre supérieure du radier alors que c'est la fibre inférieure qui est tendue ici... ce constat est valable quelque soit la valeur du « ressort »

Appréhender les mécanismes d'interaction

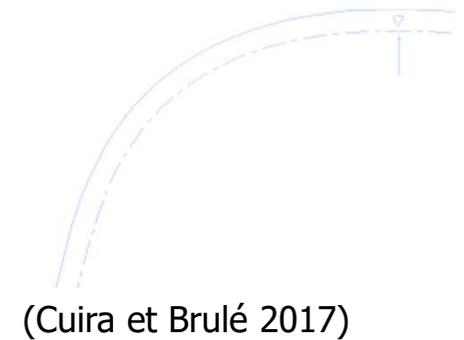
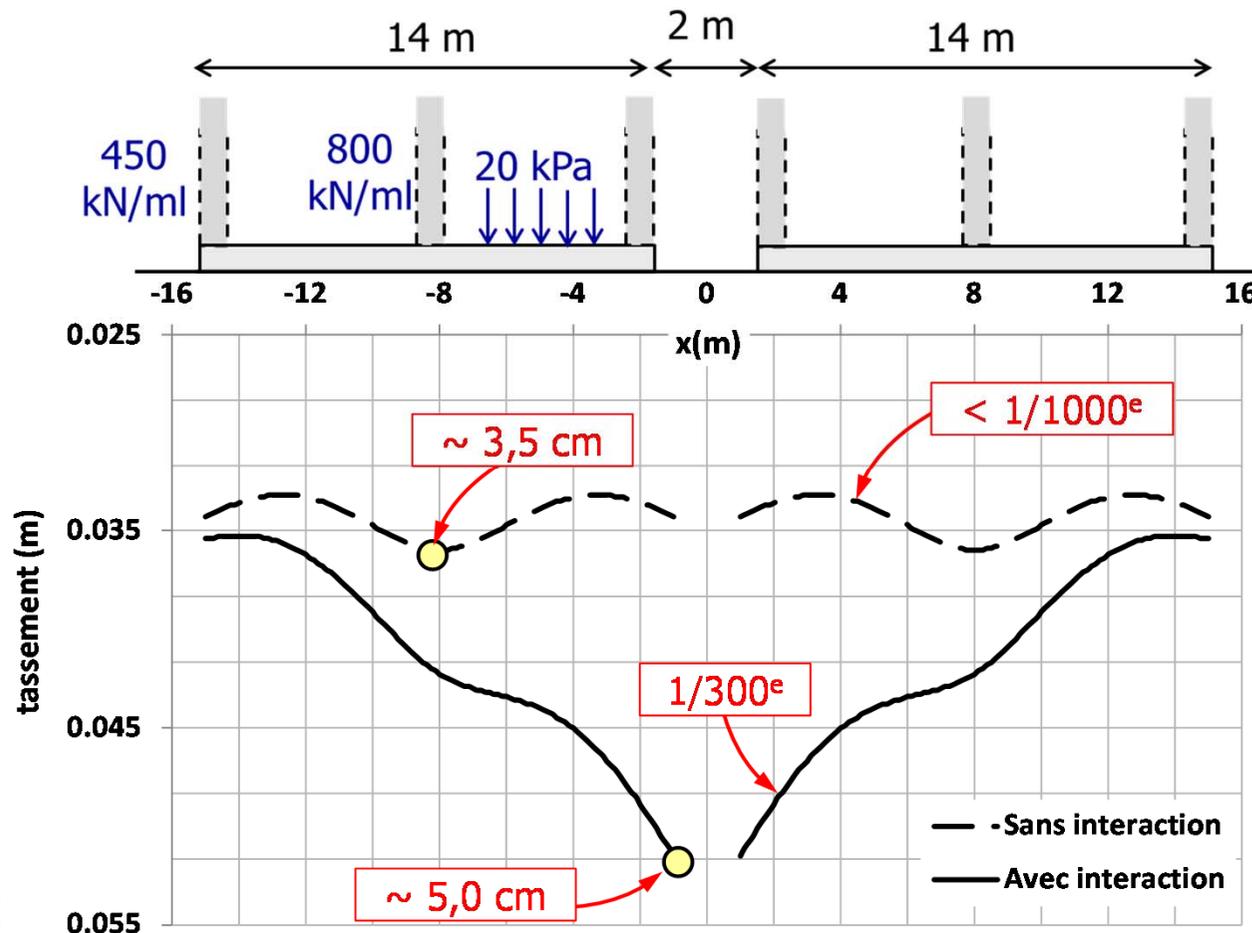
- Interaction entre ouvrages voisins : construction simultanée



Interaction « simultanée » de deux ouvrages fondés superficiellement

Appréhender les mécanismes d'interaction

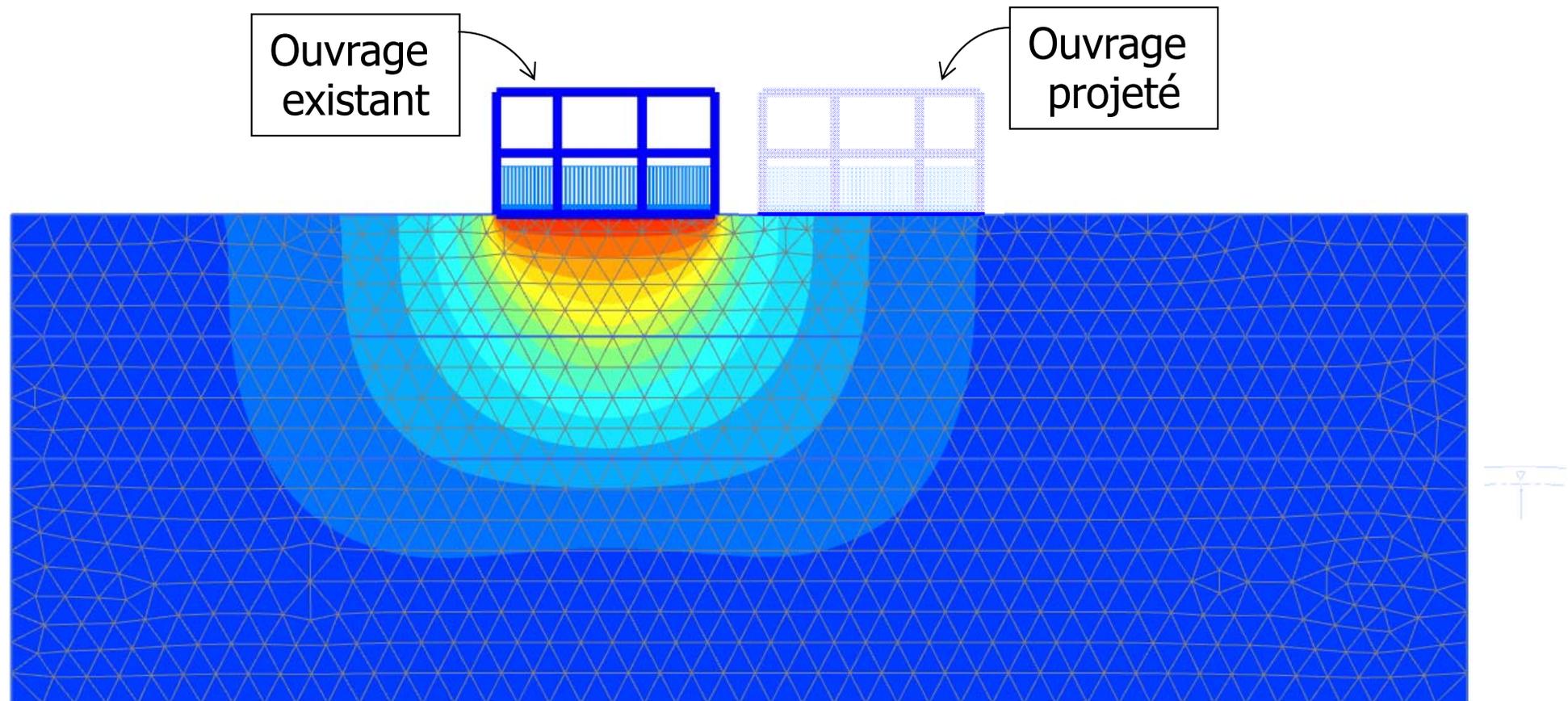
- Interaction entre ouvrages voisins : construction simultanée



Enseignements décisifs pour la justification de la fondation de l'ouvrage

Appréhender les mécanismes d'interaction

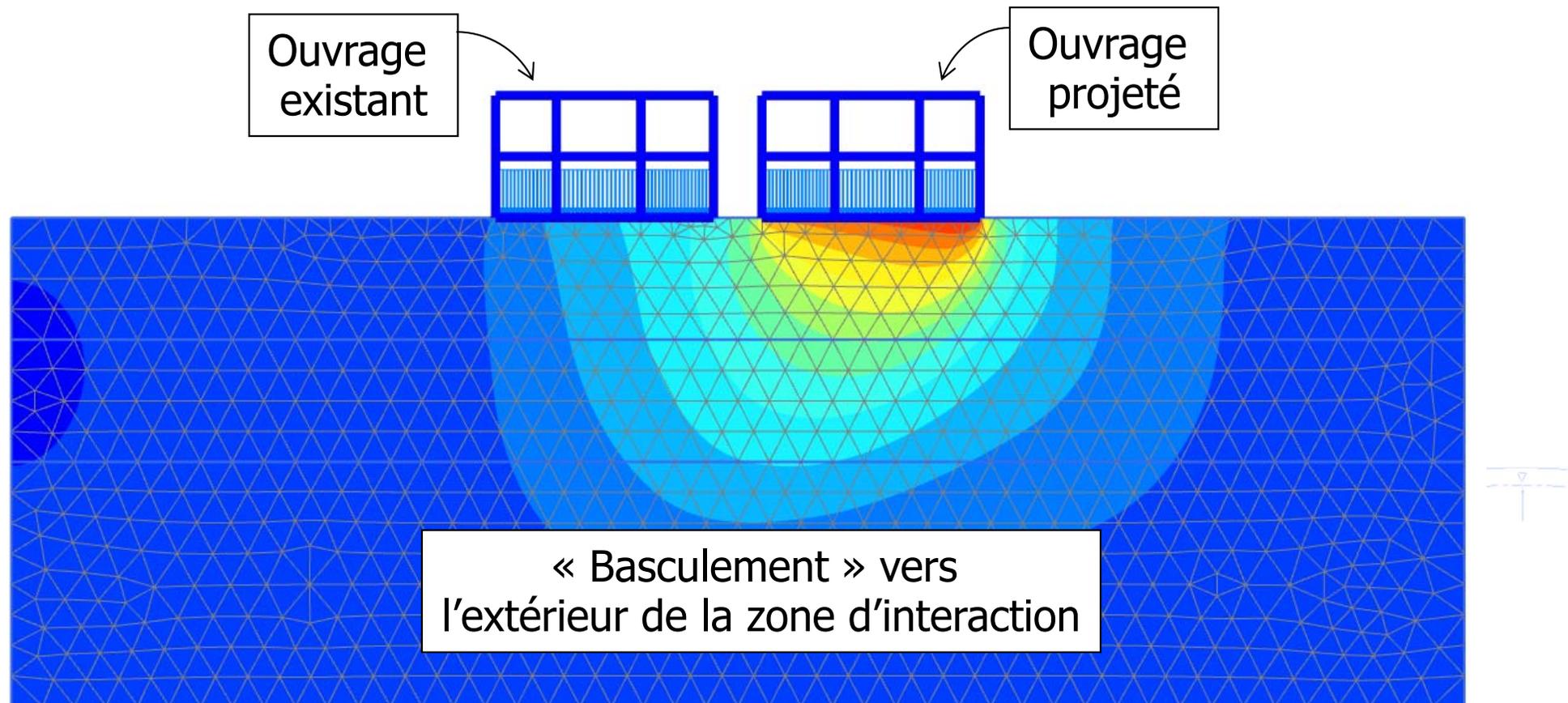
- Interaction entre ouvrages voisins : construction en deux phases



La prise en compte du phasage modifie les mécanismes d'interaction

Appréhender les mécanismes d'interaction

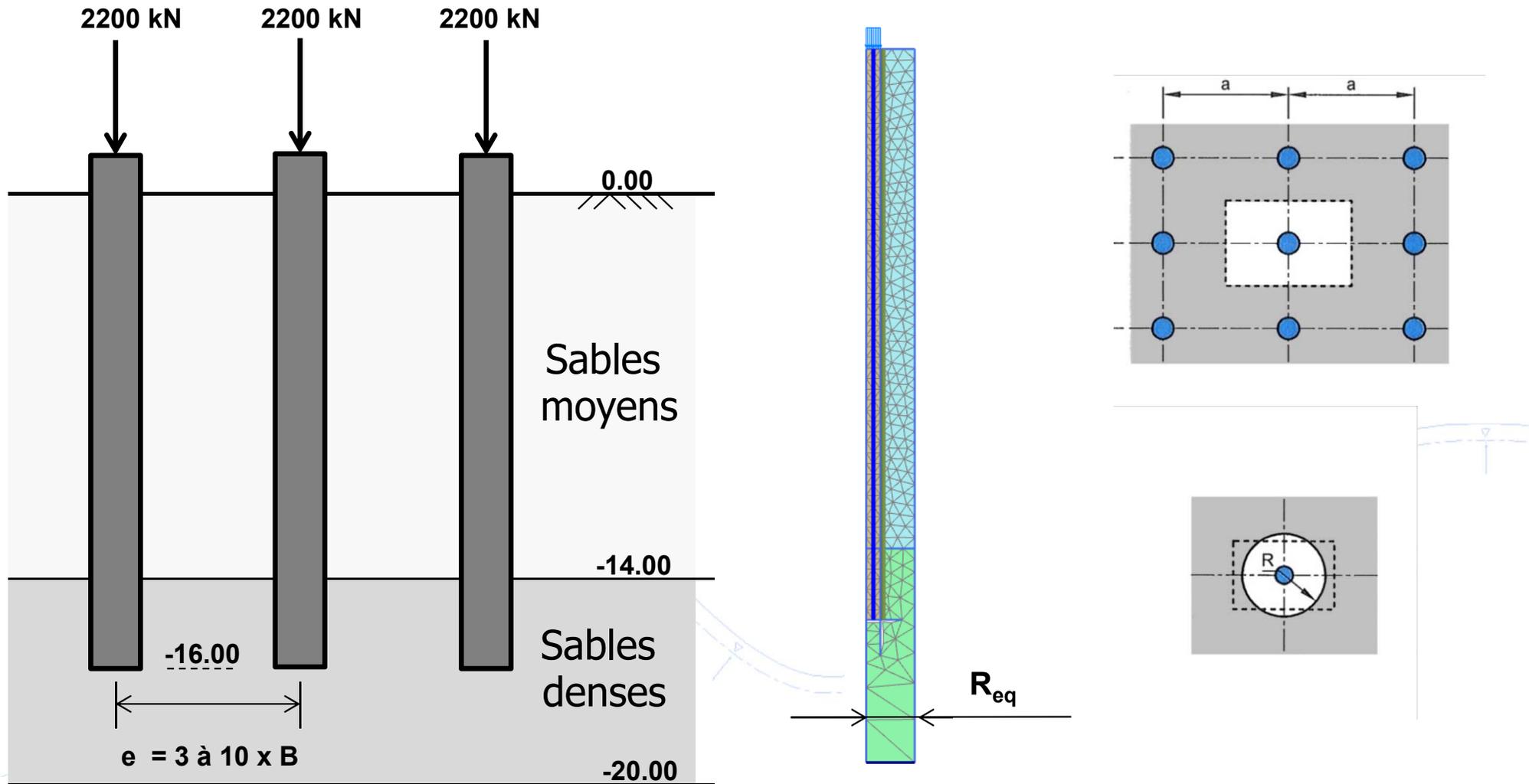
- Interaction entre ouvrages voisins : construction en deux phases



La prise en compte du phasage modifie les mécanismes d'interaction

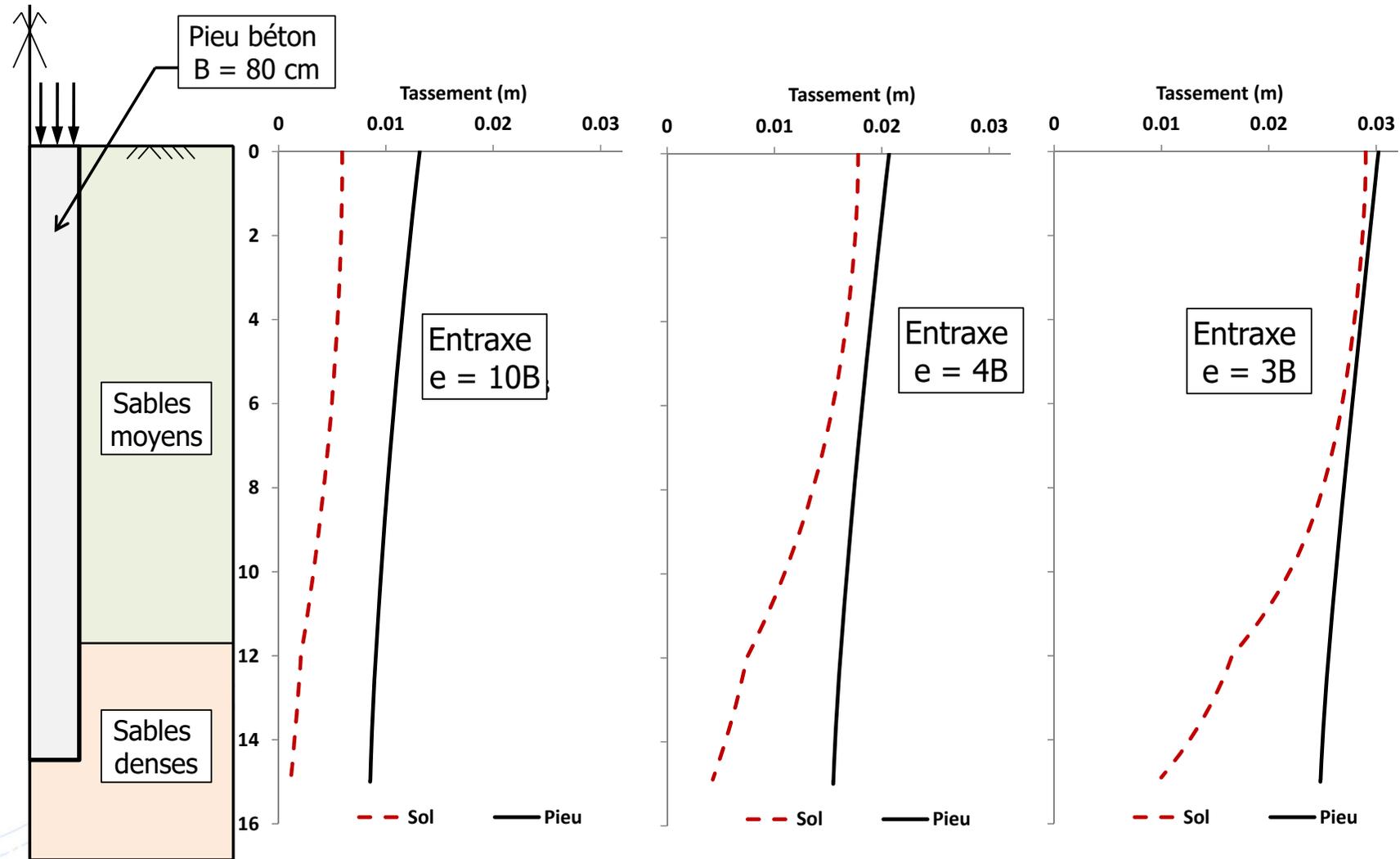
Appréhender les mécanismes d'interaction

- Effets de groupe entre pieux : cas d'un pieu situé en partie courante



Appréhender les mécanismes d'interaction

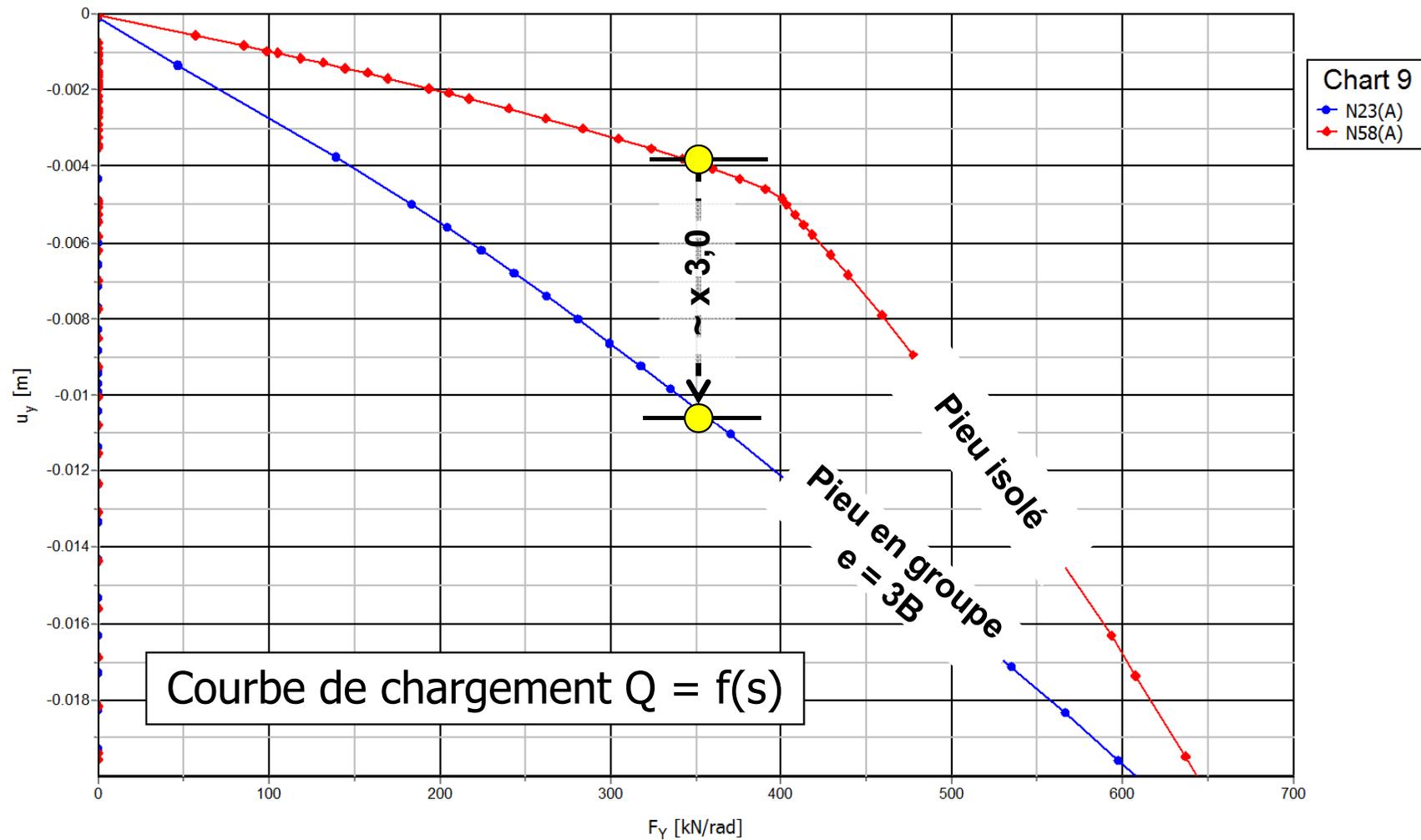
- Effets de groupe entre pieux : « assouplissement » apparent des pieux



(Cuira et Brulé 2017)

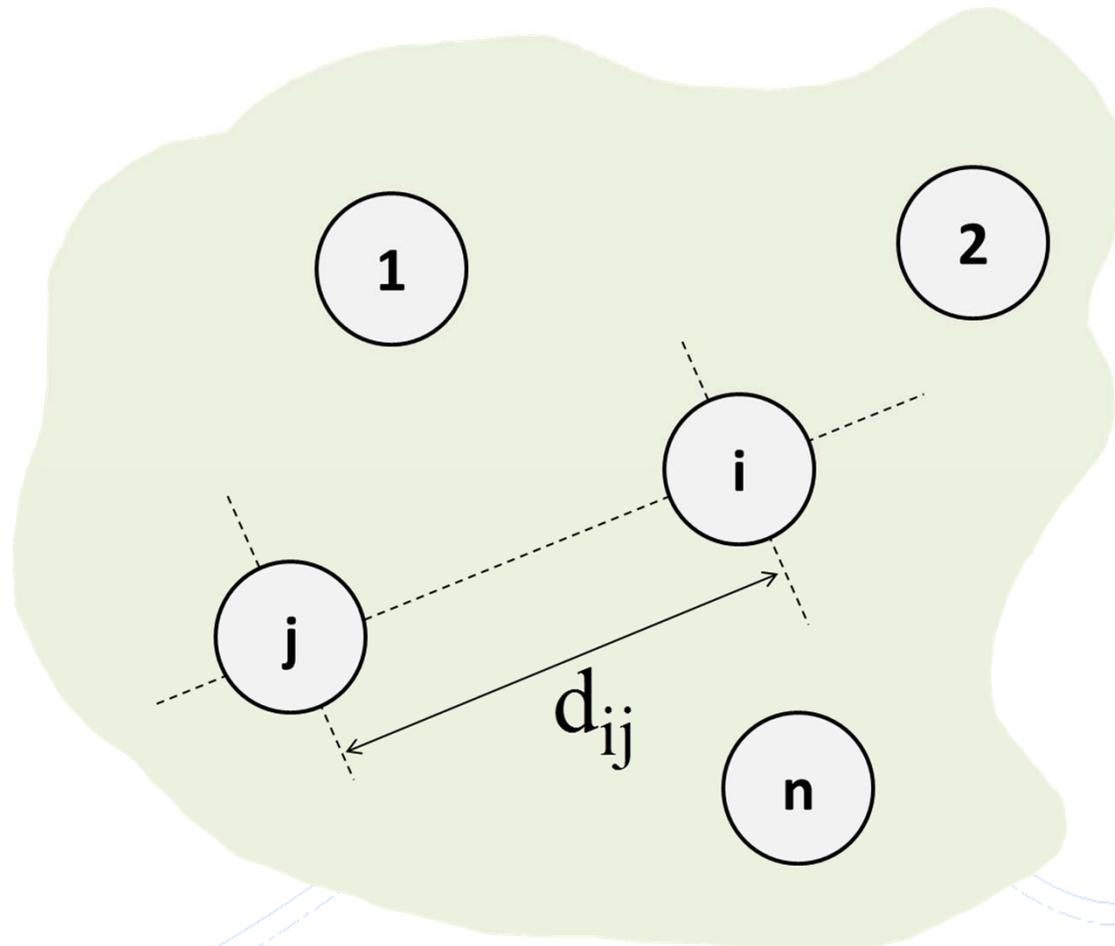
Appréhender les mécanismes d'interaction

- Effets de groupe entre pieux : « assouplissement » apparent des pieux



Appréhender les mécanismes d'interaction

- Effets de groupe entre pieux : impact selon position et contraste DDC

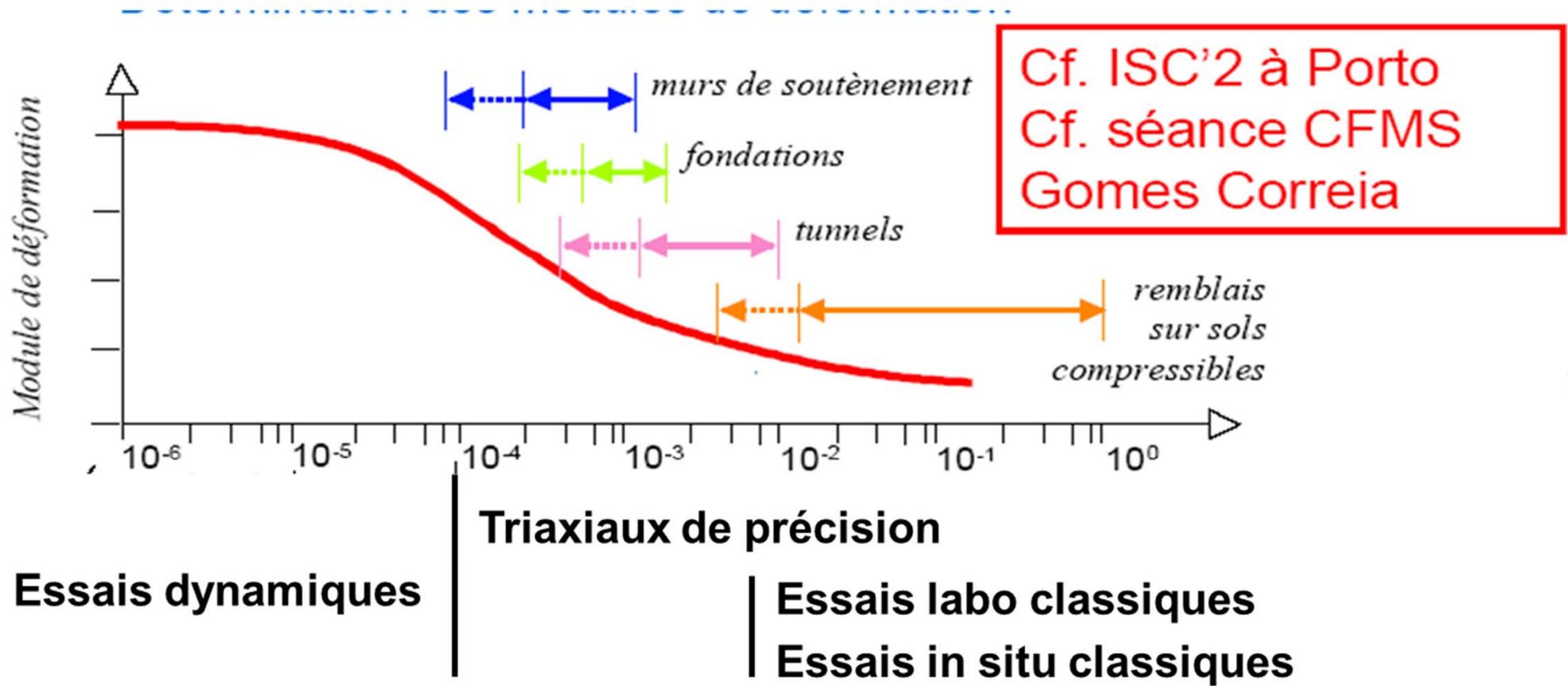


$$K_i^{\text{groupe}} = \frac{K_i^{\text{isolé}}}{1 + \sum_{j \neq i} \alpha_v(d_{ij}) \frac{F_j}{F_i}}$$

La raideur apparente dépend de la position du pieu et de la DDC

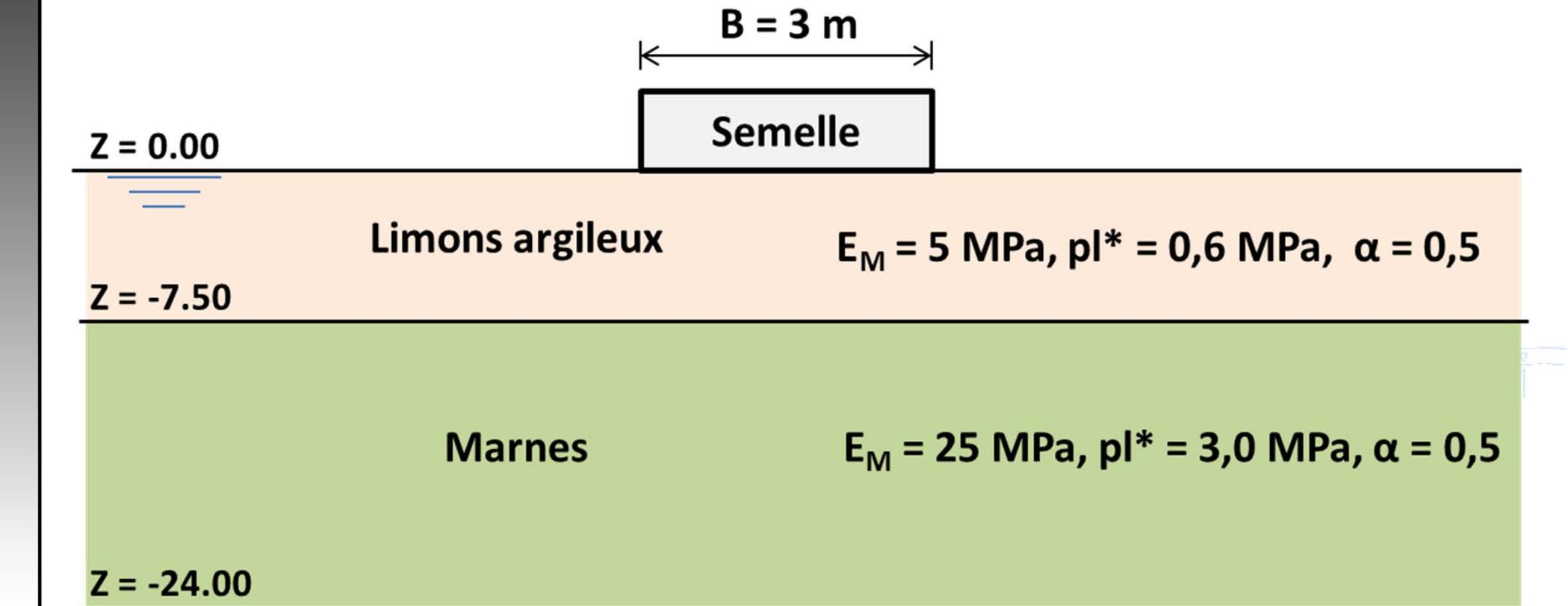
La question des modules

- Le module est fonction du niveau de déformation (induite par l'ouvrage)



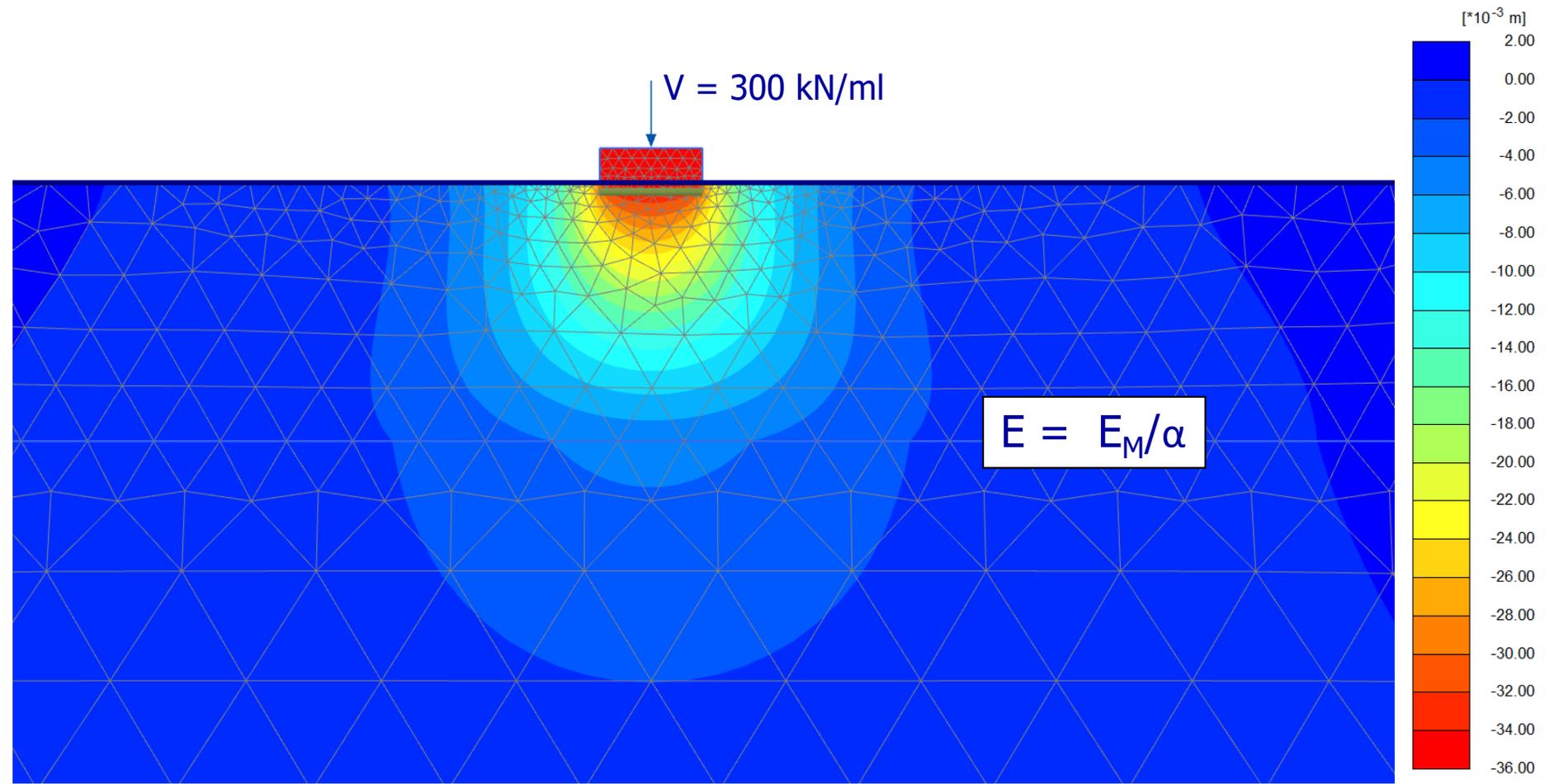
La question des modules

- Exemple d'une semelle isolée : charge de service = 1 bar



La question des modules

- Exemple d'une semelle isolée : première estimation (brutale)



Tassement de 3,5 cm pour $E = E_M / \alpha$

La question des modules

- Exemple d'une semelle isolée : confrontation au modèle pressiométrique

$$s = \frac{q - q_0}{9} \left(\frac{\lambda_c B \alpha}{E_c} + 2 \frac{B_0}{E_d} \left(\frac{\lambda_d B}{B_0} \right)^\alpha \right)$$

$$\frac{1}{E_d} = \frac{0,25}{E_1} + \frac{0,30}{E_2} + \frac{0,25}{E_{3,5}} + \frac{0,10}{E_{6,8}} + \frac{0,10}{E_{9,16}}$$

$$E_c = E_1$$

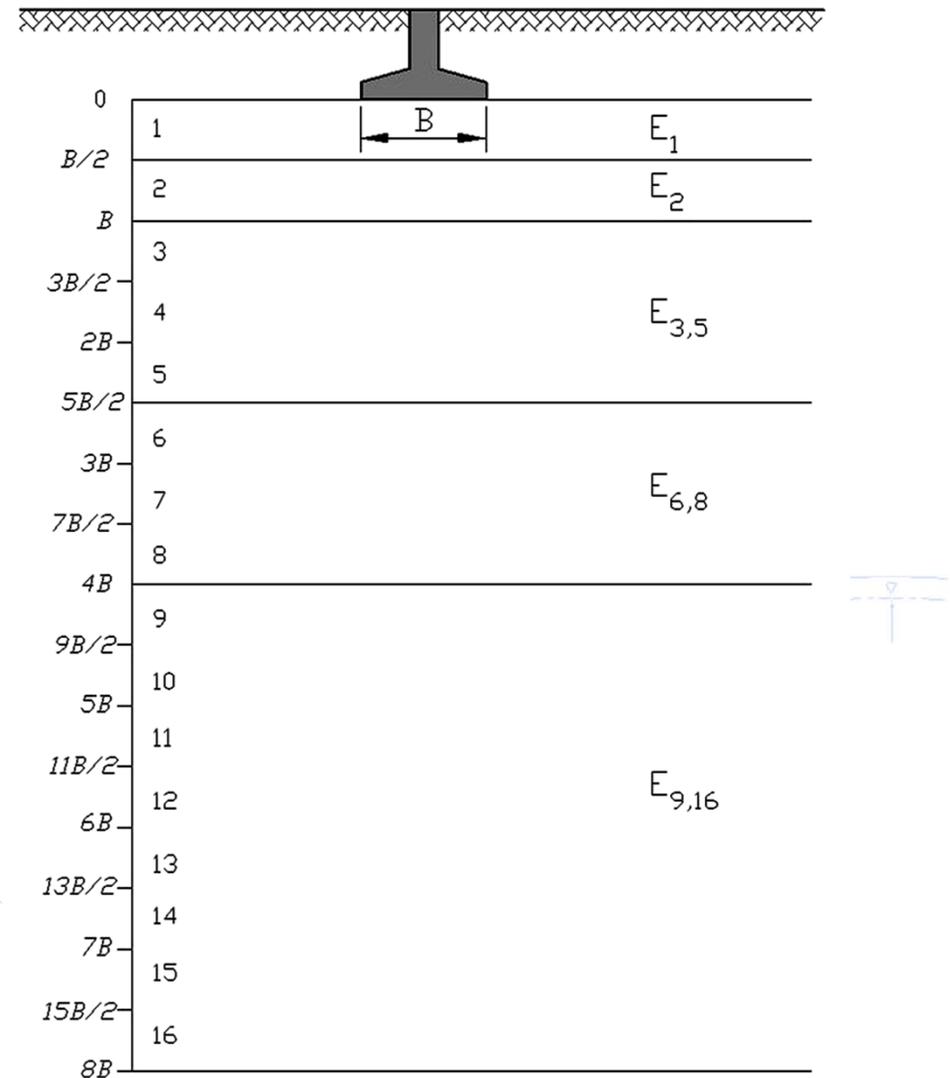
$$E_1 = E_2 = E_{3,5} = 5 \text{ MPa}$$

$$E_{6,8} = E_{9,16} = 25 \text{ MPa}$$

$$E_c = 5,00 \text{ MPa} / E_d \sim 5,95 \text{ MPa}$$

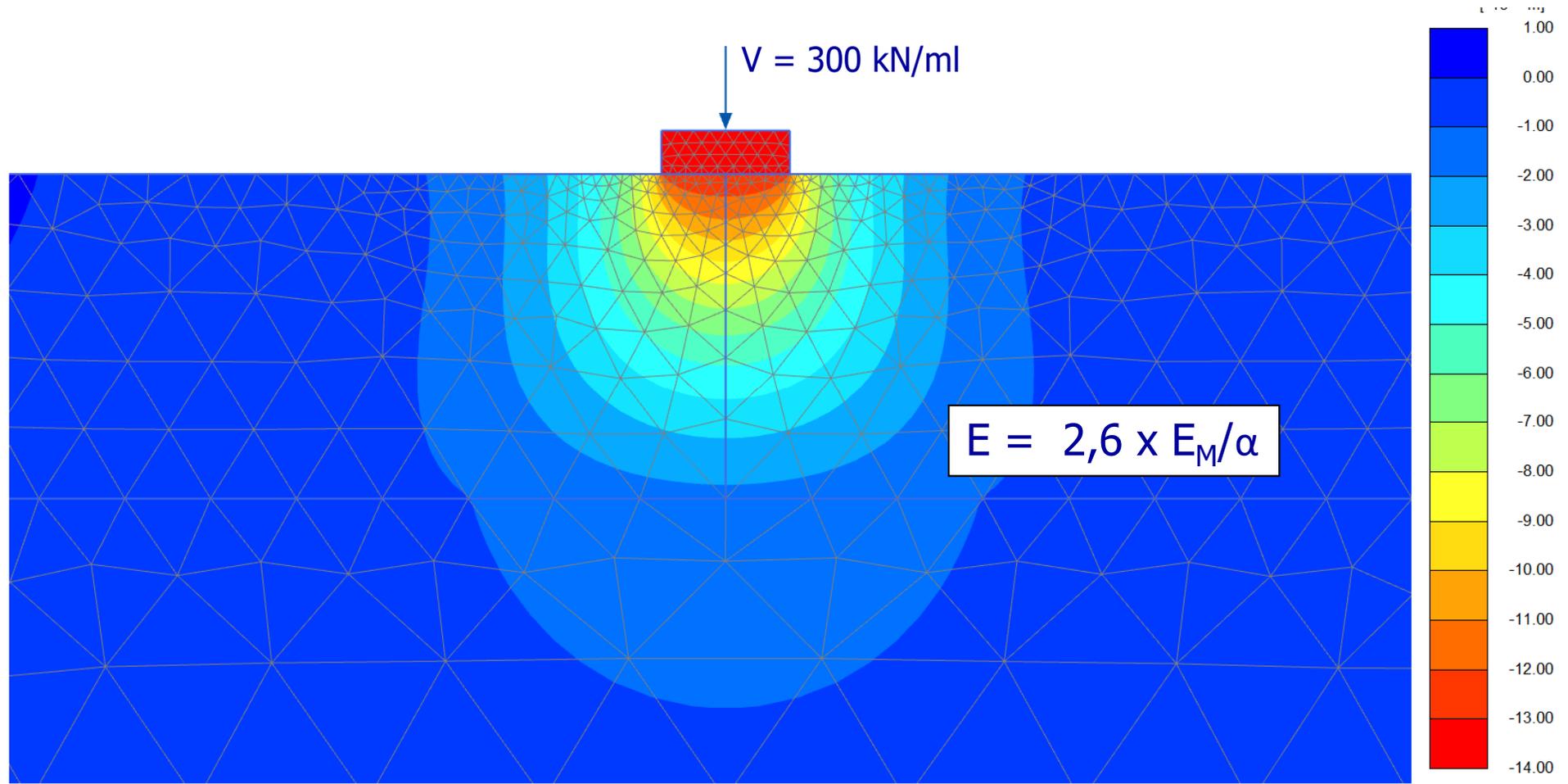
$$\lambda_c = 1,50 / \lambda_d = 2,65 / \alpha = 0,5$$

$$s \sim 1,3 \text{ cm}$$



La question des modules

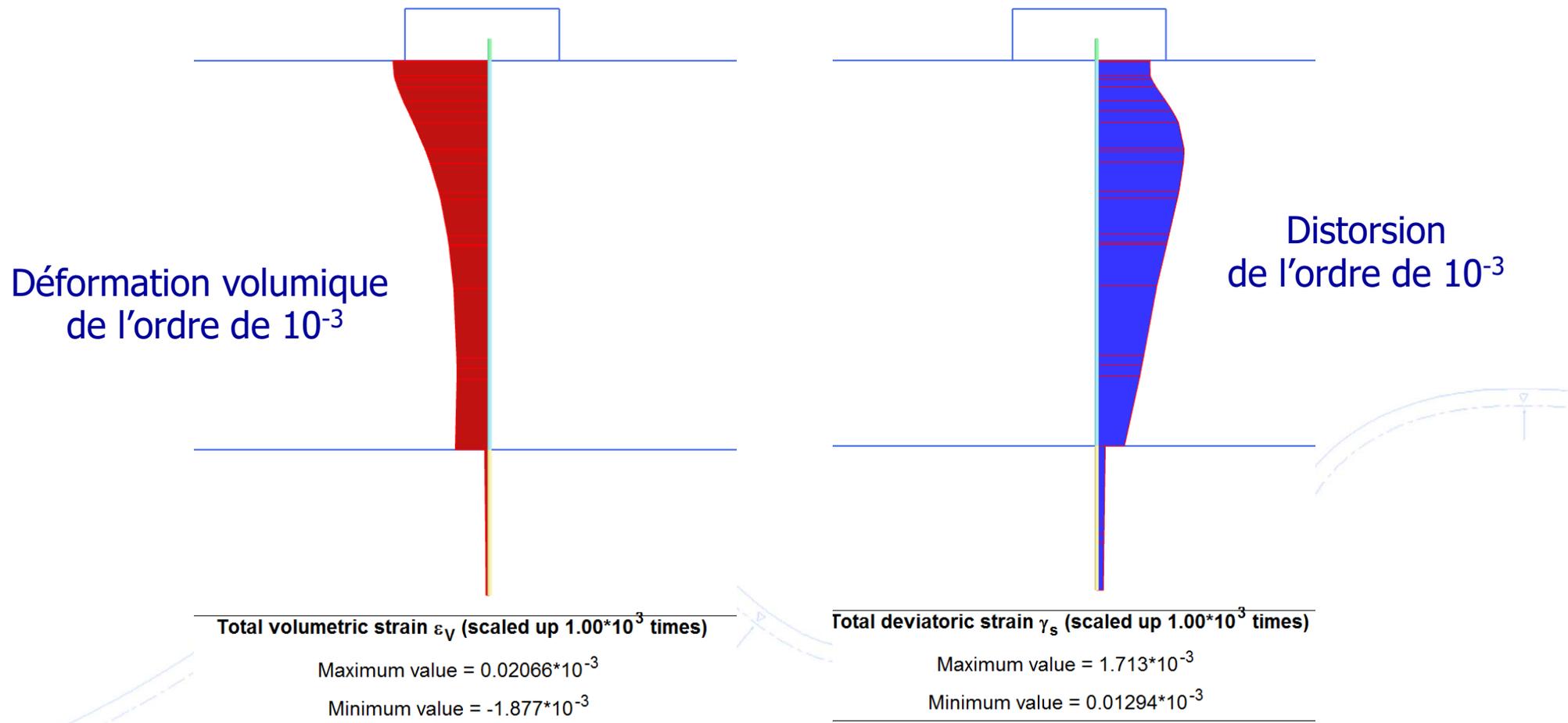
- Exemple d'une semelle isolée : calage du module



Tassement de 1,3 cm pour $E = 2,6 \times E_M/\alpha$

La question des modules

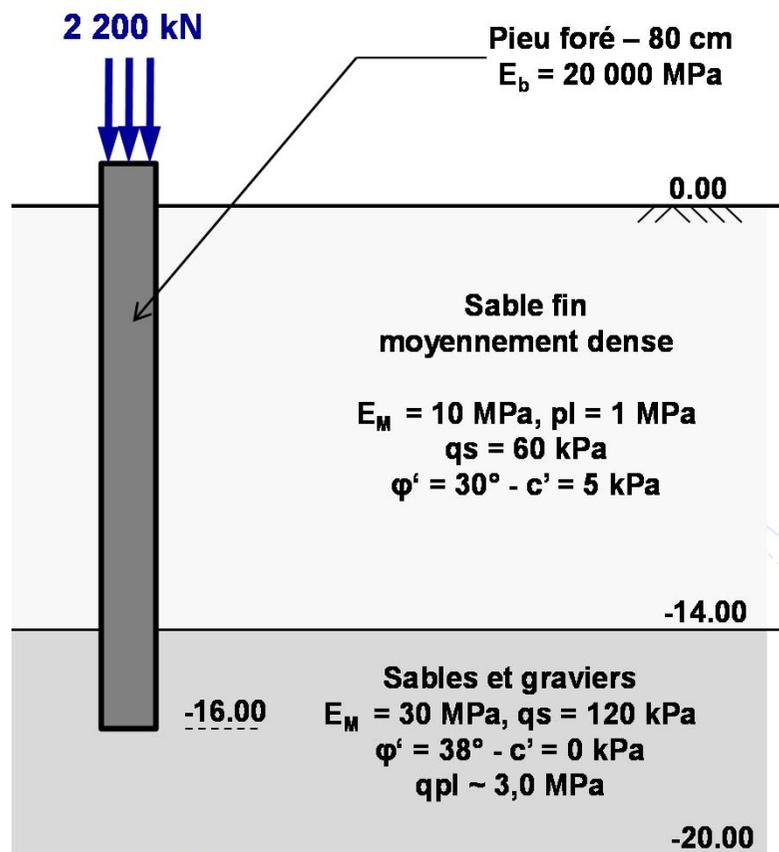
- Exemple d'une semelle isolée : constat du taux de déformation



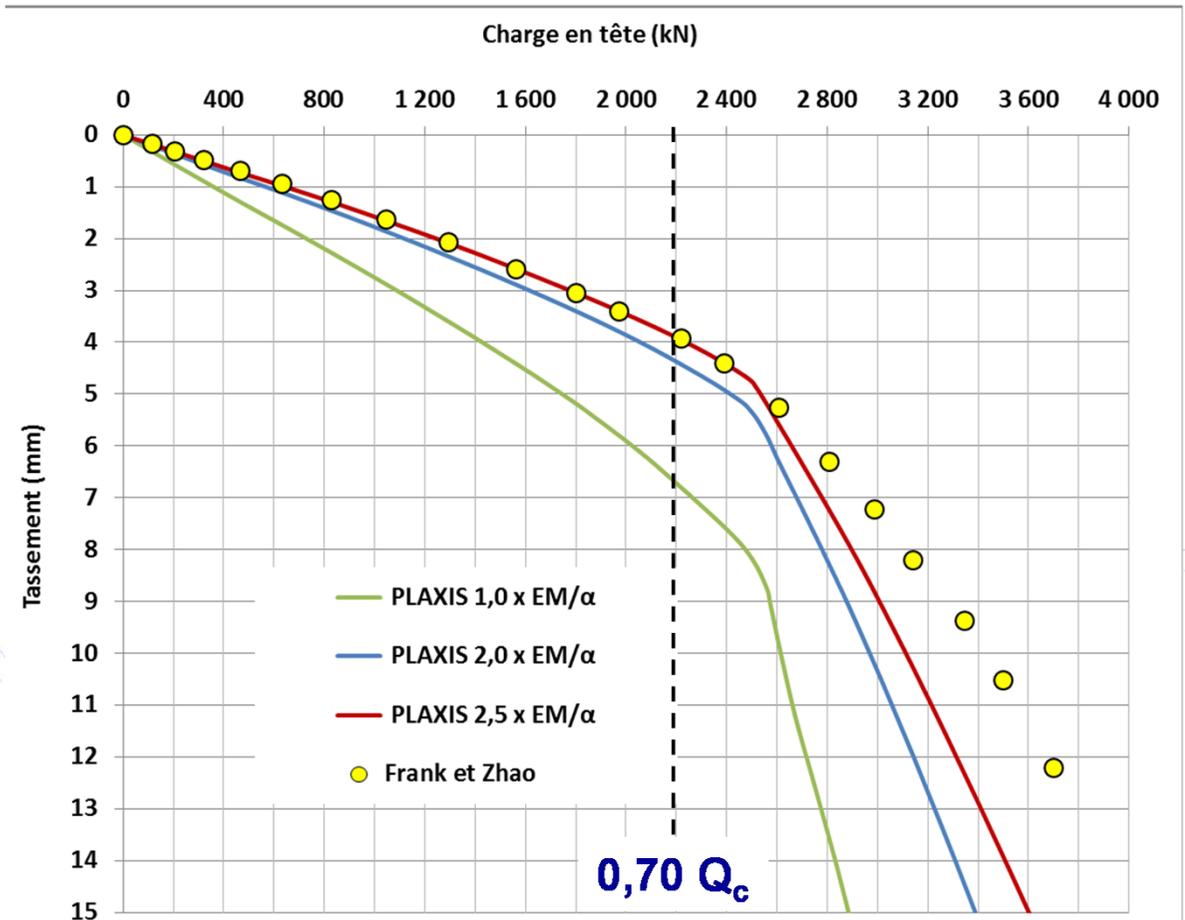
(Cuira et Flavigny, 2016)

La question des modules

- Réponse d'un pieu isolé : confrontation au modèle de Frank et Zhao



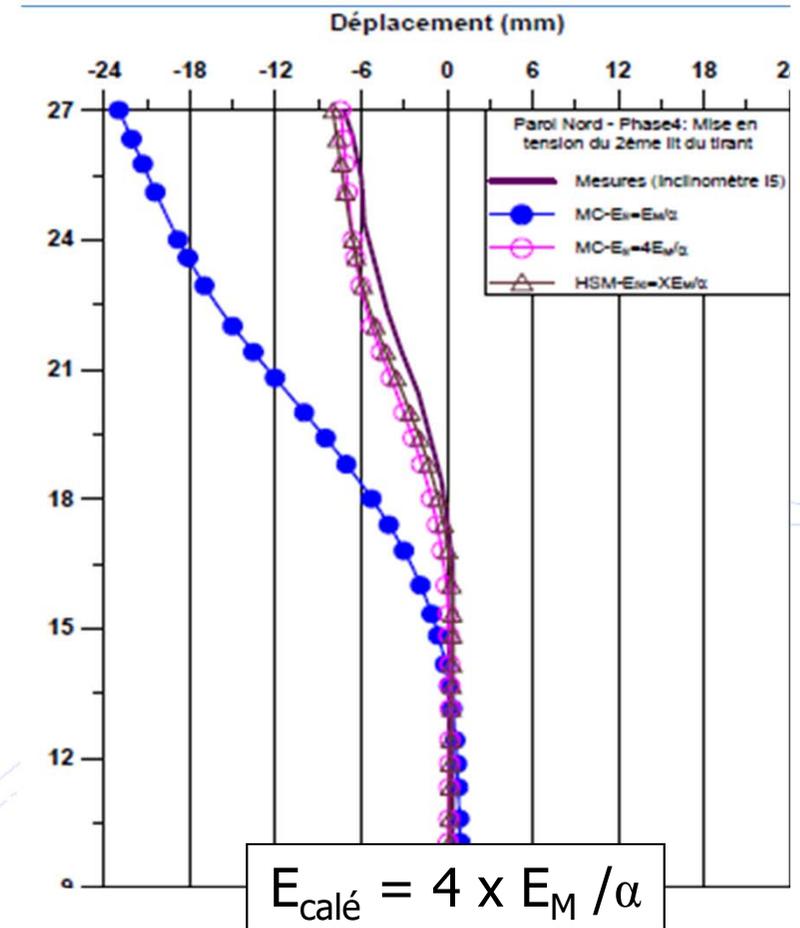
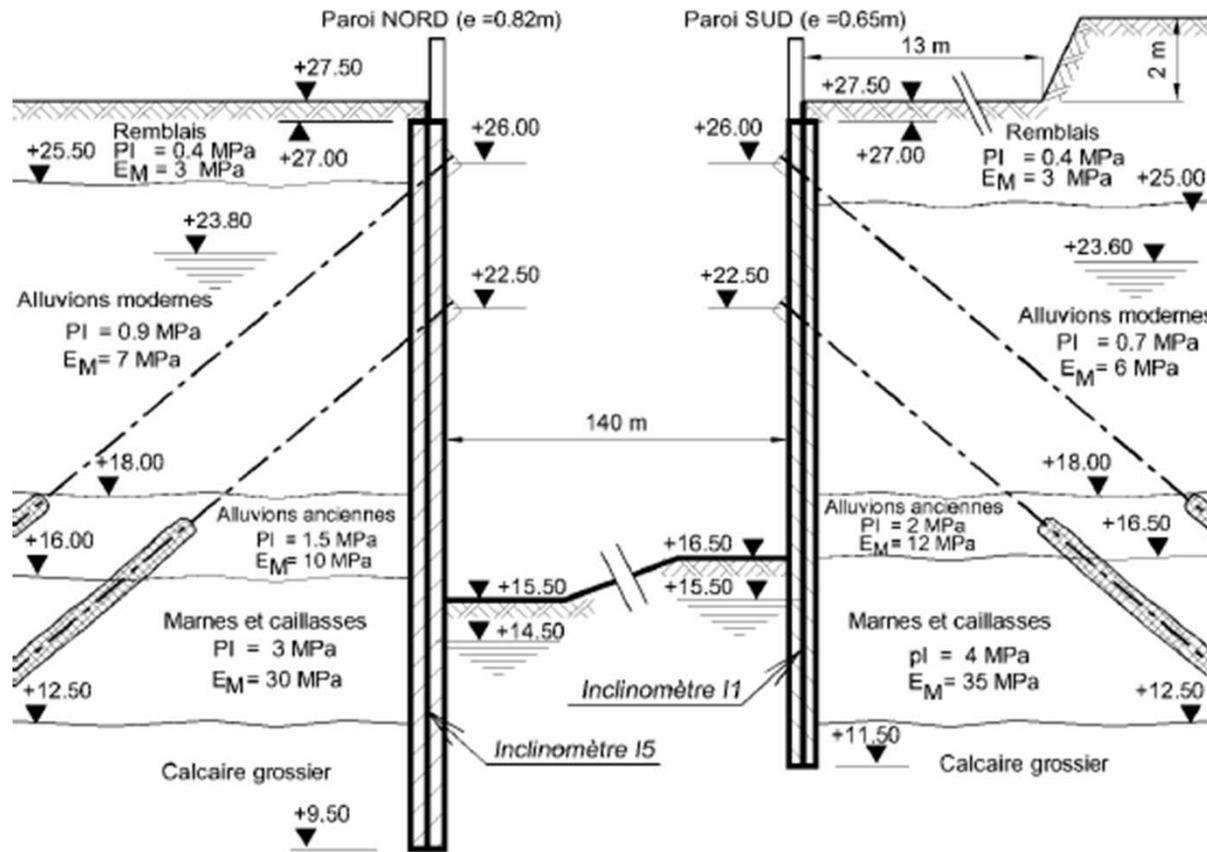
(Caira et Flavigny, 2016)



Déformations comparables
à semelle isolée

La question des modules

- Le cas d'un écran de soutènement : REX station d'épuration à Colombes



P. Schmitt, CFMS, 2005

La question des modules

- Fondation de deux immeubles de grande hauteur



La question des modules

- Fondation de deux immeubles de grande hauteur : étude de sensibilité

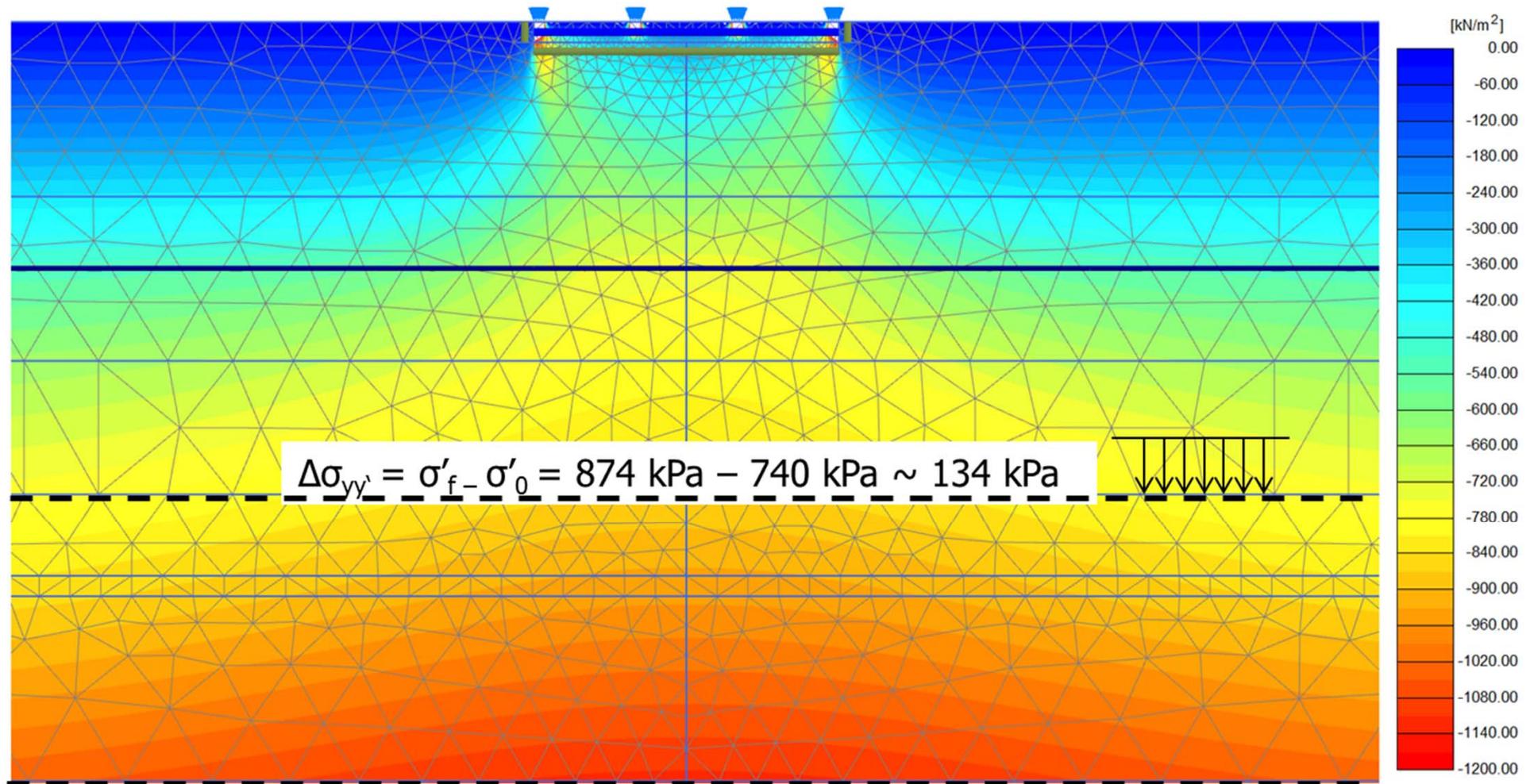
Rapport E/E_M dans Argiles	Modèle numérique (éléments finis 3D)	Modèle analytique (Boussinesq)	Rapport des résultats
6,0	5,2 cm	5,5 cm	1,06
4,5	6,0 cm	6,5 cm	1,08
3,0	7,5 cm	8,5 cm	1,13
1,5	12,0 cm	14,2 cm	1,18

En affinant le choix du « modèle » : marge de 5 à 20%

En affinant le choix du « module » : rapport de 1 à 3 sur le résultat !

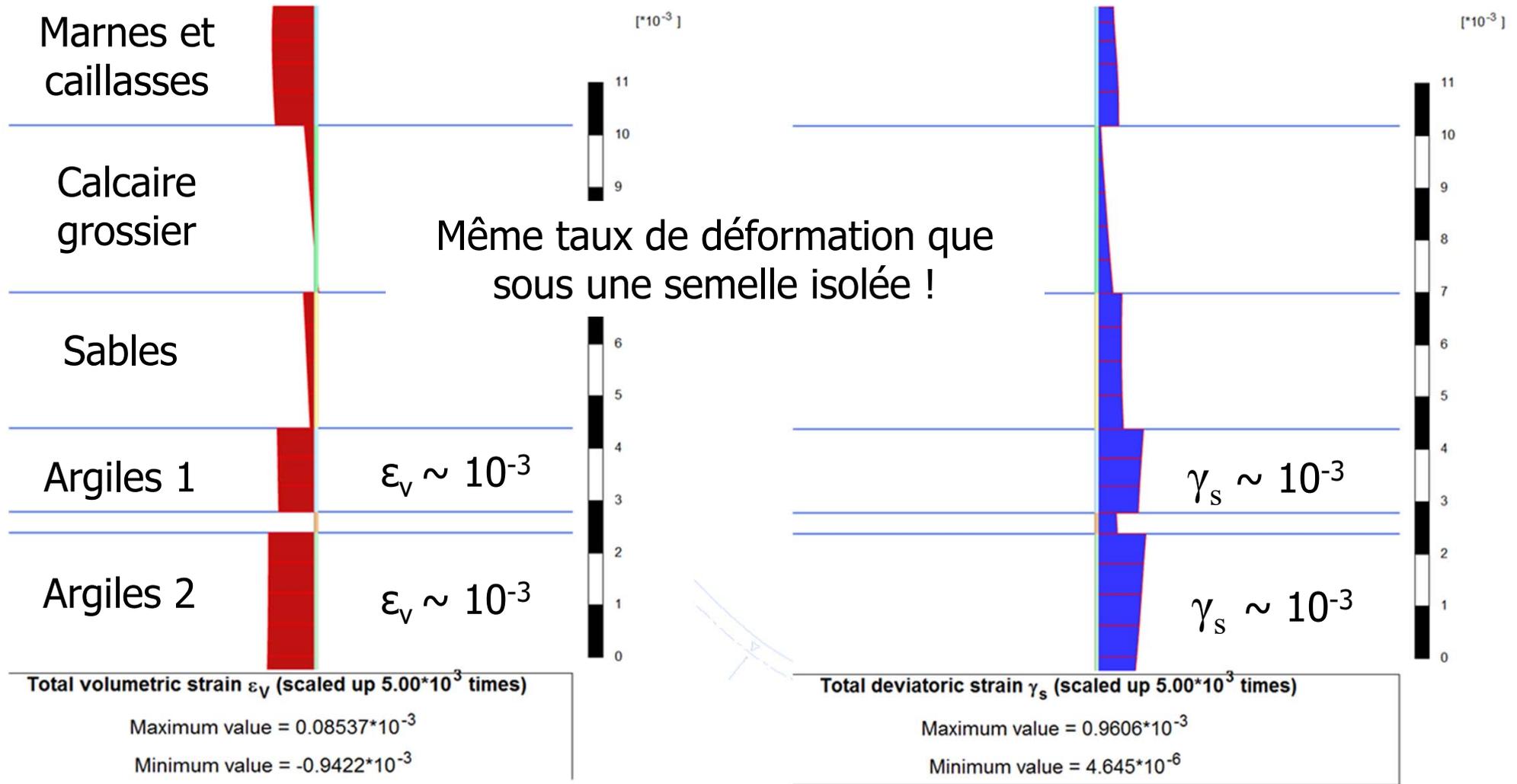
La question des modules

- Fondation de deux immeubles de grande hauteur



La question des modules

- Fondation de deux immeubles de grande hauteur

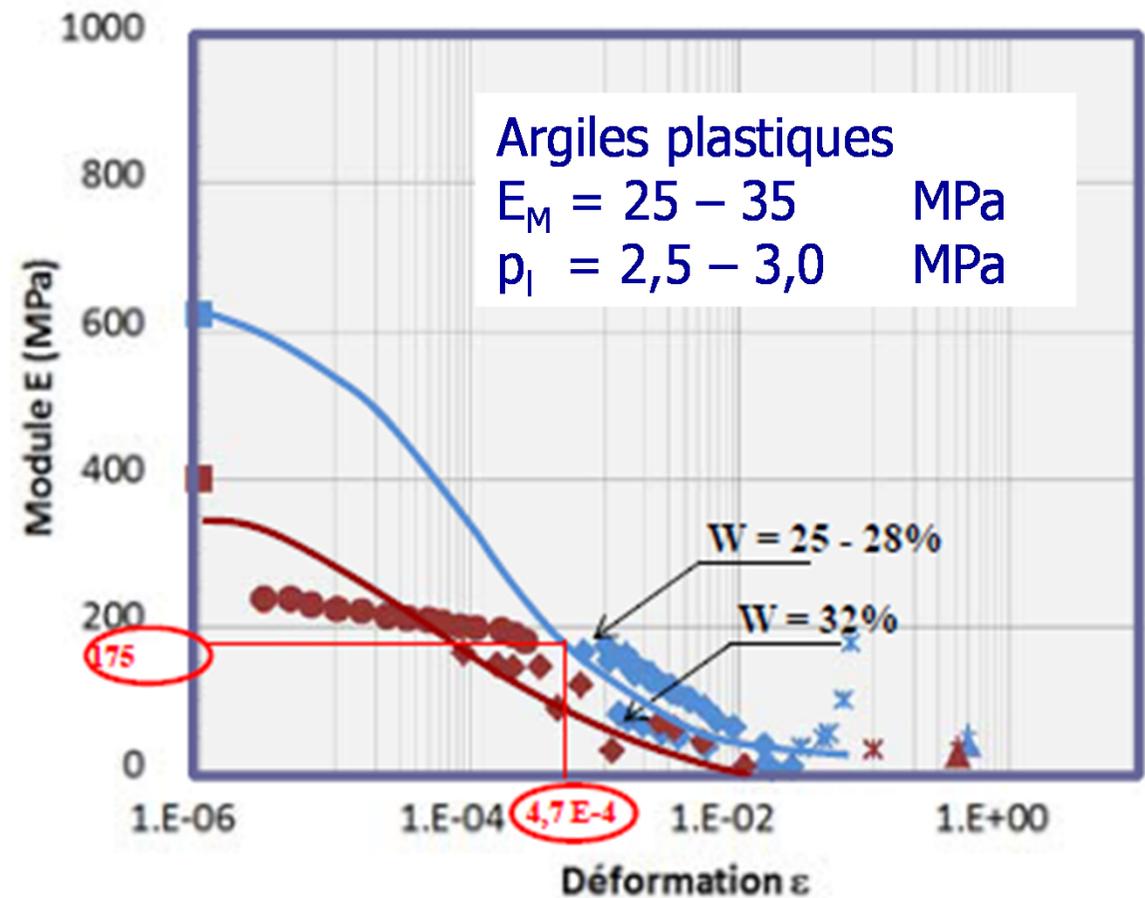


La question des modules

- Fondation de deux immeubles de grande hauteur

$E \sim 175$ MPa pour **Tour A**
 ($\Delta q = 350$ kPa, $\varepsilon \sim 0,5 \times 10^{-3}$)

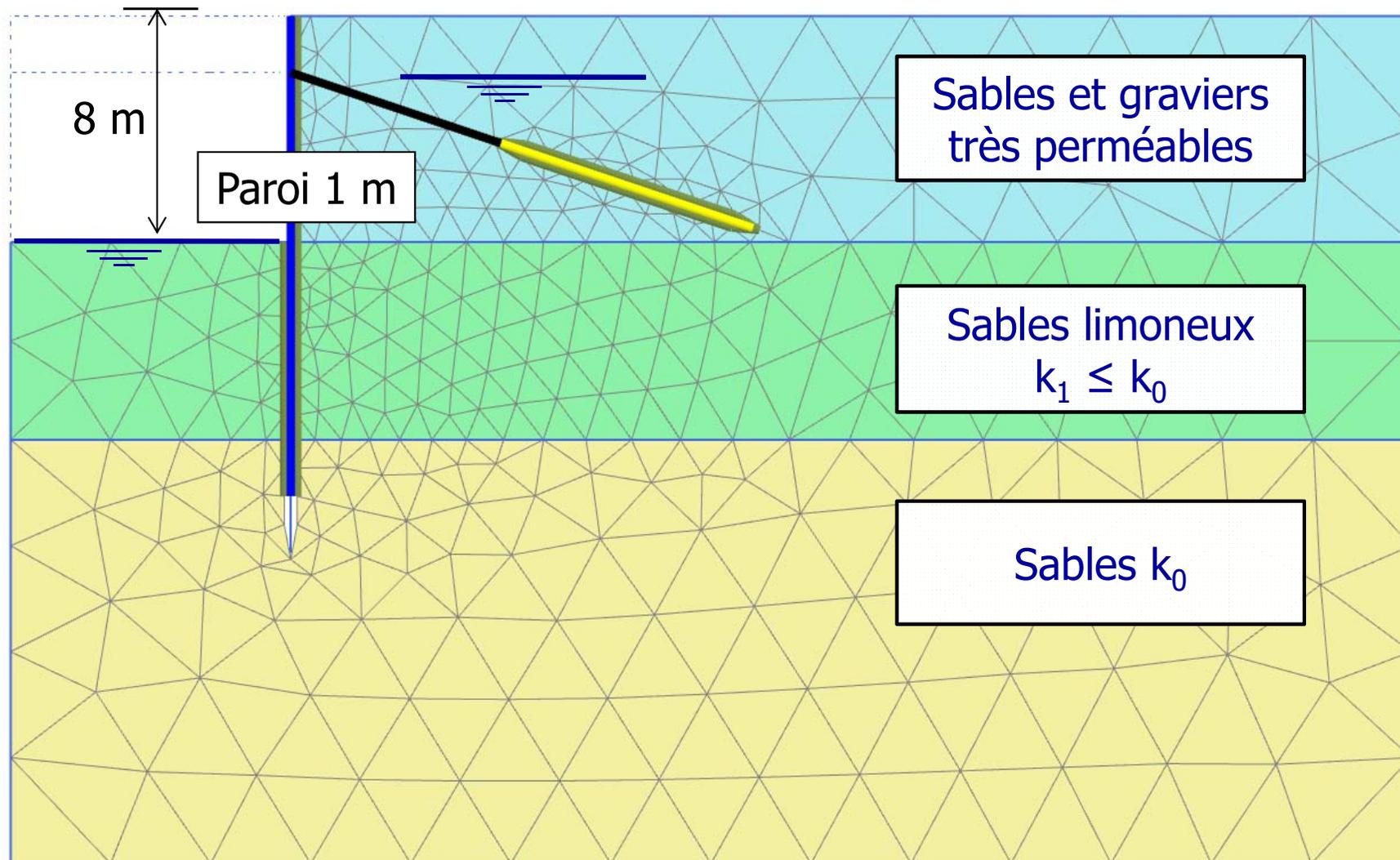
$E \sim 90$ MPa pour **Tour B**
 ($\Delta q = 650$ kPa, $\varepsilon \sim 2,0 \times 10^{-3}$)



(Caira et Flavigny, 2016)

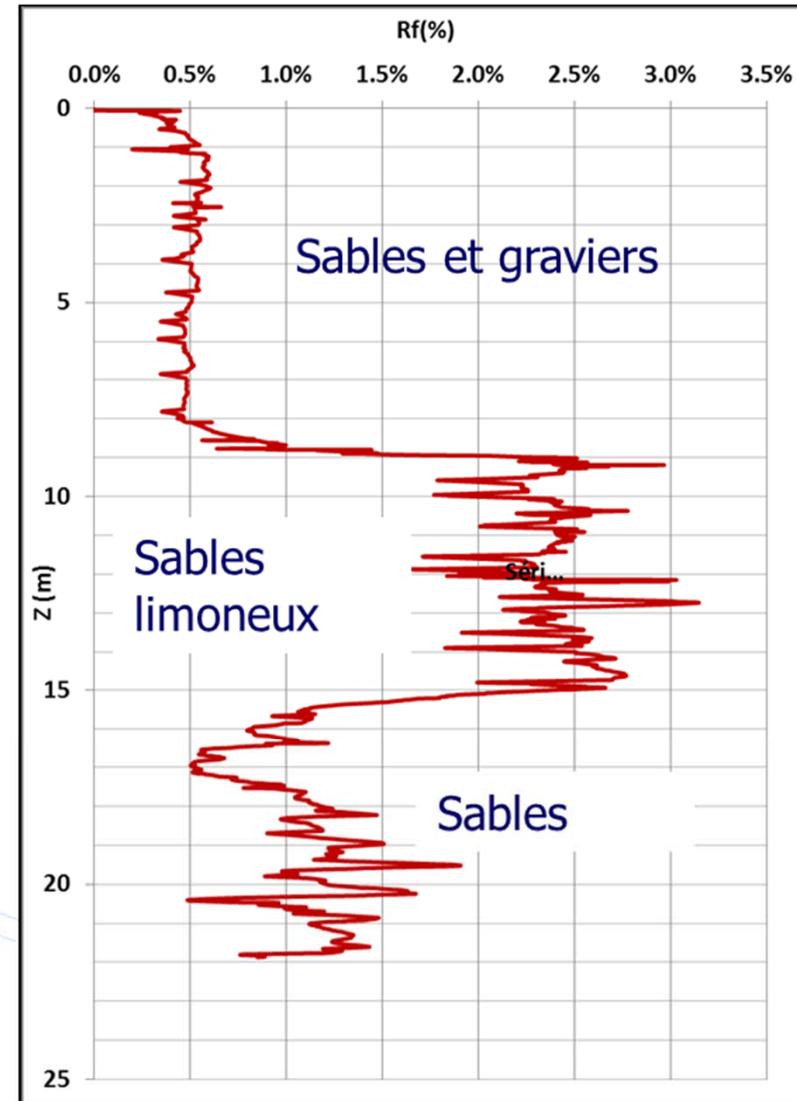
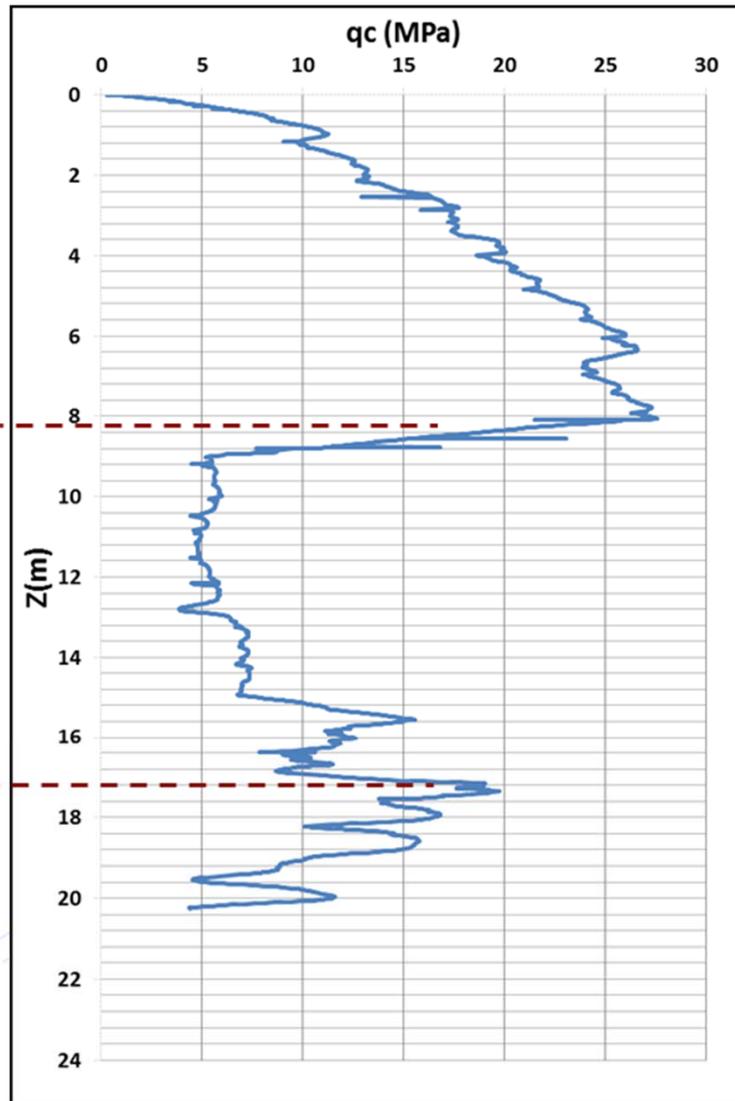
Couplages hydro-mécaniques

⇒ Excavation avec rabattement de nappe



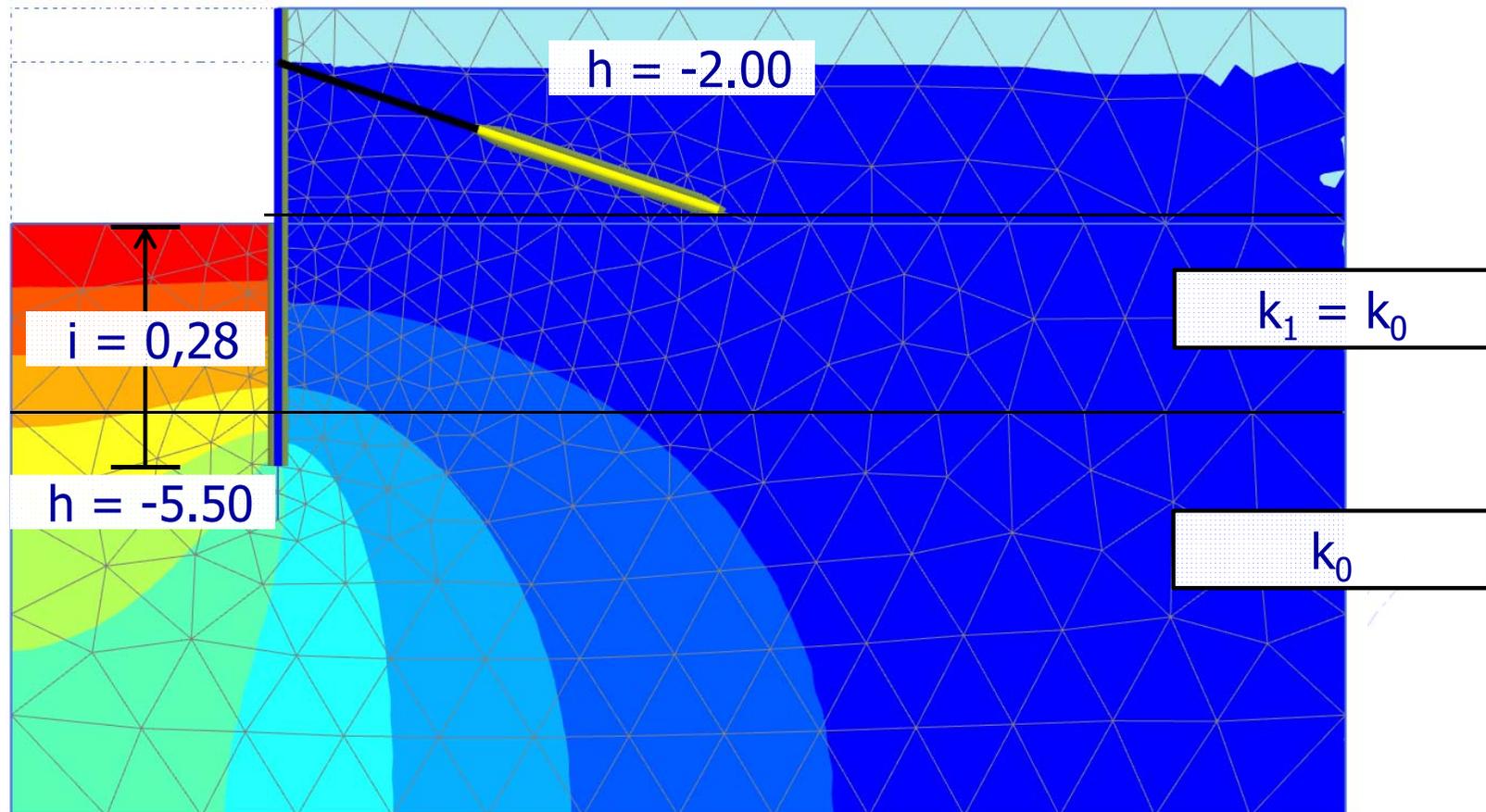
Couplages hydro-mécaniques

⇒ Excavation avec rabattement de nappe : intérêt des CPT



Couplages hydro-mécaniques

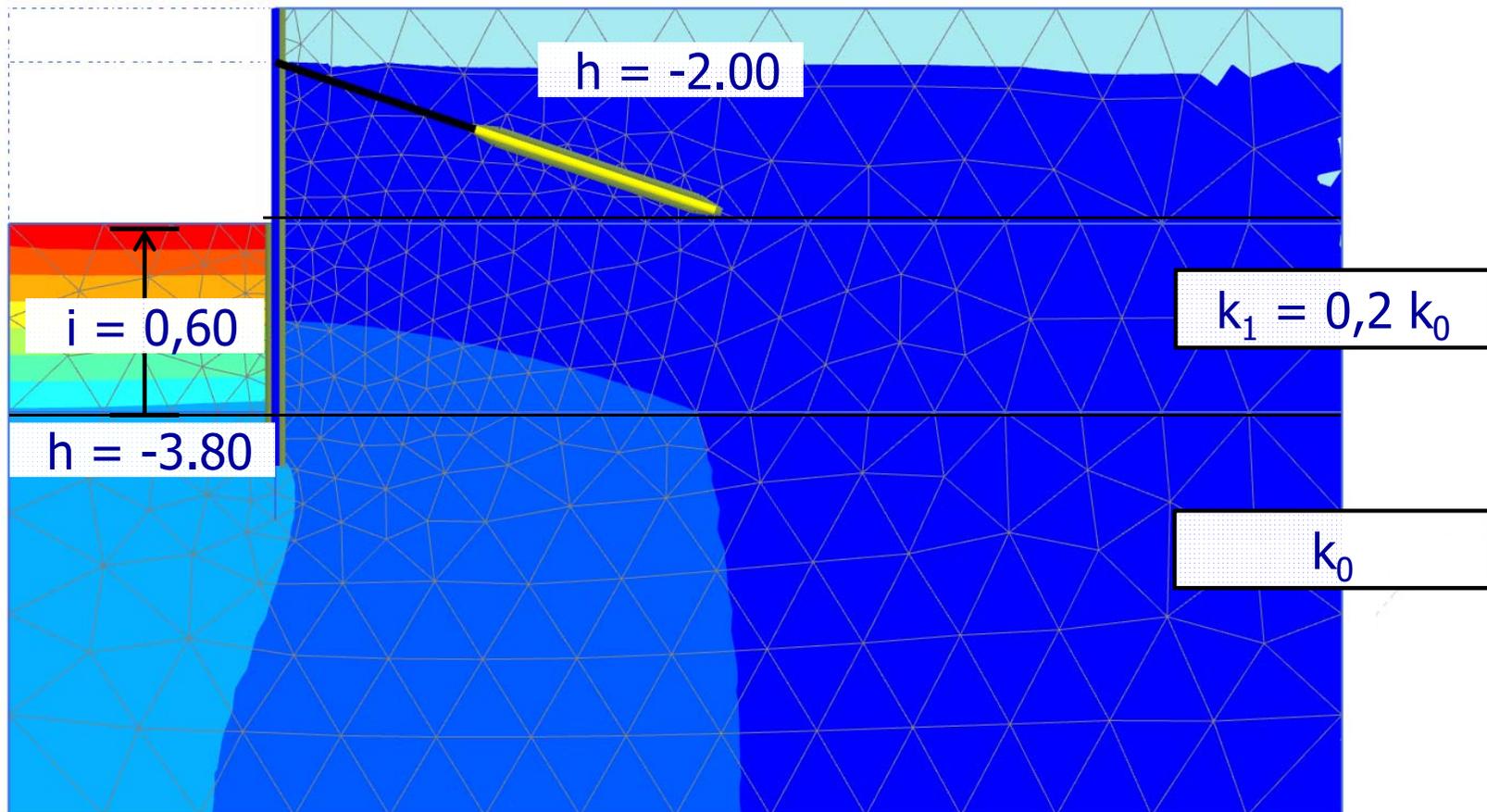
⇒ Excavation avec rabattement de nappe : calcul régime d'écoulement



Equipotentiels hydrauliques : cas sans
contraste de perméabilités

Couplages hydro-mécaniques

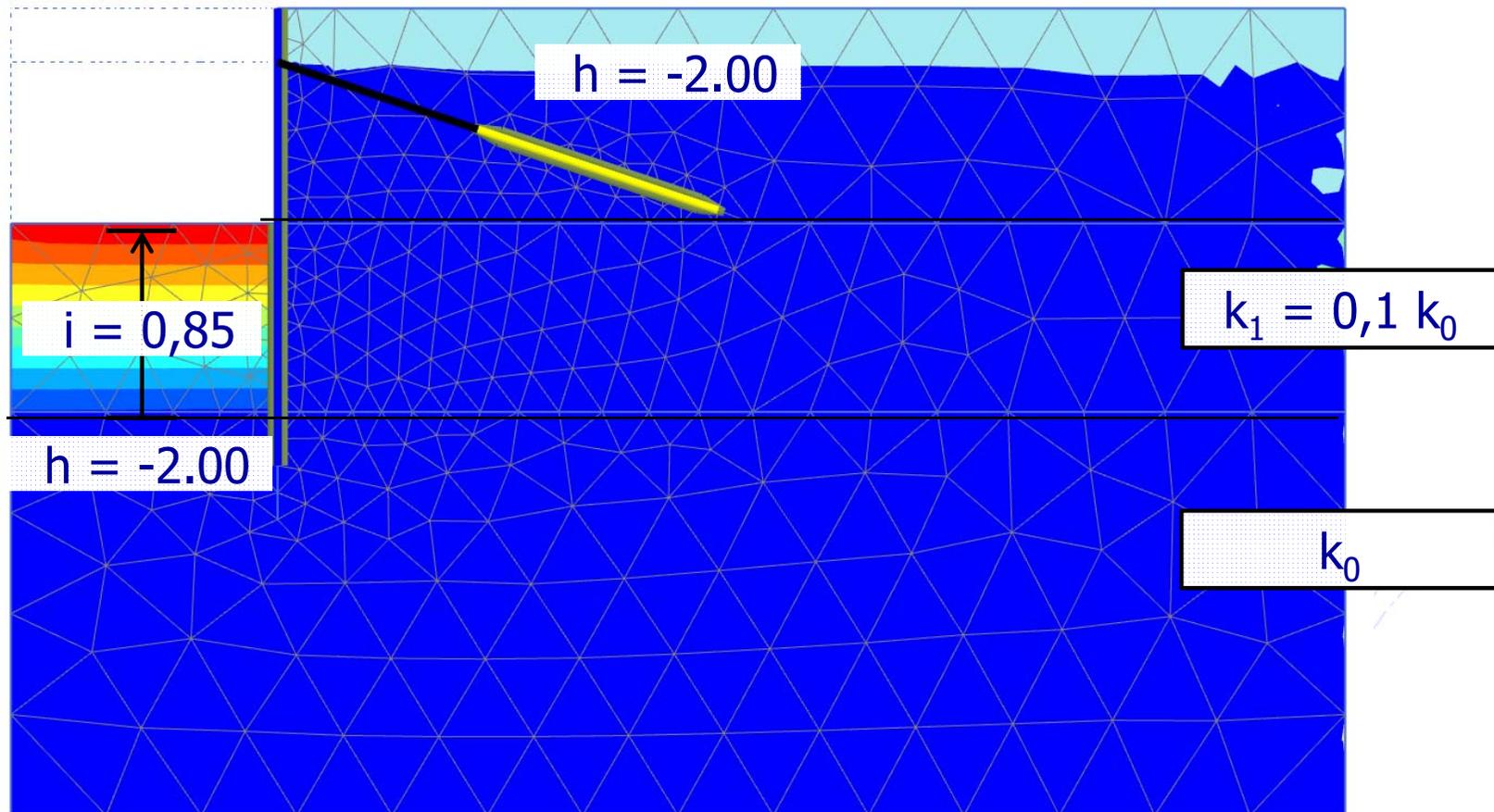
⇒ Excavation avec rabattement de nappe : calcul régime d'écoulement



Equipotentiels hydrauliques : cas avec
contraste de 5 sur les perméabilités

Couplages hydro-mécaniques

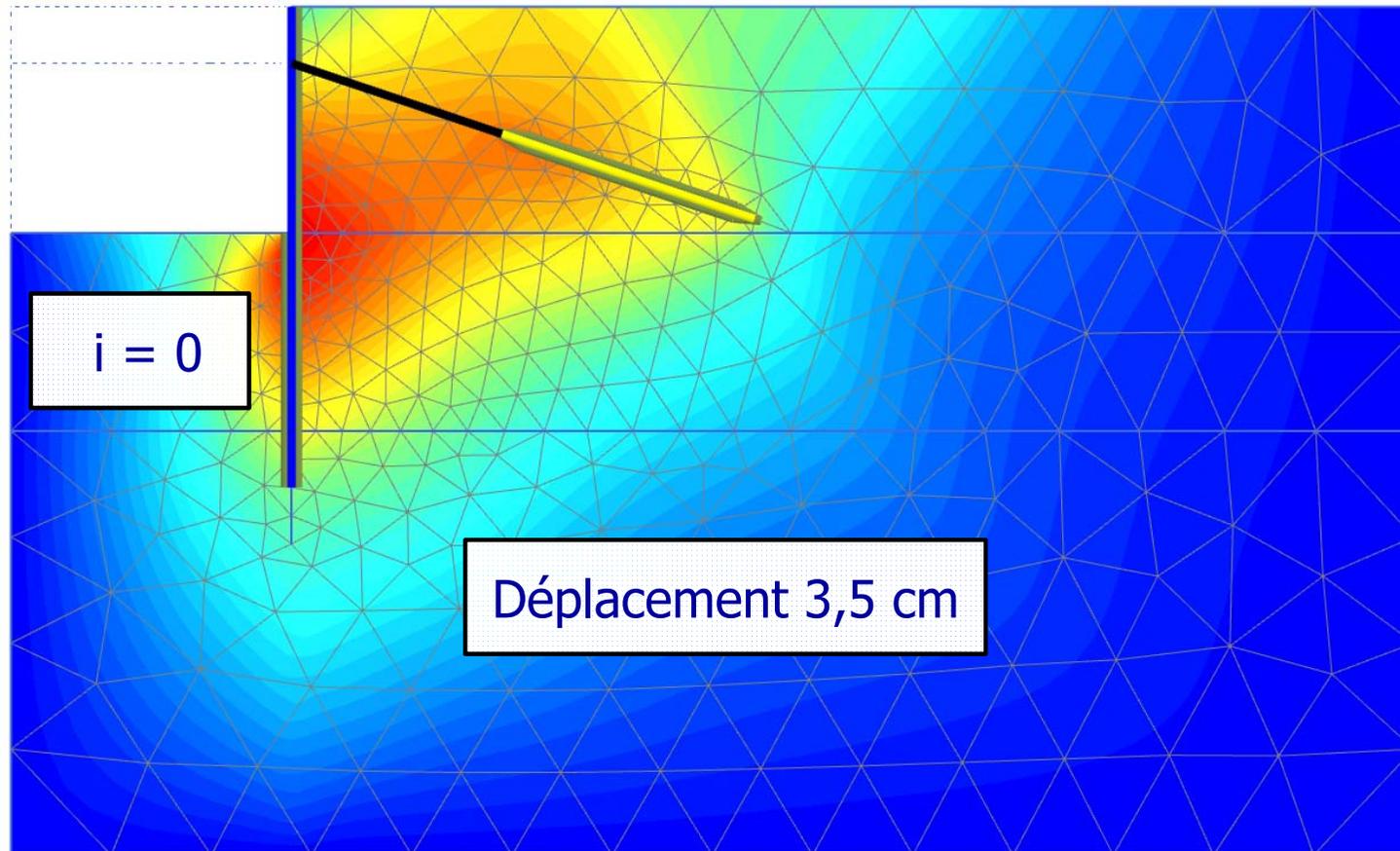
⇒ Excavation avec rabattement de nappe : calcul régime d'écoulement



Equipotentiels hydrauliques : cas avec contraste de 10 sur les perméabilités

Couplages hydro-mécaniques

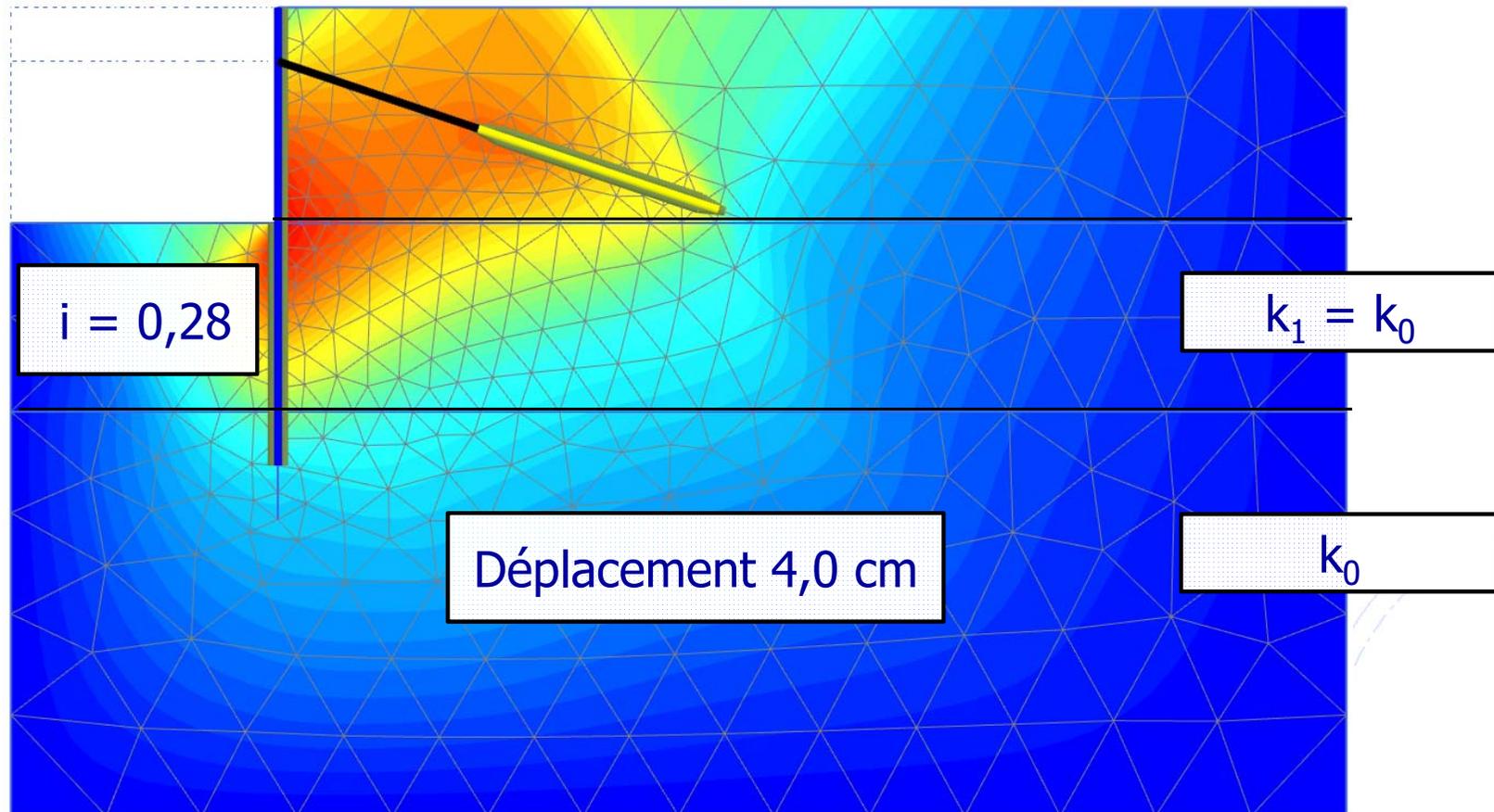
⇒ Excavation avec rabattement de nappe : couplage hydro-mécanique



Déplacements horizontaux en l'absence d'écoulement (régime hydrostatique)

Couplages hydro-mécaniques

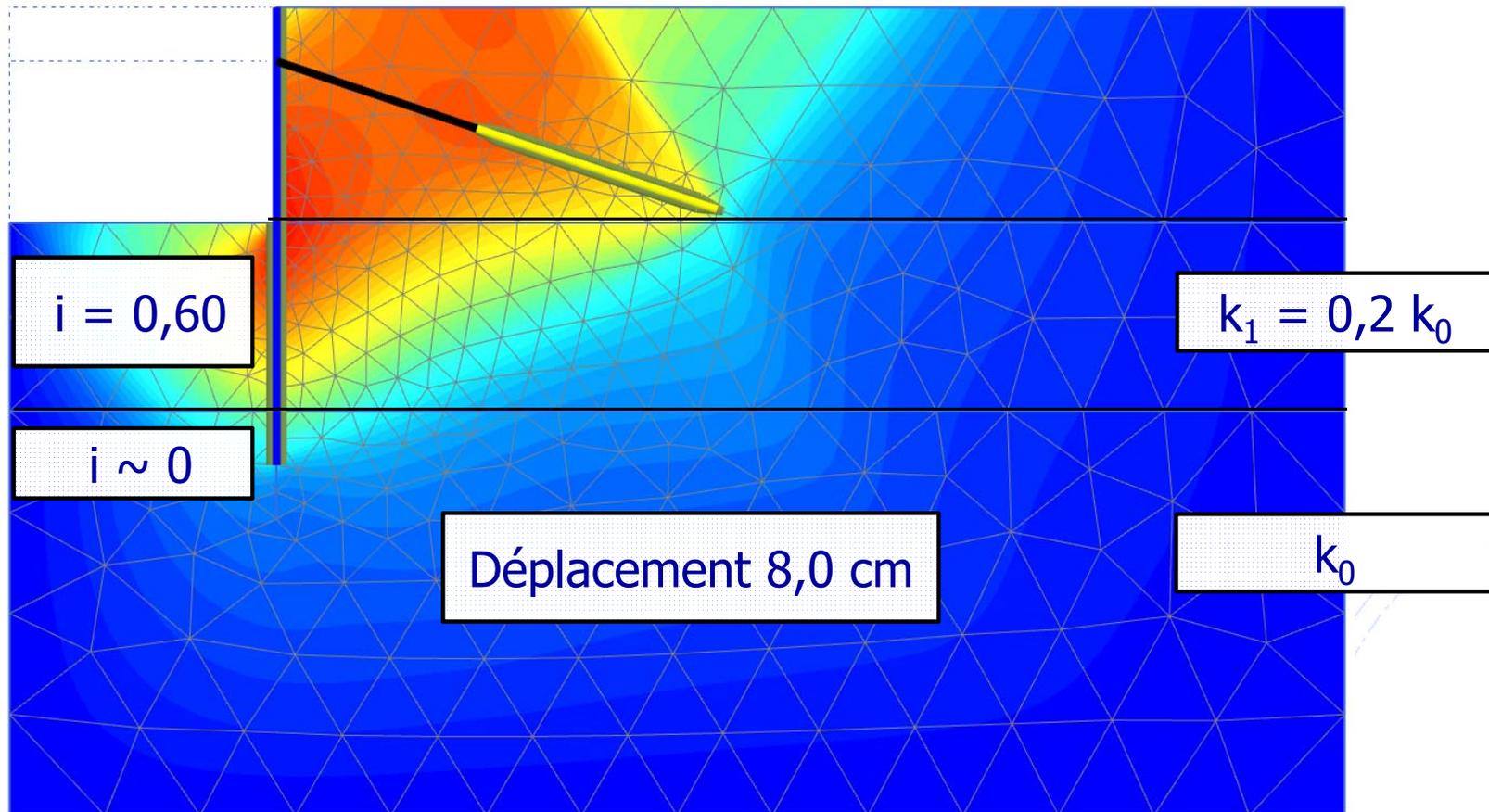
⇒ Excavation avec rabattement de nappe : couplage hydro-mécanique



Déplacements horizontaux en présence d'écoulement (perméabilité homogène)

Couplages hydro-mécaniques

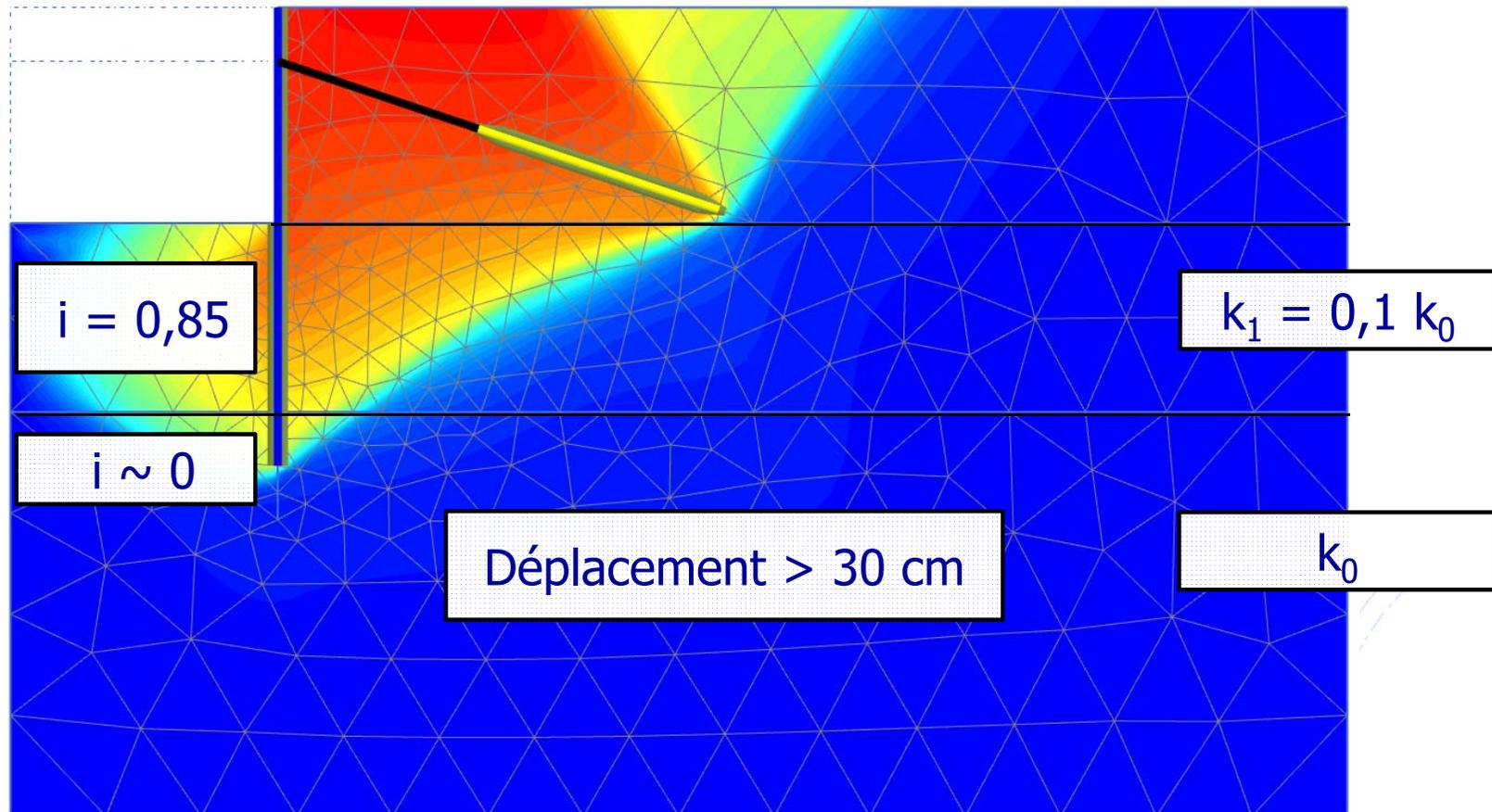
⇒ Excavation avec rabattement de nappe : couplage hydro-mécanique



Déplacements horizontaux en présence
d'écoulement ($k_1 = 0,2 \times k_0$)

Couplages hydro-mécaniques

⇒ Excavation avec rabattement de nappe : couplage hydro-mécanique



Déplacements horizontaux en présence d'écoulement ($k_1 = 0,1 \times k_0$)

Couplages hydro-mécaniques

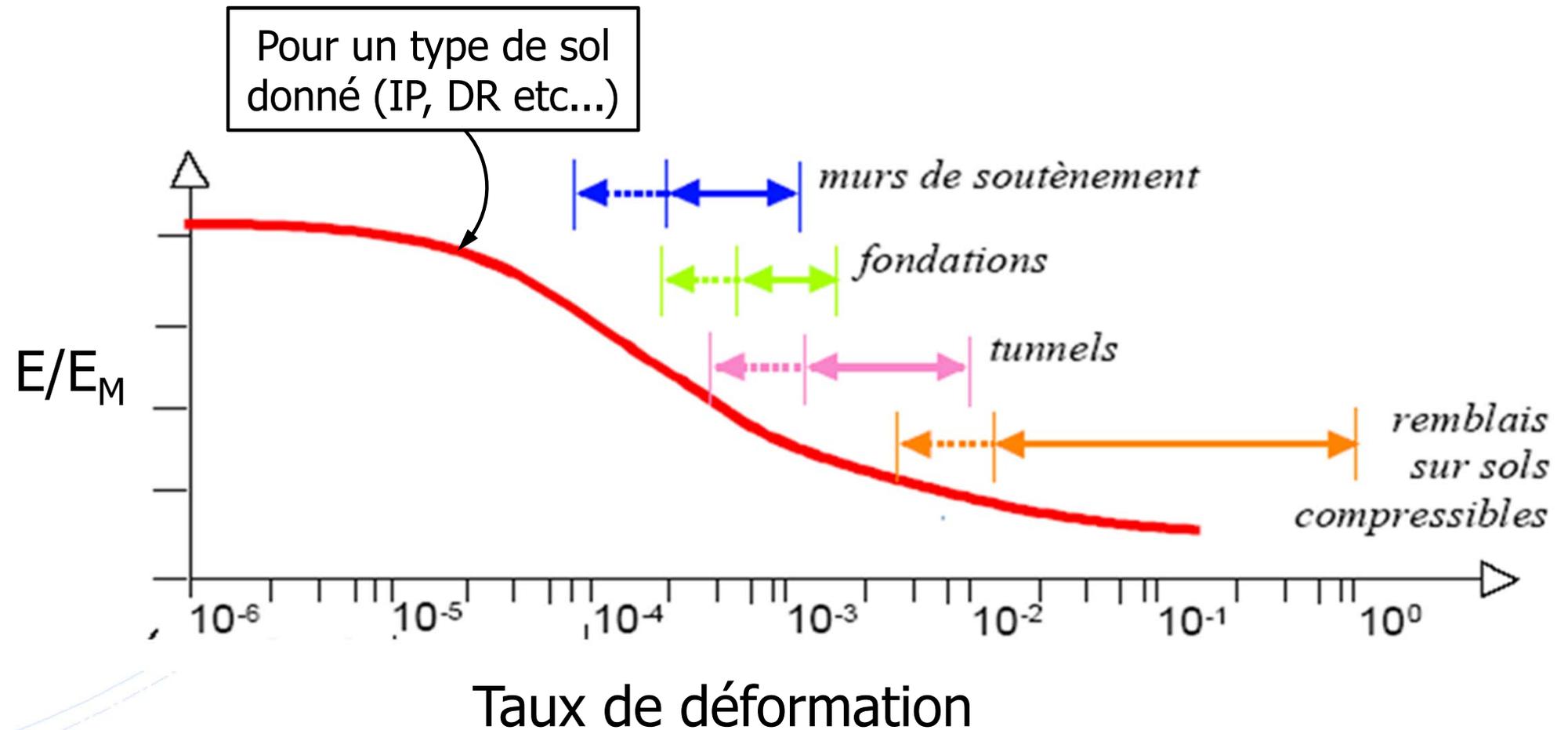
⇒ Excavation avec rabattement de nappe : étude de sensibilité

Type de calcul	Contraste perméabilités	Gradient hydraulique	Flèche (cm)	Moment (kNm/ml)	Sécurité
Hydrostatique	--	$i = 0$	3,5	700	2,2
Ecoulement	$k_1 = k_0$	$i = 0,28$	4,0	800	1,8
	$k_1 = 0,2 \times k_0$	$i = 0,60$	8,5	1000	1,3
	$k_1 = 0,1 \times k_0$	$i = 0,85$	> 30	>1300	< 1

Etablir une estimation par excès de la perméabilité ne nous place PAS nécessairement du côté de la sécurité

Quels modèles pour l'avenir ?

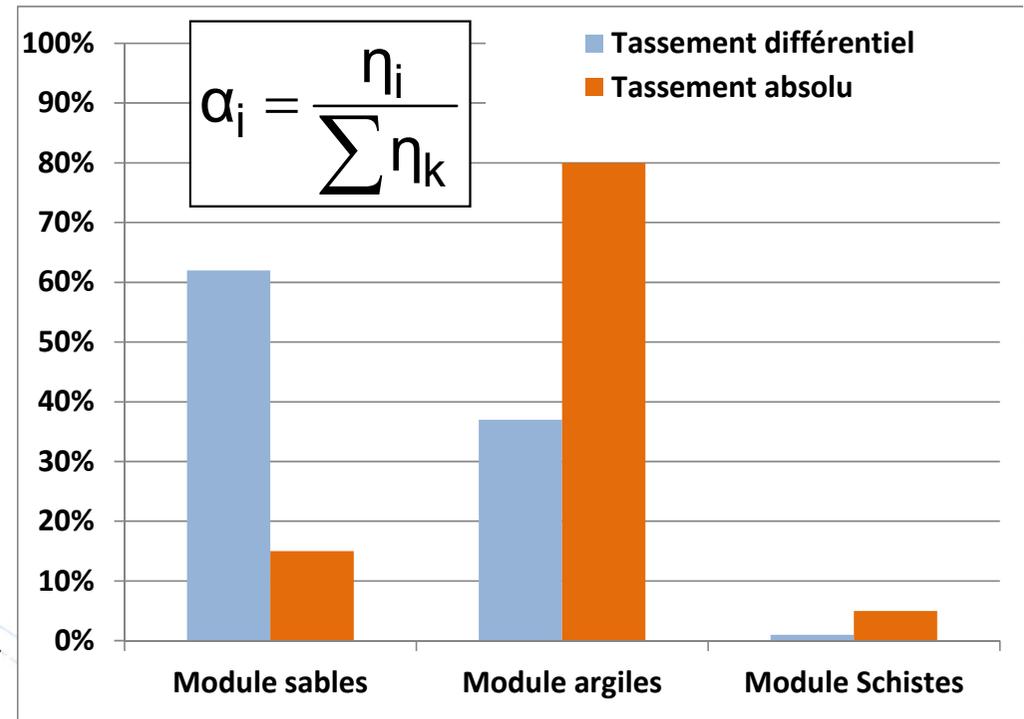
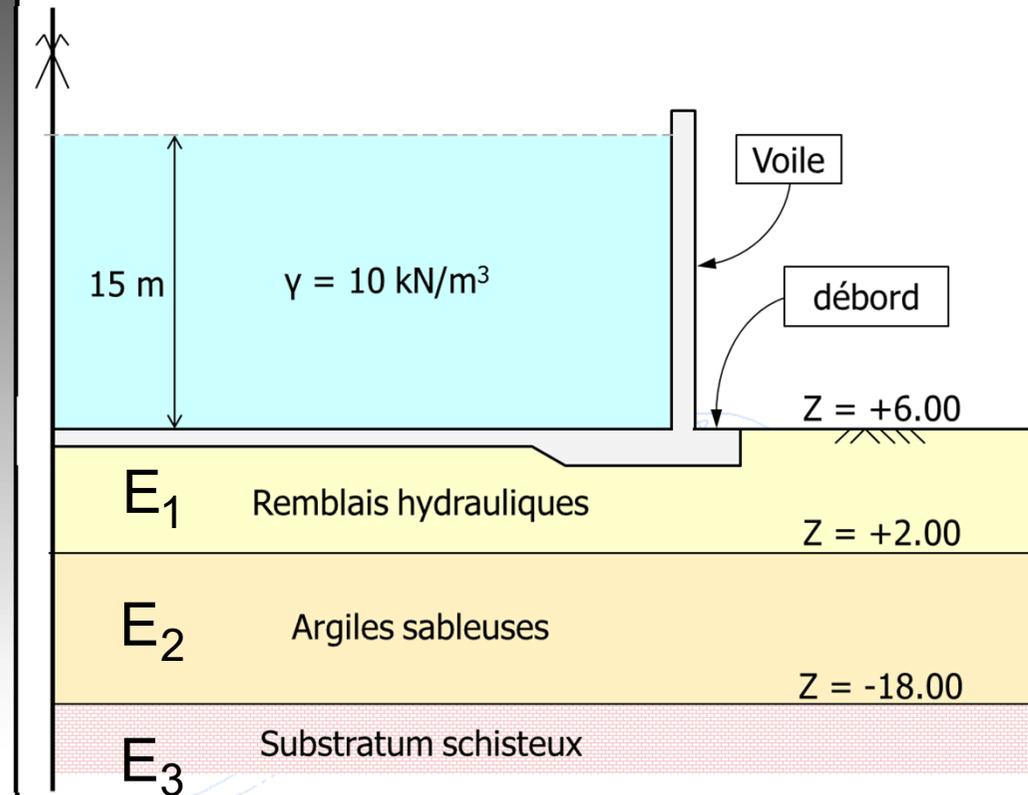
- Améliorer l'état de la pratique en matière de choix des modules à partir du pressiomètre (PN ARSCOP)



Quels modèles pour l'avenir ?

- Importance des études de sensibilité

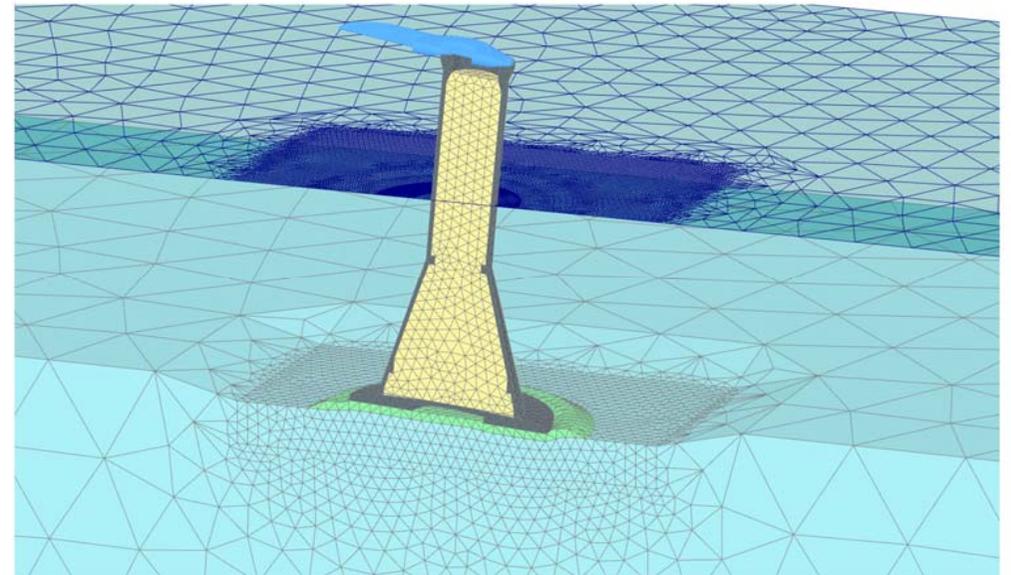
$$\eta_i = \frac{s(E_i - \Delta E_i)}{s(E_i)} - 1$$



Quels modèles pour l'avenir ?

- Notion de diagramme d'interaction

Généralisation de la notion de courbe de chargement



Moment M (ou e/B)

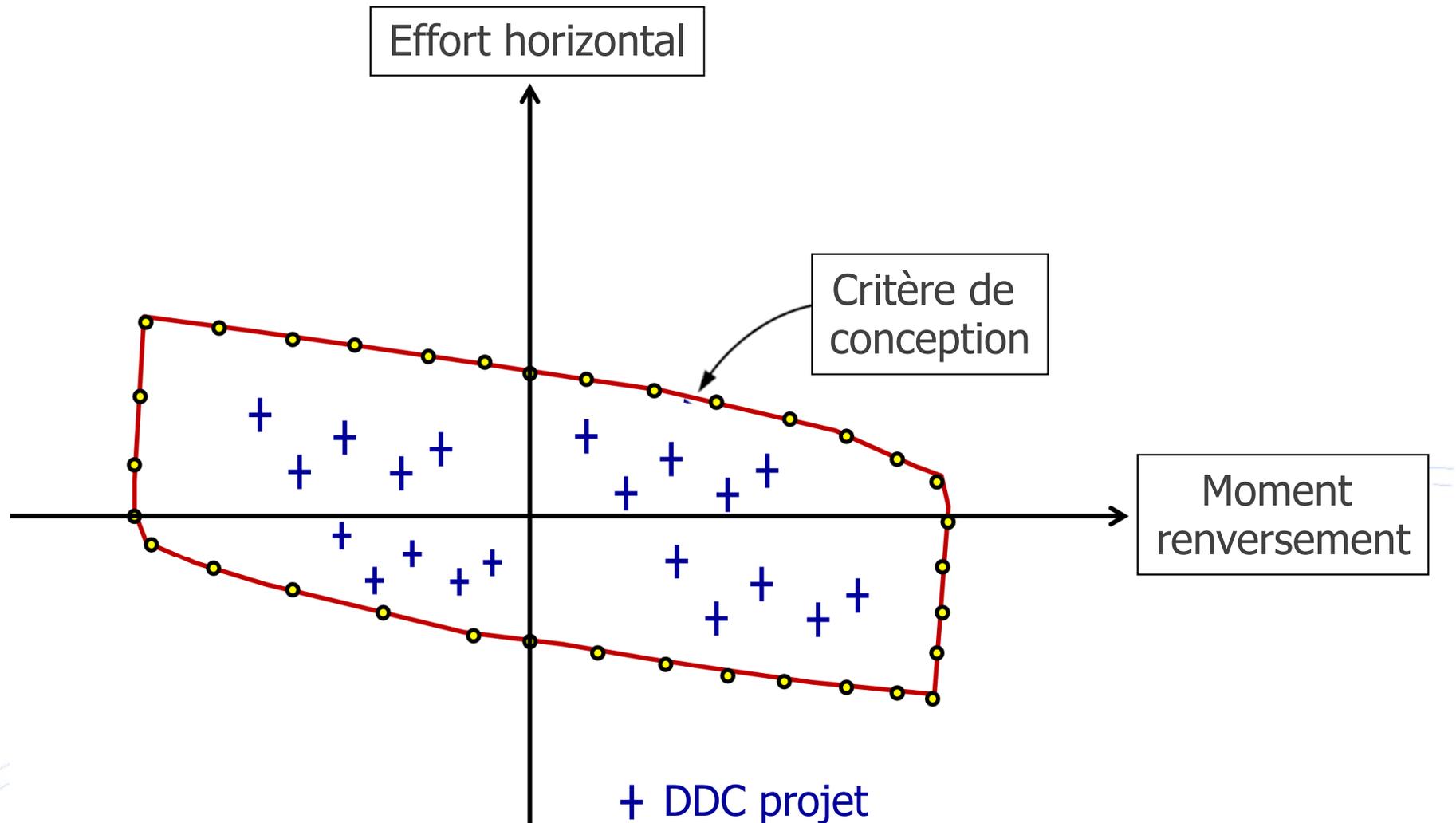
Diagramme de stabilité à V fixé

Diagramme établi pour un « critère » donné : déplacement, sollicitations, stabilité

Effort H (ou δ)

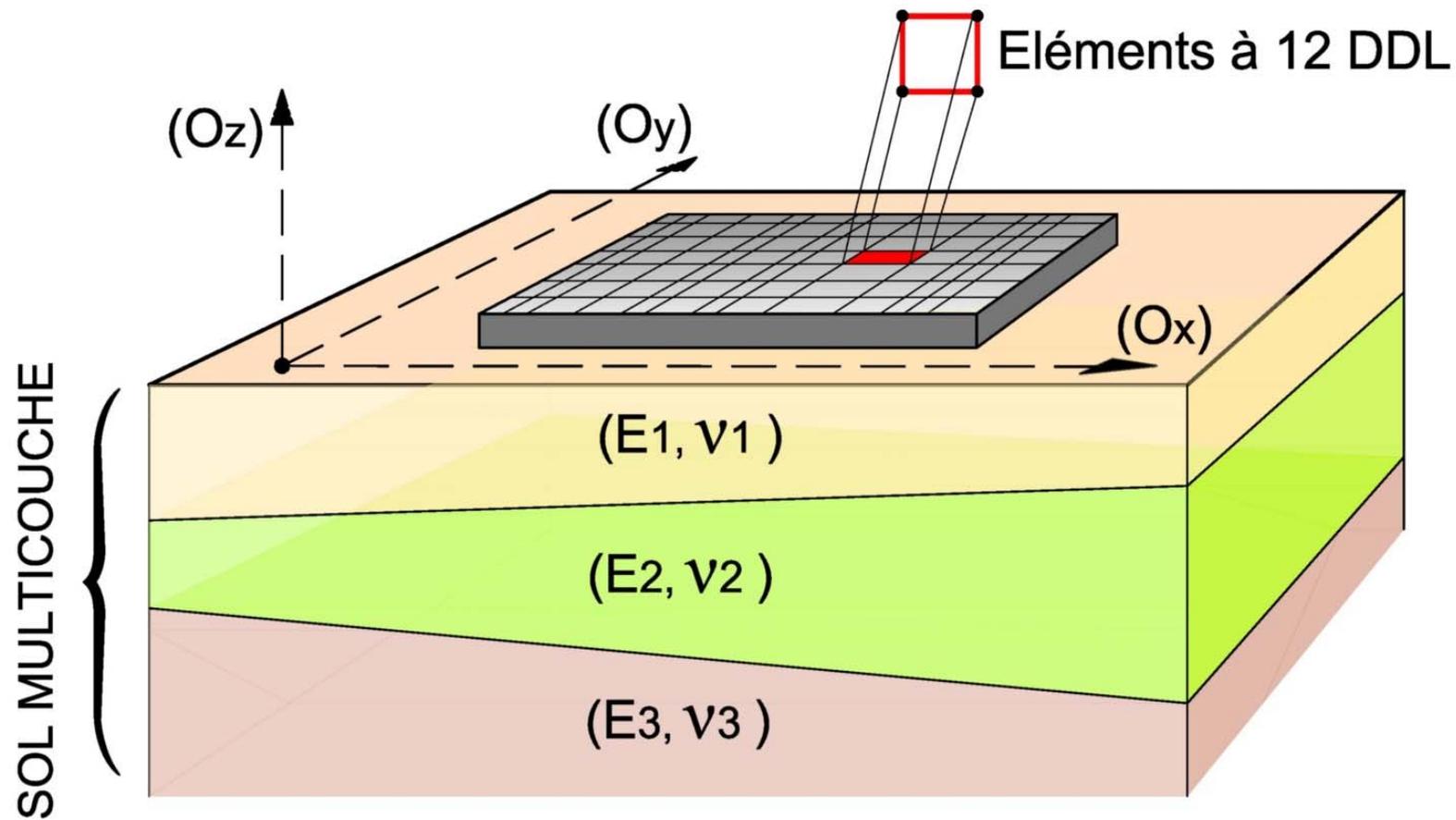
Quels modèles pour l'avenir ?

- Notion de diagramme d'interaction



Quels modèles pour l'avenir ?

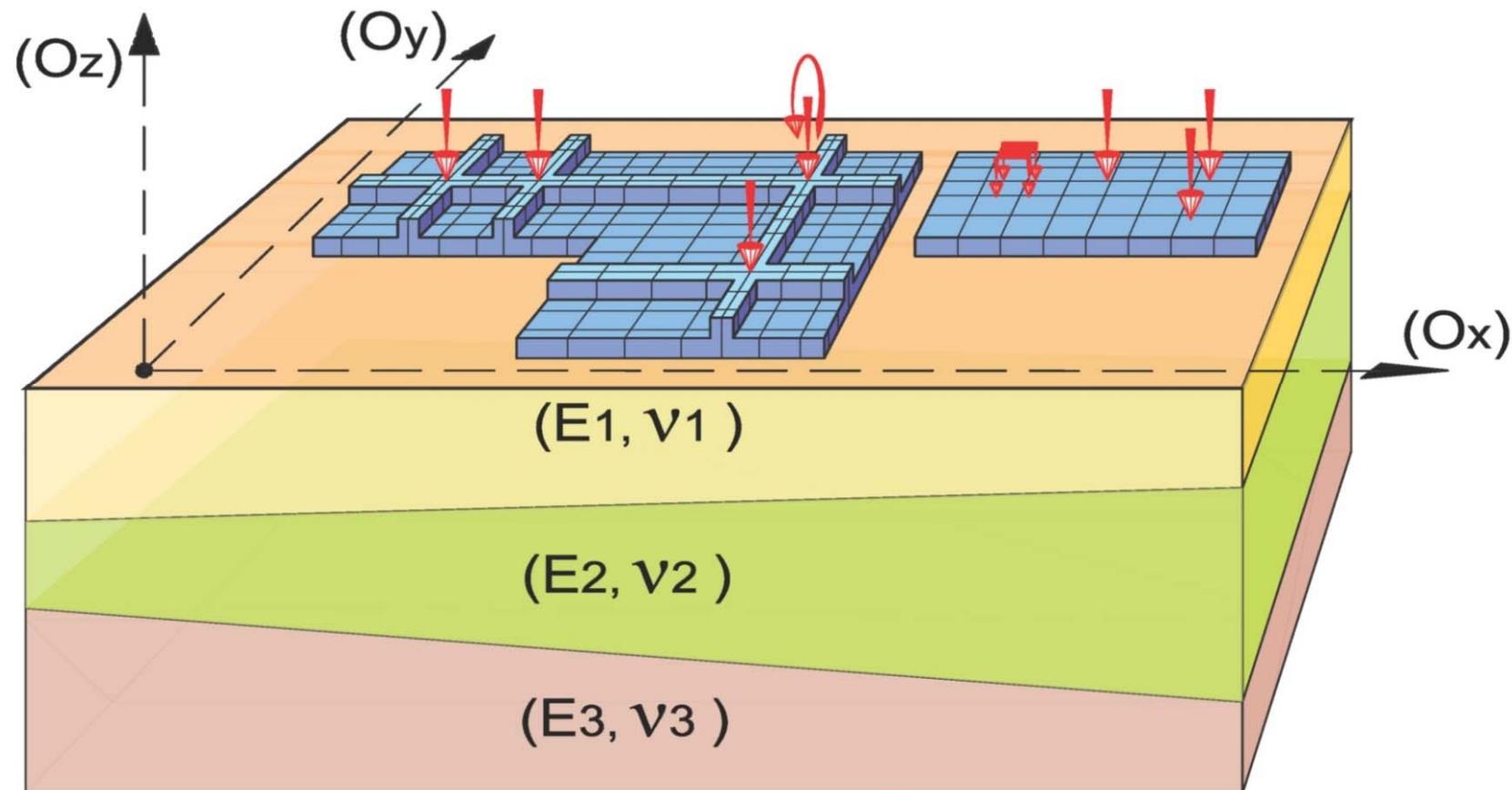
- Développement de modèles « hybrides » : radiers et dallages



Modèle Tasplaq (2006)

Quels modèles pour l'avenir ?

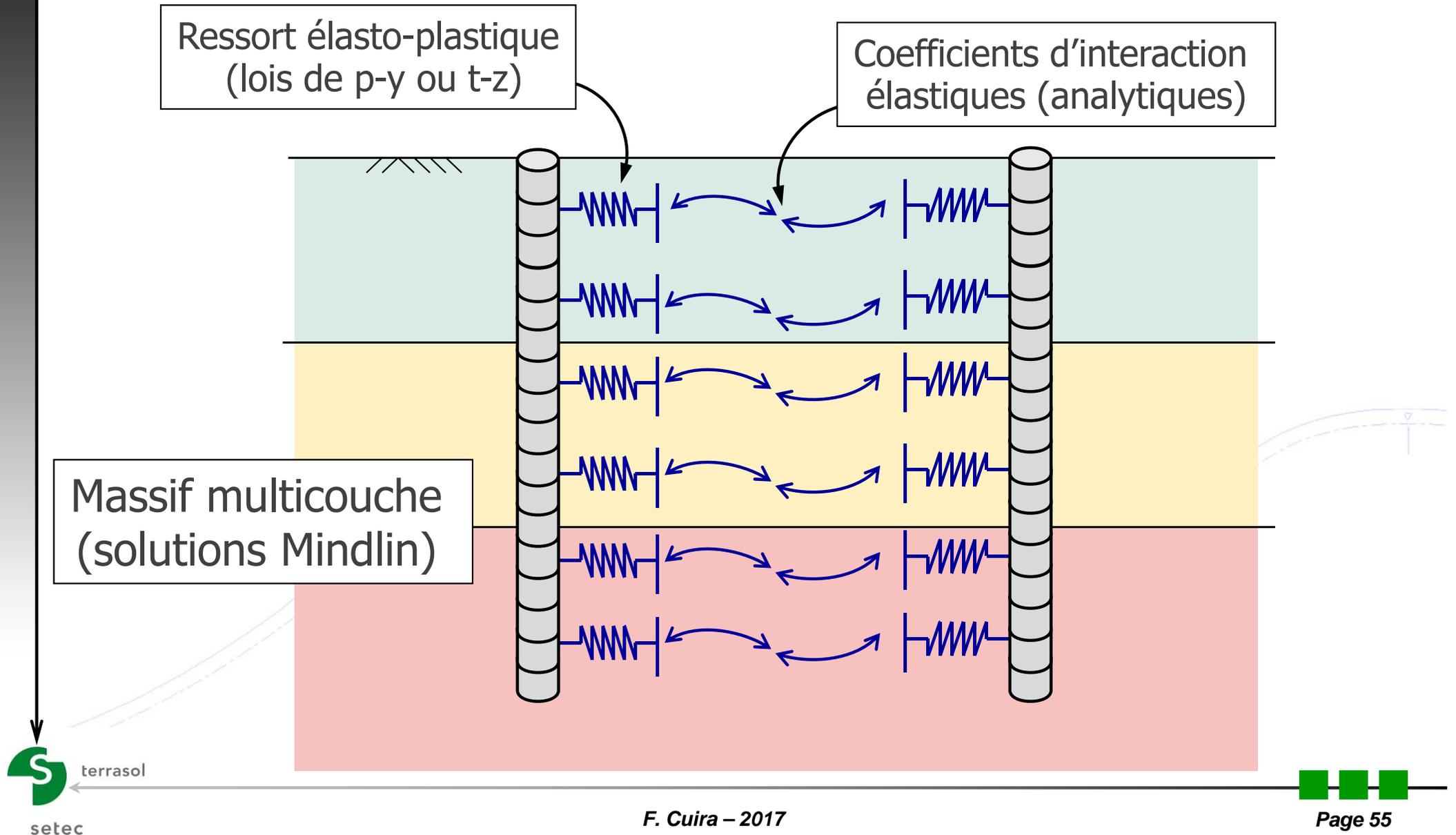
- Développement de modèles « hybrides » : radiers et dallages



Modèle Tasplaq (2006)

Quels modèles pour l'avenir ?

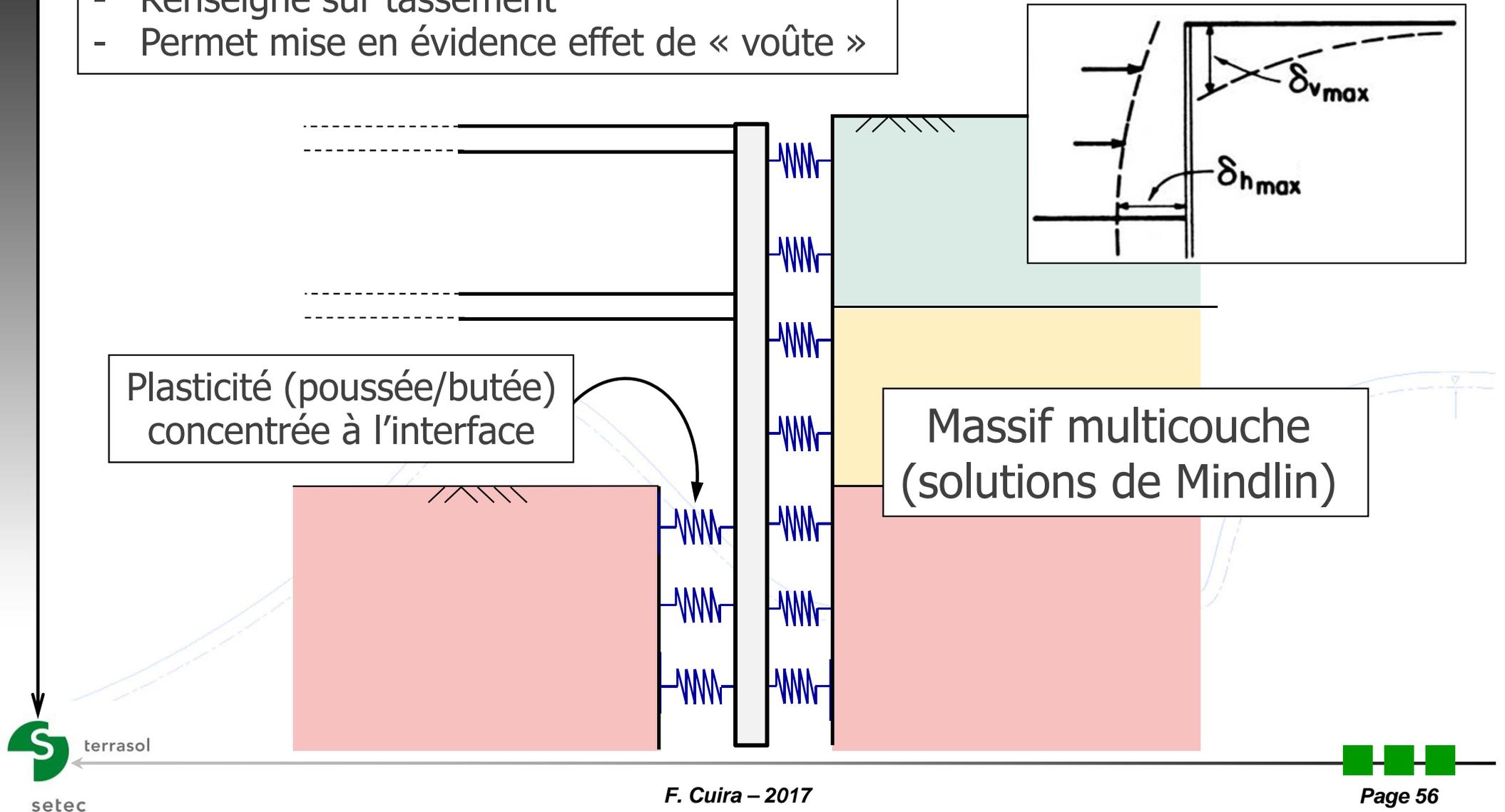
- Développement de modèles « hybrides » : groupe de pieux



Quels modèles pour l'avenir ?

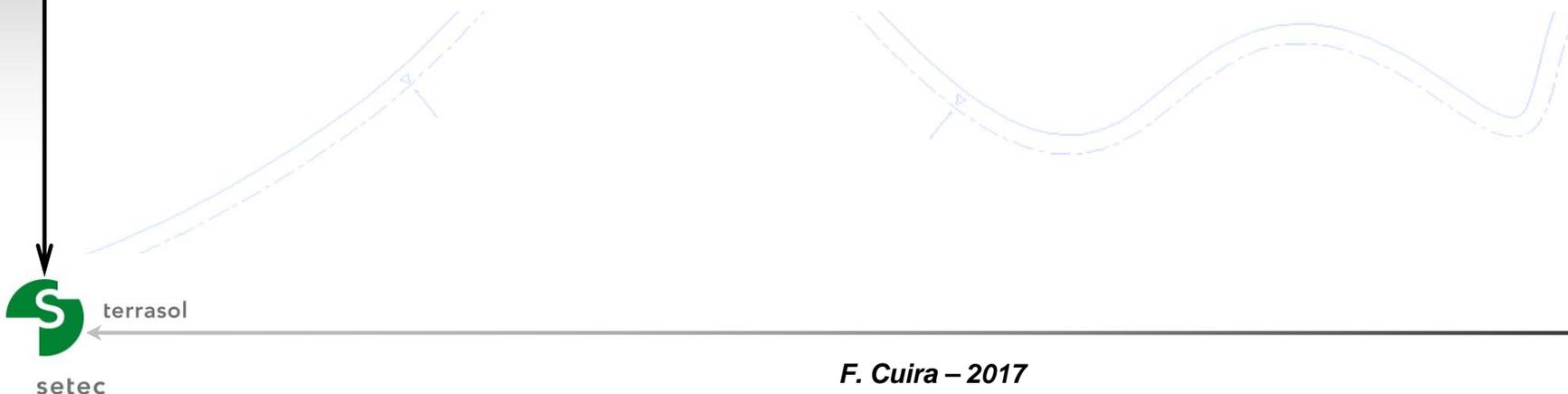
- Développement de modèles « hybrides » : écrans de soutènement

- Renseigne sur tassement
- Permet mise en évidence effet de « voûte »



Le défi du géotechnicien

- Garantir une continuité avec les approches semi-empiriques => améliorer état de la pratique en matière de choix de paramètres (ex. PN ARSCOP)
- Faire parler les modèles au-delà des données d'entrée : études de sensibilité / notion de diagramme d'interaction
- Opportunité des modèles « hybrides » : perfectionnement (dans la continuité) des approches de dimensionnement usuelles



Merci pour votre attention

