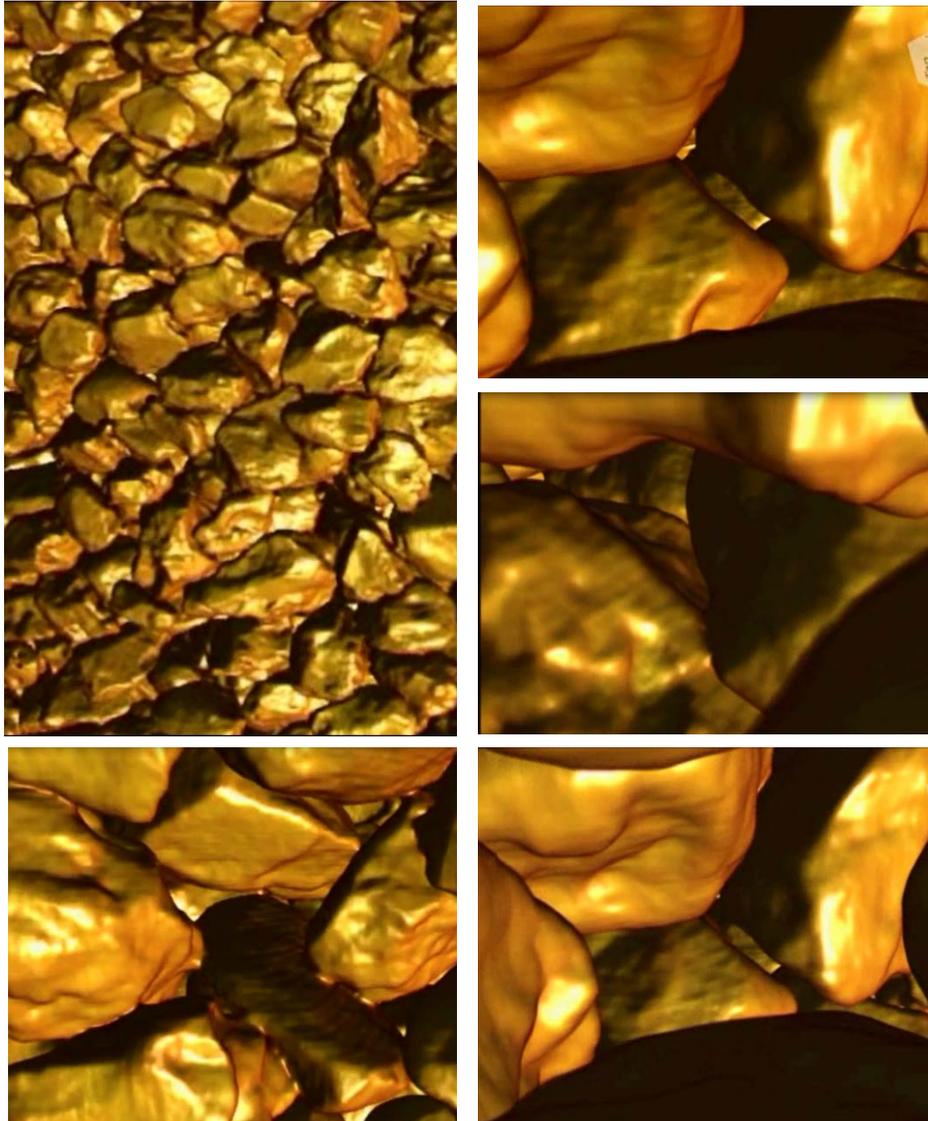


Décomposer (découper)... recomposer ...

... des voies utiles pour la conception des ouvrages géotechniques

Bruno SIMON
(Terrasol)

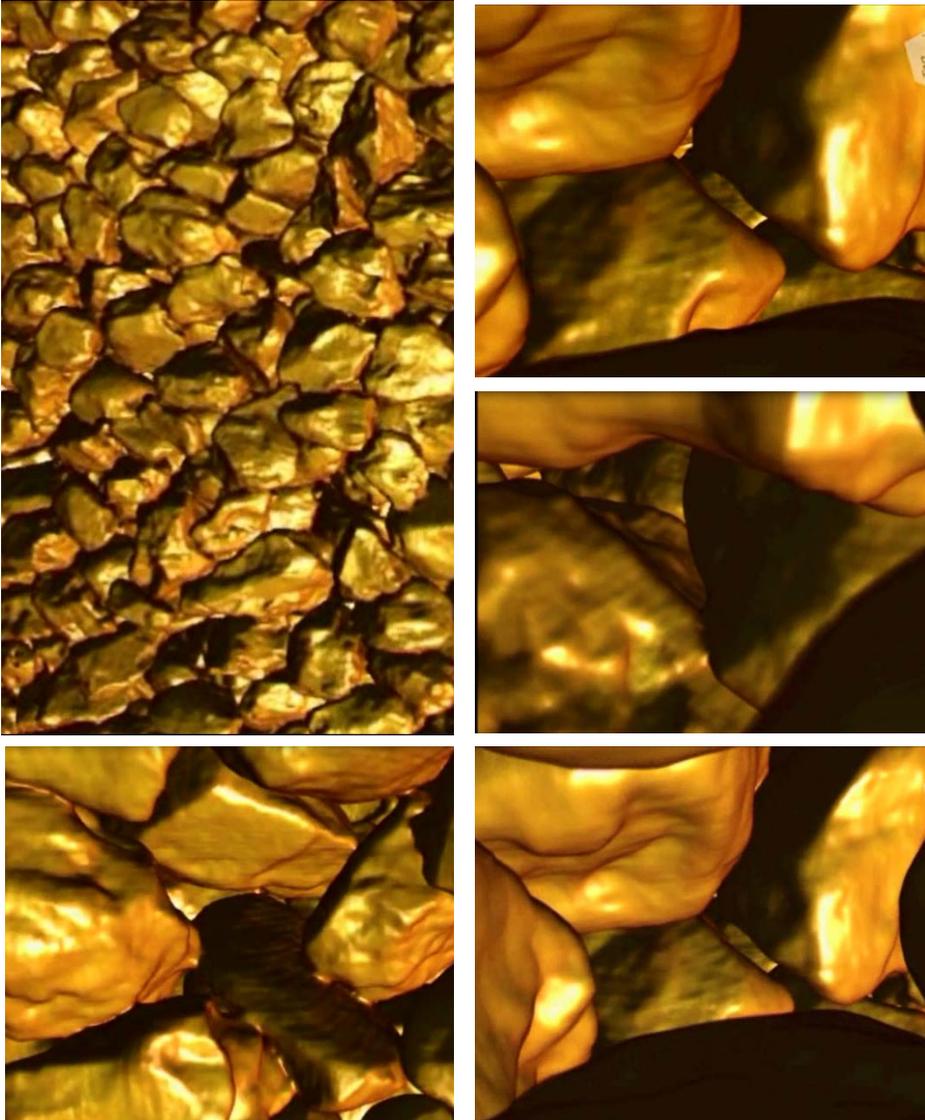
Les défis de la géotechnique



« Voyage granulaire » - L3SR Grenoble



Les défis de la géotechnique



« Voyage granulaire » - L3SR Grenoble



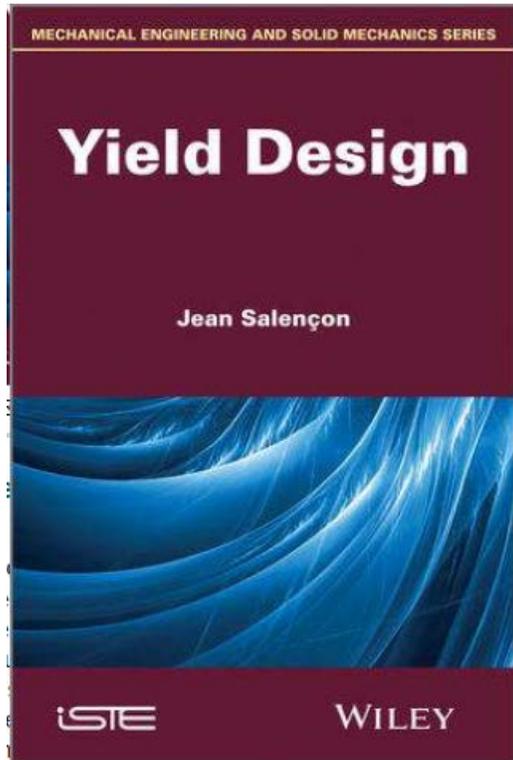
Est-ce que ça tient ?
De combien ça tasse ?

Découper ... un héritage

...

Calcul à la rupture (J. Salençon 1983)

- Théorie générale d'évaluation de la charge de rupture d'un système mécanique

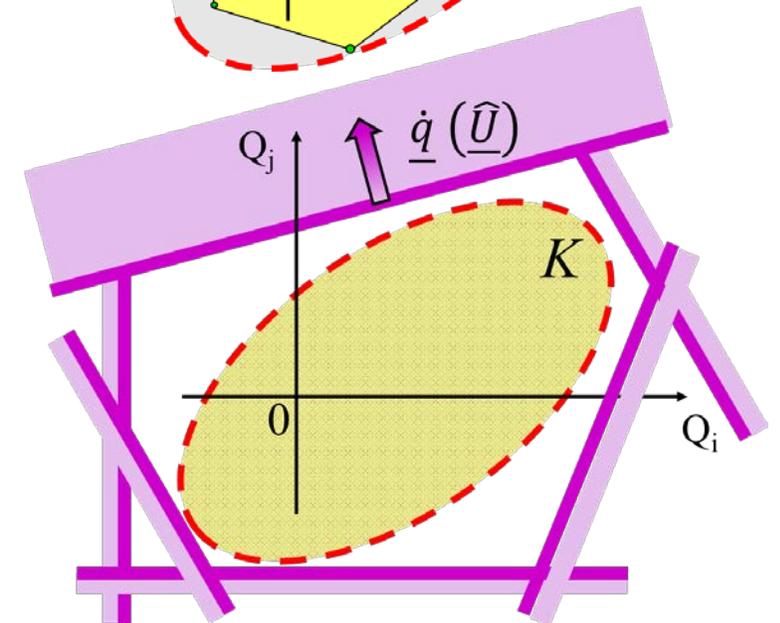
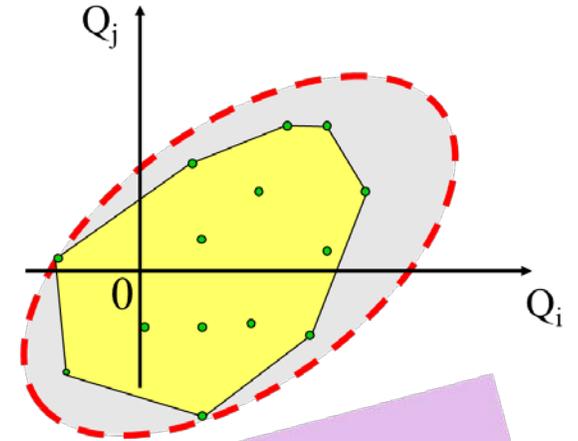


– Approche statique

→ charge de rupture par défaut

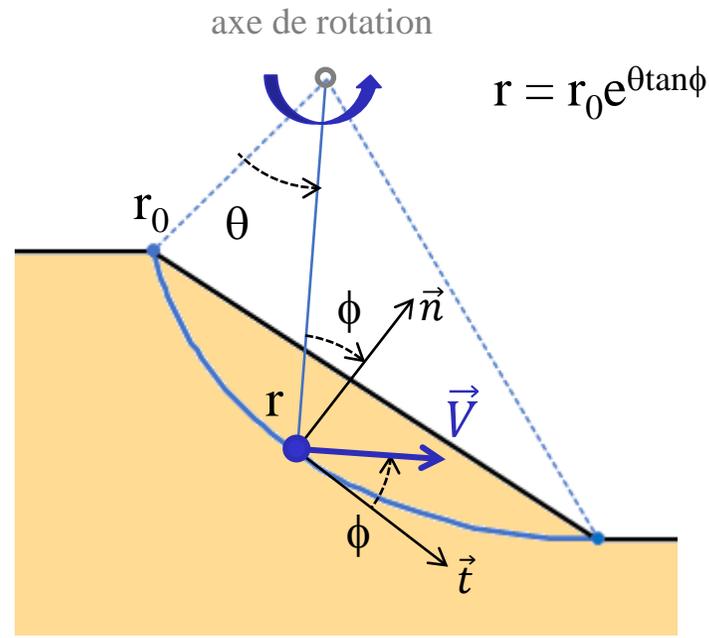
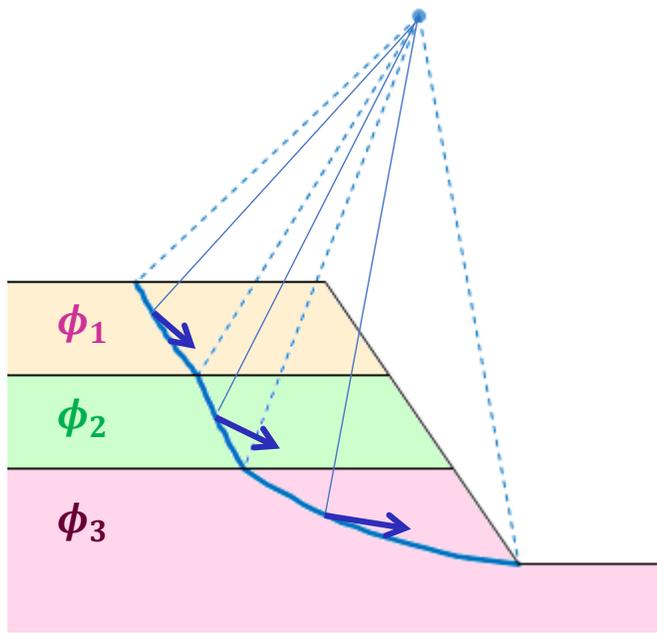
– Approche cinématique

→ charge de rupture évaluée par excès

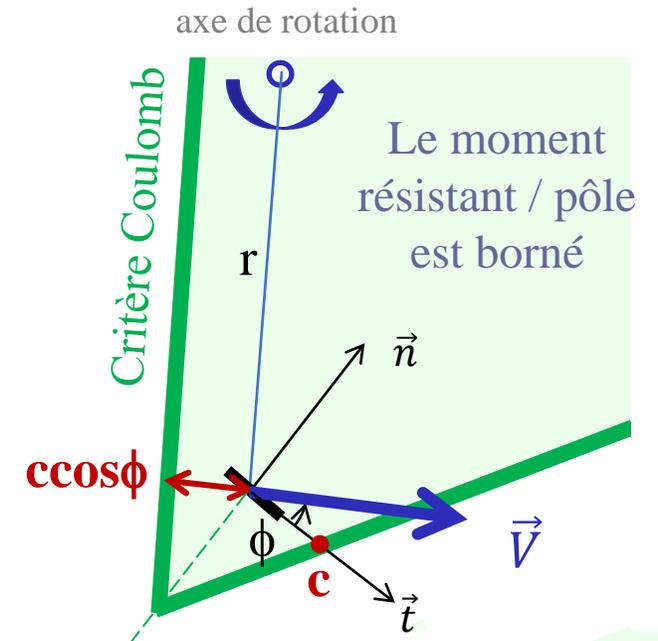


Calcul à la rupture (J. Salençon 1983)

- **Approche cinématique** – une application restreinte
 - Critère de Mohr Coulomb
 - Mouvement de blocs rigides
 - Arcs de spirales logarithmiques



Un outil de coupes !



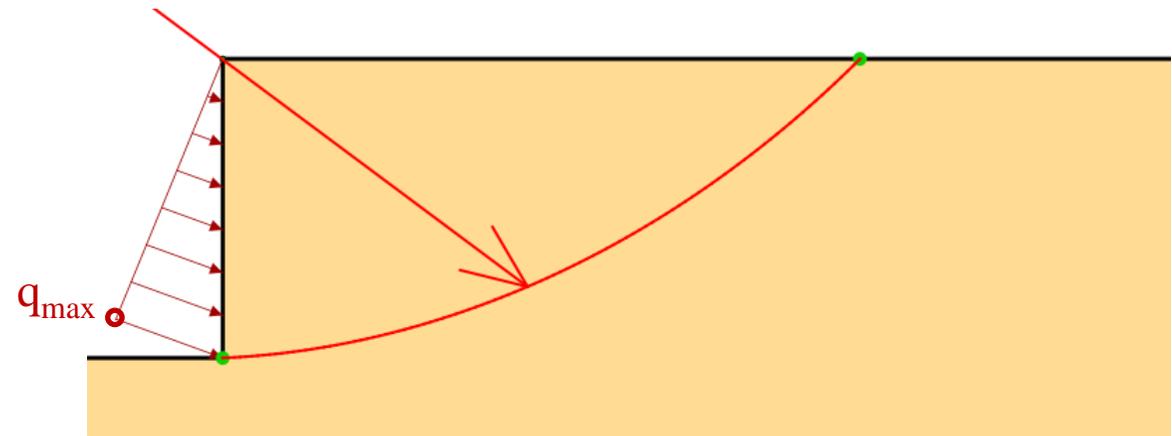
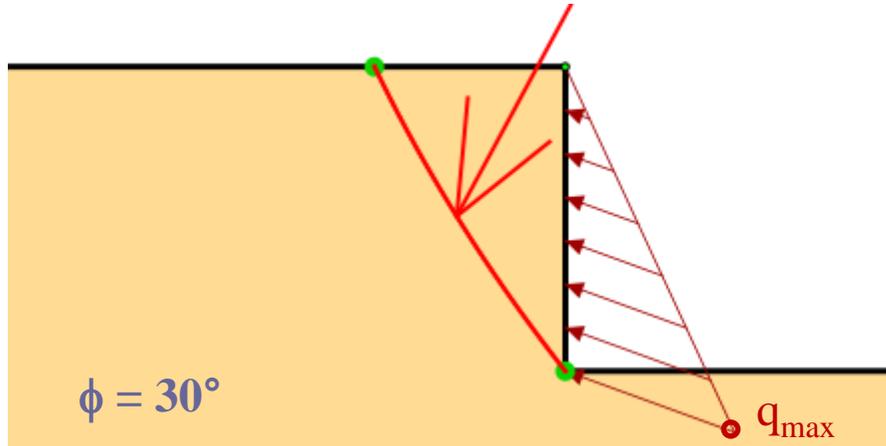
Découper pour ...

...évaluer poussée ou butée

Poussée – butée

Sol frottant

calcul à la rupture



k_{cal}/k_{tab} - Poussée

δ/ϕ	0	+2/3	+1
<i>Coulomb</i>	1,00	0.99	0.97
C à R	1.00	1.00	0.99

k_{cal}/k_{tab} - Butée

δ/ϕ	0	-2/3	-1
<i>Coulomb</i>	1.00	1.15	1.59
C à R	1.00	1.01	1.07

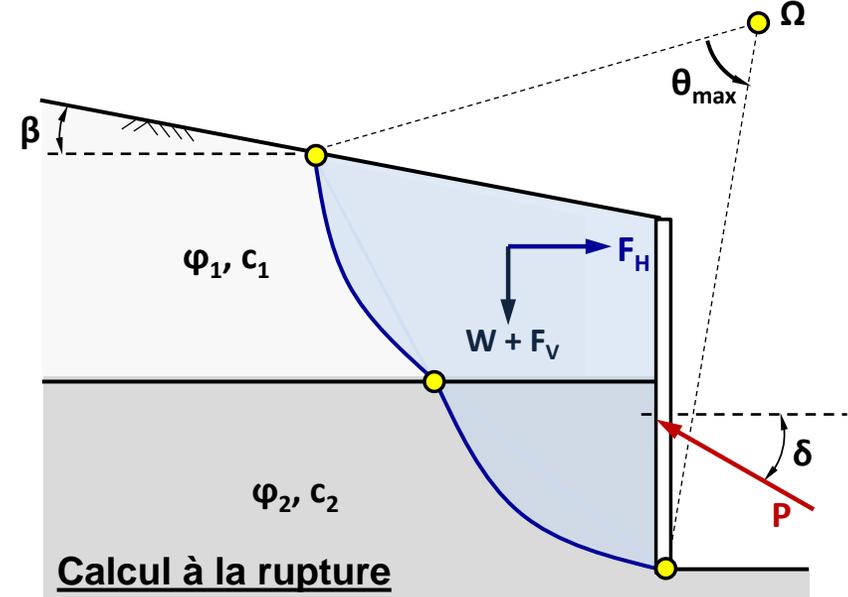
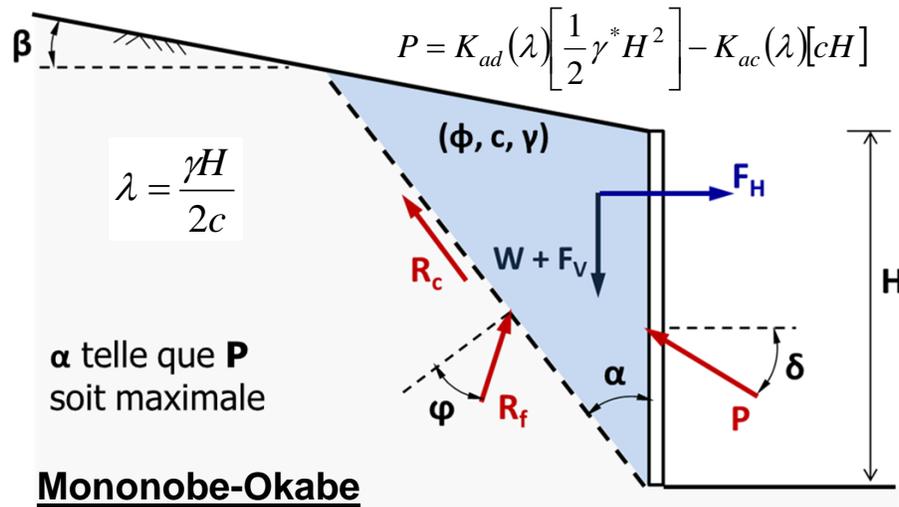
Résultats (C à R) conformes à une approche de la charge de rupture par l' « extérieur »

Poussée – butée

Situation sismique (pseudo-statique)

- Calcul « Monobe / Okabe »

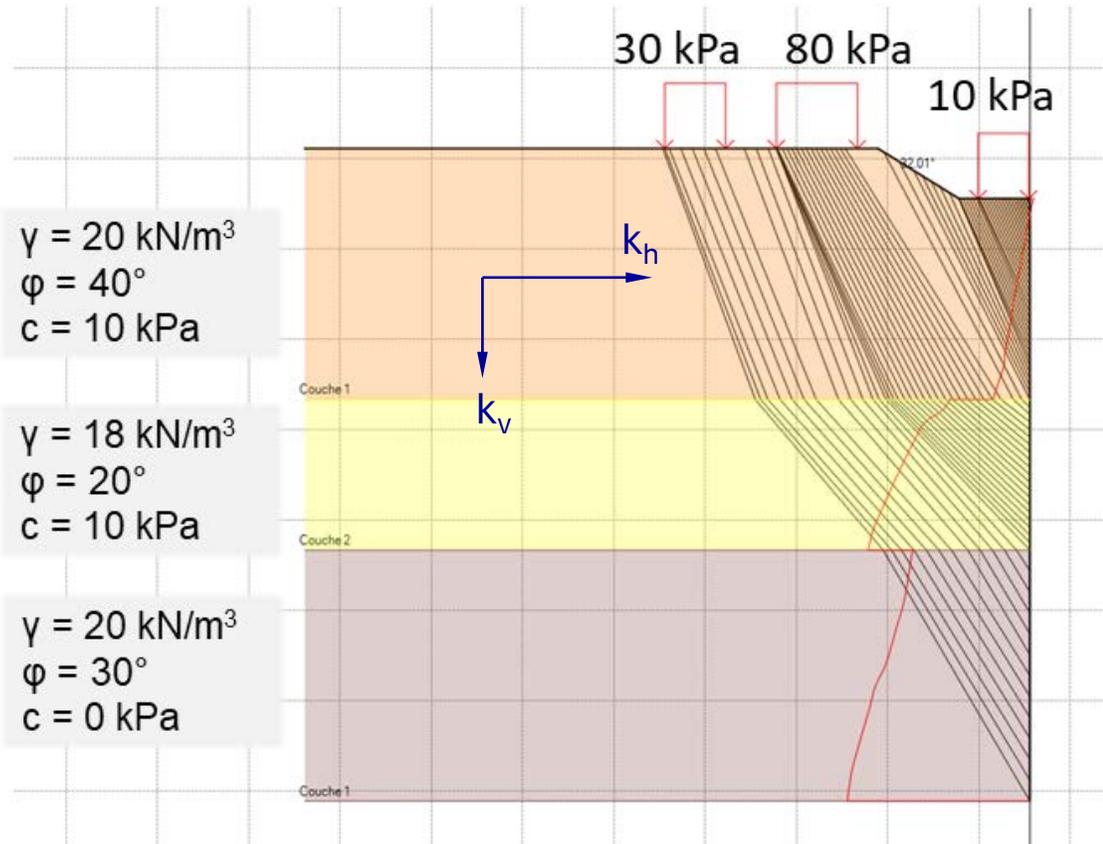
non sécuritaire selon le calcul à la rupture



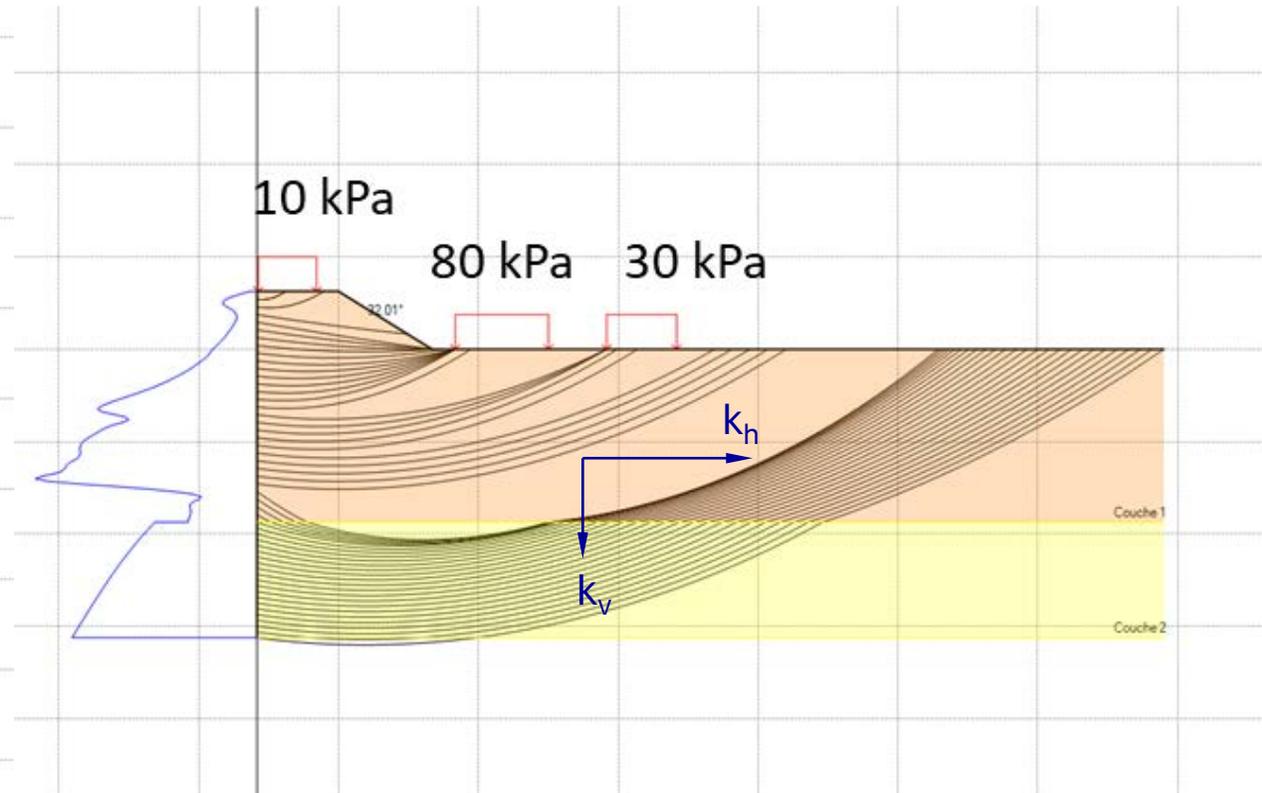
H = 10 m
 $\delta/\phi = 0$
 $\theta = 17^\circ$

ϕ (°)	pente talus (°)	cohésion c (kPa)	Monobe- Okabe	Calcul à la rupture cinématique plane	Calcul à la rupture cinématique rotation ^{nelle}
30	0	0	570 kN/ml	570 kN/ml	575 kN/ml (+01%)
30	0	20	305 kN/ml	305 kN/ml	310 kN/ml (+02%)
30	16	20	450 kN/ml	450 kN/ml	500 kN/ml (+11%)
0	0	50	368 kN/ml	368 kN/ml	450 kN/ml (+22%)

- Calcul à la rupture : capacité à traiter des configurations stratigraphiques complexes



Calage du diagramme de poussée dynamique

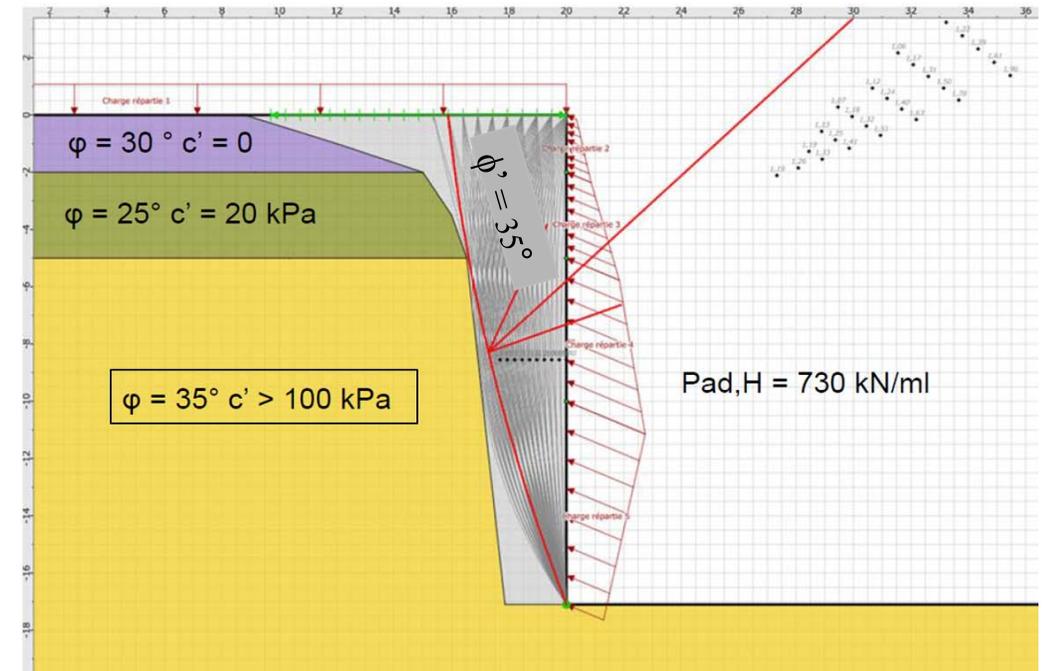
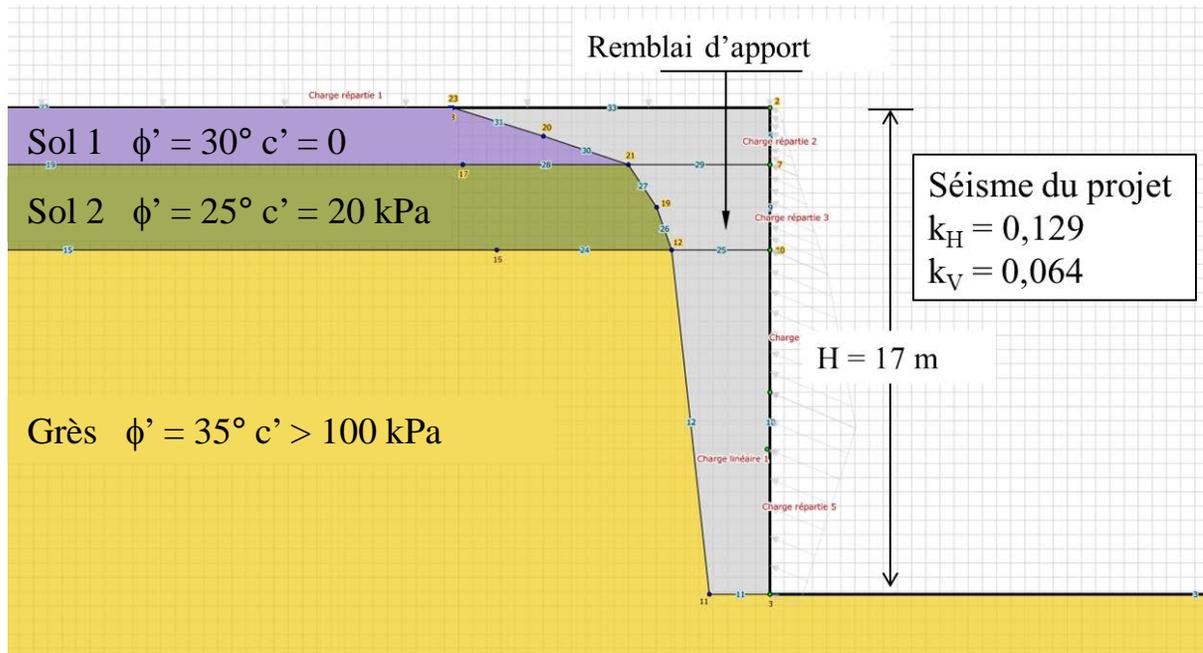


Calage du diagramme de butée dynamique

Poussée – butée

Situation sismique (pseudo-statique)

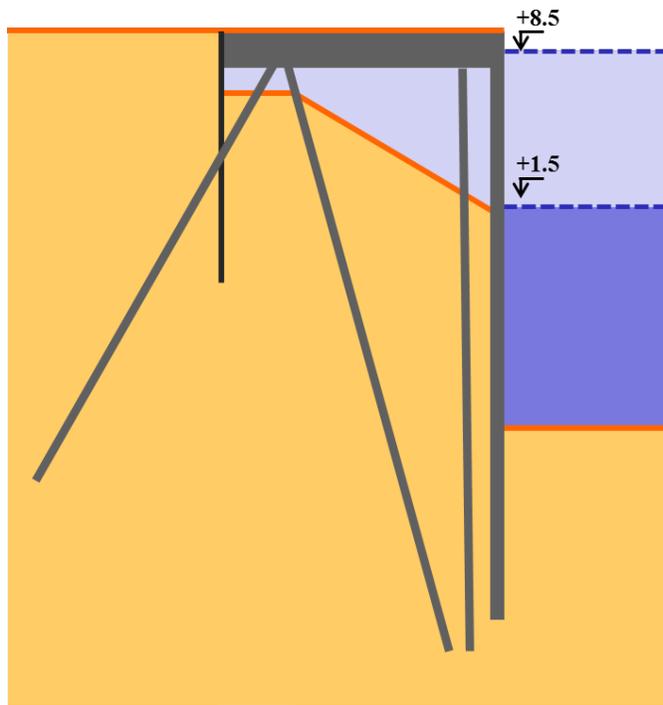
- Calcul à la rupture : capacité à traiter des configurations stratigraphiques complexes



	Cohésion du Grès (kPa)	Rugosité δ/φ	Remblai intercalaire	Poussée dynamique (projetée kN/ml)	Poussée statique (projetée kN/ml)	Incrément dynamique (projetée kN/ml)
Sol homogénéisé	0	0	Non	1 540	1210	330
Multicouche 1	20	0	Non	1 215	920	295
Multicouche 2	50	0	Non	870	580	290
Multicouche 3	50	2/3	Oui $\varphi' = 35^\circ$	810	625	185
Multicouche 4	> 100	2/3	Oui $\varphi' = 35^\circ$	730	625	105

Poussée

- Augmentée en conditions de marée



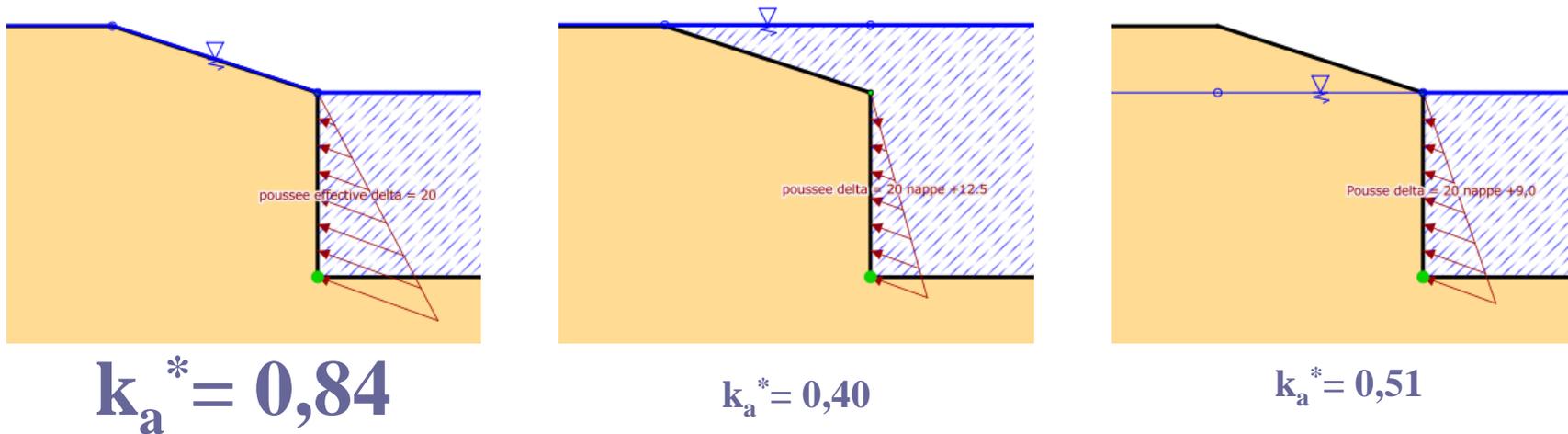
quai QSH1 Honfleur



Poussée

- Augmentée en conditions de marée

quai QSH1 Honfleur



Le diagramme de poussée à marée basse est majoré par un facteur 1.6 par rapport aux situations où la nappe est supposée au repos

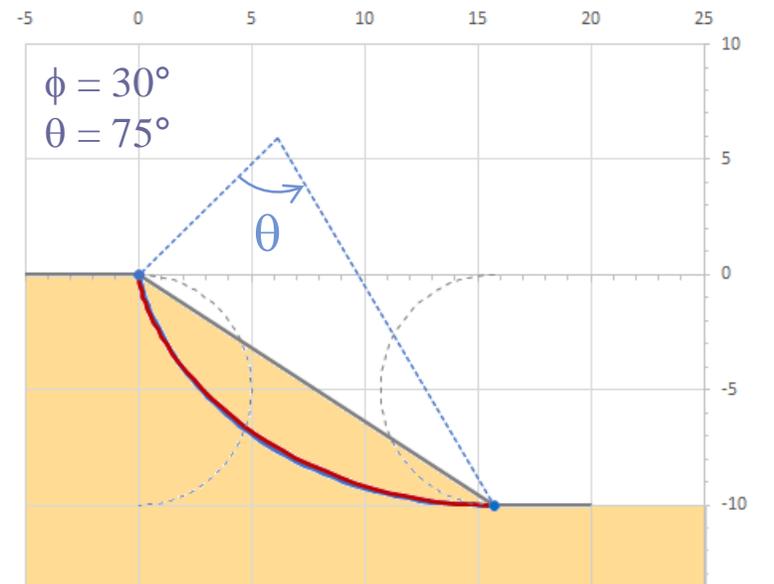
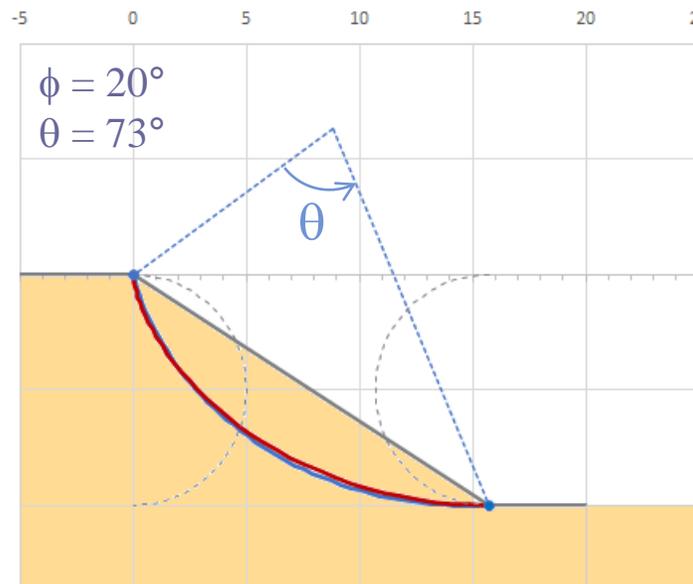
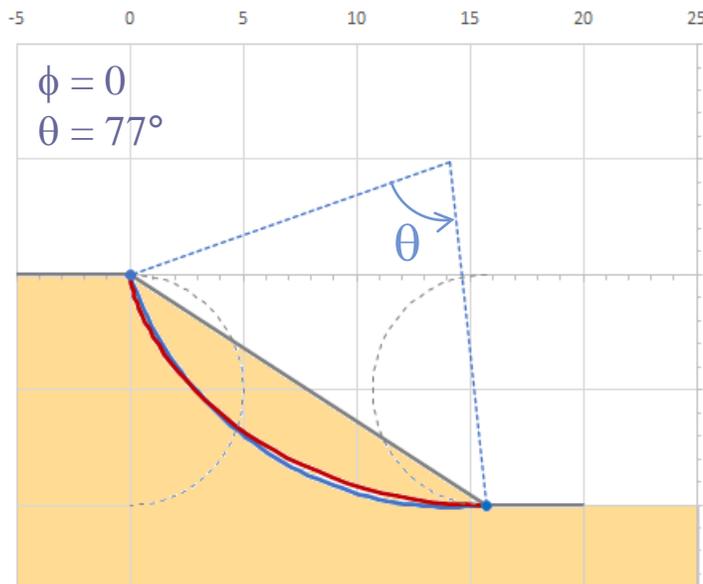
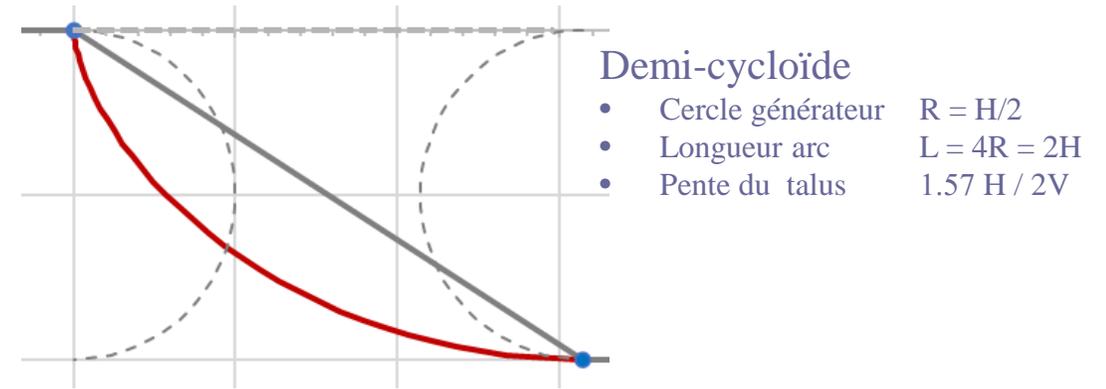
Découper pour...

.... interpréter les ruptures

Relevés de glissements (A. Collin - 1846)

$c' (F = 1)$	$\phi = 0$	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 30^\circ$
Sans nappe	15.9	4.8	0*
Avec nappe	15.9	13.3	11.8

(*) $F = 1.10$

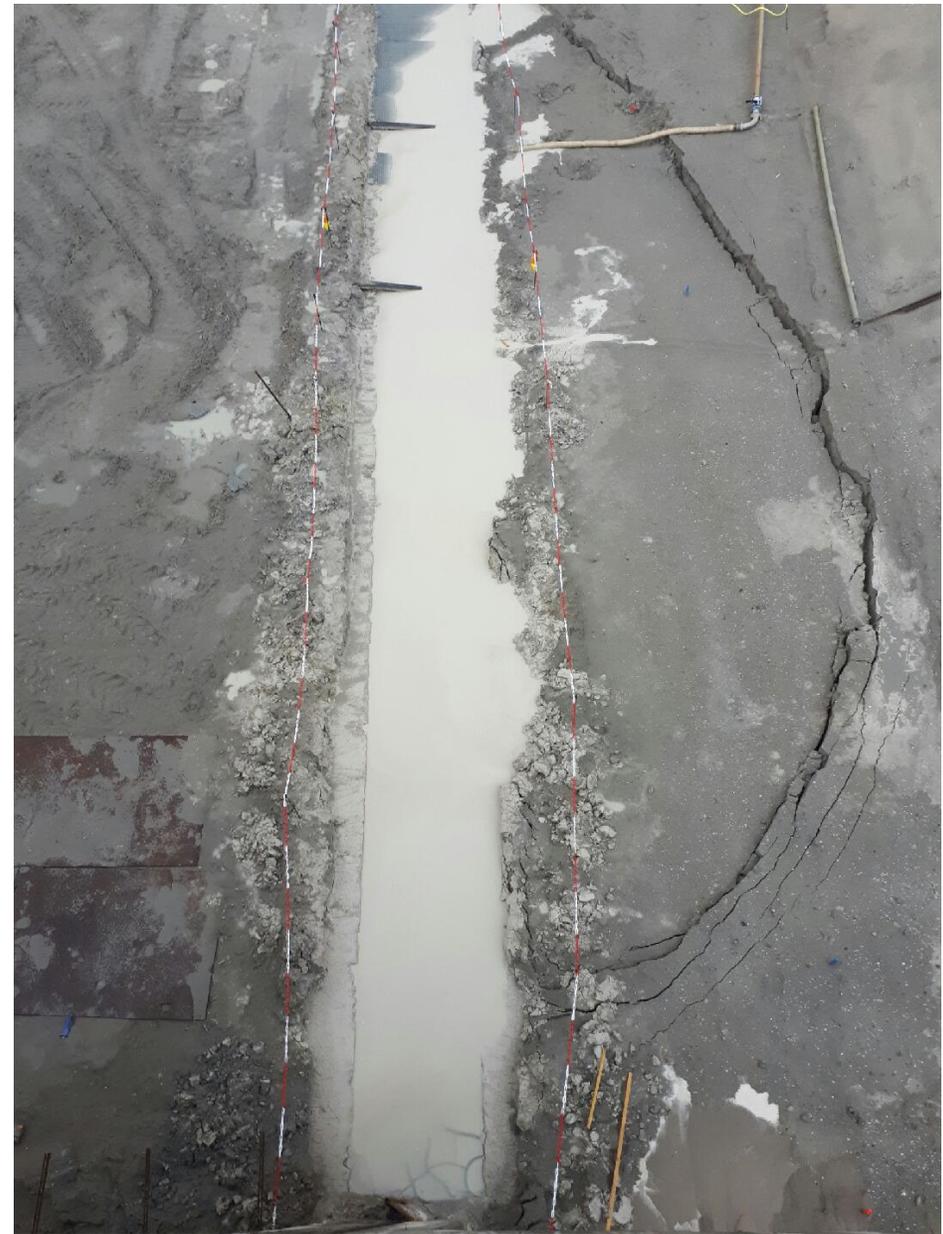


Les géométries relevées par A. Collin, interprétées dans le cadre du calcul à la rupture, s'accordent à des valeurs réalistes de la résistance au cisaillement

Découper pour ...

.... prévenir les ruptures

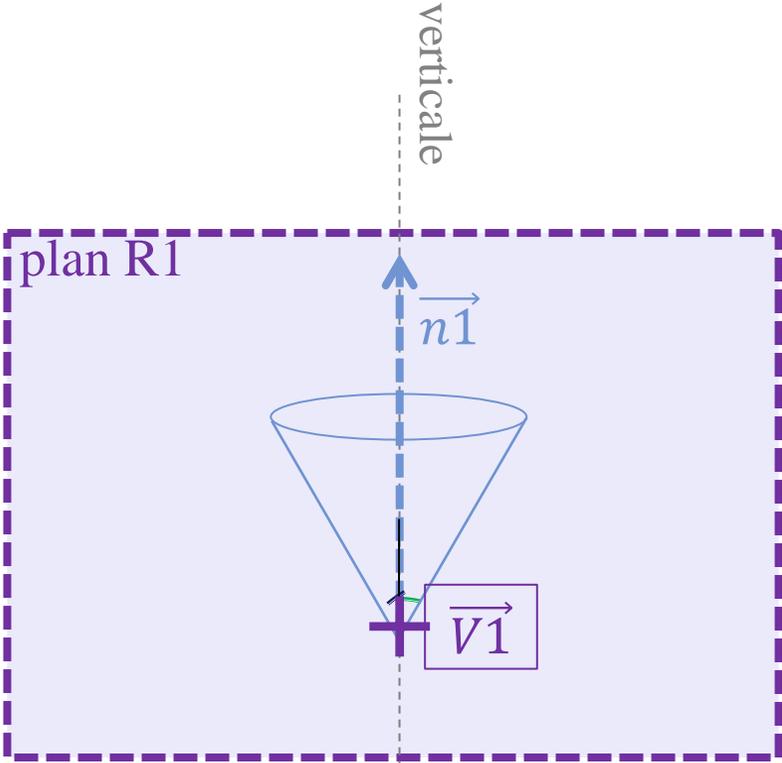
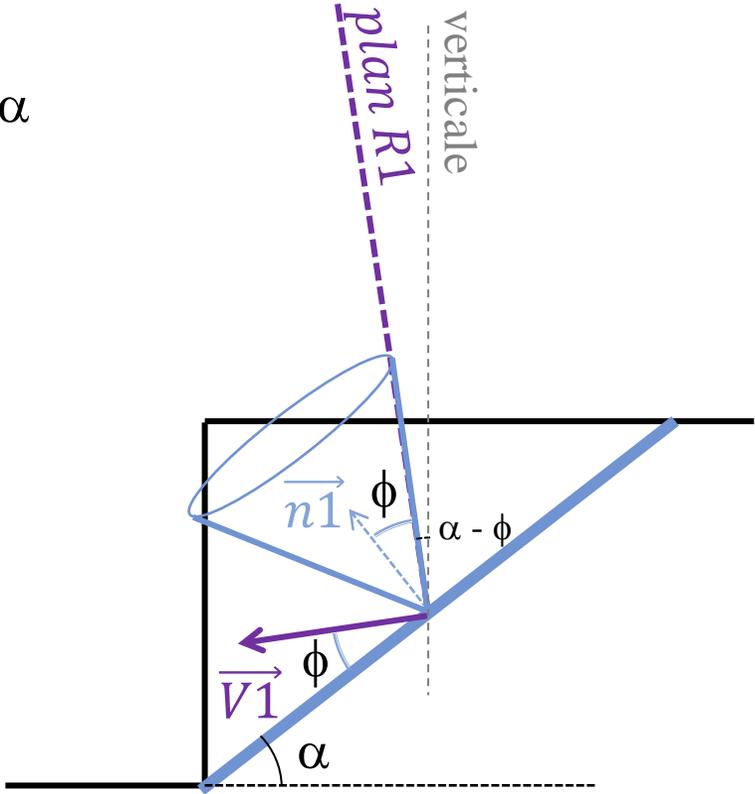
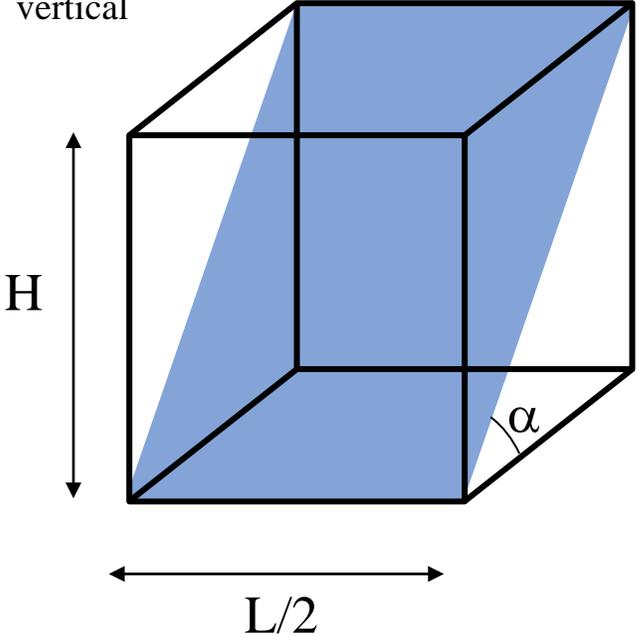
Tranchée stabilisée à la boue



Calcul 3D (2 plans)

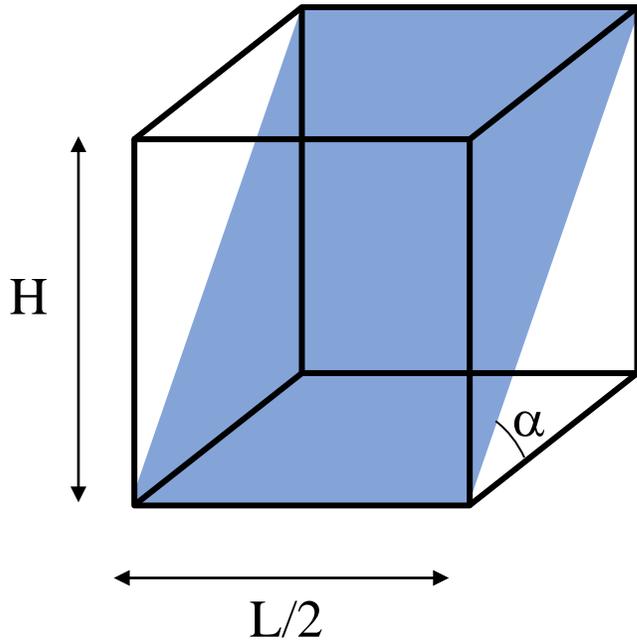
Plan rupture 1 : paramètre α

Plan de symétrie vertical



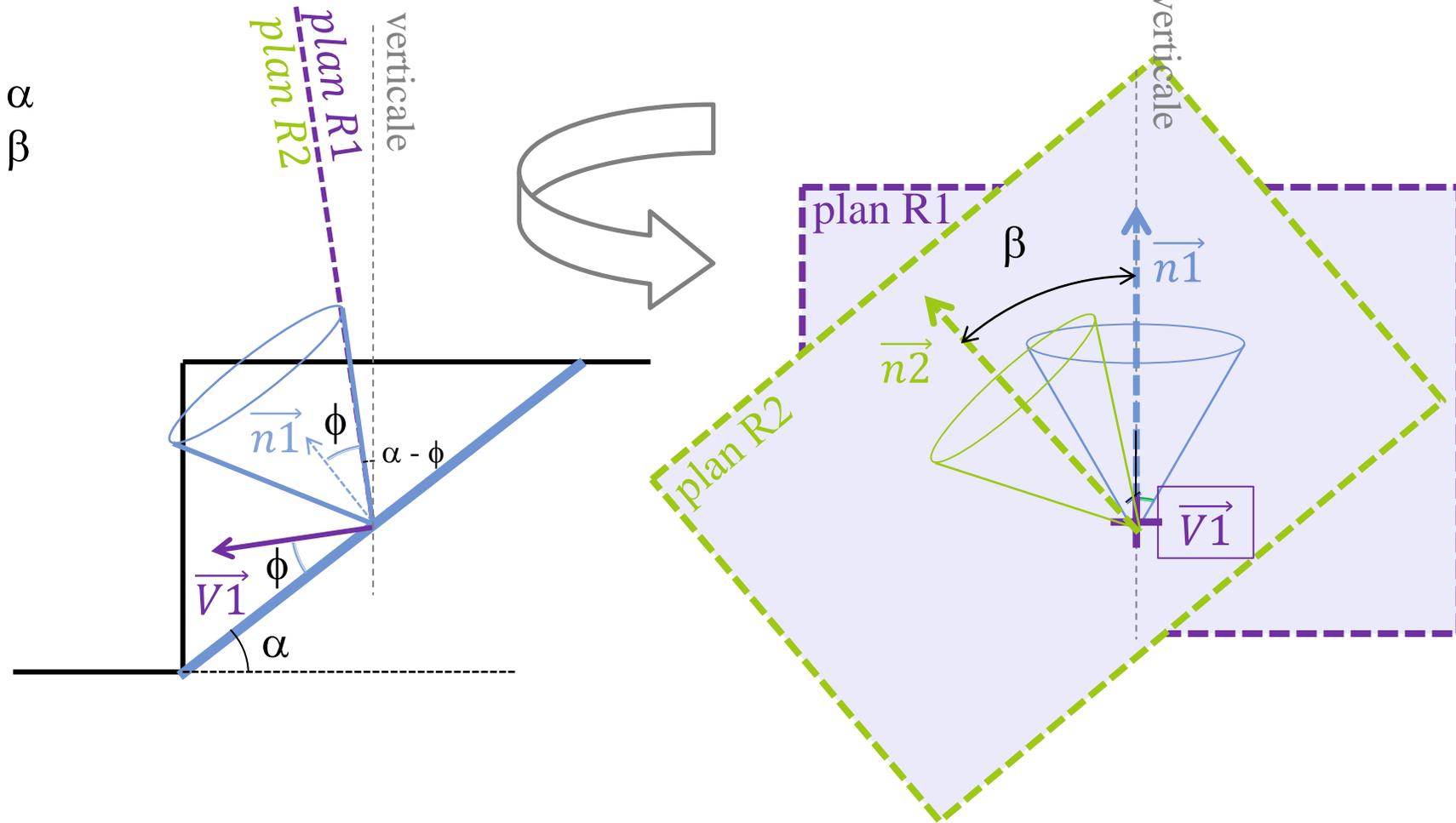
Calcul 3D (2 plans)

Plan rupture 1 : paramètre α
 Plan rupture 2 : paramètre β



Hypothèse

Cônes 1 et 2 tangents au même plan R1/R2

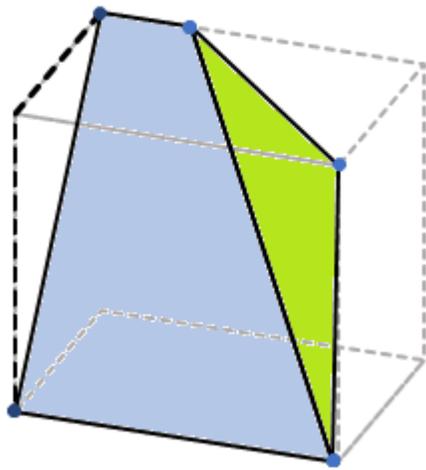


- Les réactions R1 et R2 ont une projection nulle sur $V1$
- Le travail résistant associé aux cônes 1 ET 2 dans la translation $V1$ est nul

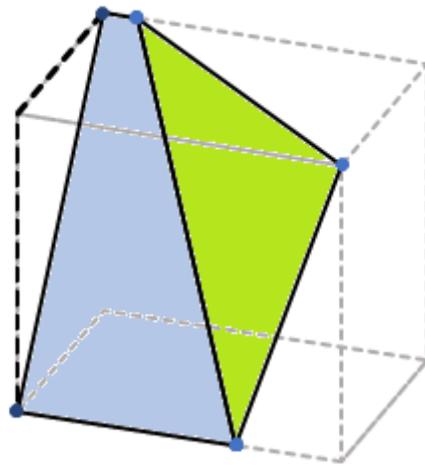
Calcul 3D (2 plans)

Plan rupture 1 : paramètre α

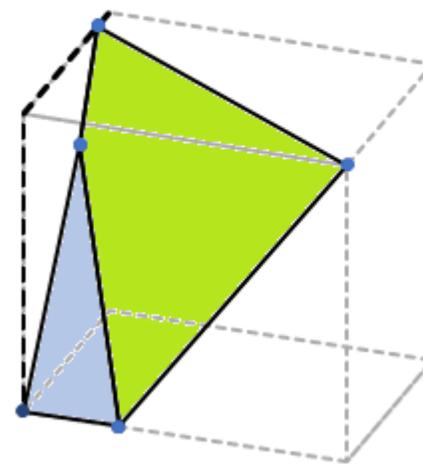
Plan rupture 2 : paramètre β



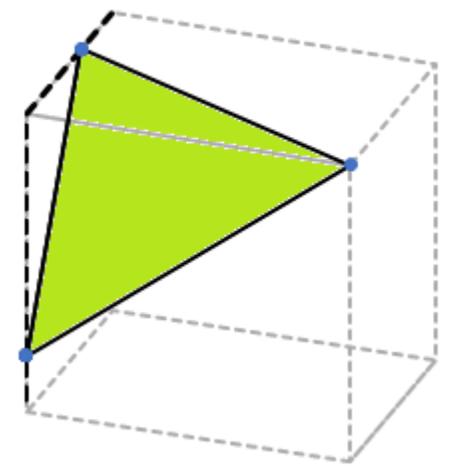
$$\alpha = 70^\circ$$
$$\beta = 60^\circ$$



$$\alpha = 70^\circ$$
$$\beta = 50^\circ$$



$$\alpha = 70^\circ$$
$$\beta = 40^\circ$$



$$\alpha = 70^\circ$$
$$\beta = 30^\circ$$

Calcul 3D (2 plans)

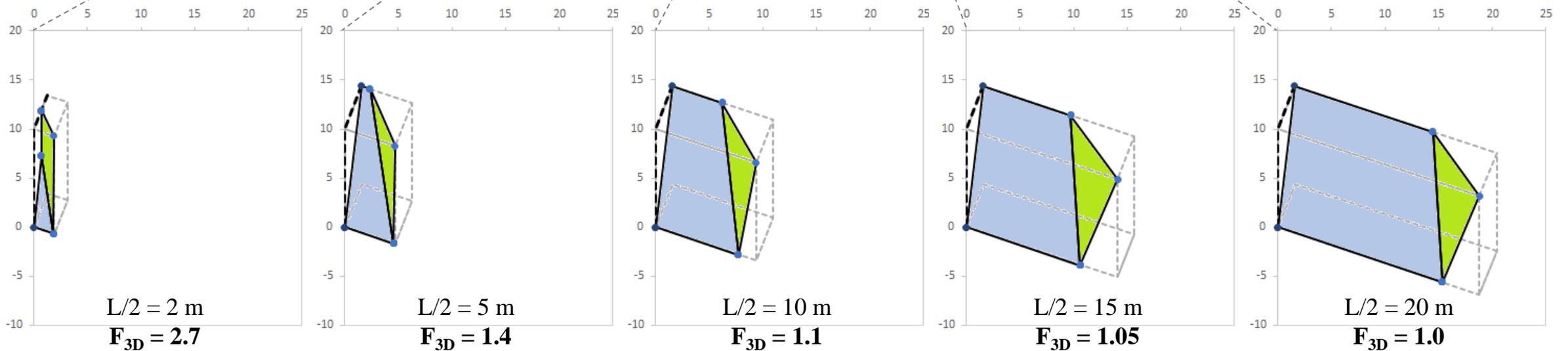
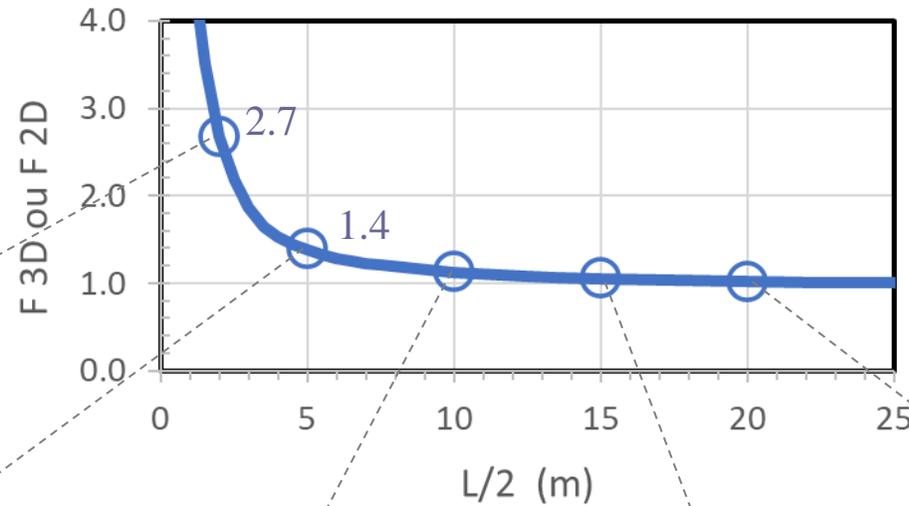
H = 10 m

Sol

- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- $\phi' = 35^\circ$
- $c' = 5 \text{ kPa}$

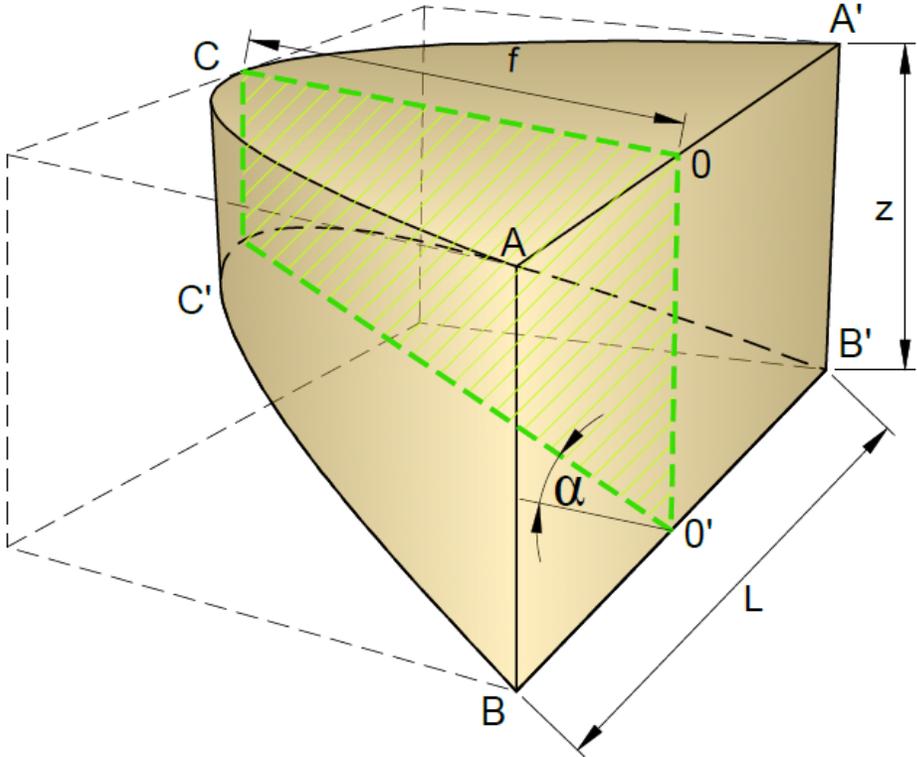
Boue

- $\gamma_b = 11,5 \text{ kN/m}^3$

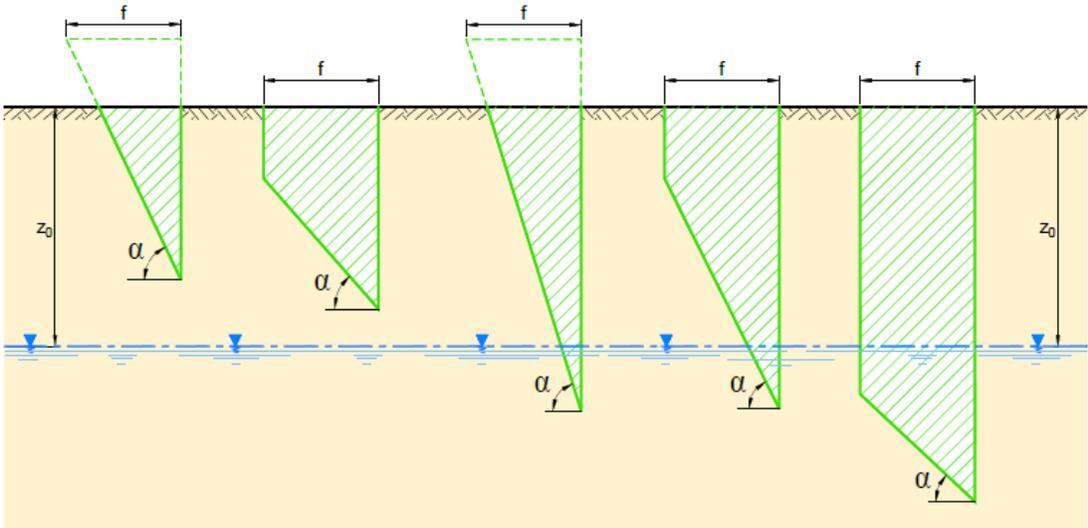
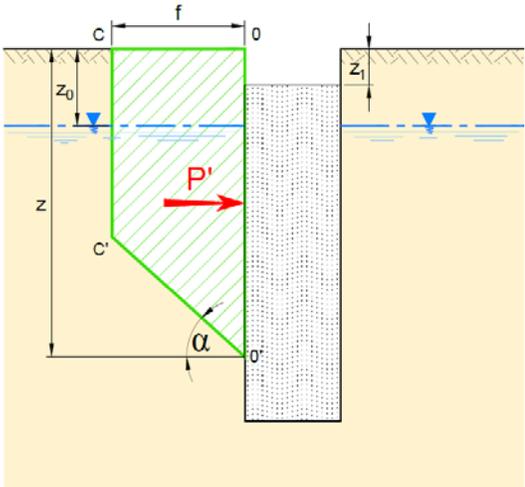


Piaskowski A., Kowalewski Z. (1965, ISSMGE Montréal)

$$f = \frac{L}{2 \tan \varphi}$$



Poussée P' = max [P'(alpha)]



Comparaison

- calcul 3D (2 plans)
- coin Kowalewski

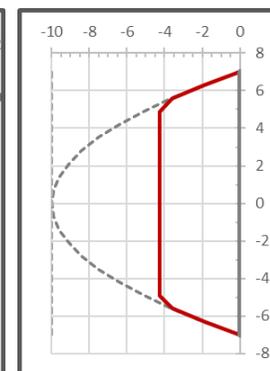
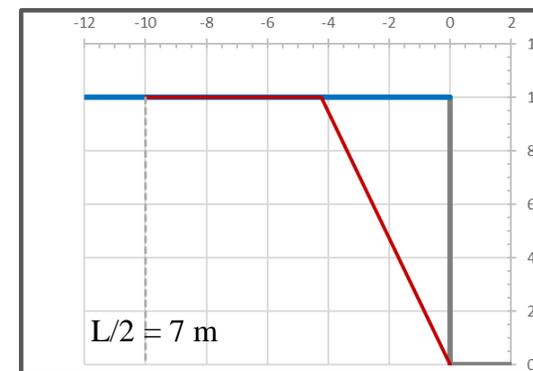
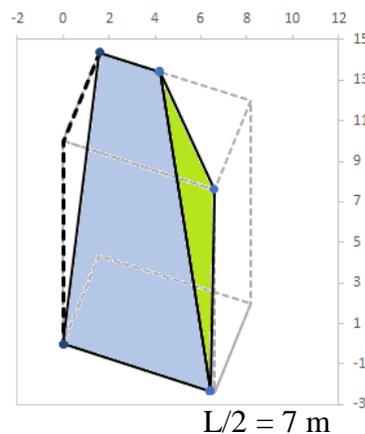
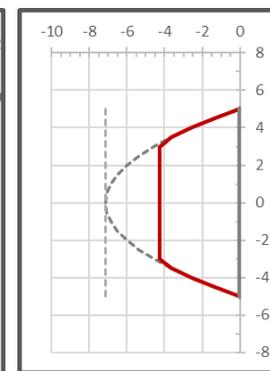
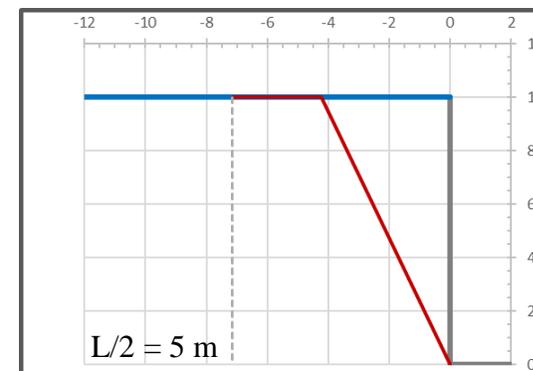
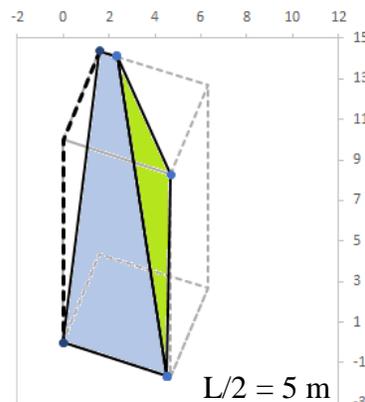
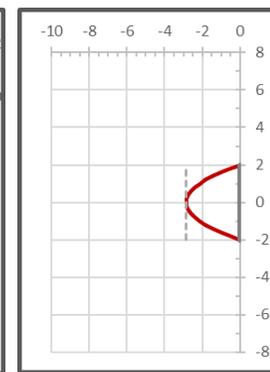
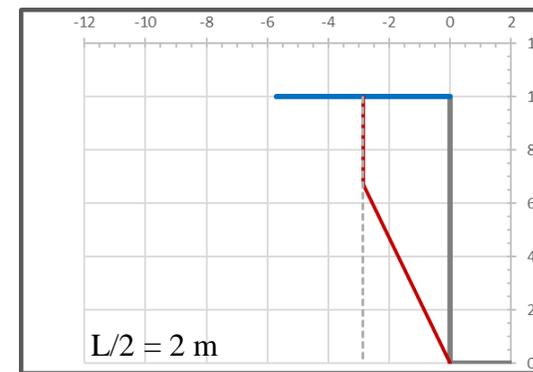
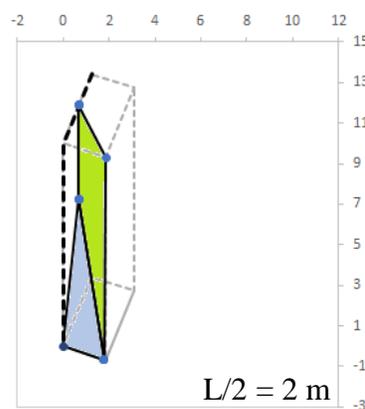
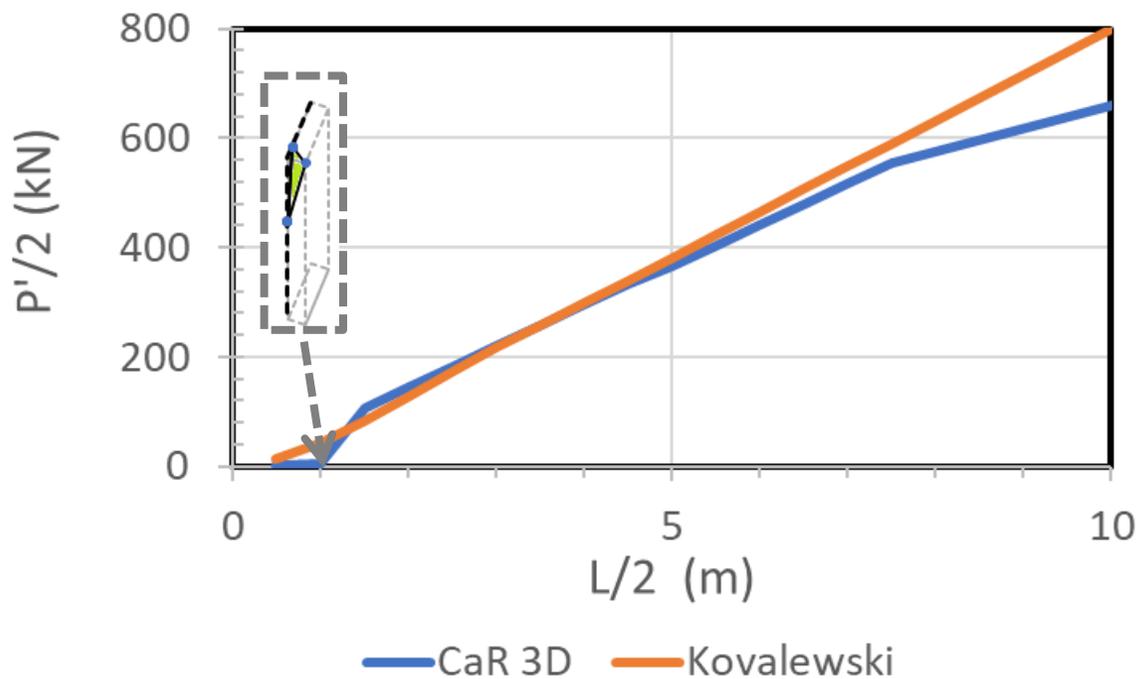
H = 10 m

Sol

- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- $\phi' = 35^\circ$
- $c' = 5 \text{ kPa}$

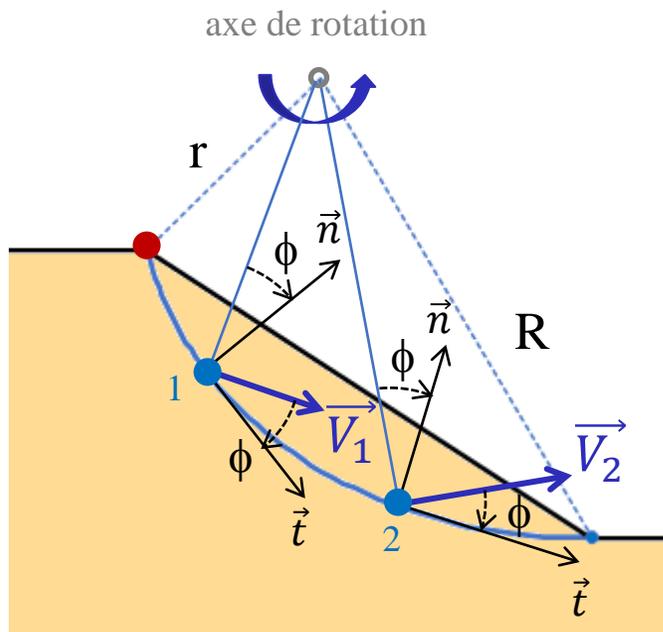
Boue

- $\gamma_b = 11,5 \text{ kN/m}^3$

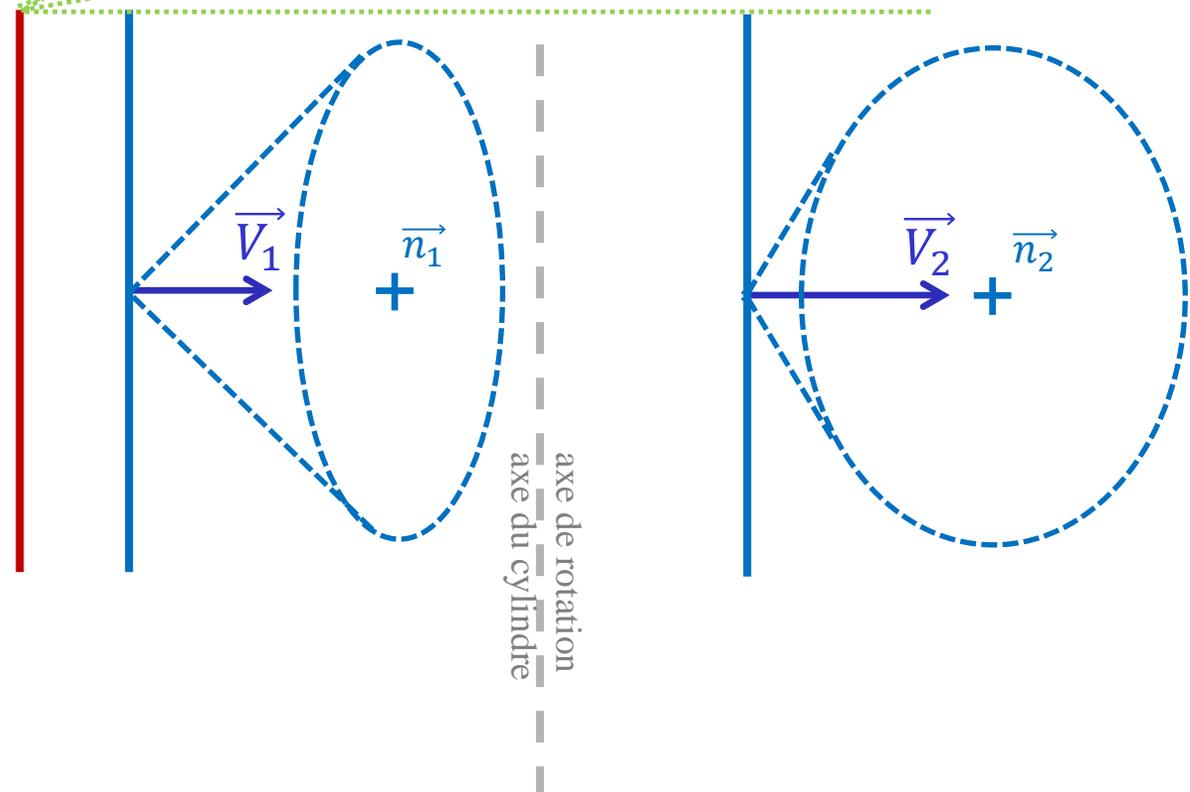


Calcul 3D par association d'un cylindre 2D et d'un plan vertical

Cas général : sol frottant (angle ϕ non nul)

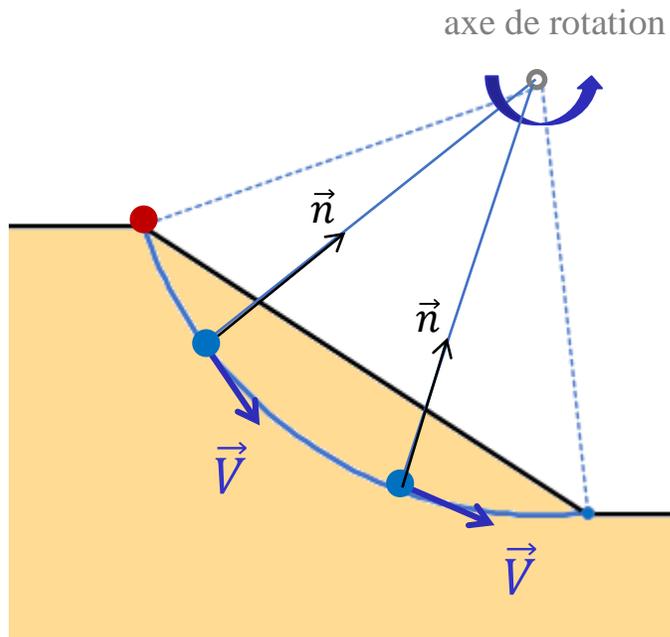


Il n'existe aucun plan vertical dans lequel un majorant de la résistance au cisaillement peut être trouvé pour le champ des vitesses \vec{V}

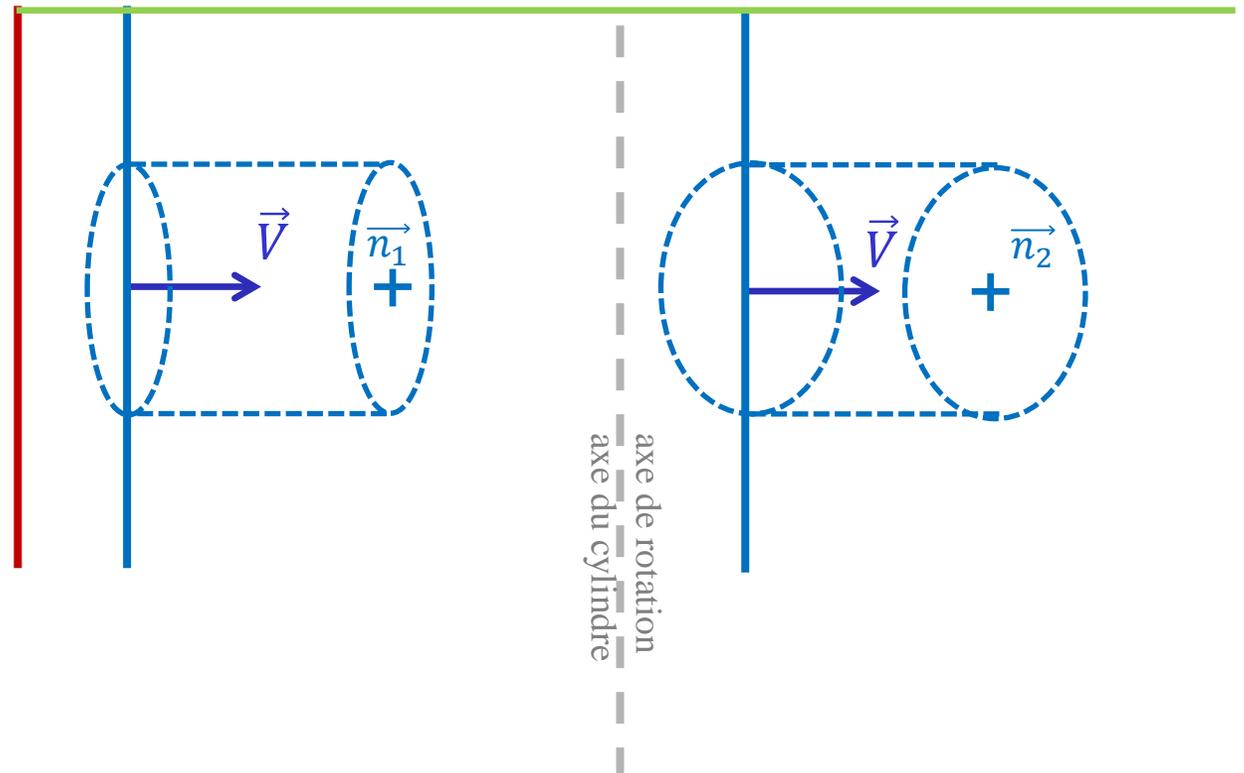


Calcul 3D par association d'un cylindre 2D et d'un plan vertical

Cas particulier d'un sol cohérent

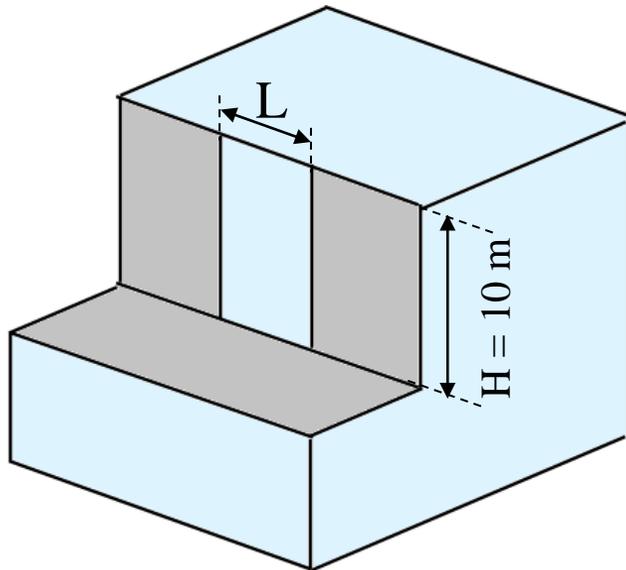


Dans tout plan vertical, perpendiculaire à l'axe du cylindre, il est possible de trouver un majorant de la résistance au cisaillement dans le champ de vitesse \vec{V}



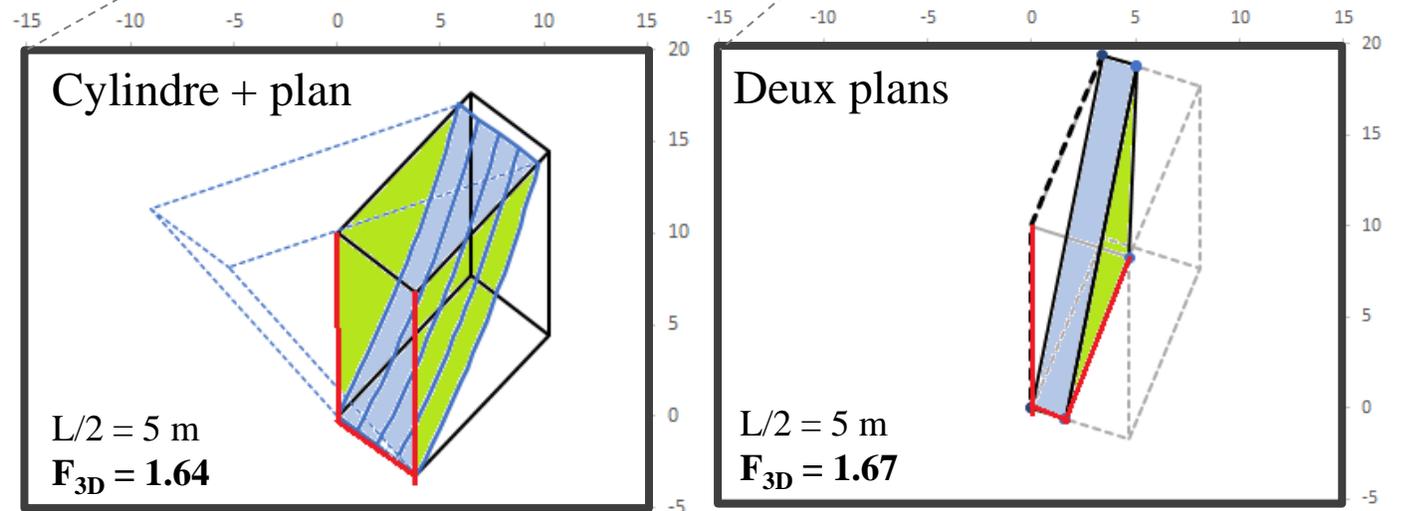
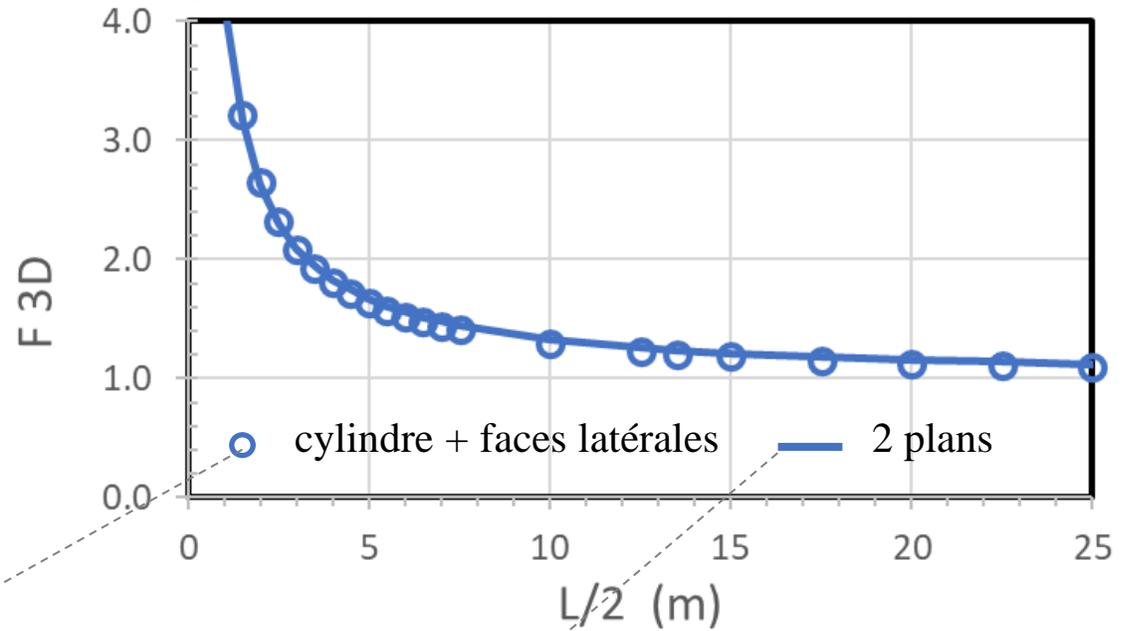
Calcul 3D par association d'un cylindre 2D et d'un plan vertical

Talus vertical de largeur L dans un massif cohérent



Sol

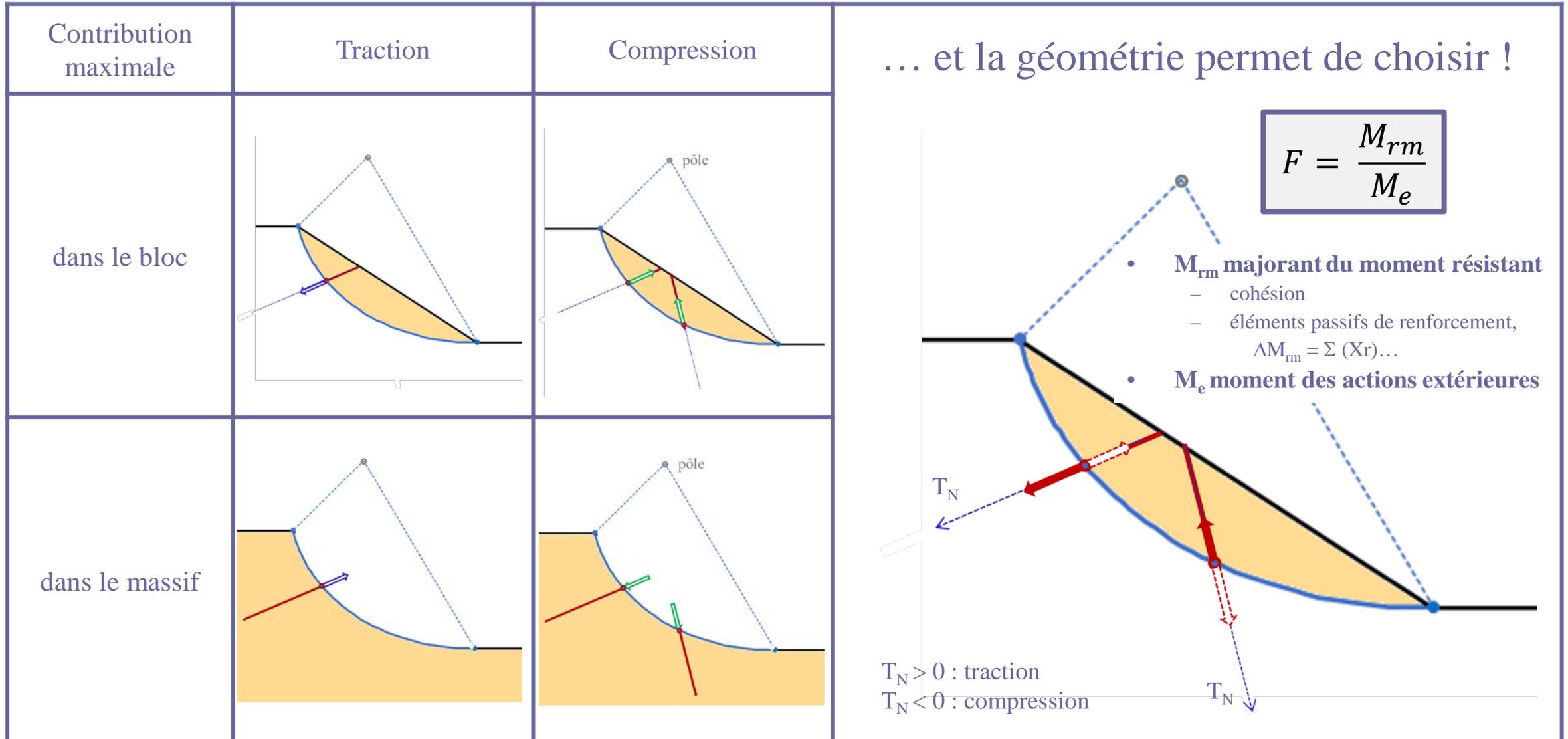
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- $\phi_u = 0^\circ$
- $c_u = 50 \text{ kPa}$



Découper ... clouer...

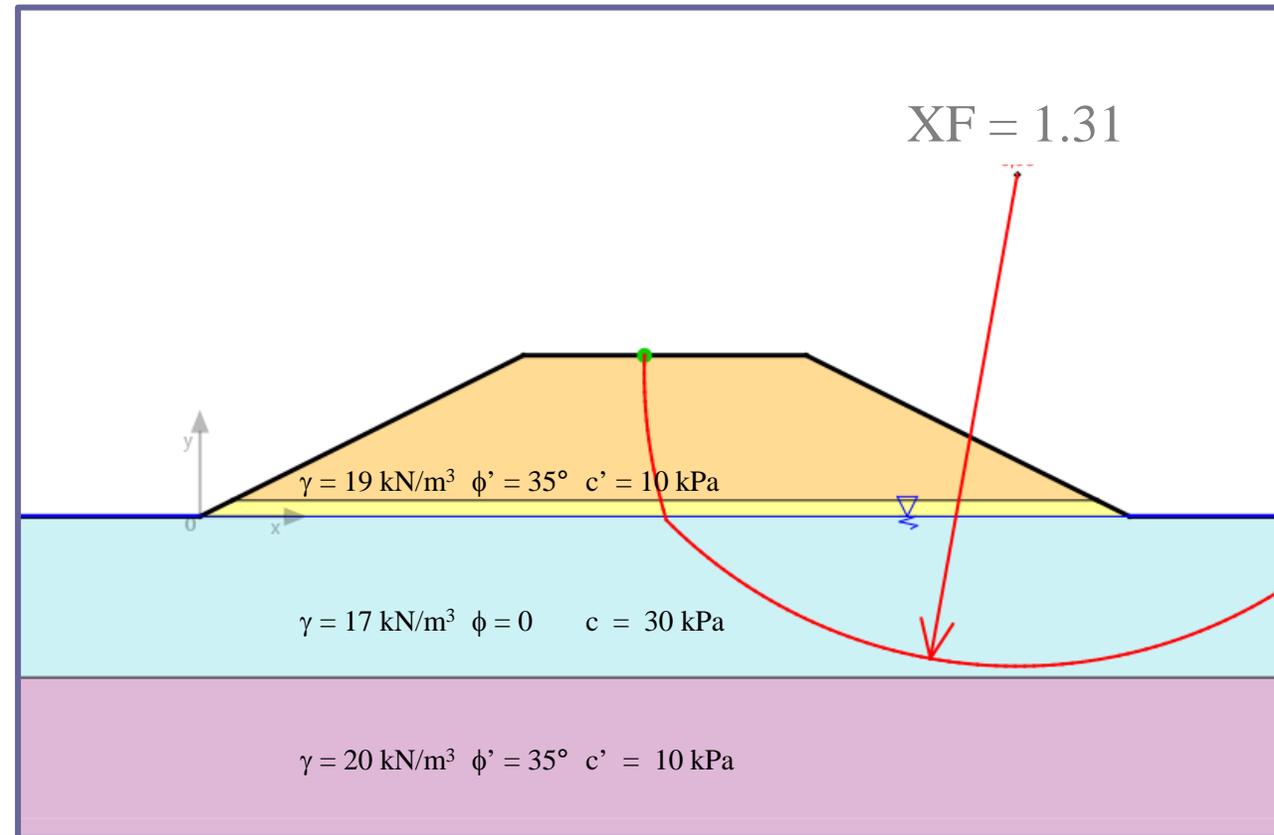
... clous ? ... inclusions ? ... pieux ?

Supposer que les renforts ne travaillent qu'en traction ou compression...



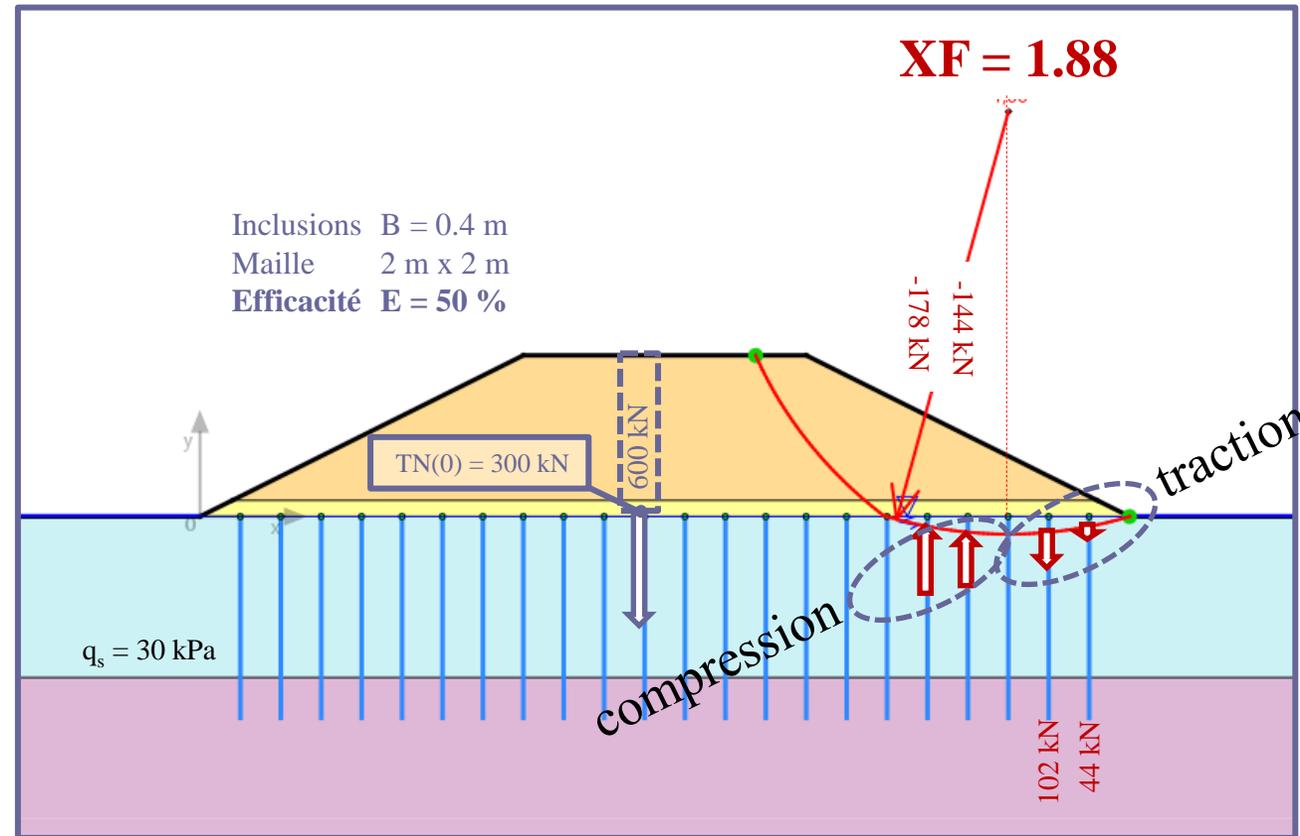
Supposer que les renforts ne travaillent qu'en traction ou compression...

- Remblai



Supposer que les renforts ne travaillent qu'en traction ou compression...

- Remblai sur inclusions rigides



Découper ... clouer...

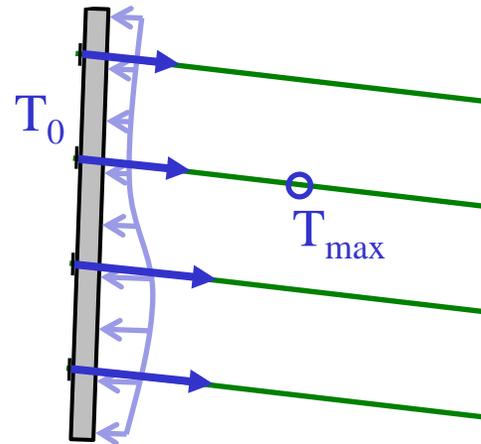
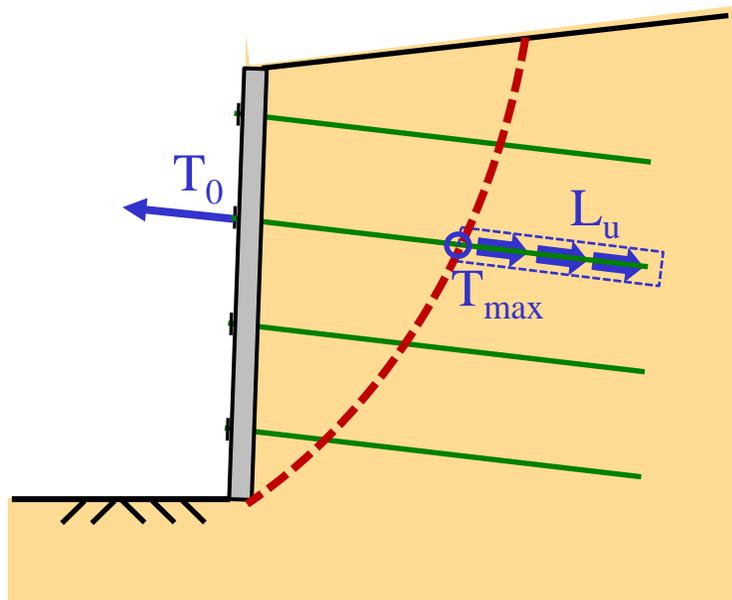
... efforts au parement ?

Évaluer les efforts au parement ?

Pendant plus de 30 ans

(recommandations Clouterre 1991)

- À partir des tractions maximales mobilisées à rupture sur la partie externe



$$\frac{T_0}{T_{max}} = 1 \quad \text{si } S \geq 3 \text{ m}$$
$$\frac{T_0}{T_{max}} = 0.5 + \frac{S - 0.5}{5} \quad \text{si } 1 \leq S \leq 3 \text{ m}$$
$$\frac{T_0}{T_{max}} = 0.6 \quad \text{si } S \leq 1 \text{ m}$$

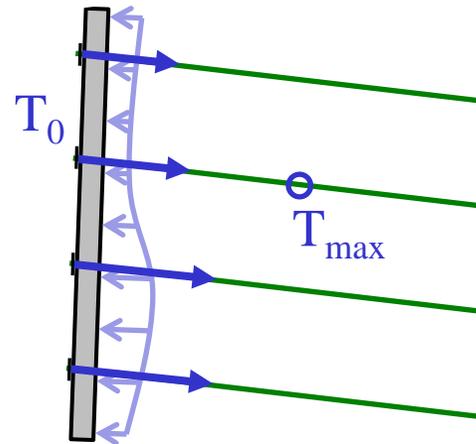
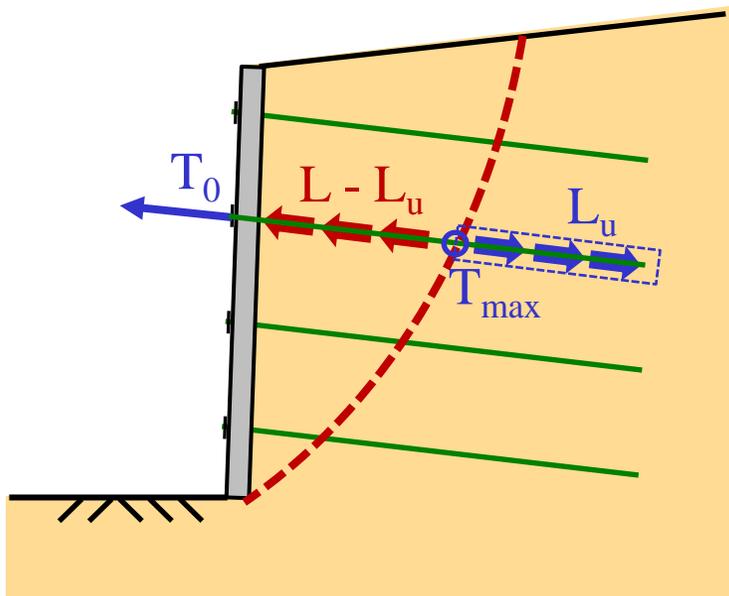
...les efforts dans le parement augmentaient si les clous étaient allongés !

Évaluer les efforts au parement ?

Depuis octobre 2020

(norme NF 94270 – octobre 2020)

- Décomposer... mais derrière le parement
 - Effort T_0 est l'effort minimal nécessaire à l'équilibre du bloc
 - Effort T_{max} dépend de T_0 et du frottement maximal sur L_u ou $(L - L_u)$



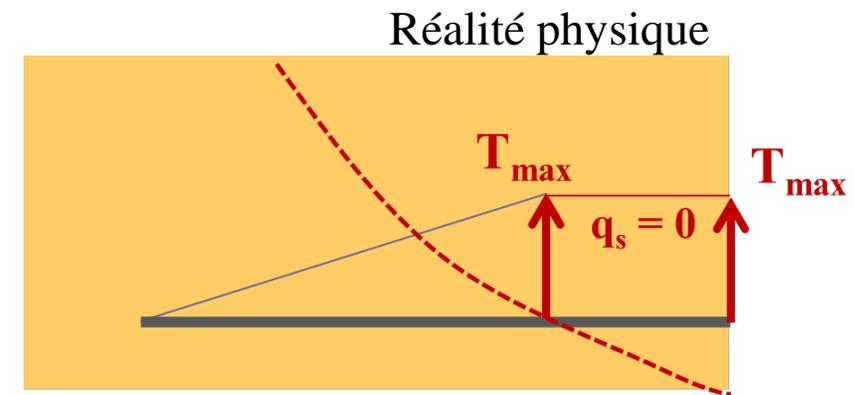
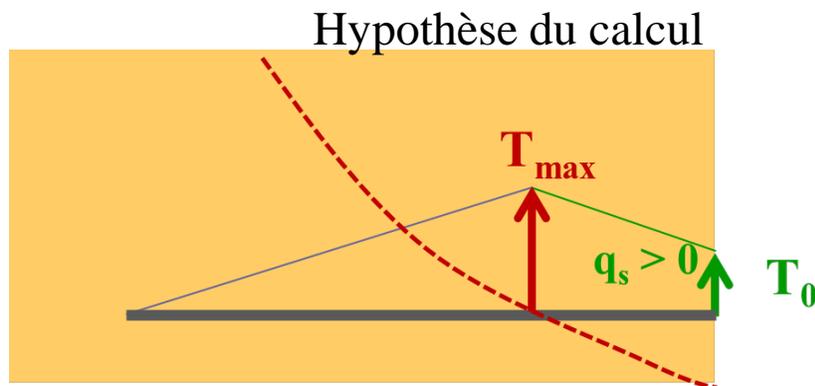
$$\frac{T_0}{T_{max}} = 1 \quad \text{si } S \geq 3 \text{ m}$$
$$\frac{T_0}{T_{max}} = 0.5 + \frac{S - 0.5}{5} \quad \text{si } 1 \leq S \leq 3 \text{ m}$$
$$\frac{T_0}{T_{max}} = 0.6 \quad \text{si } S \leq 1 \text{ m}$$

Évaluer les efforts au parement ?

Depuis octobre 2020

(norme NF 94270 – octobre 2020)

- Décomposer... mais derrière le parement
 - Calcul du parement **avec efforts T_{\max}** (plutôt que T_0)
 - Argument calculs EF
 - Le sol subit le déplacement du parement
 - Déplacement relatif sol-clou faible voire nul



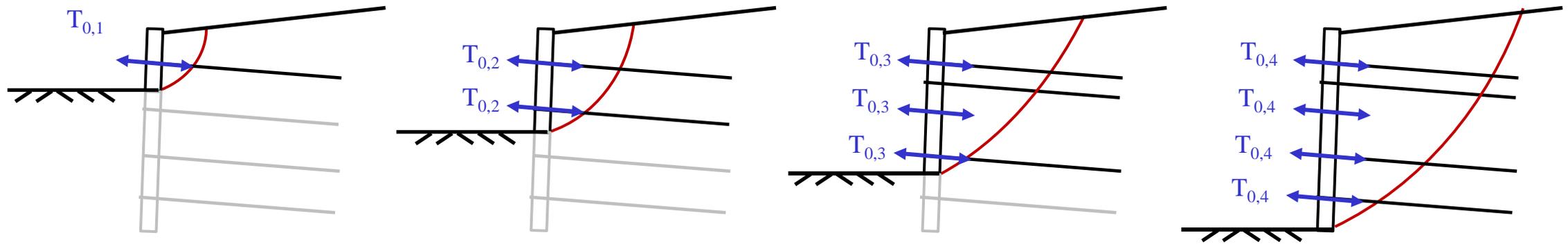
Évaluer les efforts au parement ?

Depuis octobre 2020

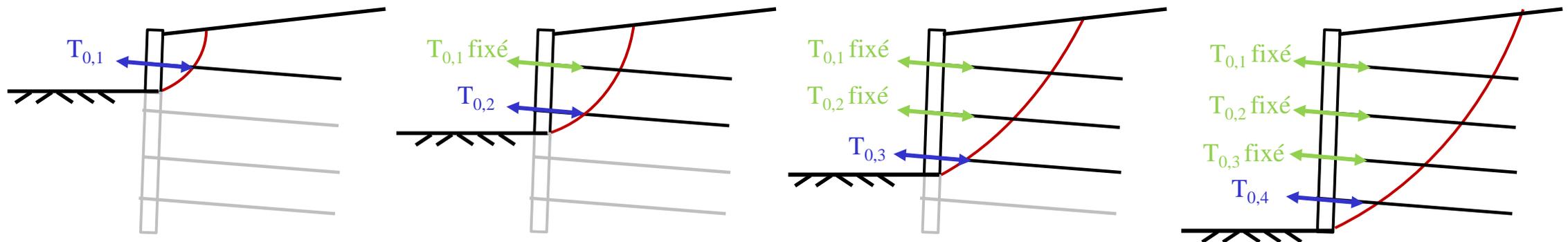
(norme NF 94270 – octobre 2020)

- Avec ou sans redistribution des efforts durant le terrassement

Avec redistribution



Sans redistribution

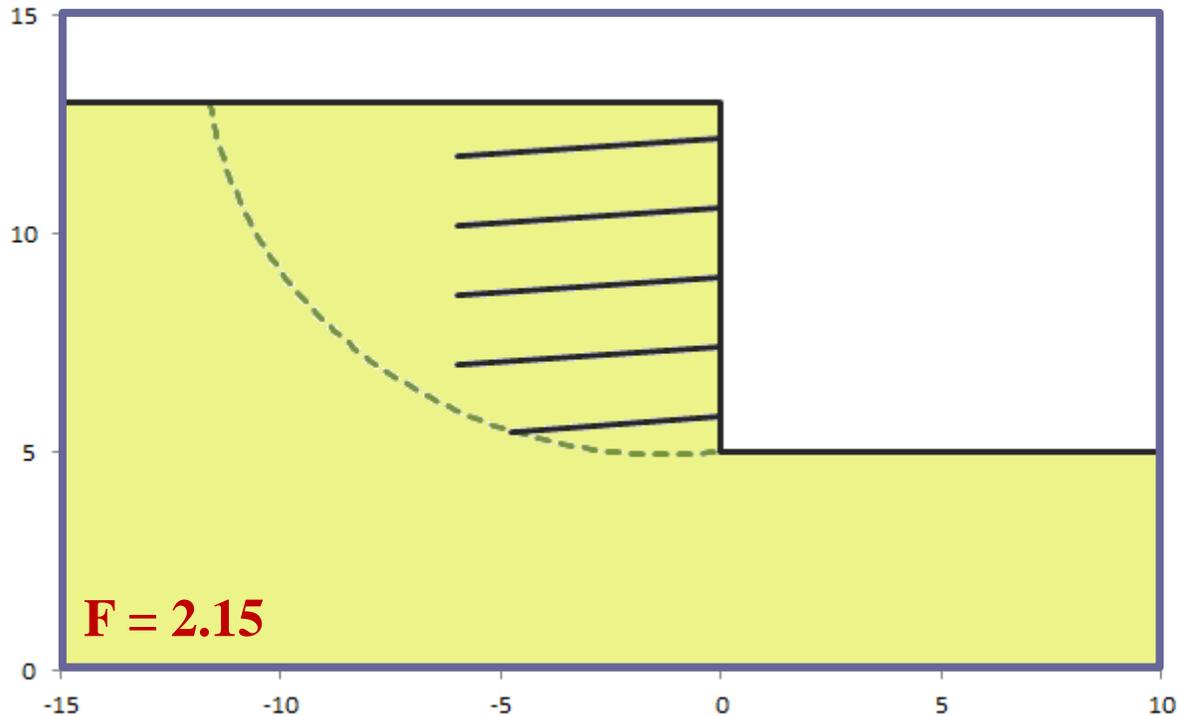


Décomposer... recomposer pour

... mieux évaluer la stabilité d'un ouvrage

Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif cloué

- Limites du calcul d'un bloc rigide



Massif homogène sans nappe

Sol

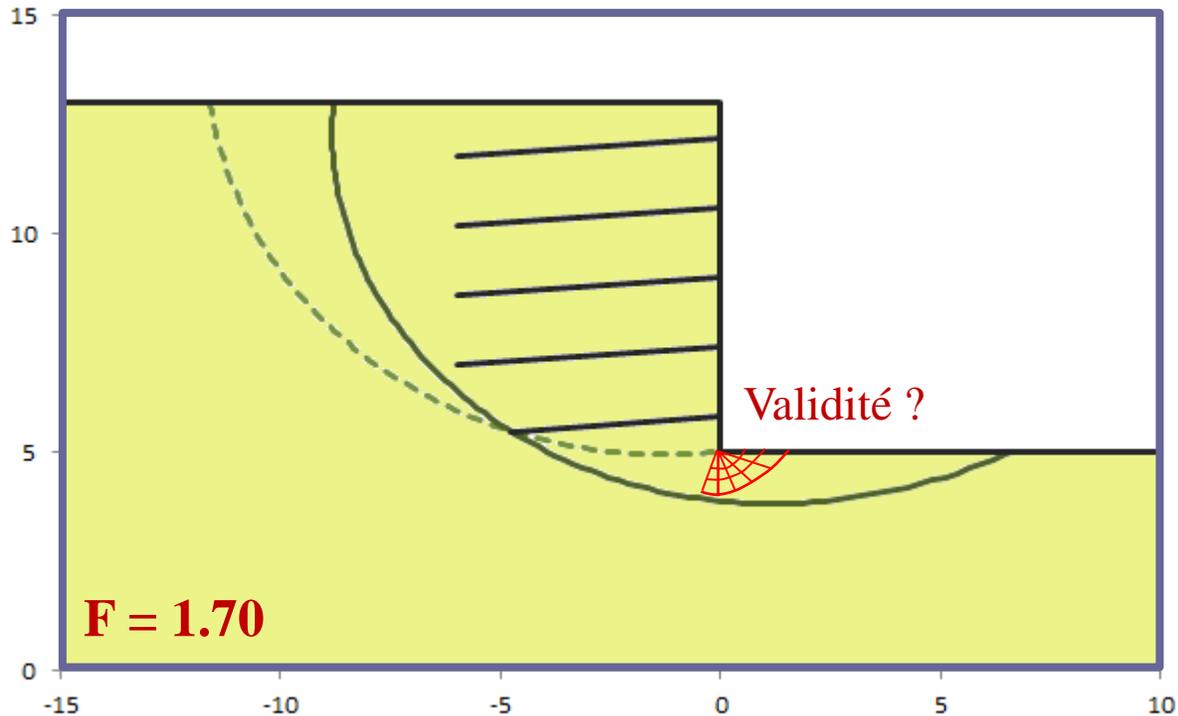
- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Clous

- $N_{\max} = 402 \text{ kN}$
- Forage 120 mm
- $\alpha = 4^\circ$
- $S_h = 2.9 \text{ m}$

Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif cloué

- Limites du calcul d'un bloc rigide



Massif homogène sans nappe

Sol

- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

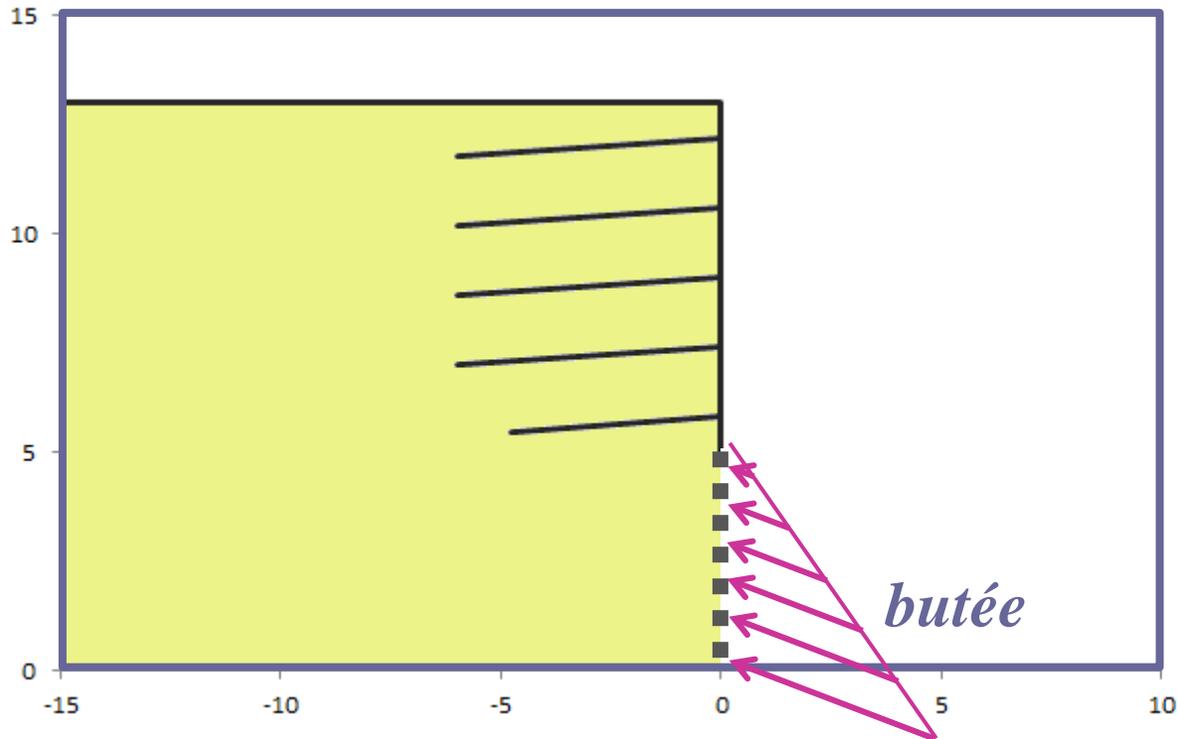
Clous

- $N_{\max} = 402 \text{ kN}$
- Forage 120 mm
- $\alpha = 4^\circ$
- $S_h = 2.9 \text{ m}$

Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif cloué

- Approche alternative
 - Butée limite dans le plan vertical sous le parement

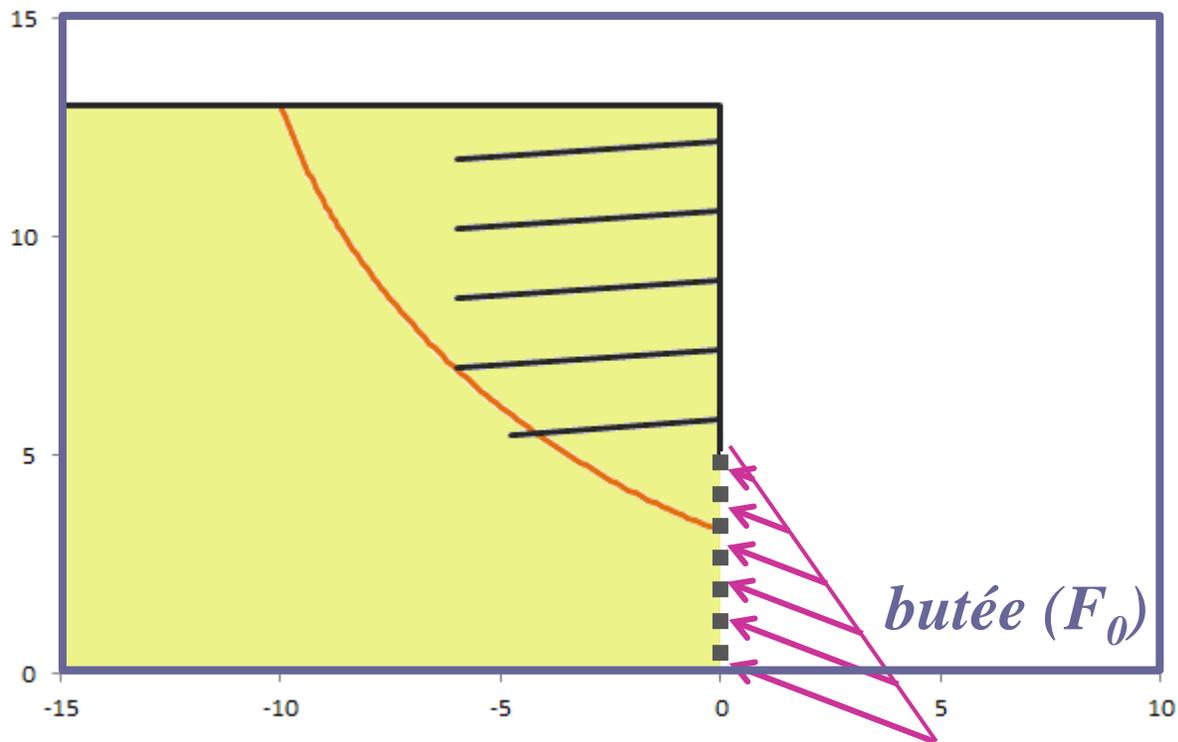
norme NF P 94 270 (2009)



Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif cloué

- Approche alternative
 - Butée limite dans le plan vertical sous le parement
 - Décomposition de l'équilibre entre deux domaines

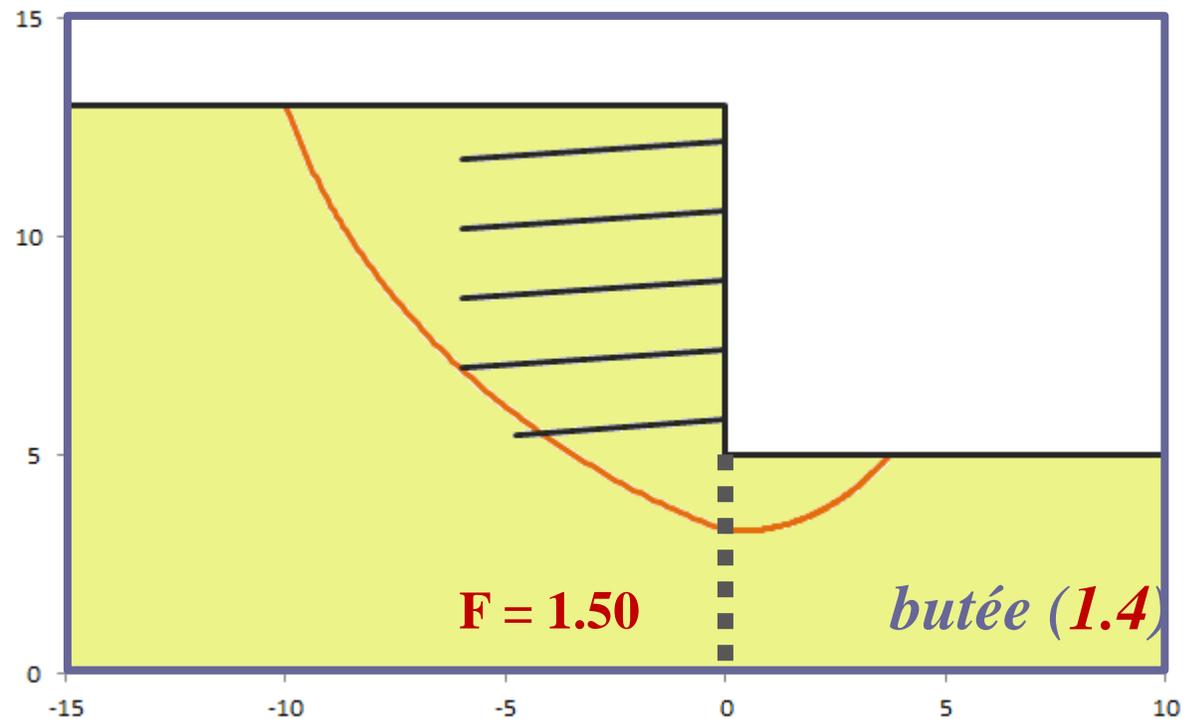
norme NF P 94 270 (2009)



Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif cloué

- Approche alternative
 - Décomposition en deux domaines

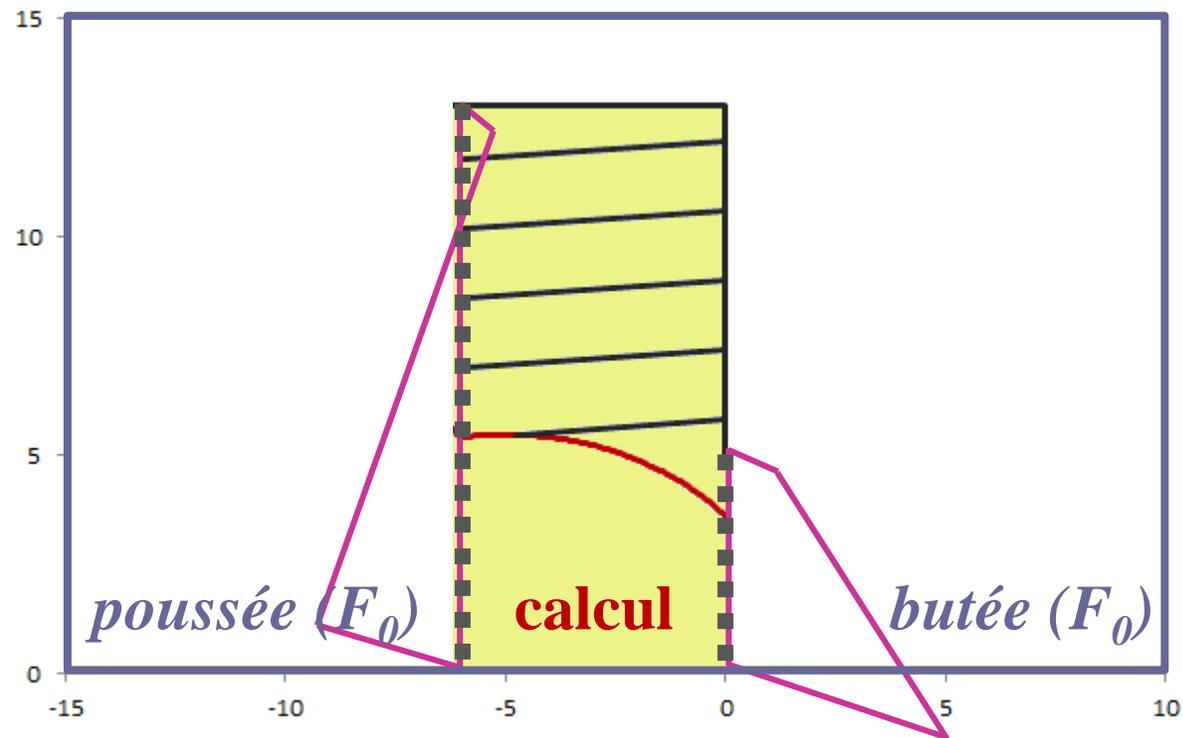
norme NF P 94 270 (2009)



Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif cloué

- Approche alternative
 - Décomposition en trois domaines

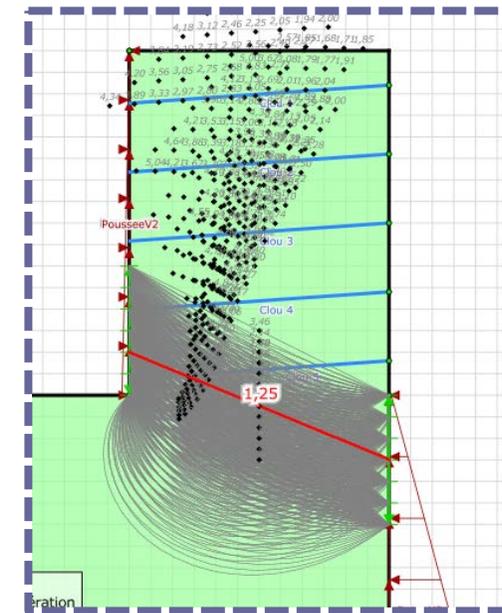
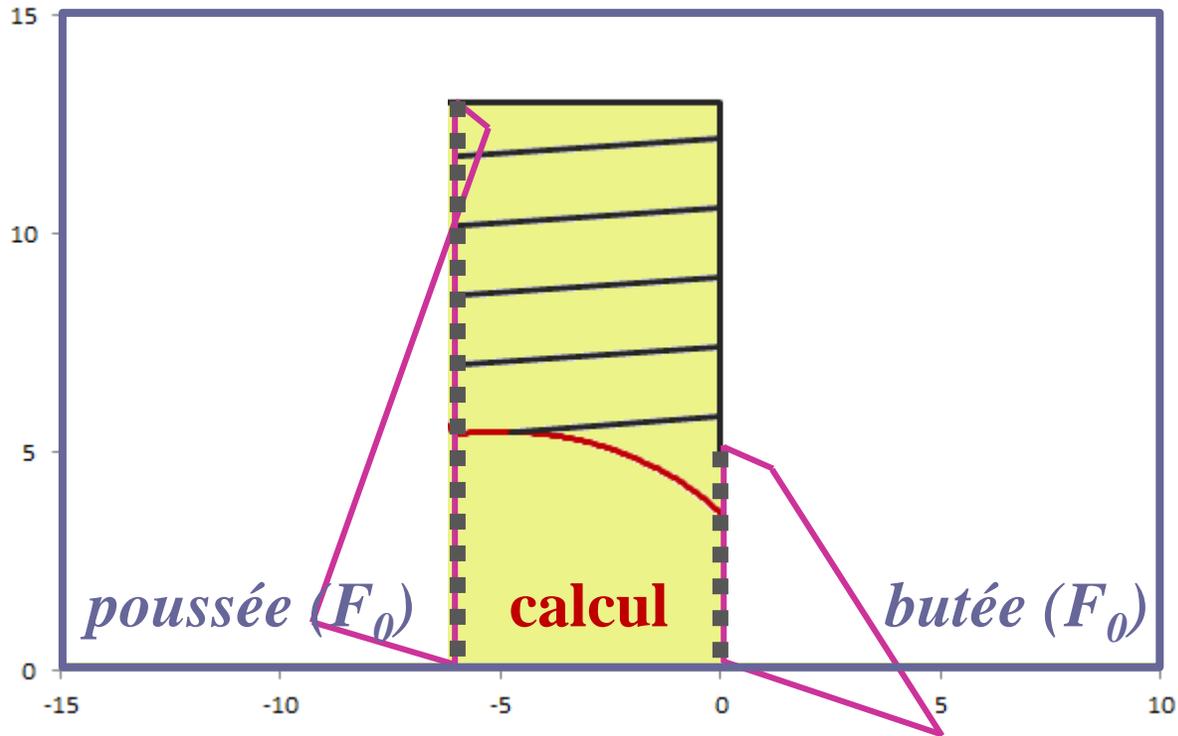
norme NF P 94 270 (2009)



Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif cloué

- Approche alternative
 - Décomposition en trois domaines

norme NF P 94 270 (2009)

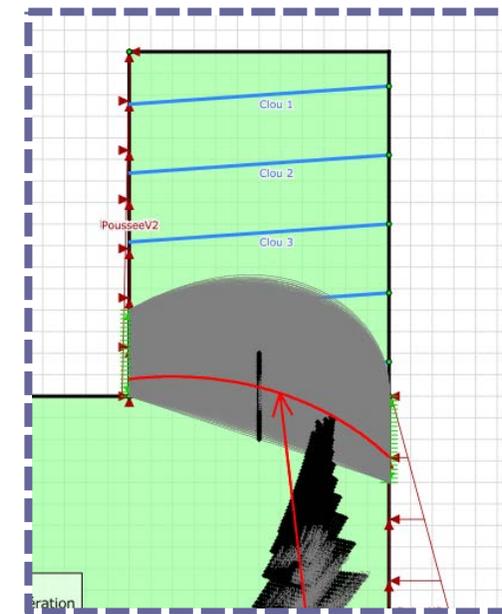
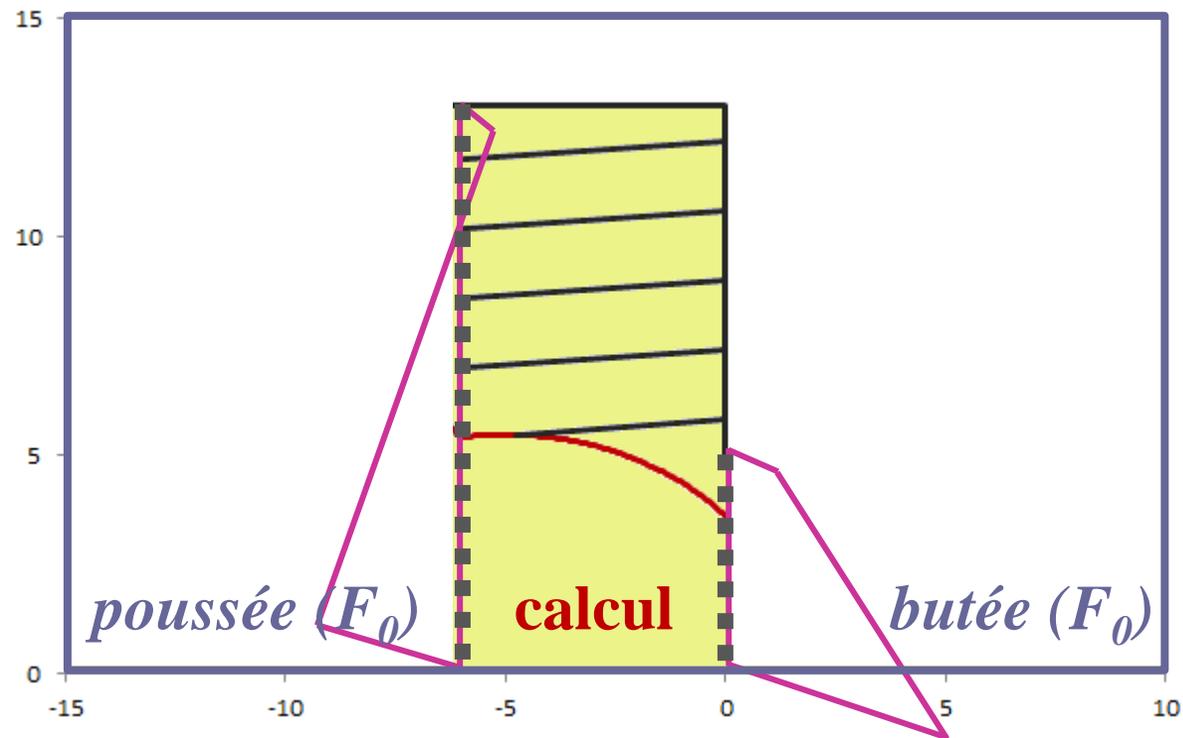


pôles supérieurs

Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif cloué

- Approche alternative
 - Décomposition en trois domaines

norme NF P 94 270 (2009)

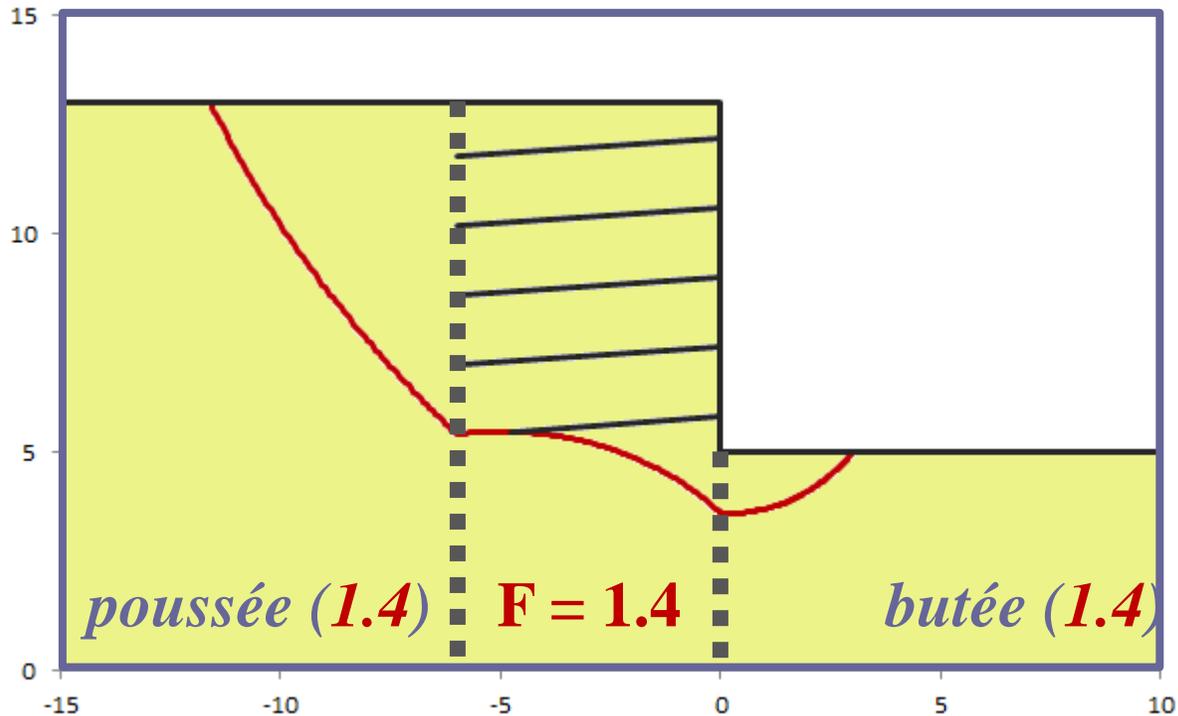


pôles inférieurs

Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif cloué

- Approche alternative
 - Décomposition en trois domaines

norme NF P 94 270 (2009)



Massif homogène sans nappe

Sol

- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

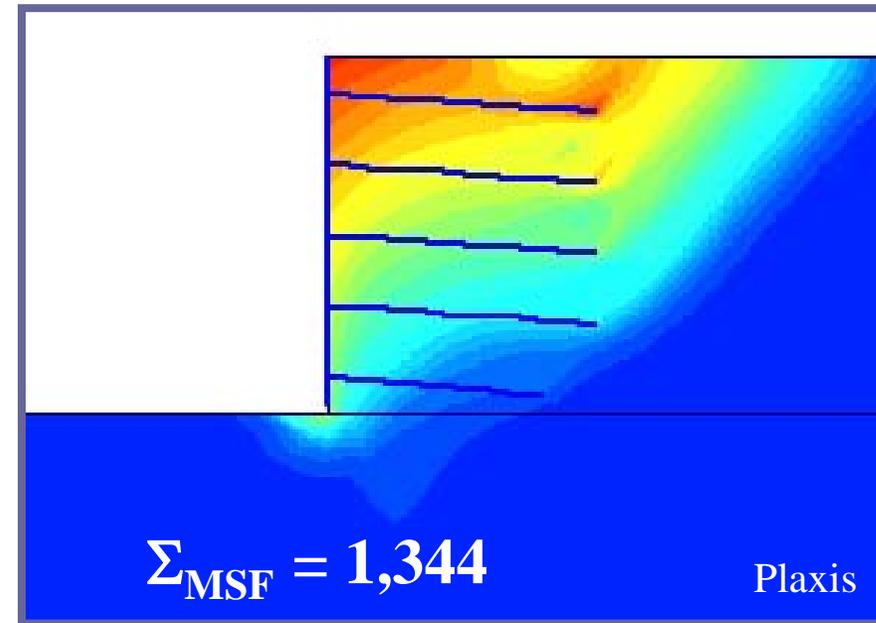
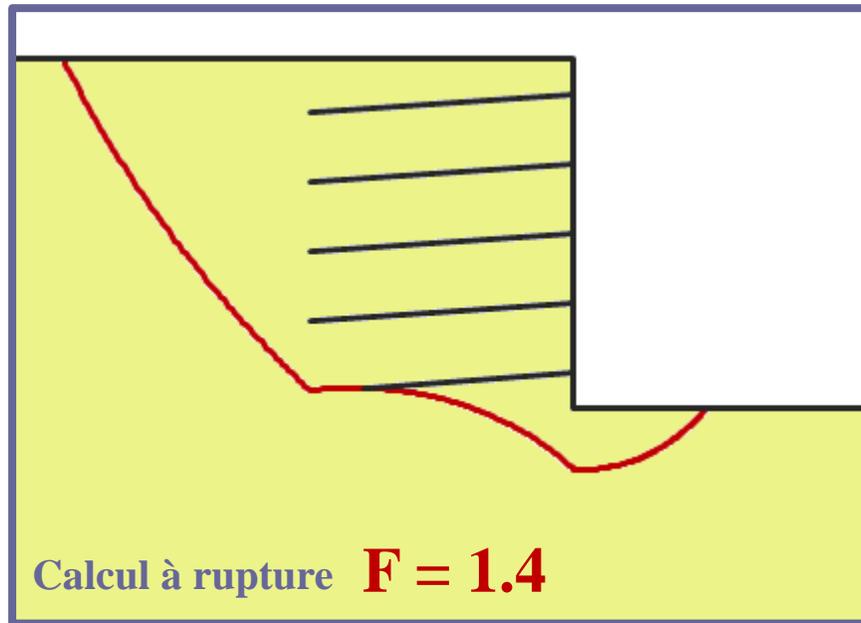
Clous

- $N_{\max} = 402 \text{ kN}$
- Forage 120 mm
- $\alpha = 4^\circ$
- $S_h = 2.9 \text{ m}$

Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif cloué

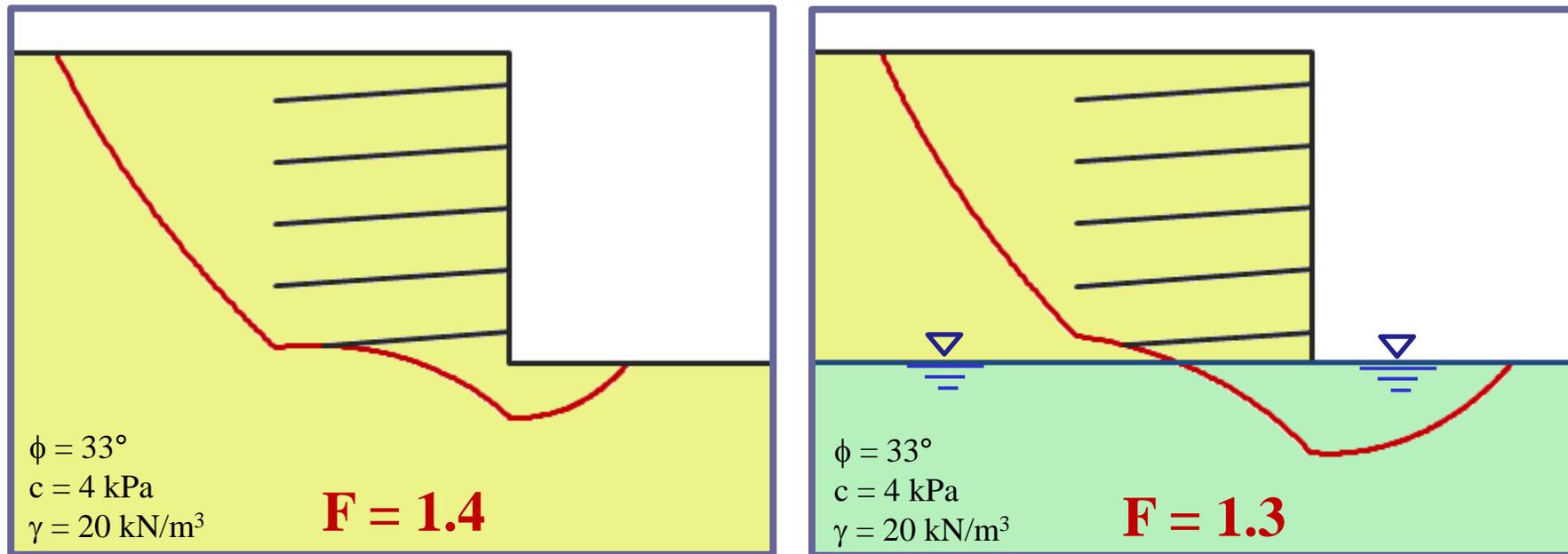
- Approche alternative
- Comparaison à un calcul éléments finis 2D

norme NF P 94 270 (2009)



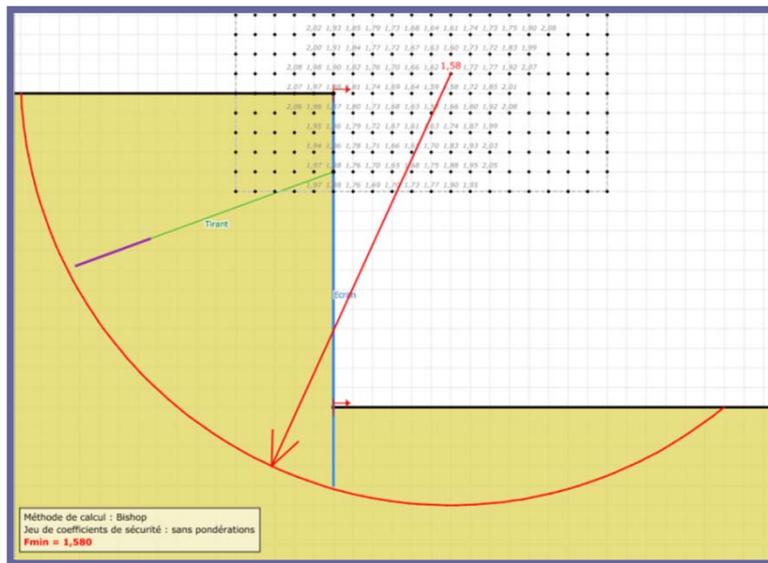
Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif cloué

- Influence d'une nappe au pied du massif cloué

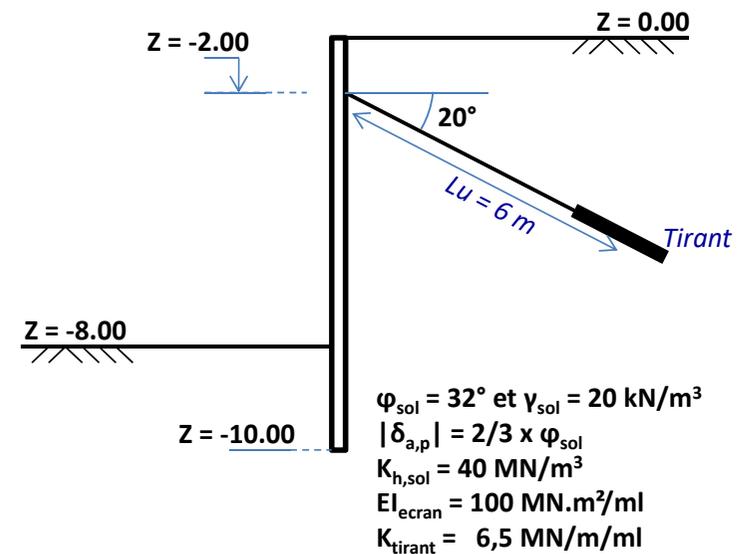


Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif ancré

- Stabilité au grand glissement et/ou stabilité du massif d'ancrage ?



$$F = 1,58$$

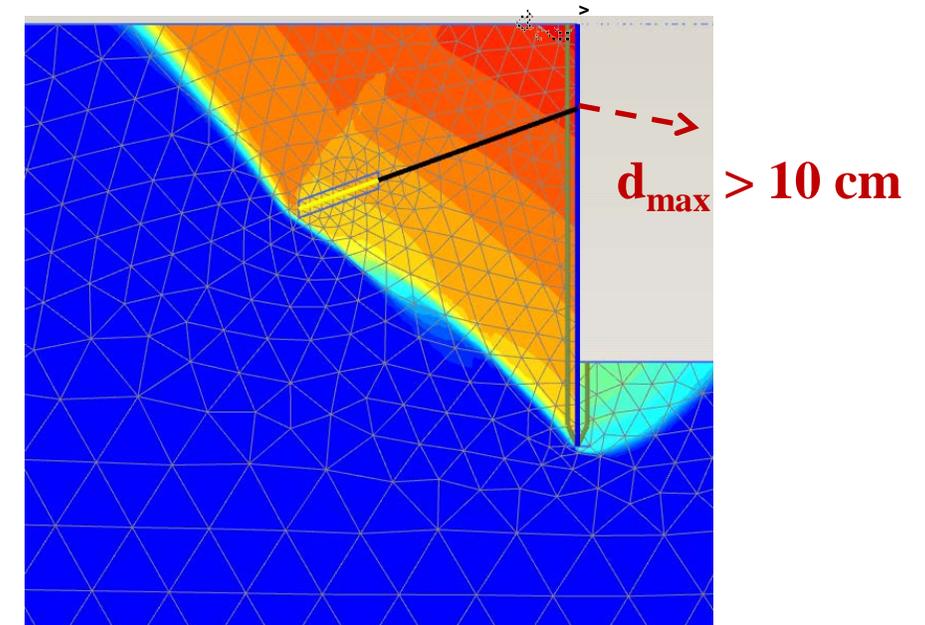
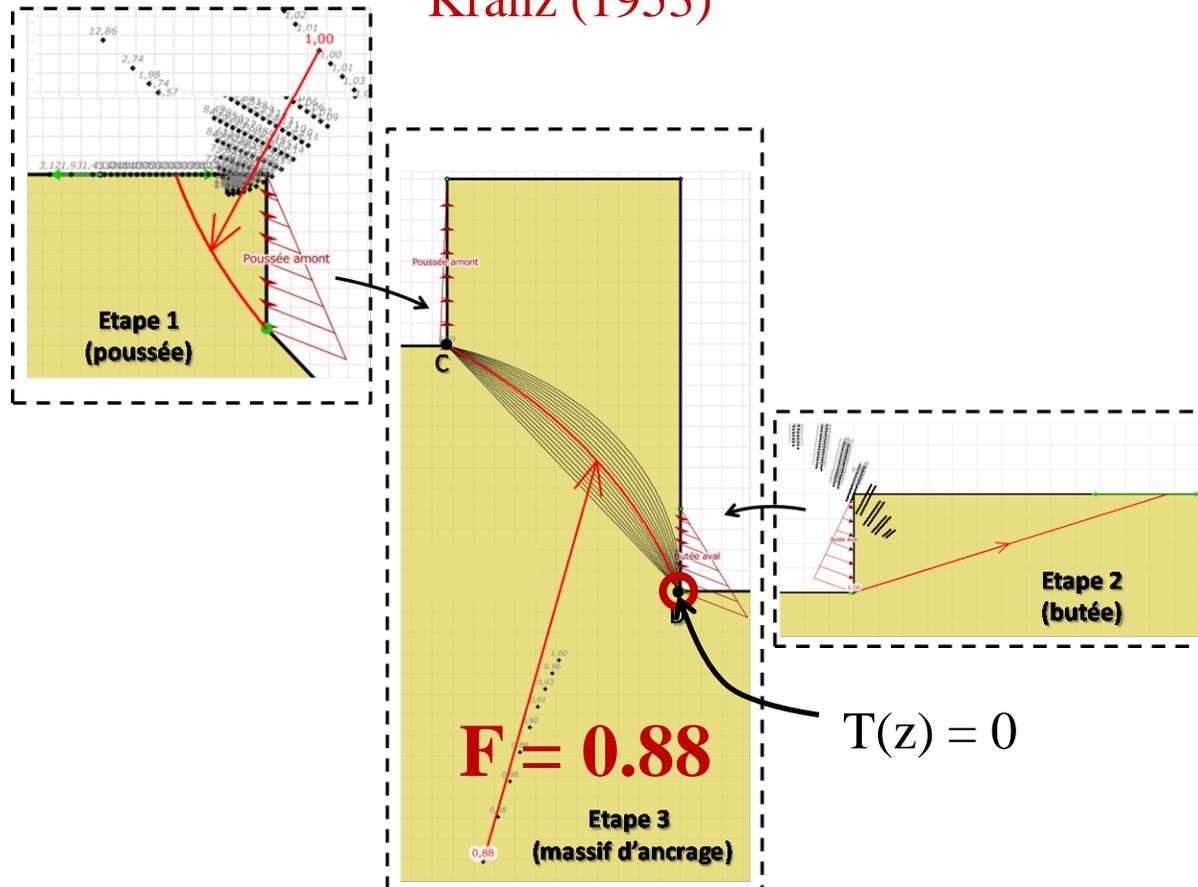


Cuira F., Simon B., 2014

Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif ancré

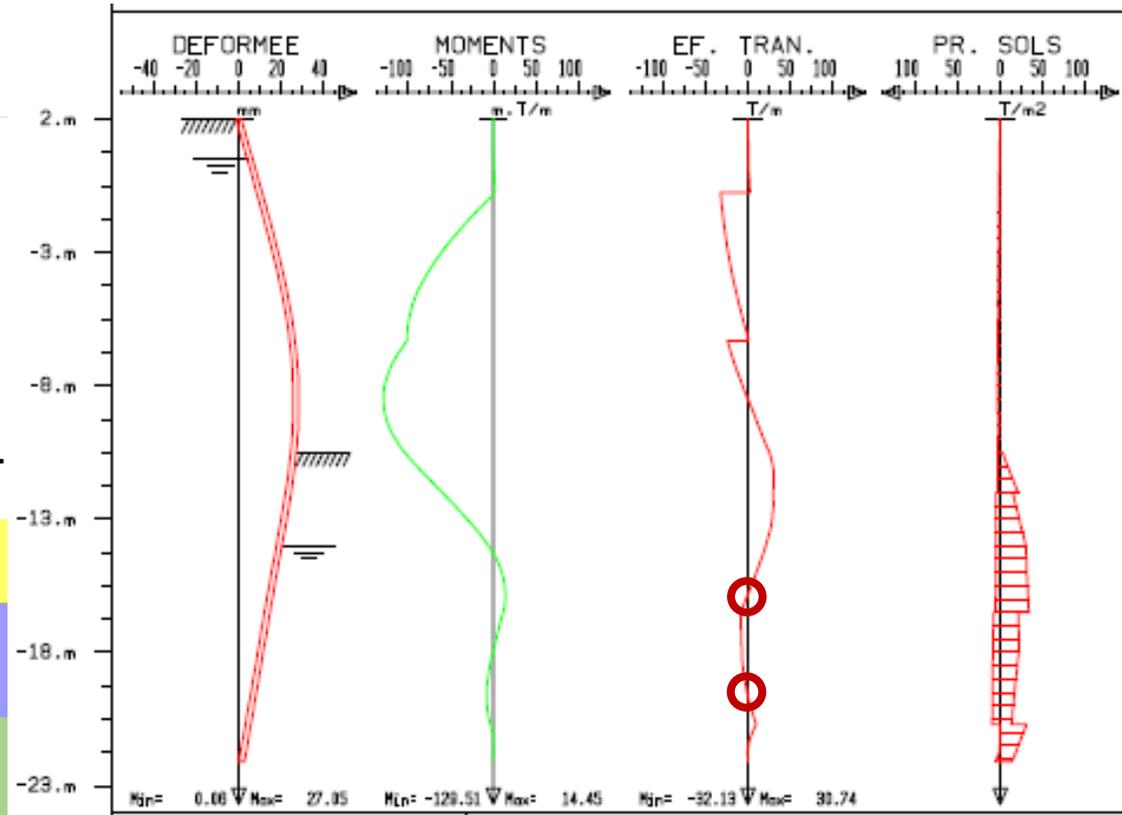
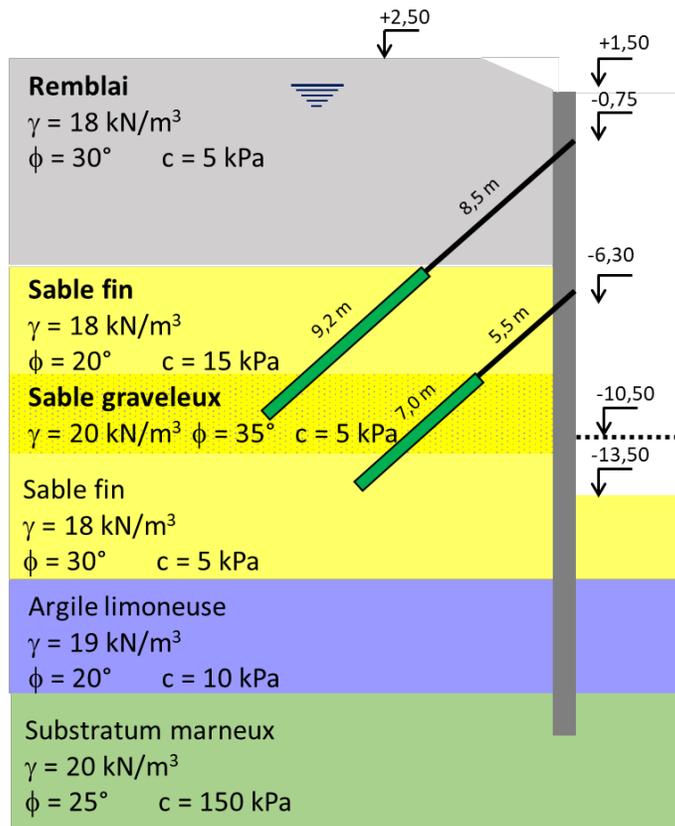
- Stabilité au grand glissement et/ou stabilité du massif d'ancrage ?
 - Nécessité de décomposer l'équilibre en celui de plusieurs blocs rigides

Kranz (1953)



Cuira F., Simon B., 2014

Décomposer, recomposer.... pour mieux évaluer la stabilité interne d'un massif ancré



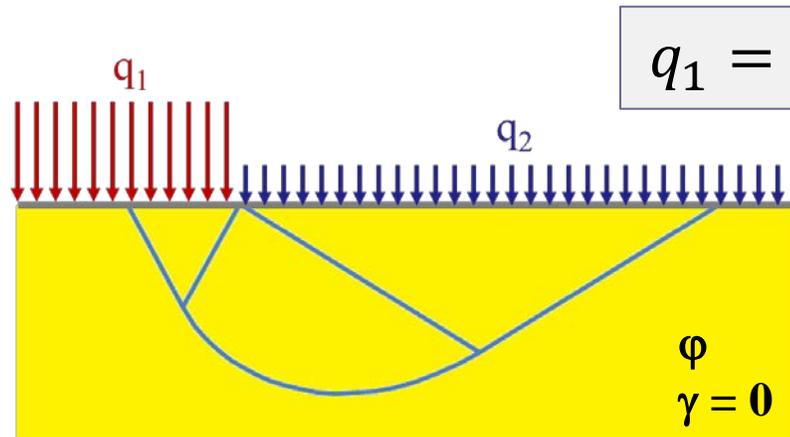
Stabilité Kranz vérifiée ni en G2PRO ou en G3 !

Décomposer... recomposer pour

... approcher une charge limite de rupture

Facteur de portance (milieu non pesant)

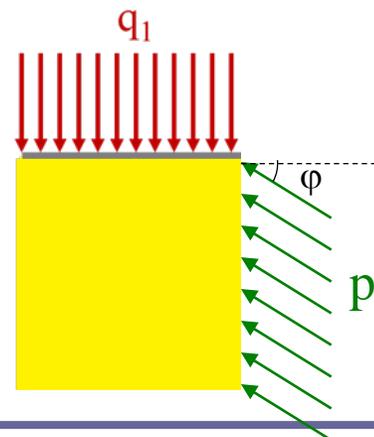
- Mécanisme de Prandtl



$$q_1 = N_q q_2$$

$$N_q = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi}$$

- Une décomposition utile



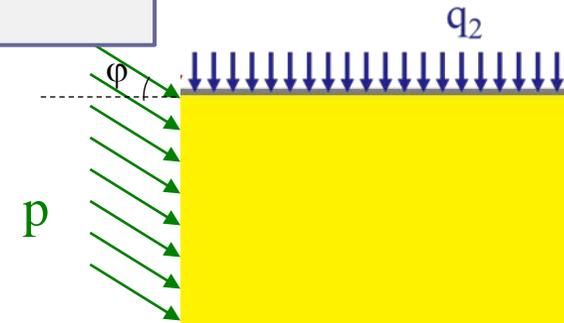
$$q_1 = \frac{K_{pq}}{K_{aq}} q_2 = N_q^* q_2$$

$$p = K_{aq} q_1$$

$$\delta/\phi = +1$$

$$p = K_{pq} q_2$$

$$\delta/\phi = -1$$

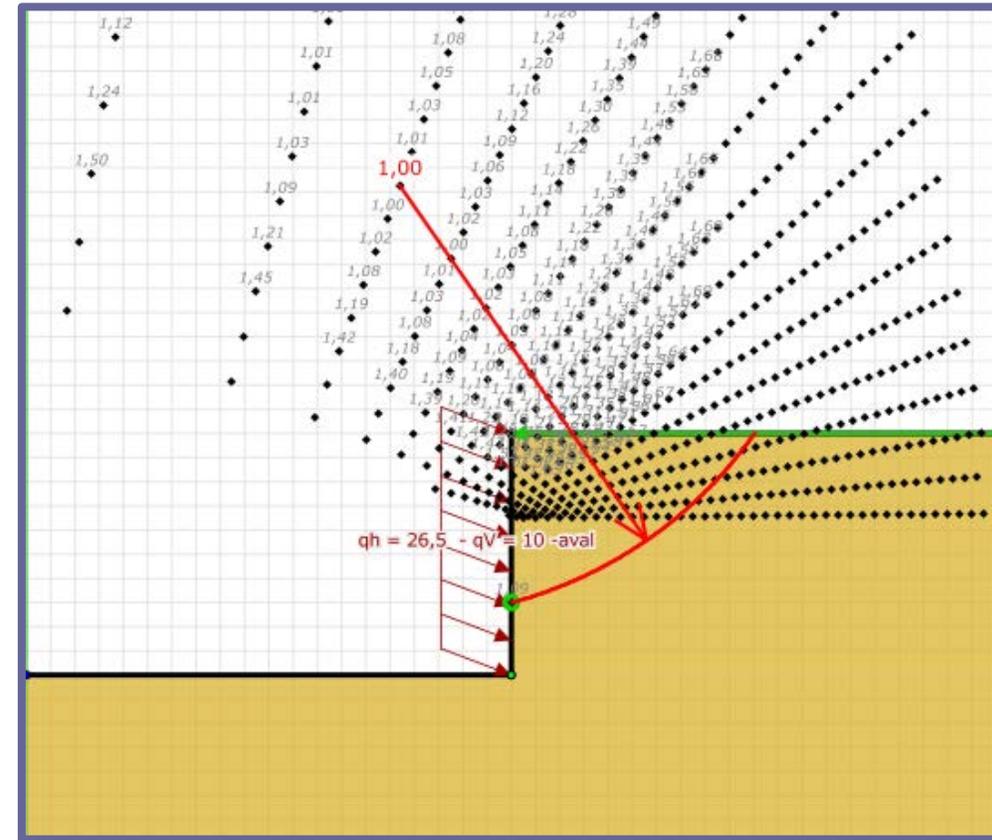
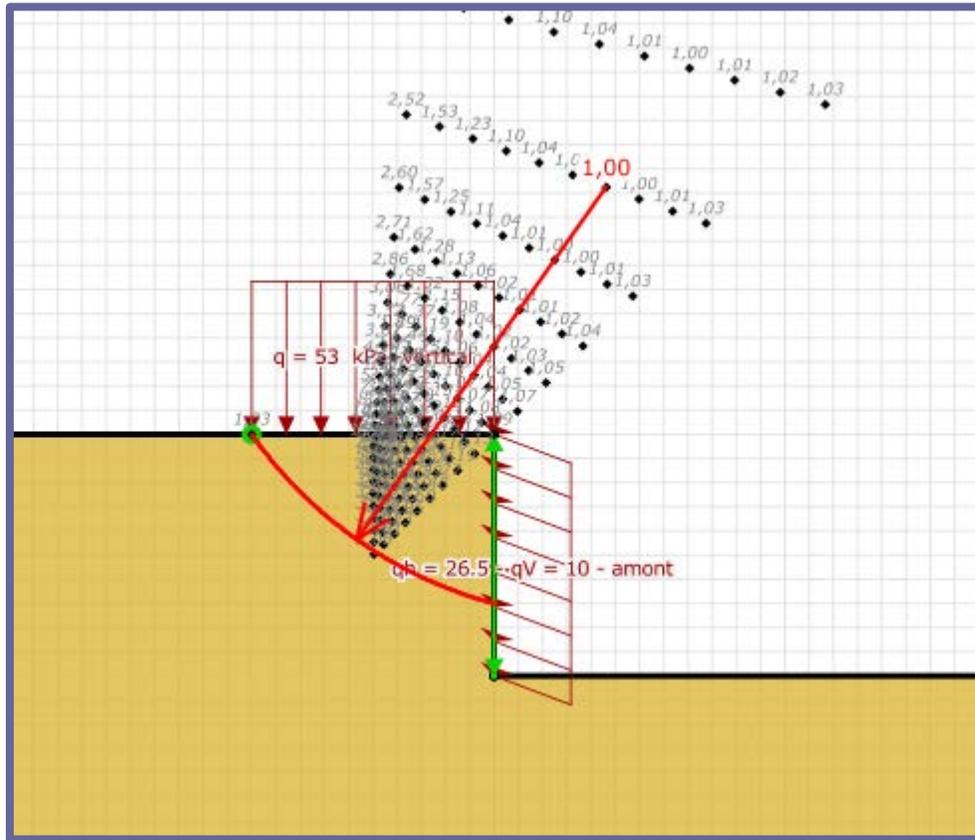


ϕ_1'	N_q^*/N_q
30	1.00
33	1.00
35	1.00
38	1.00
40	1.00

Décomposer, recomposer

- Semelle lisse, sol cohérent c_u , $\phi_u = 0$

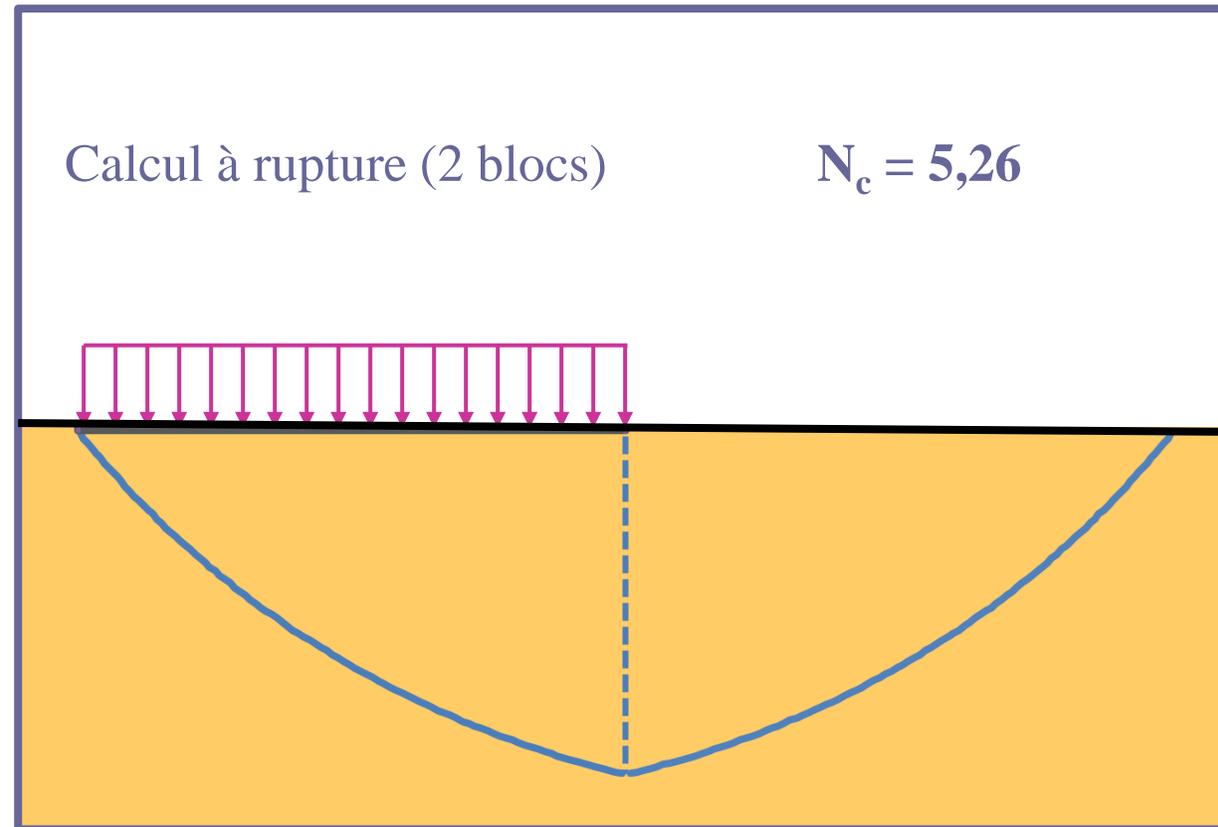
... l'équilibre limite d'une semelle



Décomposer, recomposer

... l'équilibre limite d'une semelle

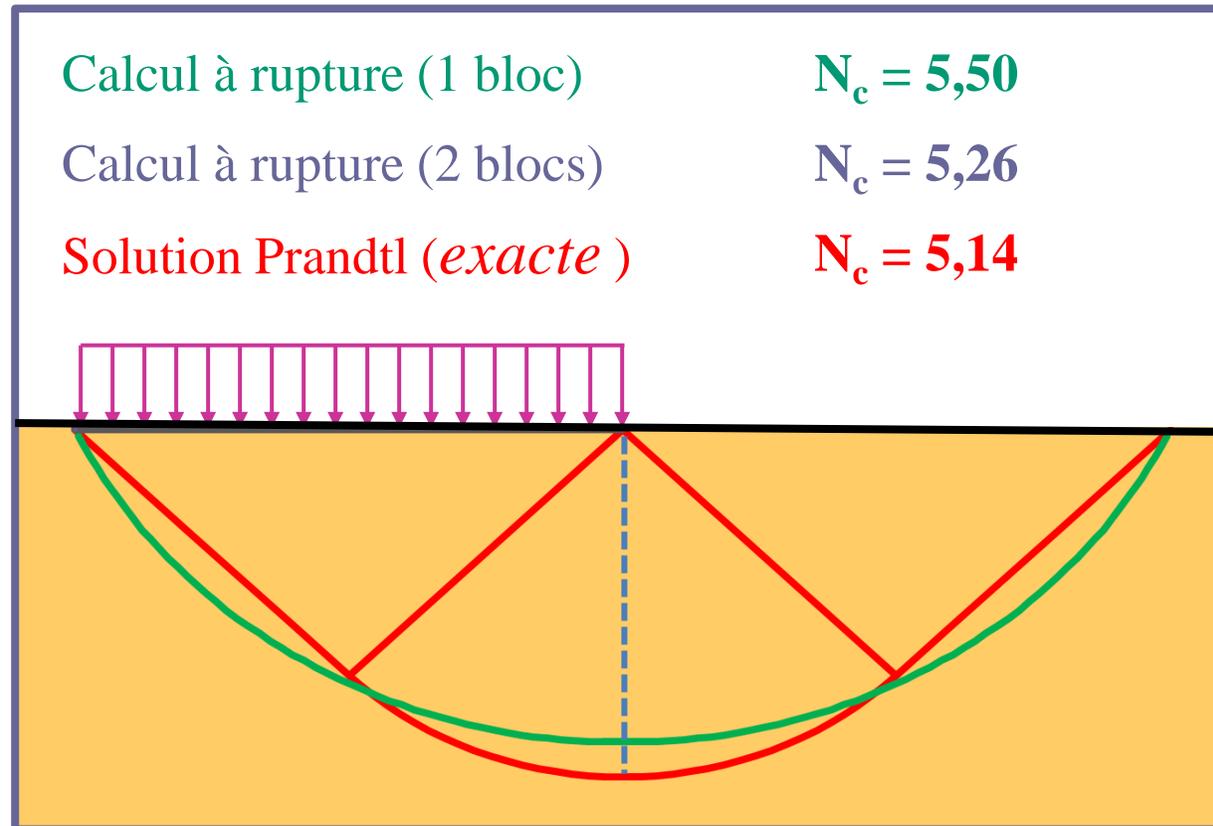
- Semelle lisse, sol cohérent c_u , $\phi_u = 0$



Décomposer, recomposer

... l'équilibre limite d'une semelle

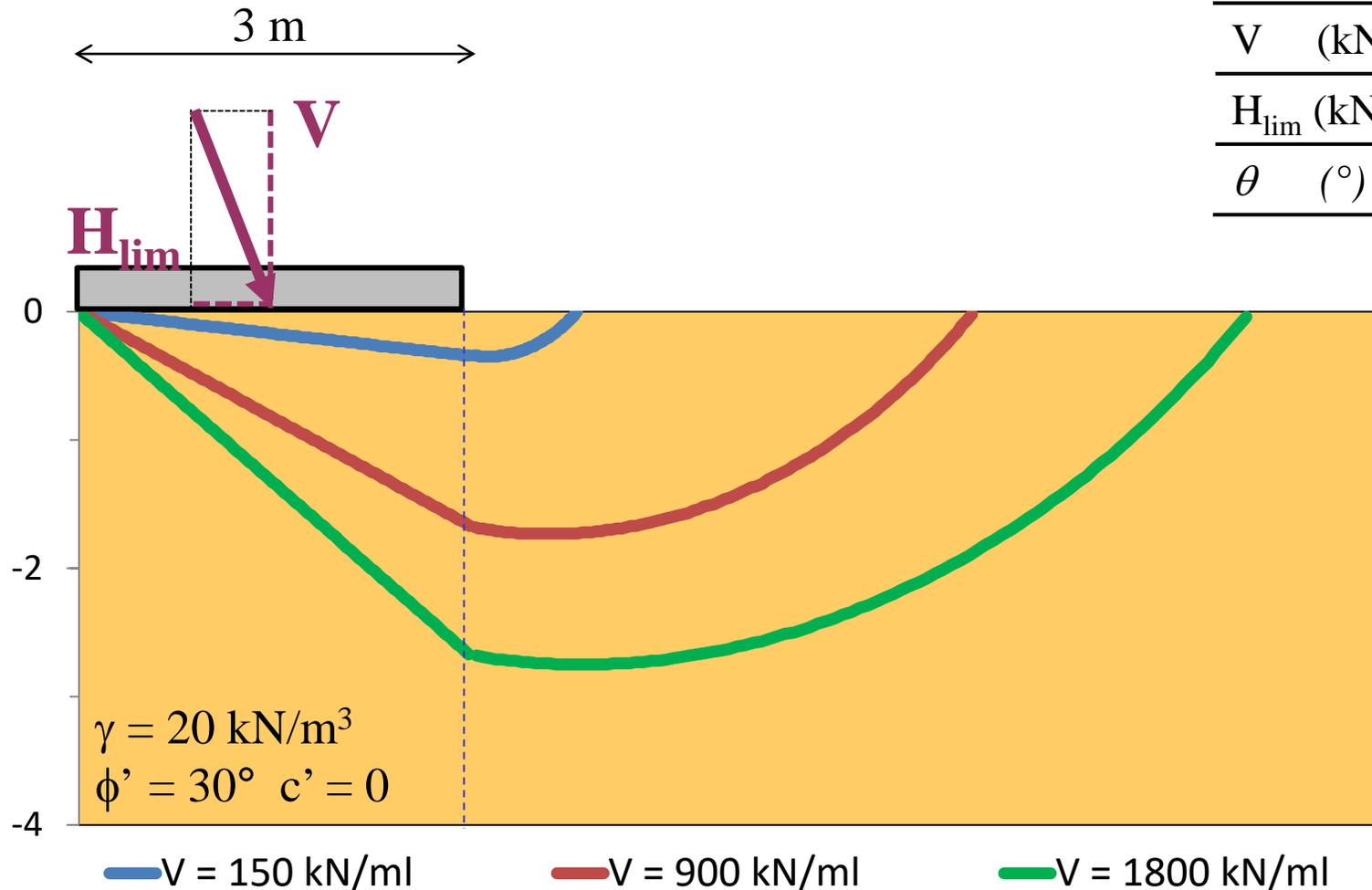
- Semelle lisse, sol cohérent c_u , $\phi_u = 0$



Décomposer, recomposer

... l'équilibre limite d'une semelle

- Semelle soumise à chargement incliné



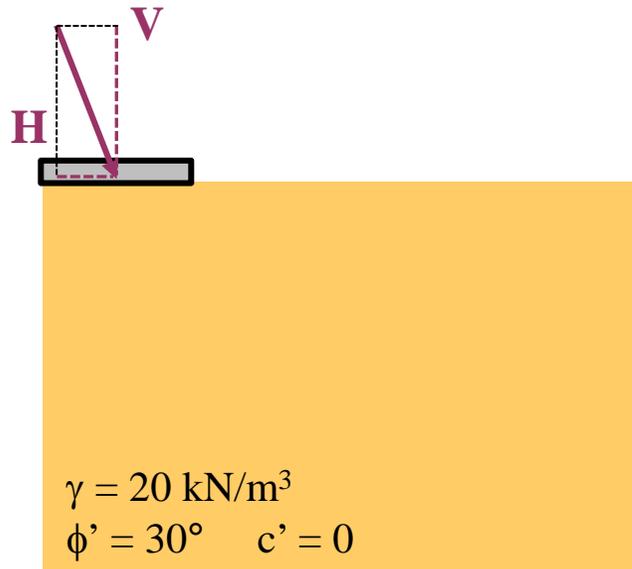
situation statique

V (kN)	150	900	1800
H_{lim} (kN)	74	180	90
θ (°)	26.3	11.3	2.9

Hor B., 2014

Décomposer, recomposer

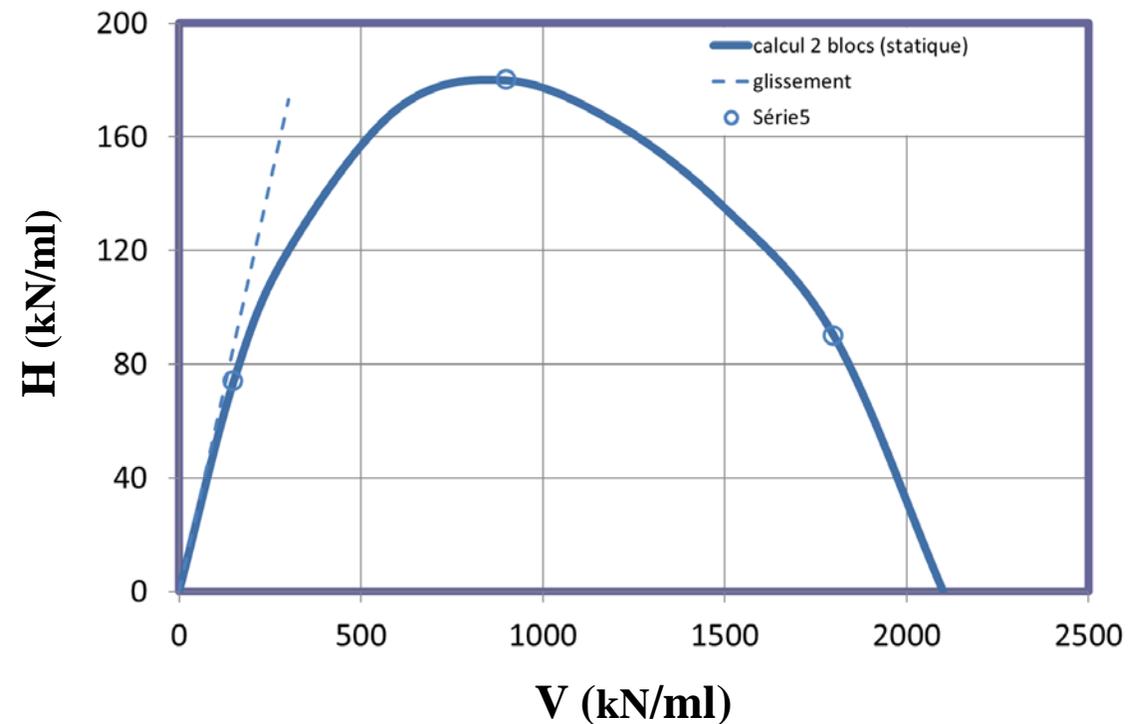
- Semelle soumise à chargement incliné



... l'équilibre limite d'une semelle

situation statique

V (kN)	150	900	1800
H_{lim} (kN)	74	180	90
θ (°)	26.3	11.3	2.9

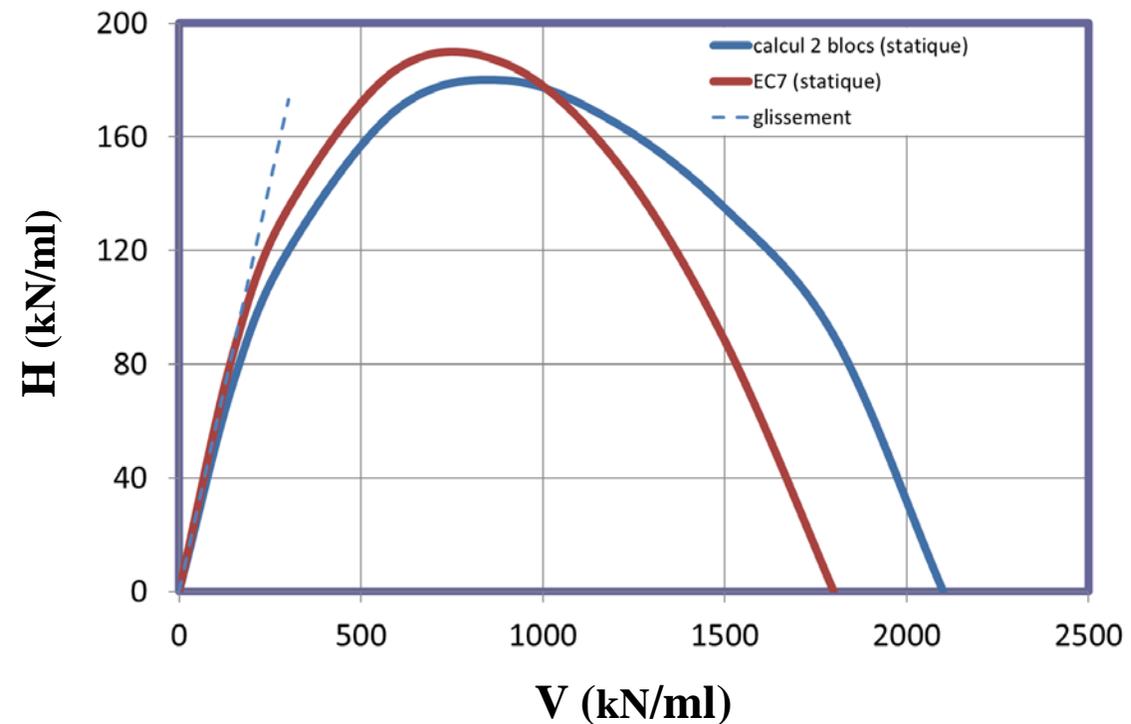
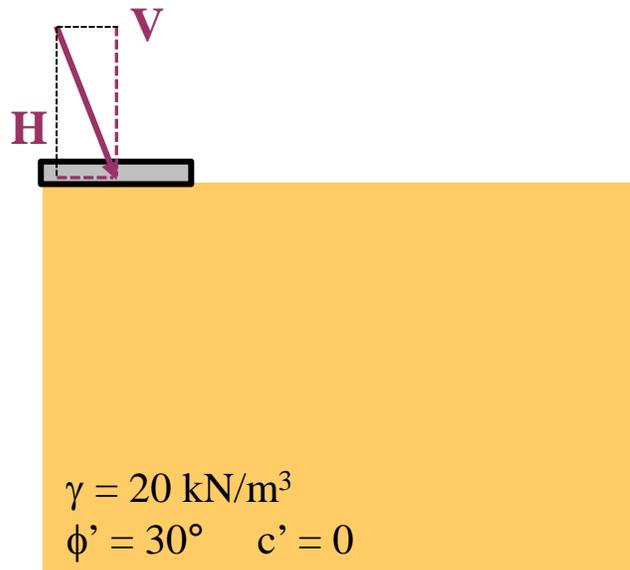


Décomposer, recomposer

... l'équilibre limite d'une semelle

- Semelle soumise à chargement incliné

situation statique

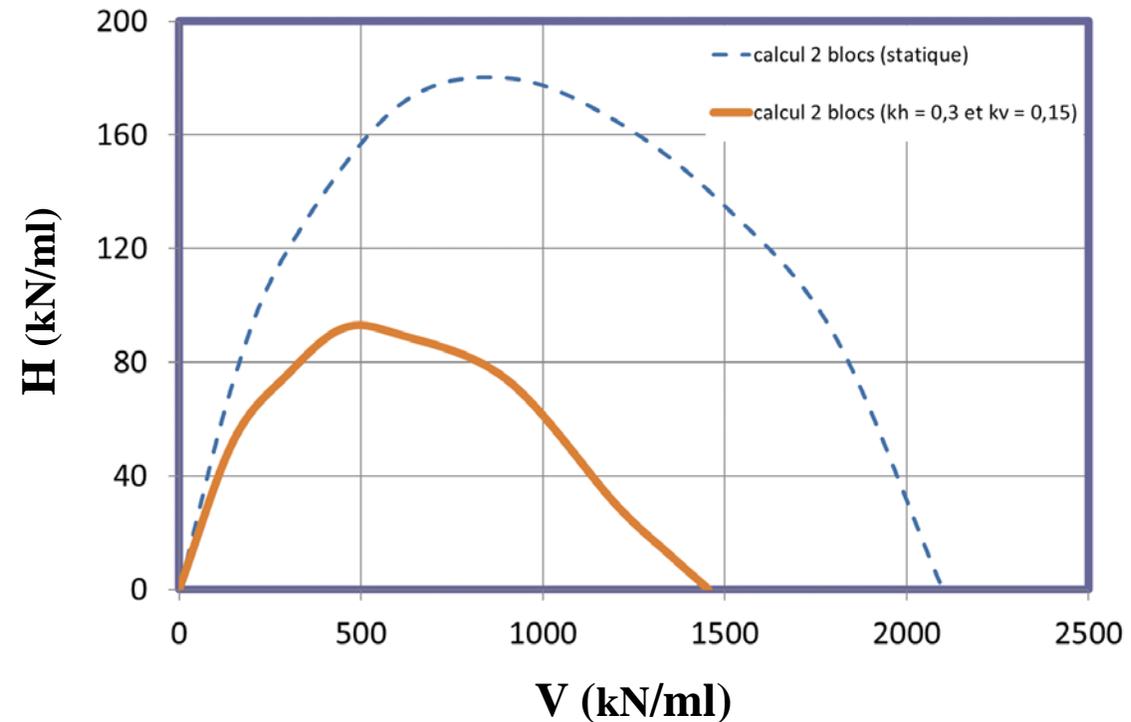
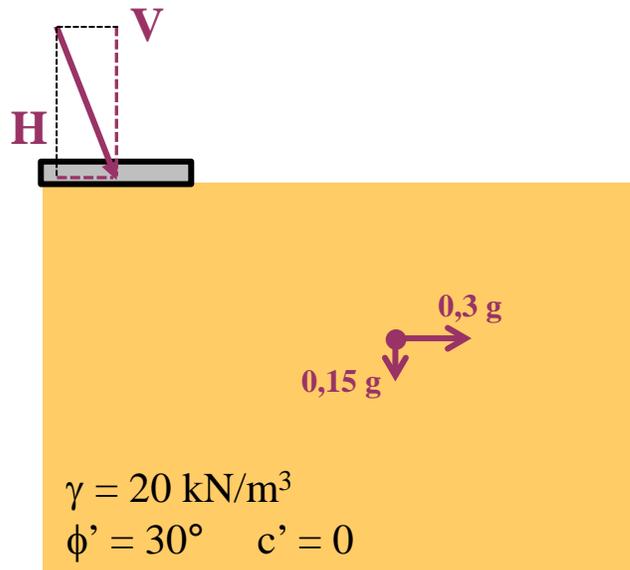


Décomposer, recomposer

... l'équilibre limite d'une semelle

- Semelle soumise à chargement incliné

situation sismique (pseudo-statique)

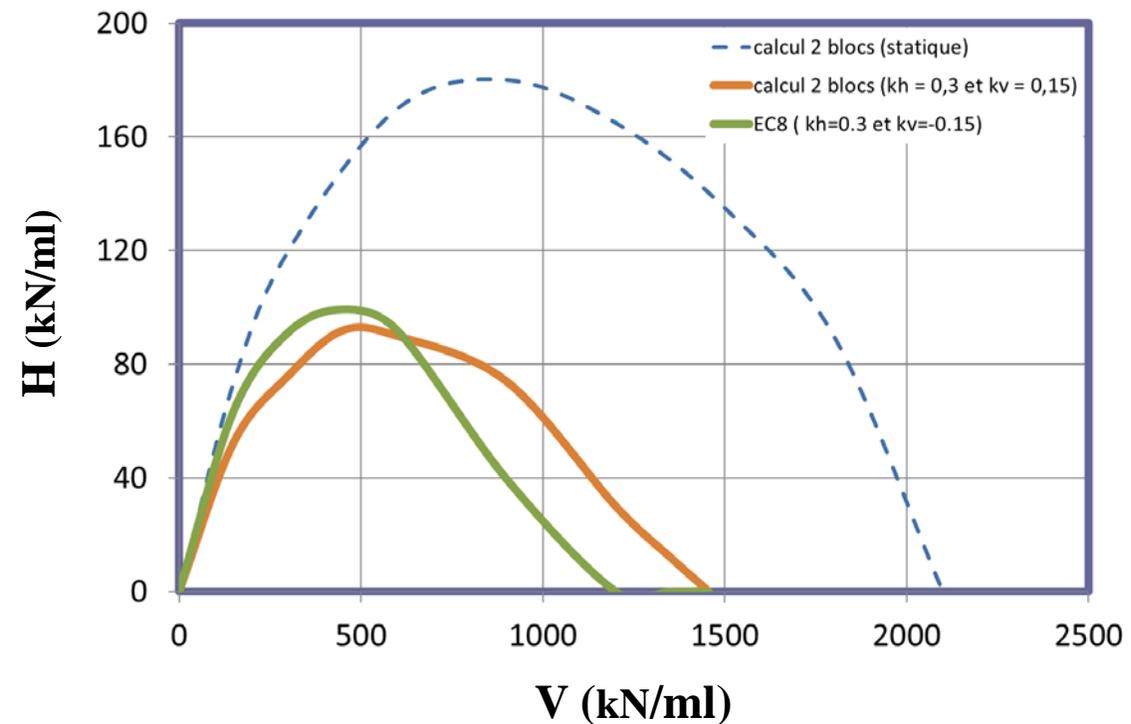
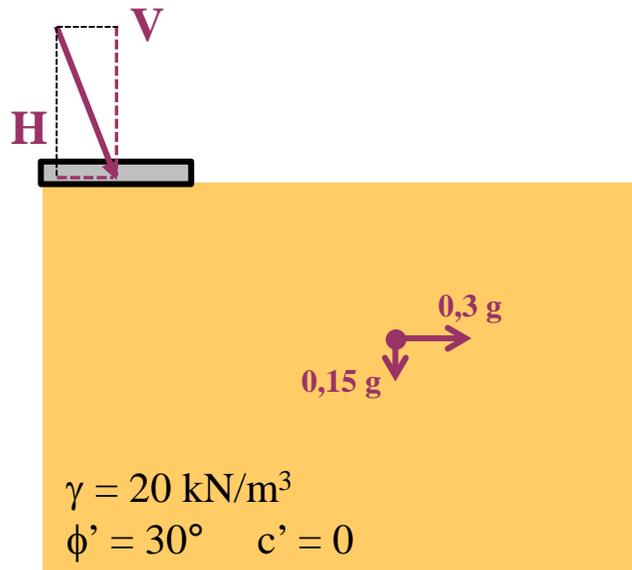


Décomposer, recomposer

... l'équilibre limite d'une semelle

- Semelle soumise à chargement incliné

situation sismique (pseudo-statique)

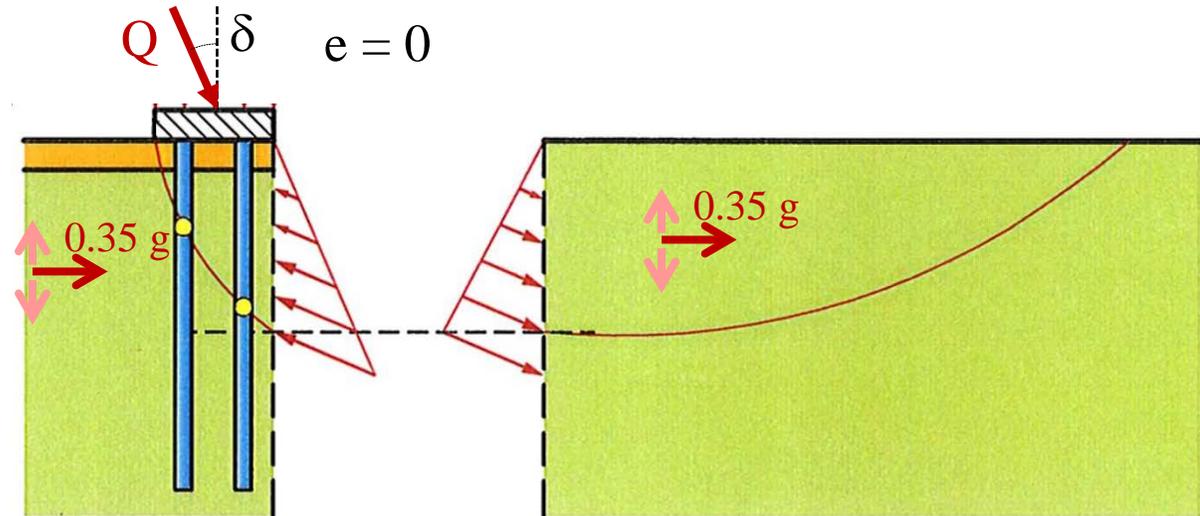


Décomposer, recomposer

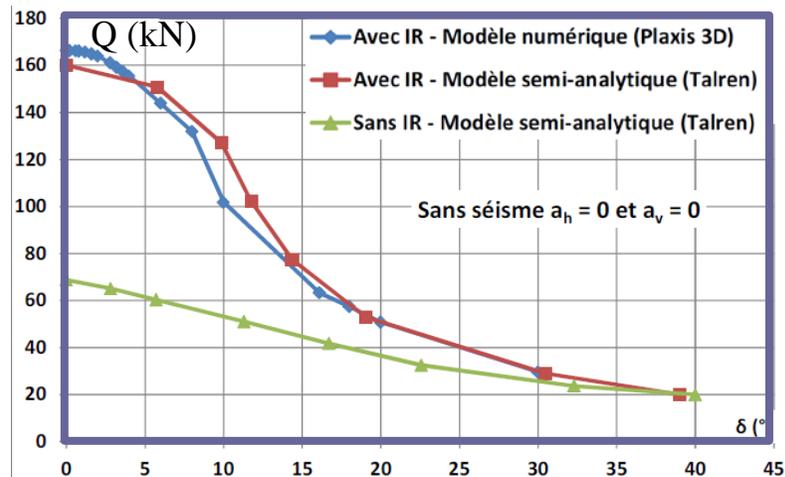
- « Semelle sur inclusions rigides »

Semelle 16 m x 12.5 m
 4 inclusions B = 1.2 m
 Matelas 0.8 m (débord 2 m)
 $\phi' = 40^\circ$

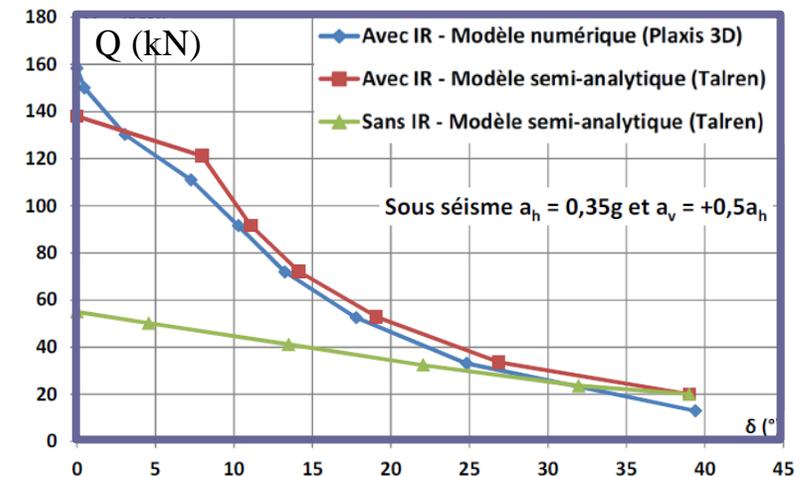
... l'équilibre limite d'une semelle



Situation statique



Situation sismique



Cuira F., Frattini N., Hor B., 2017

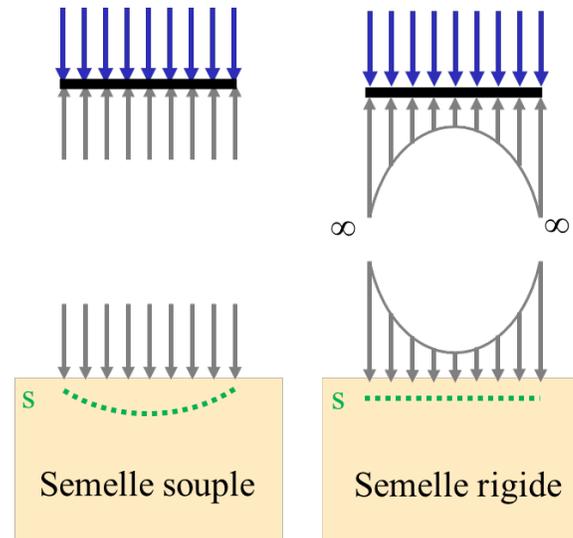
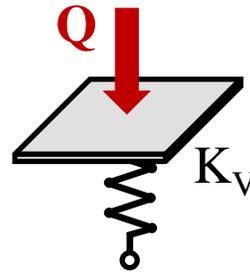
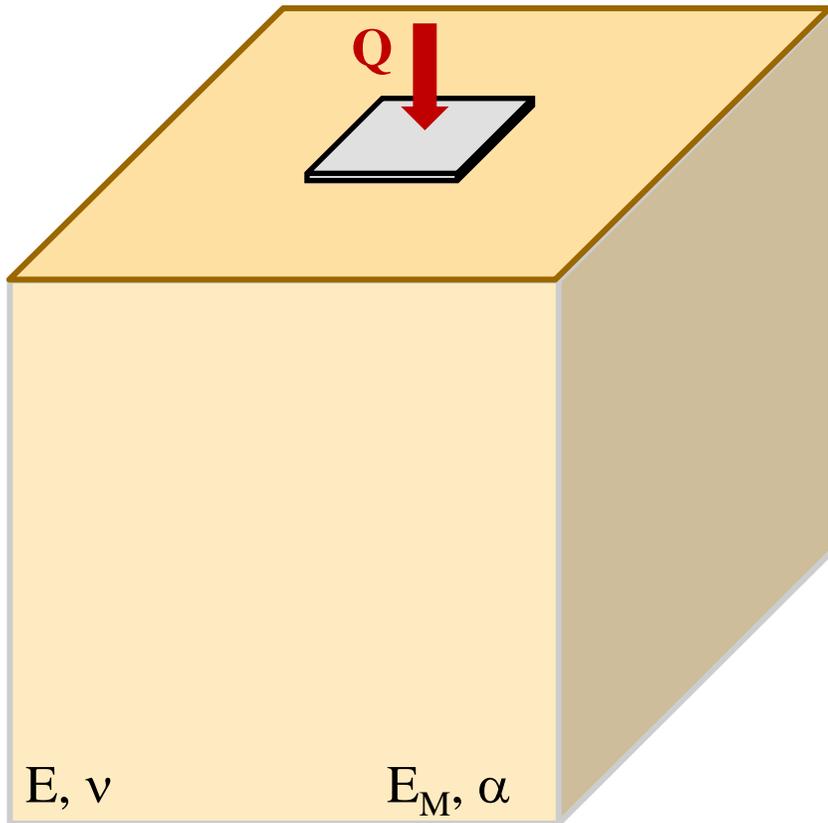
Décomposer... massif et fondation

... sous sollicitations de service

Décomposer massif et fondation

- Semelle isolée

$$Q = K_V s$$



... sous sollicitations de service

- Élasticité (Boussinesq)

$$s = \frac{qB}{E} (1 - \nu^2) c_f$$

$$s \approx \frac{3.5}{E} \frac{Q}{P}$$

- Semi-empirique (Ménard)

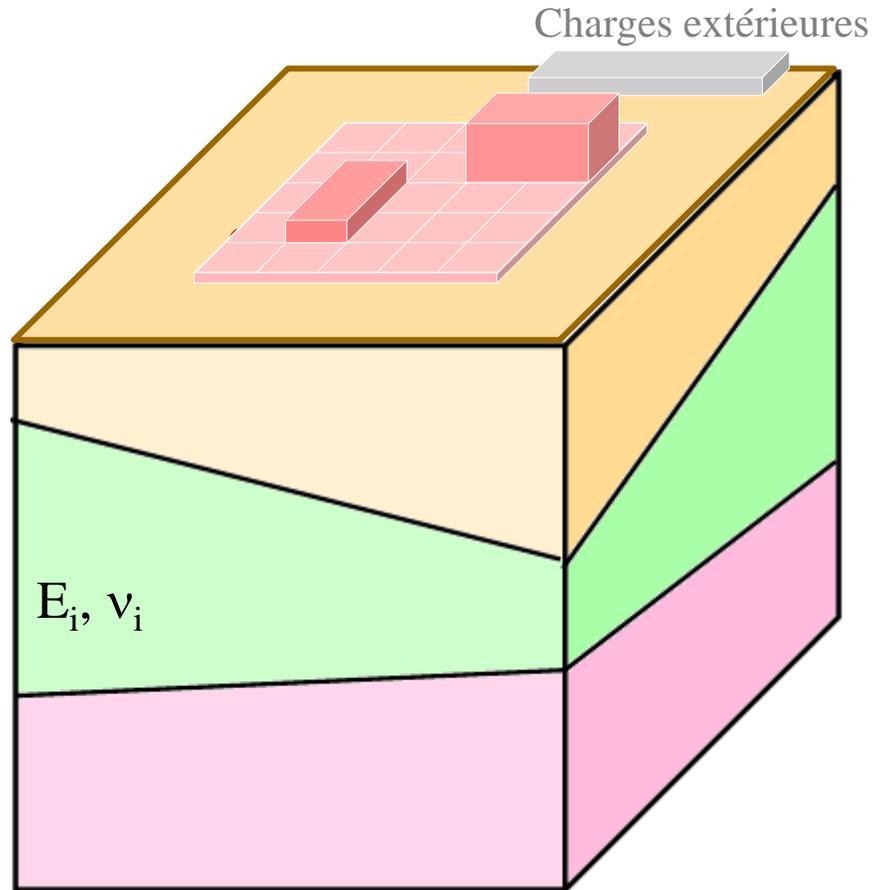
$$s = \frac{2q}{9E_d} B_0 \left[\lambda_d \frac{B}{B_0} \right]^\alpha + \frac{q}{9E_c} \lambda_c B \alpha$$

Décomposer massif et fondation

... sous sollicitations de service

- Fondation étendue / rigidité nulle

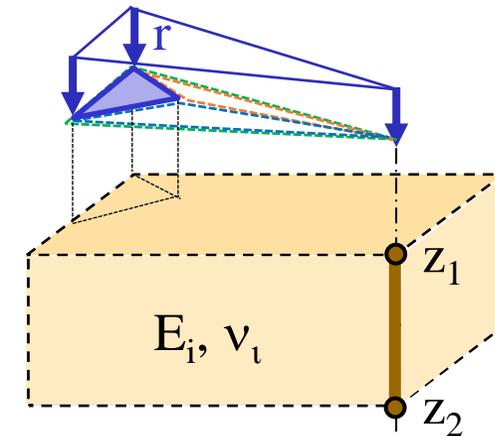
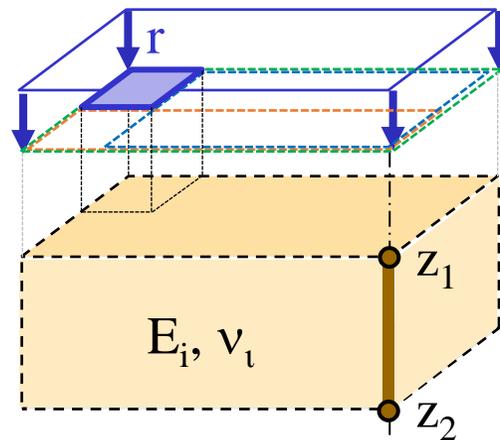
Charges réparties



- Élasticité

Steinbrenner (1943)

$$s_{D1-D2} = \frac{rB}{E} [(1 - \nu^2)(F_1(z_2) - F_1(z_1)) + (1 - \nu - \nu^2)(F_2(z_2) - F_2(z_1))]$$



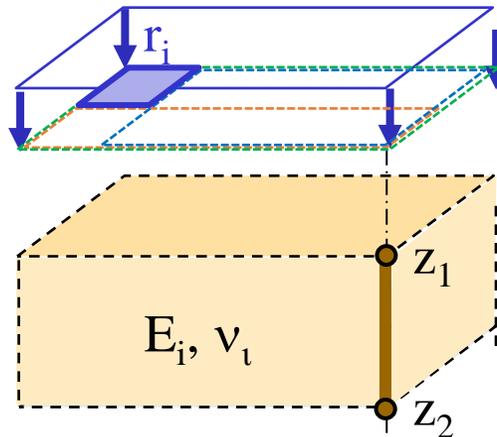
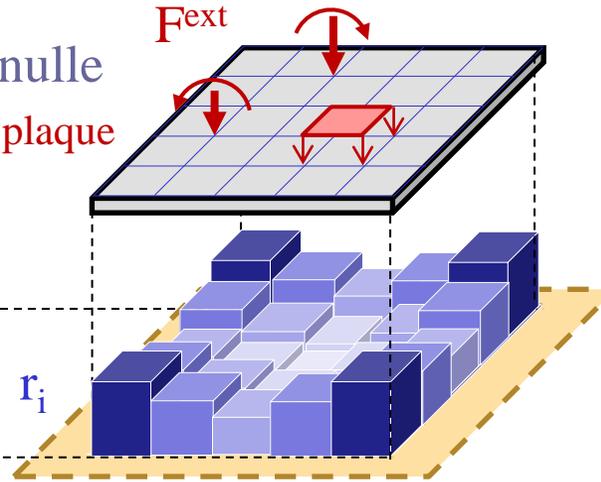
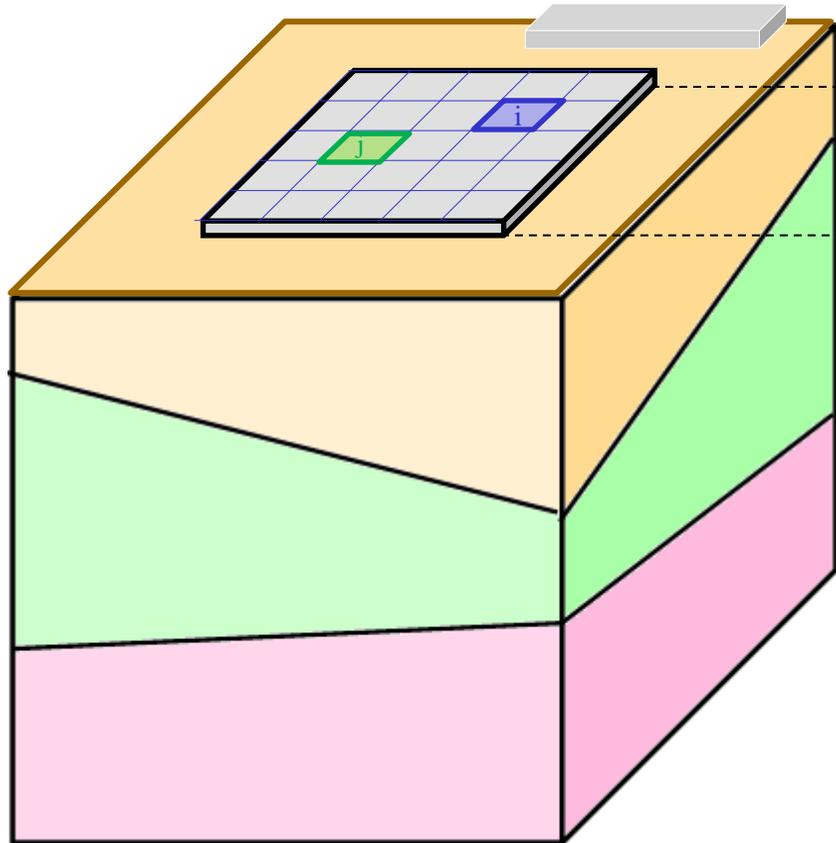
Borelli (2020)

Décomposer massif et fondation

- Fondation étendue / rigidité **non** nulle

Charges sur plaque

Charges extérieures



... sous sollicitations de service

- Éléments finis de plaque

$$\underline{\underline{\mathbf{K}^e}} \cdot \underline{\underline{\mathbf{w}}} = \underline{\underline{\mathbf{F}^{\text{ext}}}} - \underline{\underline{\mathbf{r}}}$$

- Elasticité

$$\underline{\underline{\mathbf{s}}} = \underline{\underline{\mathbf{T}^s}} \cdot \underline{\underline{\mathbf{r}}}$$

Matrice des coefficients d'influence

Réaction \mathbf{r}

	i-1	i	i+1
j-1			
j		$\alpha_{ij} = s_i / r_j$	
j+1			

Tassement \mathbf{s}

Cuira F. Simon B. 2008

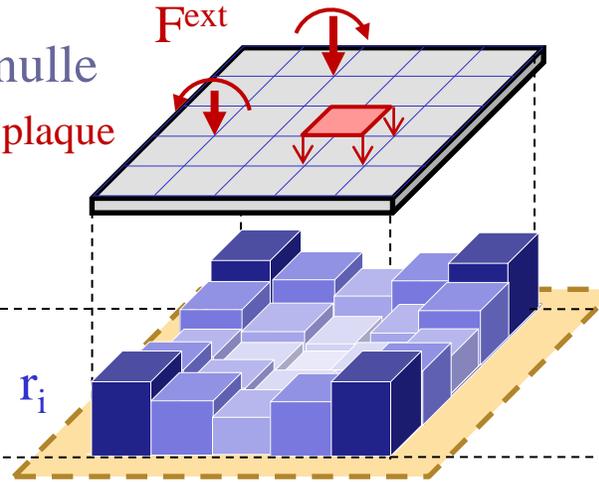
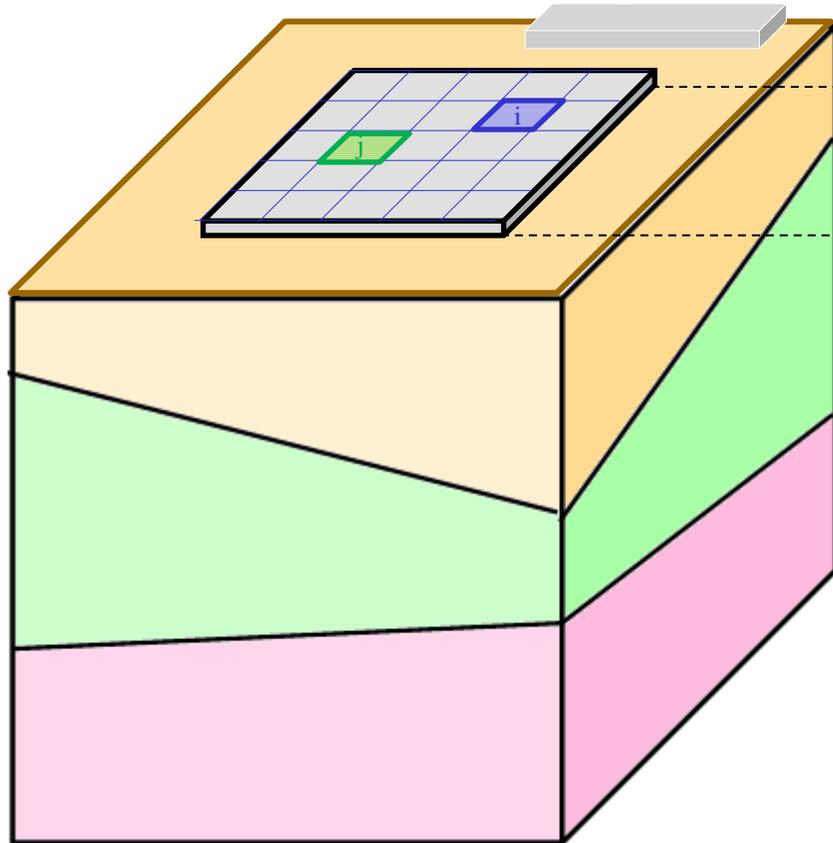
Décomposer massif et fondation

... sous sollicitations de service

- Fondation étendue / rigidité non nulle

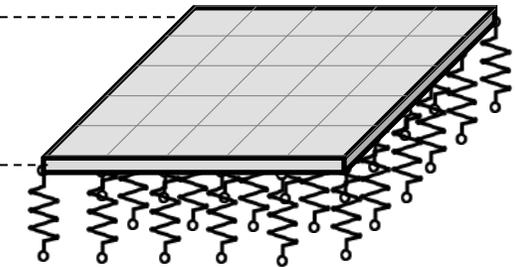
Charges sur plaque

Charges extérieures



- Eléments finis de plaque

$$\underline{\underline{\mathbf{K}^e}} \cdot \underline{\underline{\mathbf{w}}} = \underline{\underline{\mathbf{F}^{\text{ext}}}} - \underline{\underline{\mathbf{r}}}$$



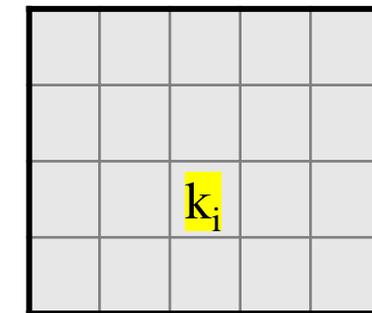
- Résultats du calcul

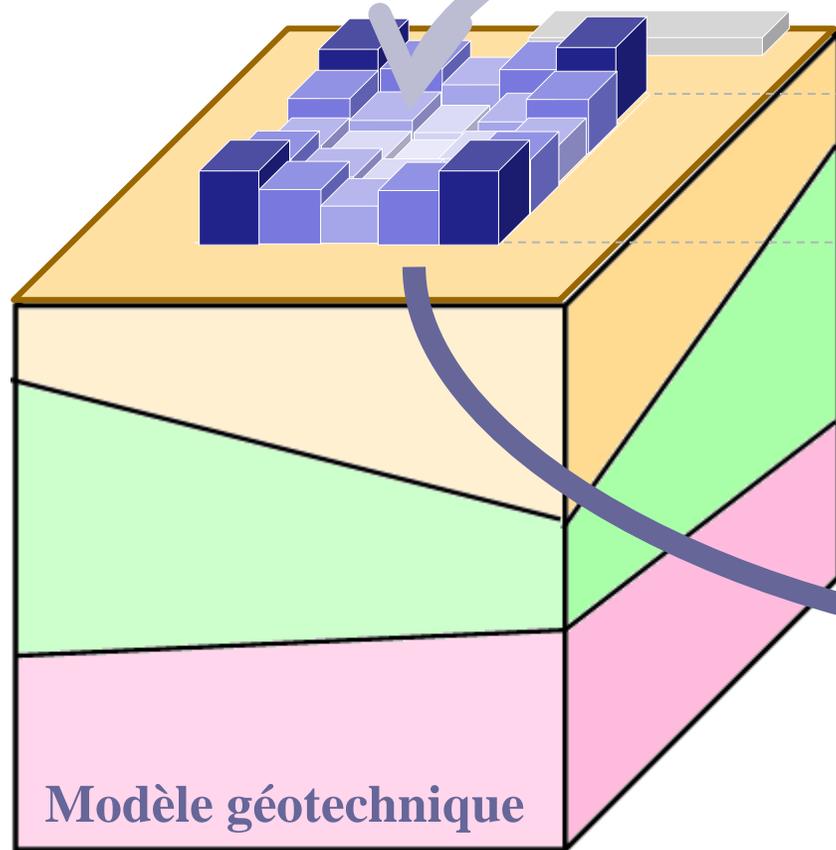
- déflexion plaque
- sollicitations
- réactions
- tassement sol
- Décollement (o/n)
-
- coefficient réaction

w_i
 M_x, M_y, T
 r_i
 s_i

$$k_i = r_i / s_i$$

- calage $k(w)$ ou $k(M)$

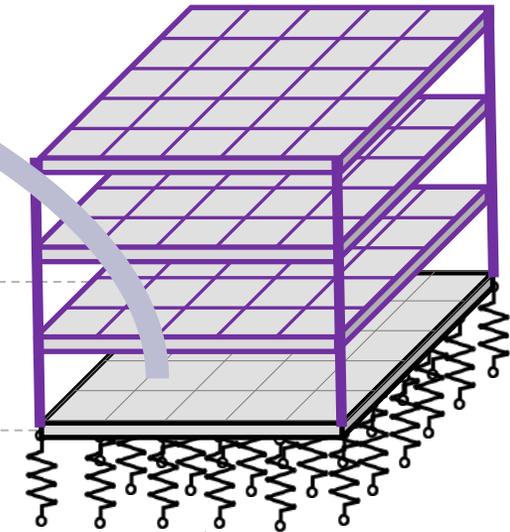




*Centrale nucléaire Karun
(Iran, 1979)
Radier double 103 m x 155 sur
appuis antisismiques
Épaisseur 2,7 m*



Modèle de structure



Tour Majunga - La Défense (2011 – 2014)



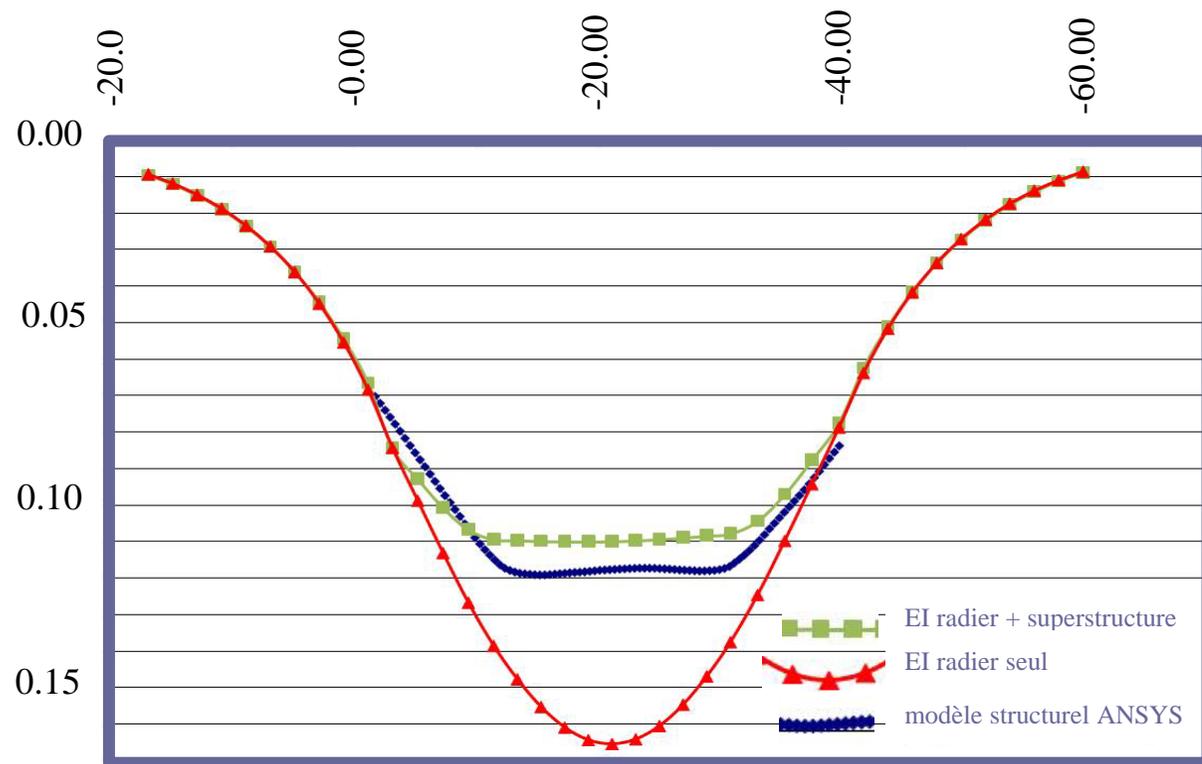
Architecte Jean-Paul Viguier



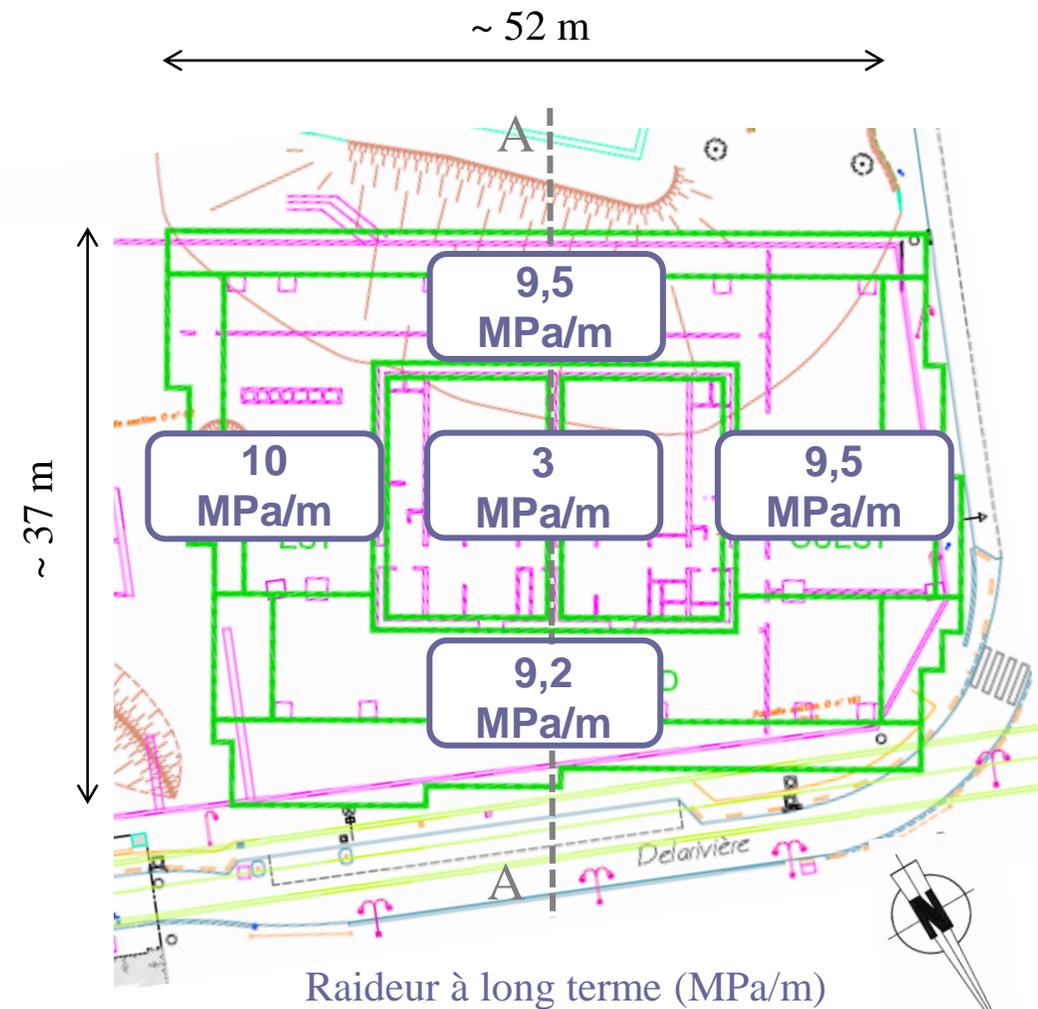
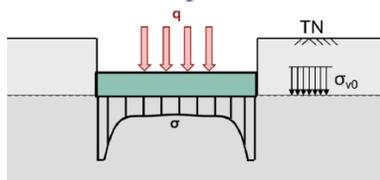
Lefèvre C. et Simon B. 2010

Tour Majunga - La Défense (2011 – 2014)

Coupe A - A



Prise en compte excavation

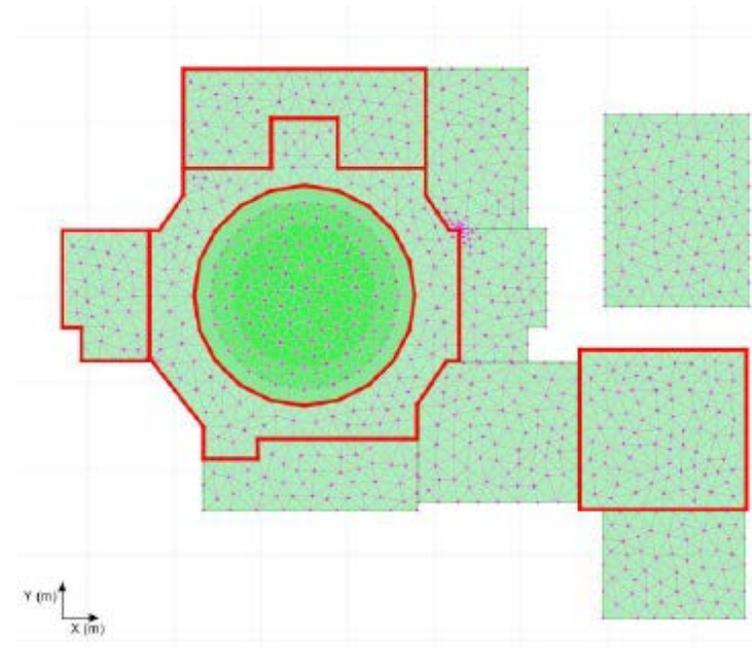
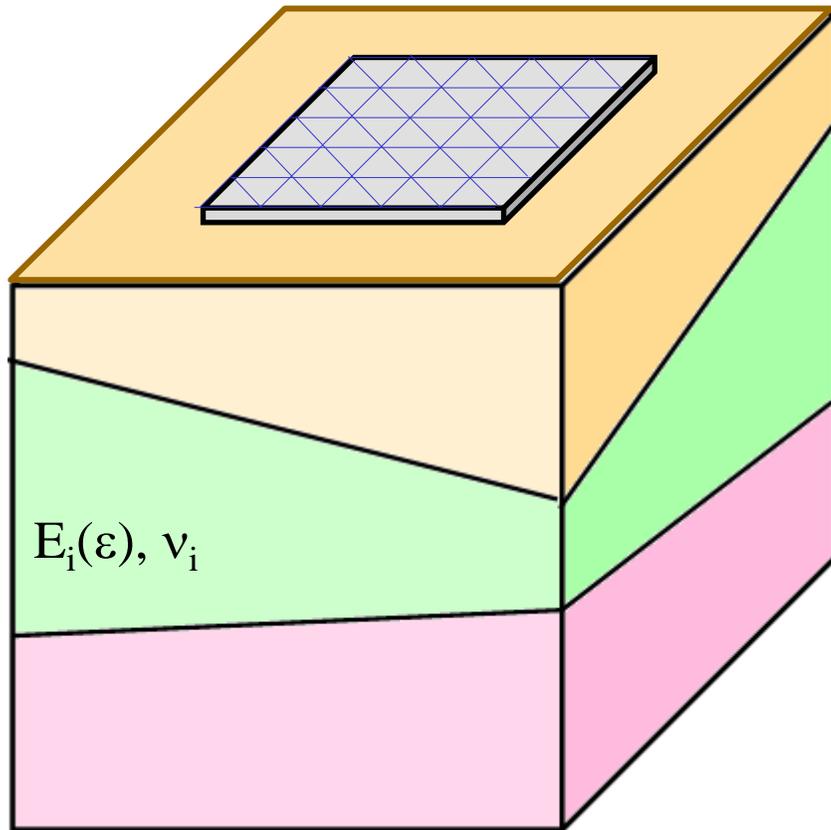


Lefèvre C. et Simon B. 2010

Décomposer massif et fondation

... sous sollicitations de service

- Développements récents

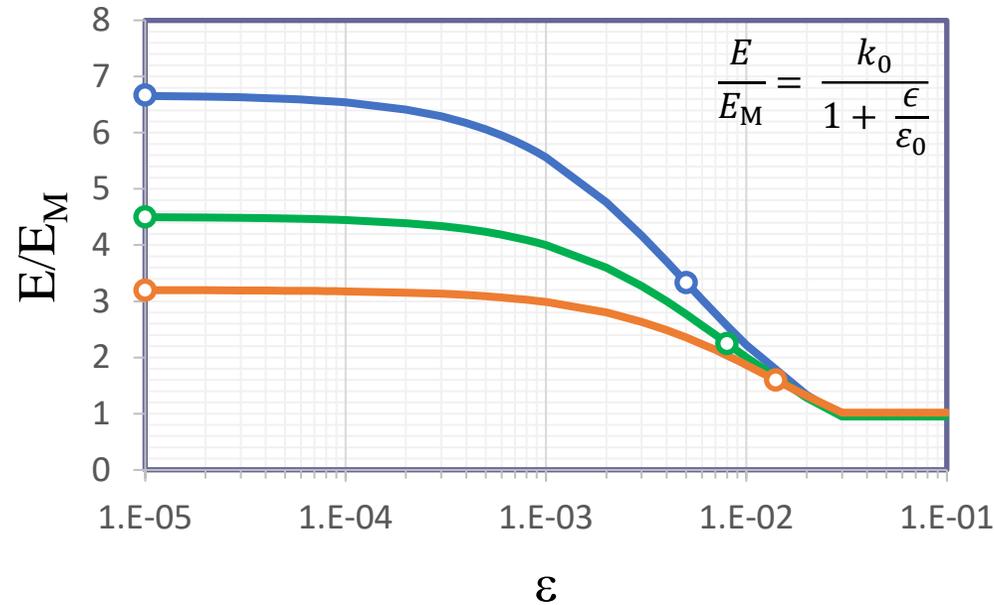


- Capacité affinée de maillage
- Stratigraphie définie par sondages
- Solution du multicouche élastique (Burmister)

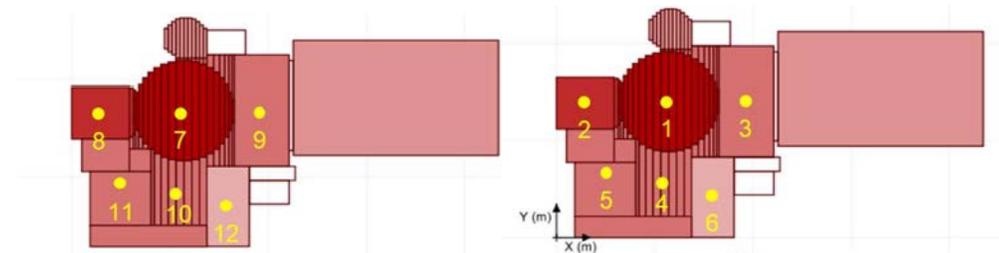
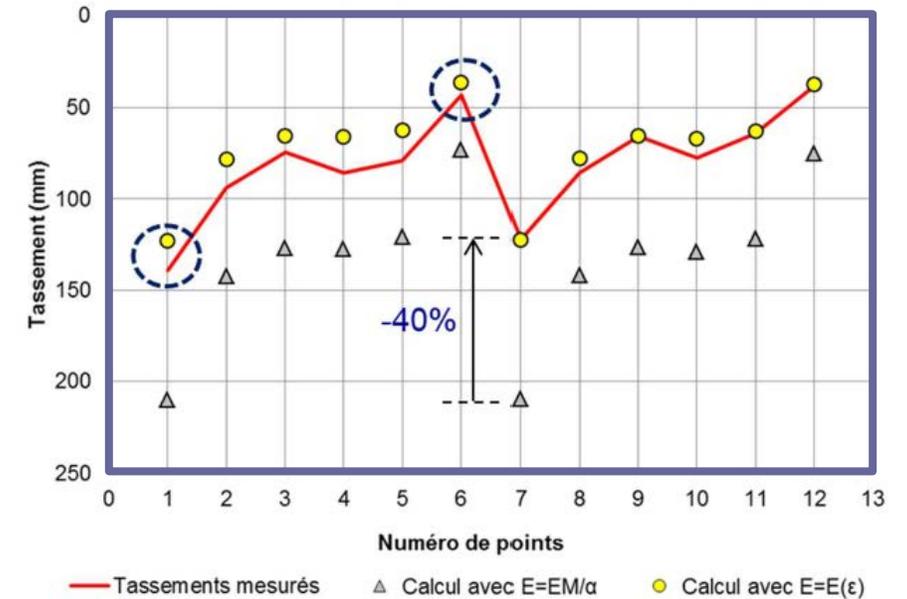
Décomposer massif et fondation

... sous sollicitations de service

- Développements récents
 - Loi de dégradation calée sur paramètres pressiométriques



	Type	k_0 (-)	ϵ (%)
Sables et graves Roche très fracturée	1	6.67	0.5
Sables, graves serrées Limons	2	4.5	0.8
Argiles, argiles surconsolidées Roche peu fracturée	3	3.2	1.4



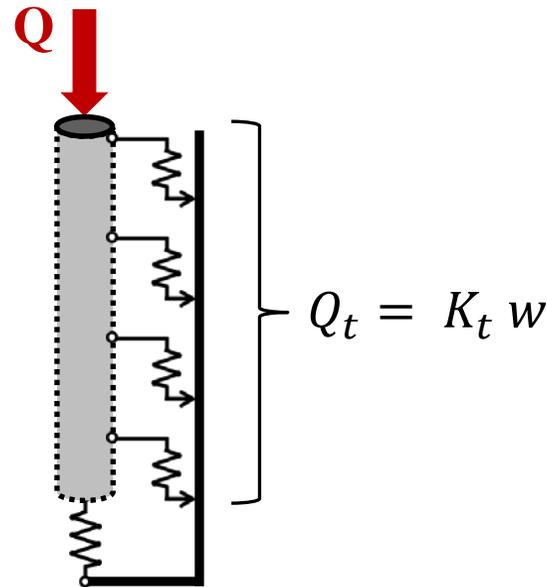
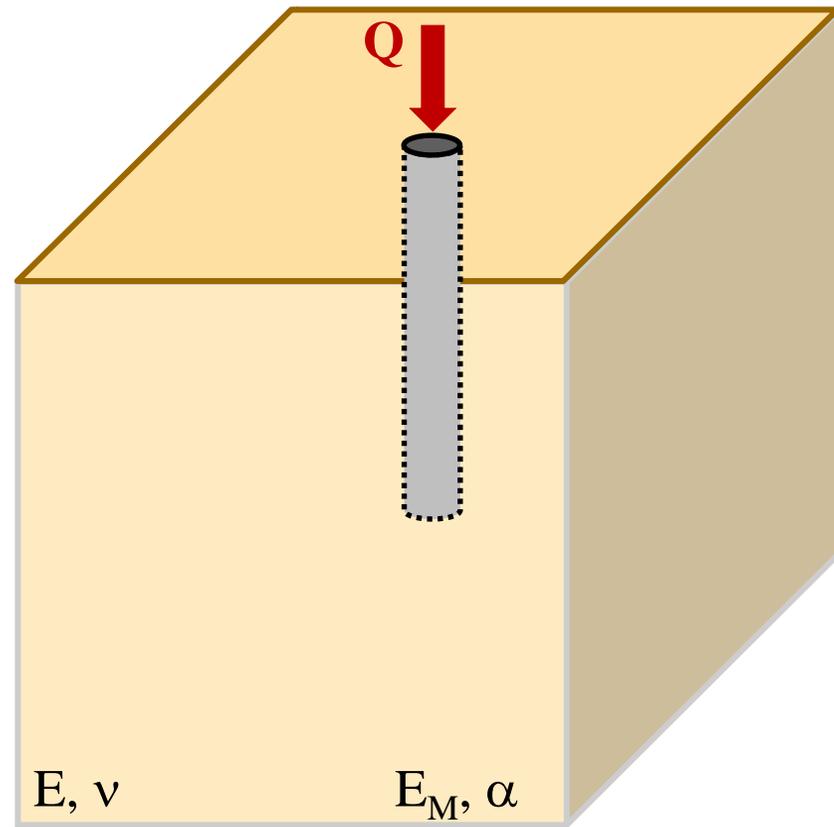
PN ARSCOP 2018

Décomposer massif et fondation

... sous sollicitations de service

- Élément de fondation profonde sous chargement axial

$[E_p, S_p]$



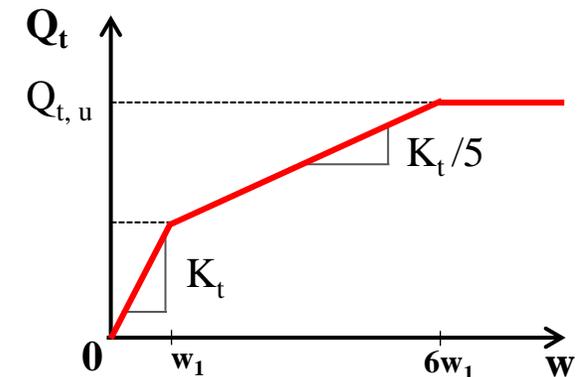
$$Q_p = K_P w_p$$

- Élasticité (R. Frank)

$$K_t = G \frac{2\pi}{1 + \ln \frac{L}{B}}$$

- Semi-empirique (L. Ménard)

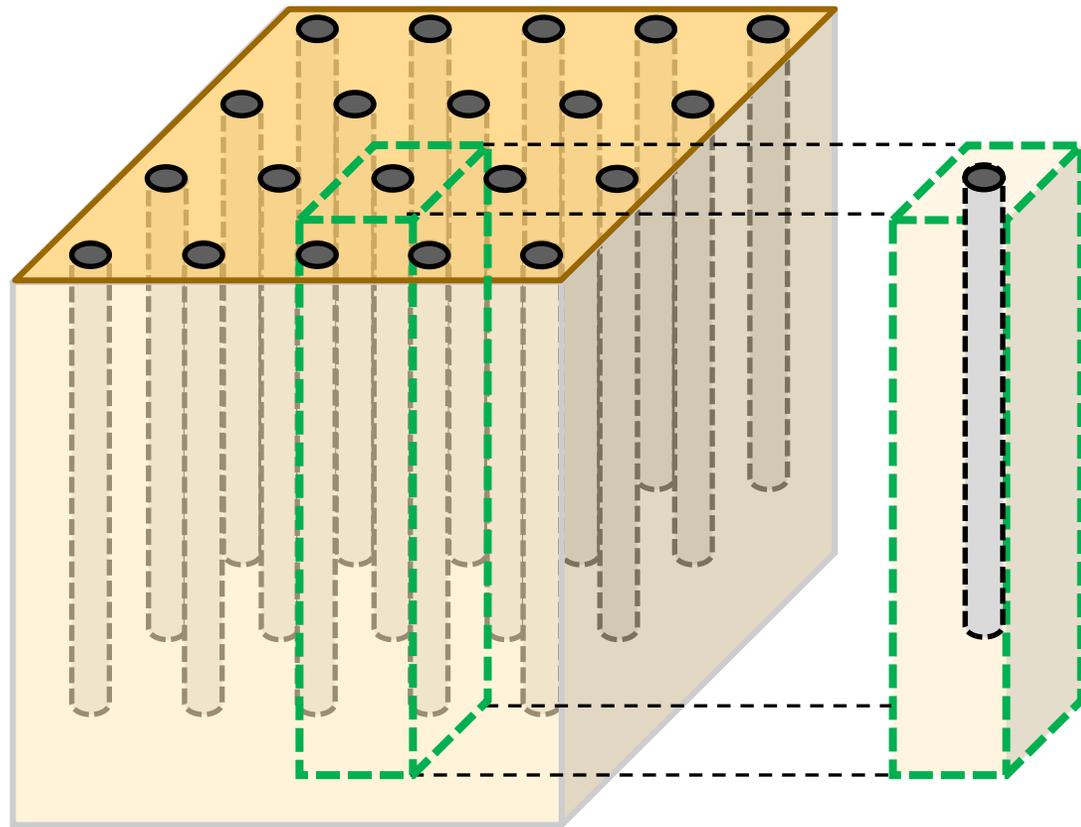
$$K_t = 2\pi E_M$$



Décomposer... un réseau

... le modèle biphasique simplifié

Décomposer un réseau...



... le modèle biphasique simplifié

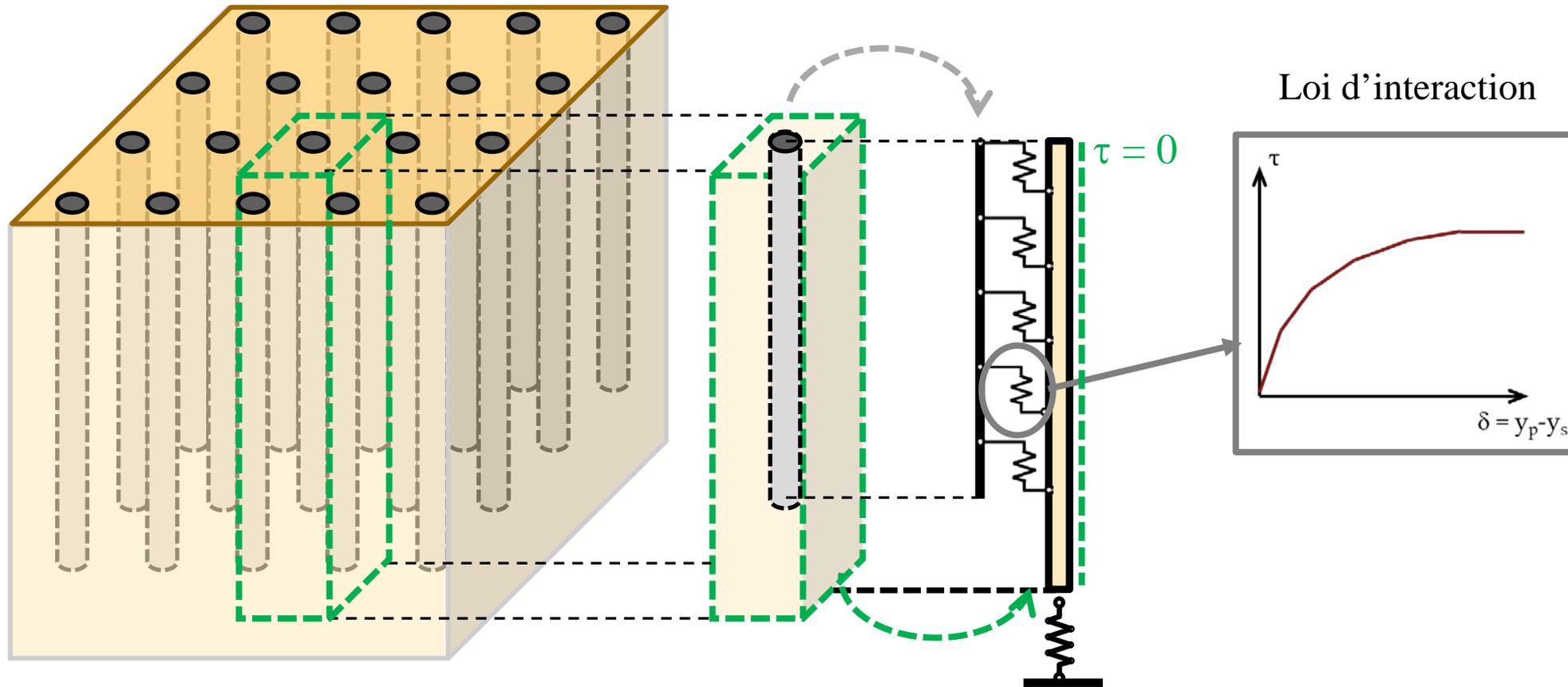


Ménard

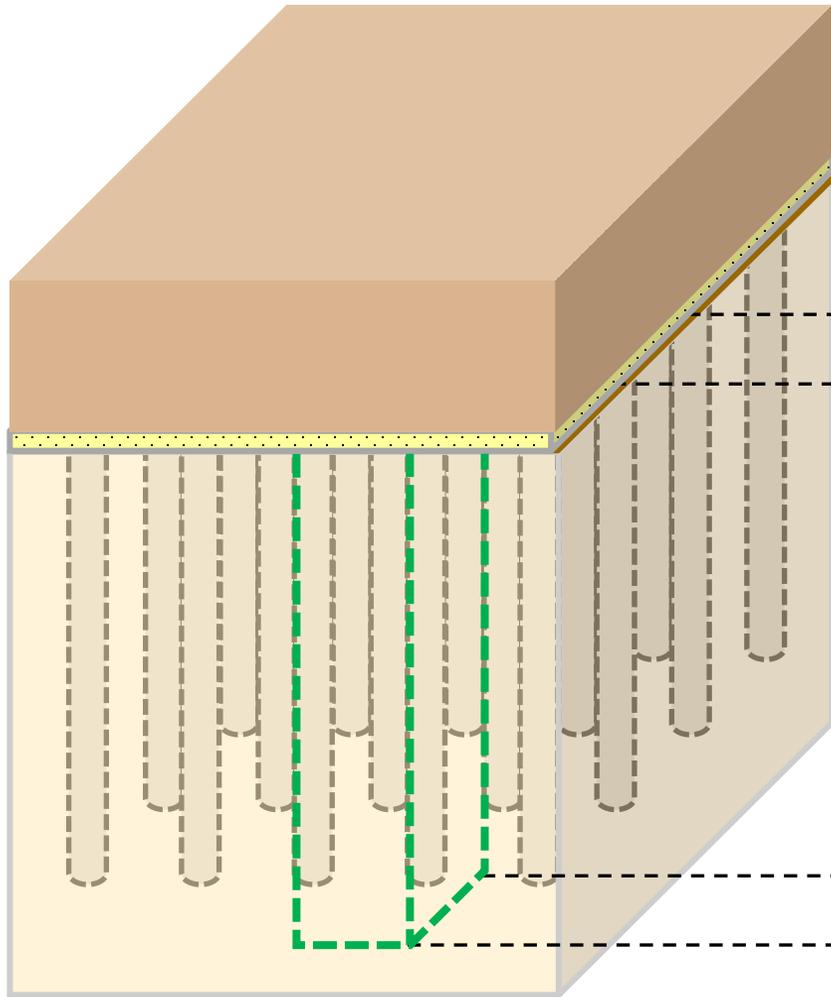
Décomposer un réseau...

Q
... le modèle biphasique simplifié

Domaines
pieu sol



Décomposer un réseau...



Q
Domaines
 pieu sol

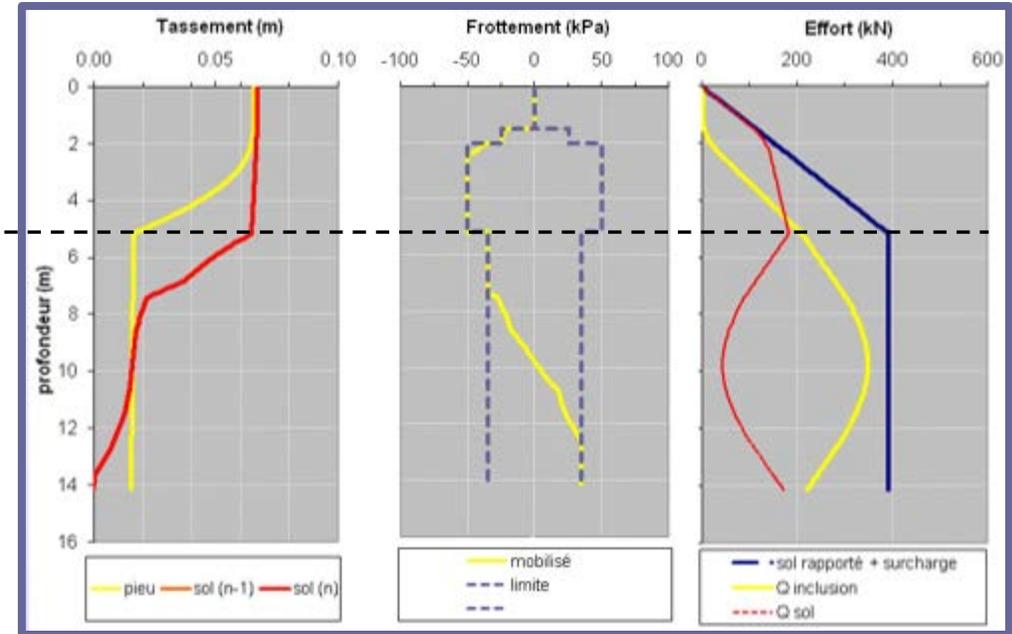
... le modèle biphasique simplifié

Conditions limites en tête

- Charge imposée (remblai)
- Ou Déformation imposée

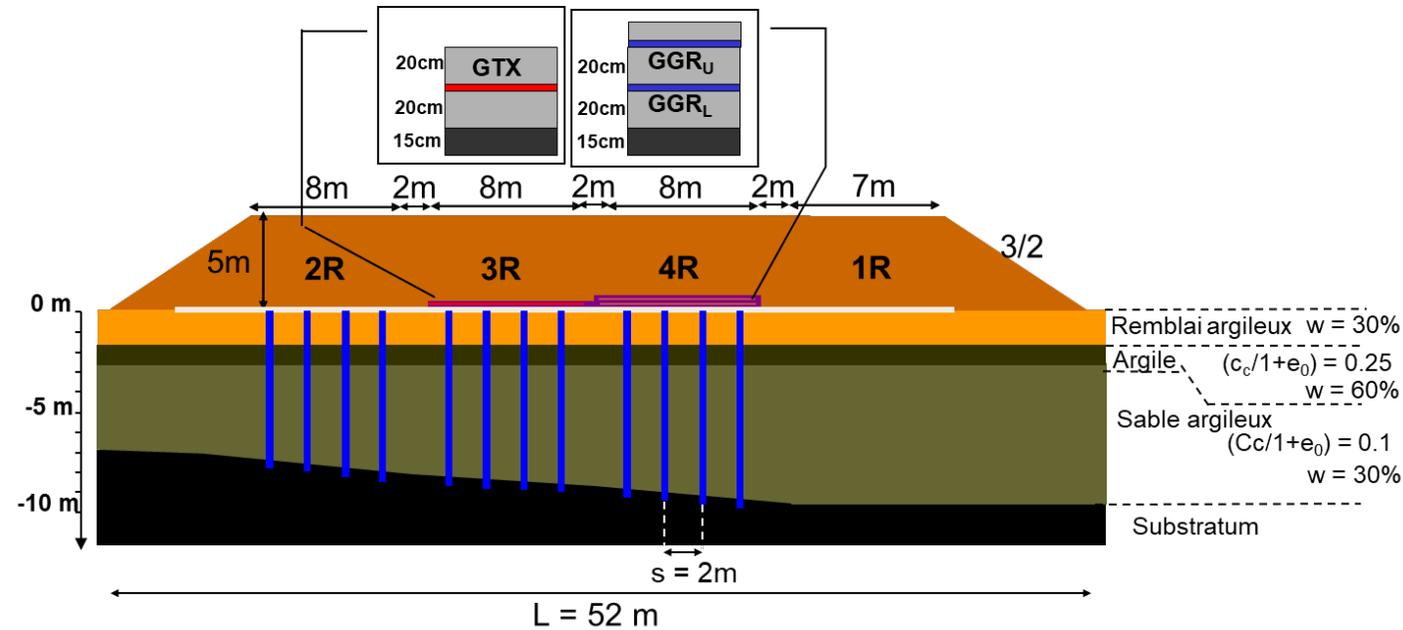
$$Q_p(0) \text{ et } Q_s(0)$$

$$y_p(0) = y_s(0)$$

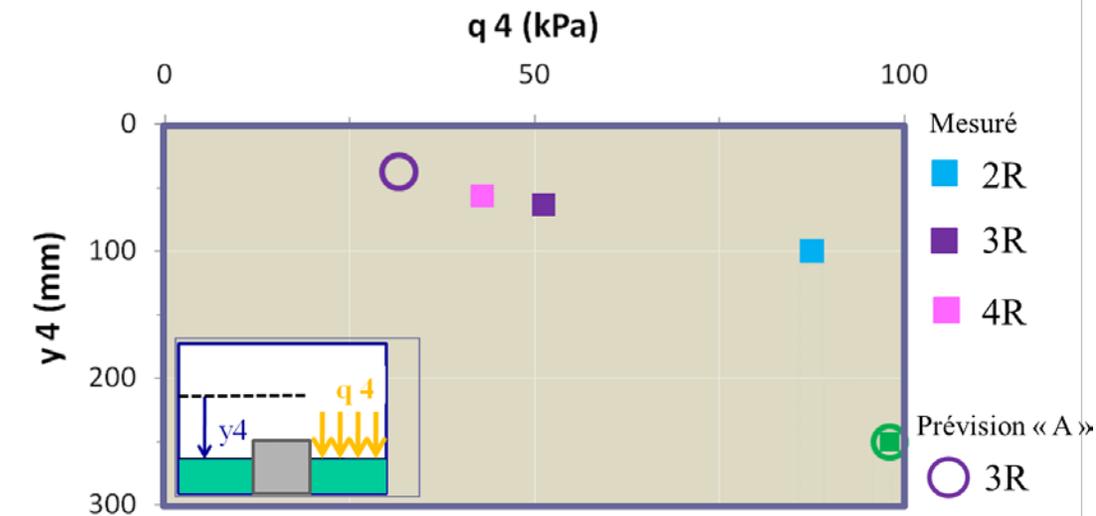
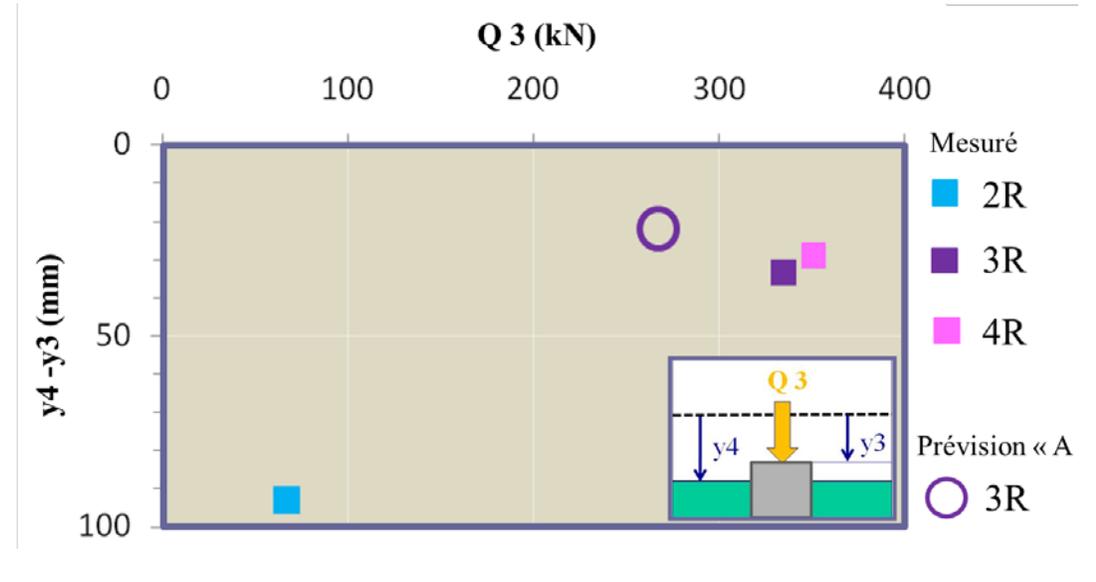


Décomposer un réseau...

- PN ASIRI – plots d'essai Chelles (2008)



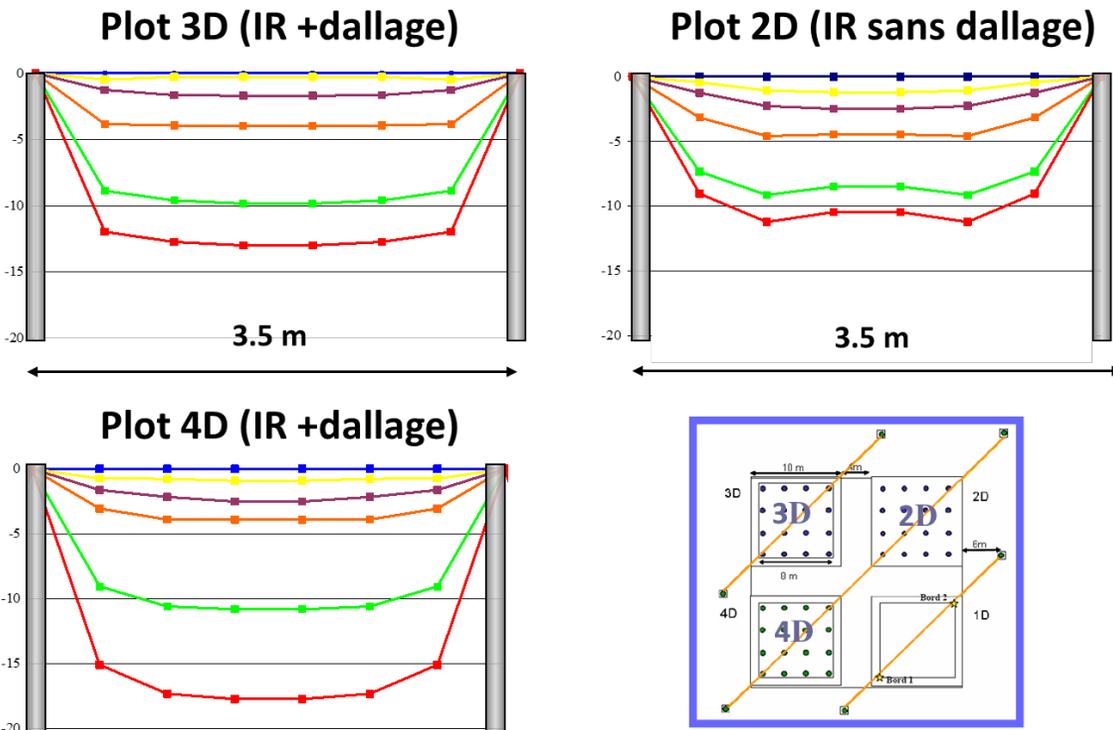
... le modèle biphasique simplifié



Décomposer un réseau...

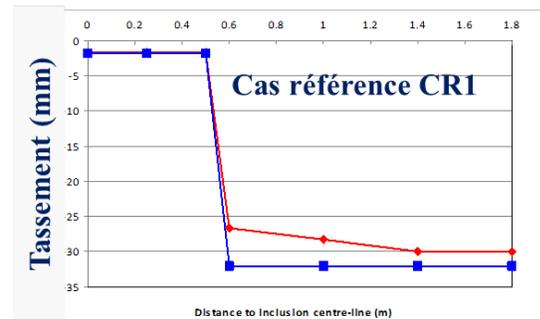
... le modèle biphasique simplifié

- Déformée en U mise en évidence par les expérimentations et modélisations ASIRI
 - le tassement considéré **uniforme** dans le **domaine sol** est une hypothèse acceptable

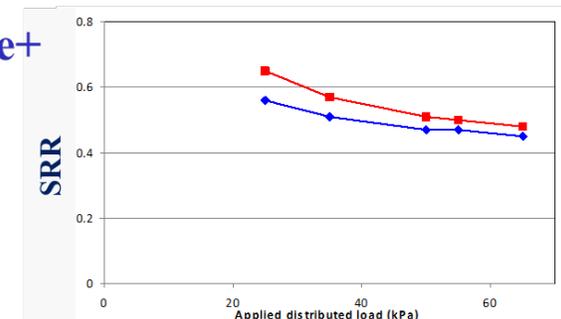
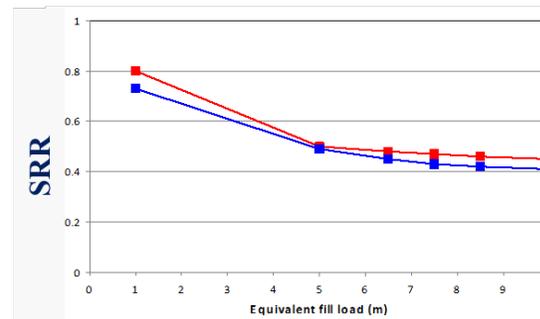
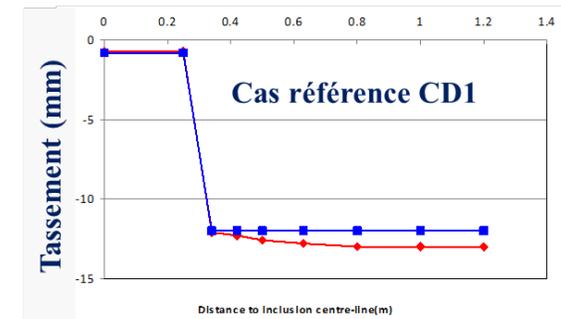


Plots d'essai St Ouen (2006)

- Cas remblai



- Cas dallage



Laurent Y. (2002)

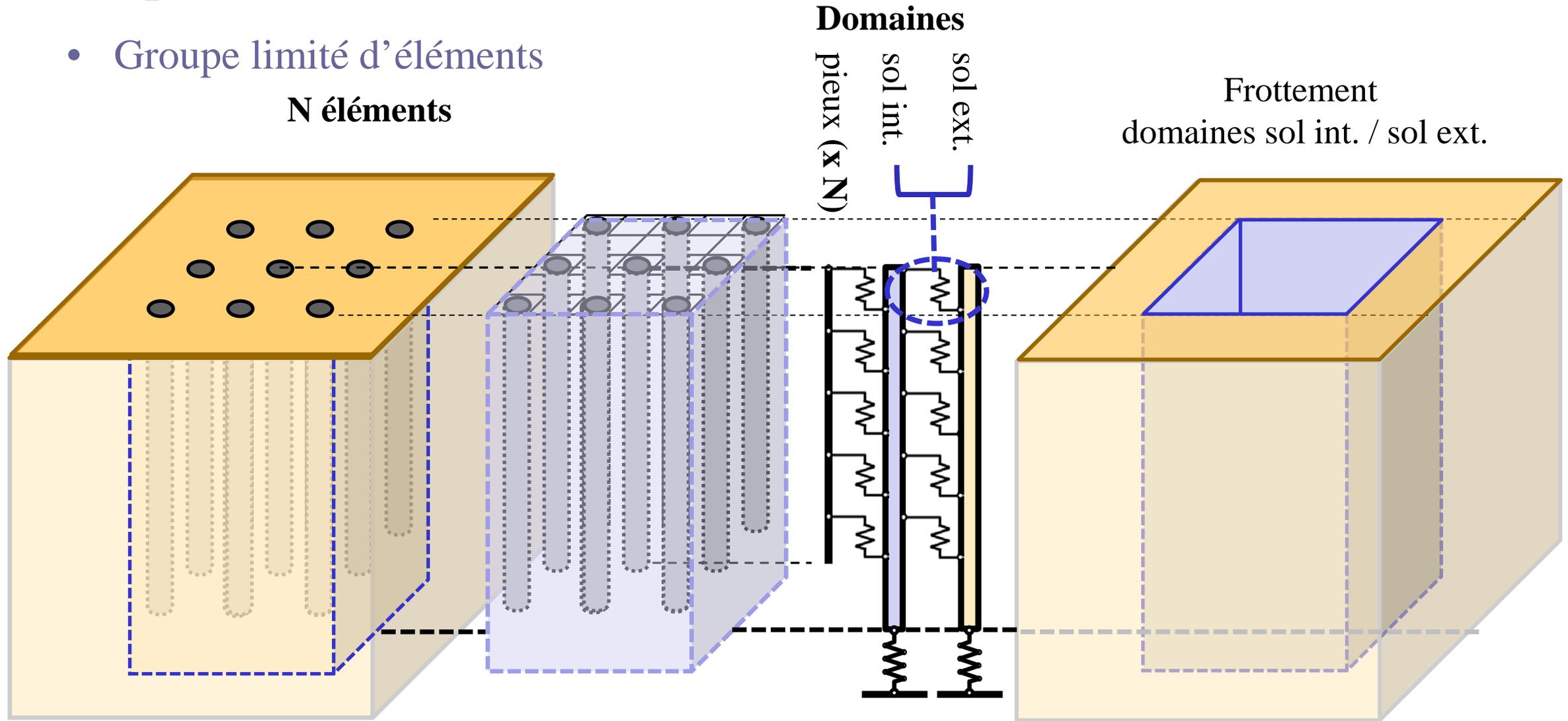
Décomposer... un réseau fini

... le modèle biphasique étendu

Décomposer un réseau fini...

- Groupe limité d'éléments
N éléments

... le modèle biphasique **étendu**

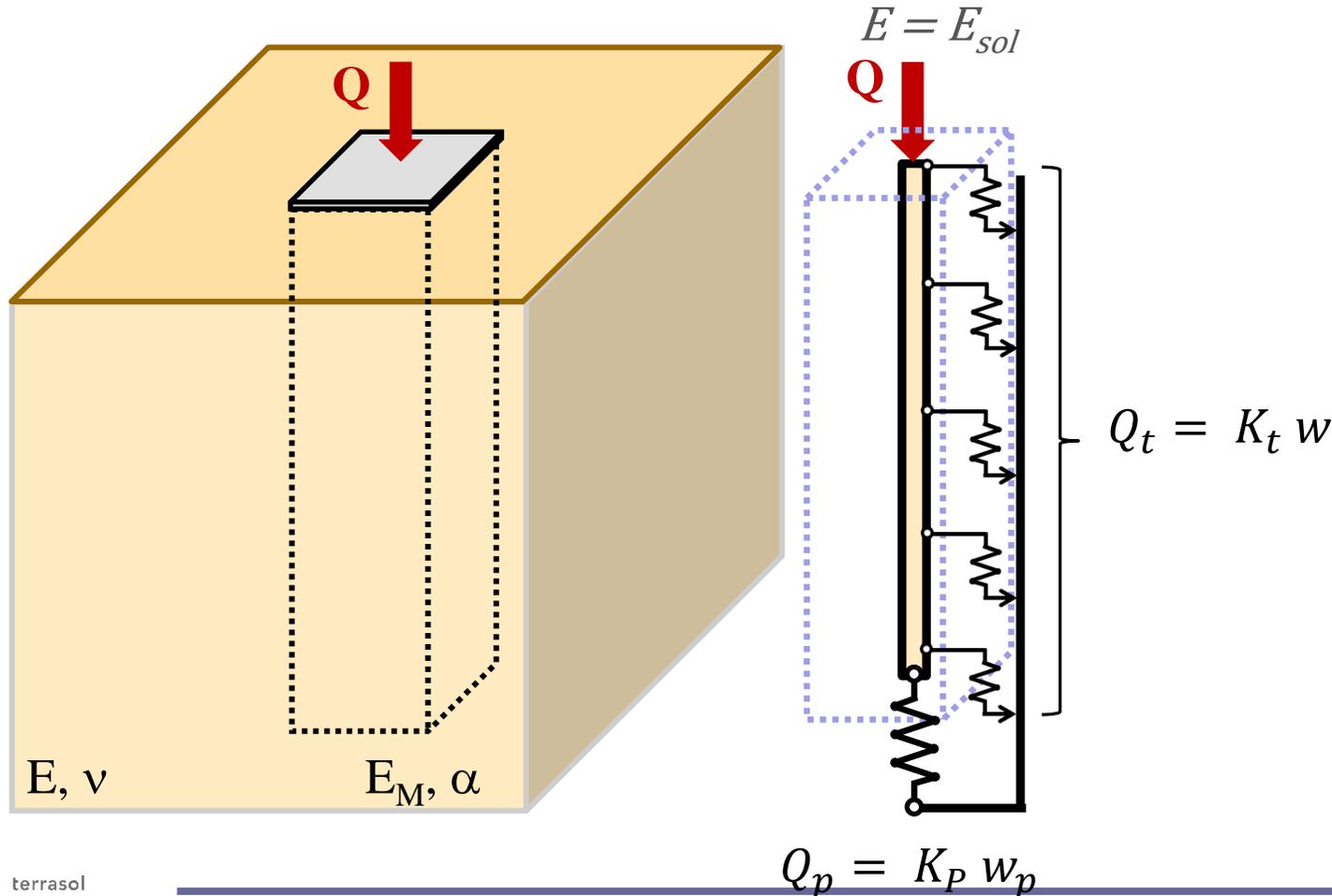


Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu

- Fondation isolée sous chargement axial

Pieu fictif équivalent



Frottement en périphérie du pieu fictif

- Élasticité (R. Frank)

$$K_t = G \frac{2\pi}{1 + \ln \frac{L}{B}}$$

- Semi-empirique (L. Ménard)

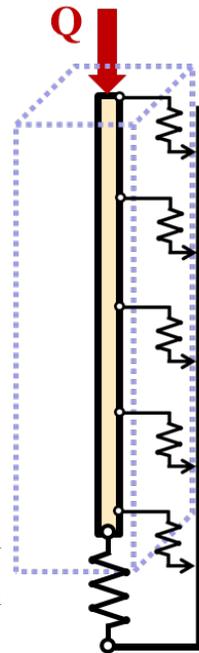
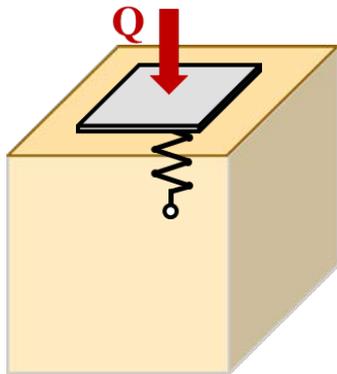
$$K_t = 2\pi E_M$$

Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu

- Fondation isolée sous chargement axial

Semelle rigide 3 m x 3 m ($Q = 1800$ kN)



- Elasticité $E = 20$ MPa $\nu = 0$

(formule semelle rigide) $s = 0.026$ m
 (tasplaq) $s = 0.025$ m

$K_t = 23,7$ MN/m

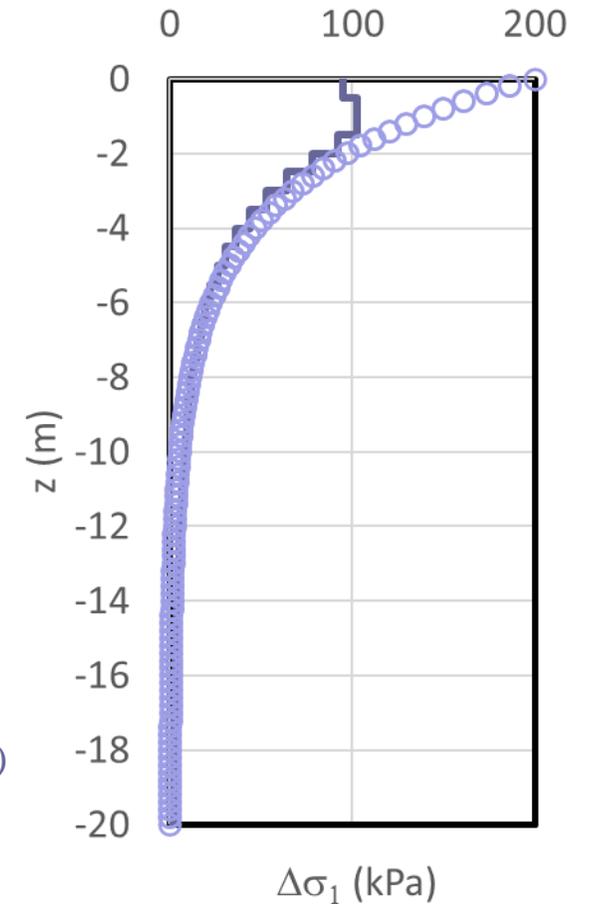
$s = 0.028$ m (taspie+ G)

- Semi-empirique $E_M = 3.8$ MPa $\alpha = 0.5$

$s = 0.025$ m

$K_t = 23,9$ MN/m

$s = 0.028$ m (taspie+ E_M)

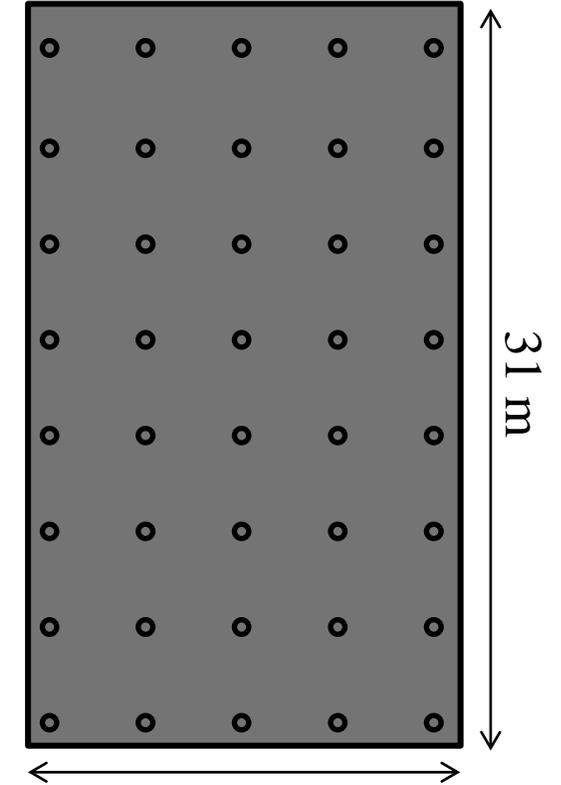


— Semelle ○ Pieu fictif

Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu

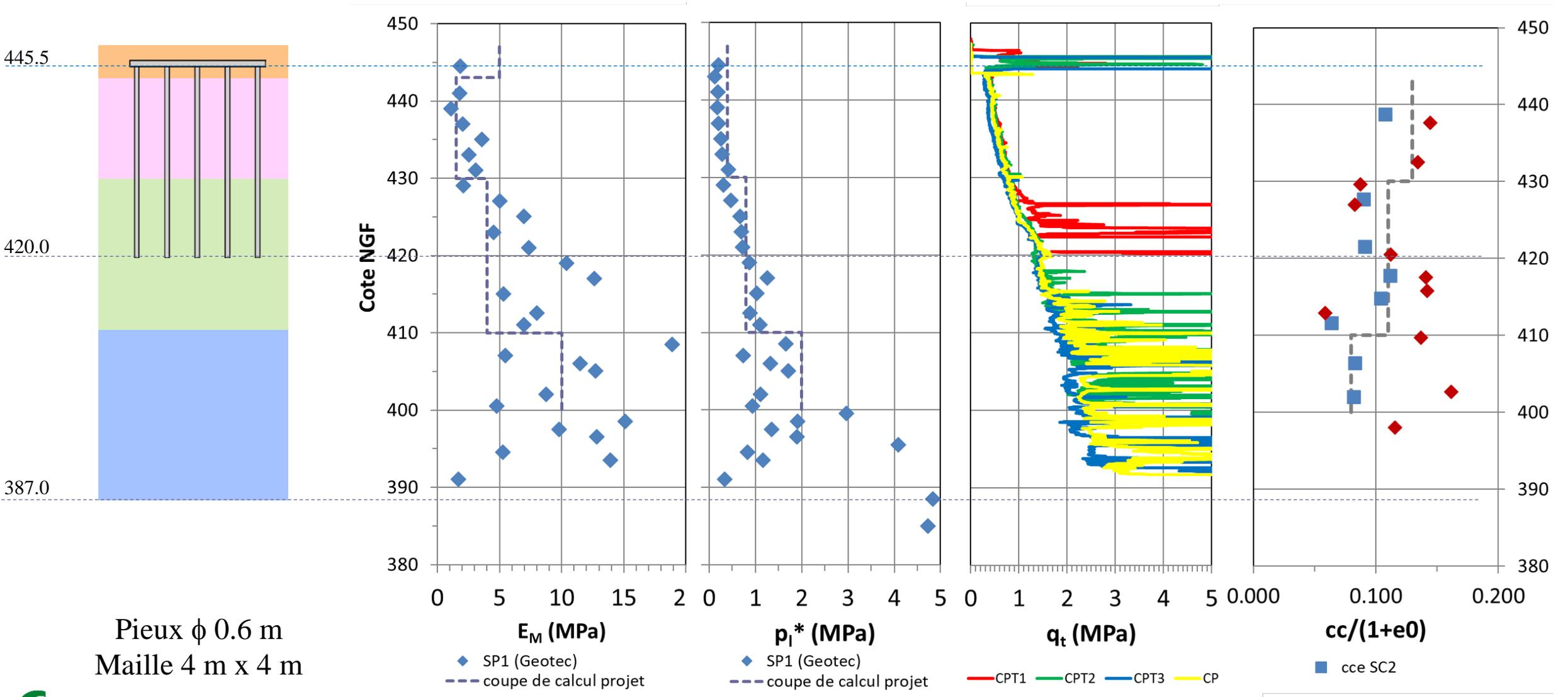
- Fondation mixte (Annecy)



18 m
Radier $H = 0.6$ m
Pieux $\phi 0.6$ m
Maille 4 m x 4 m

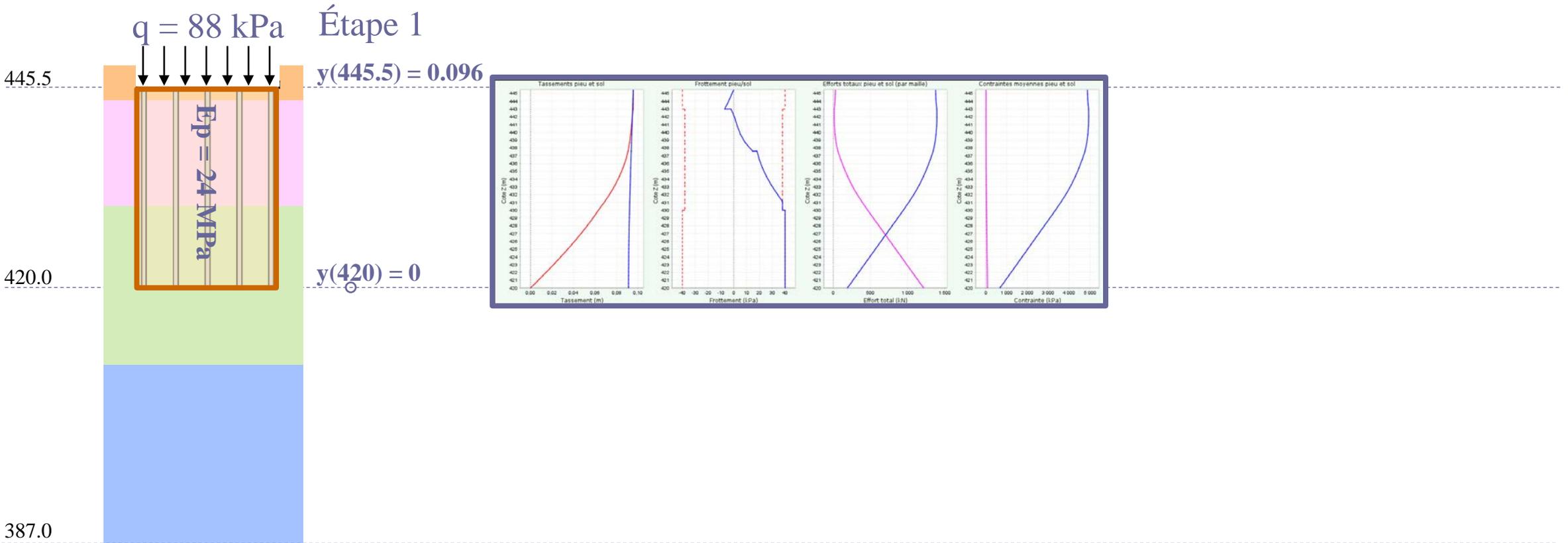
Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu



Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu



$$G + Q = 49 \text{ MN}$$

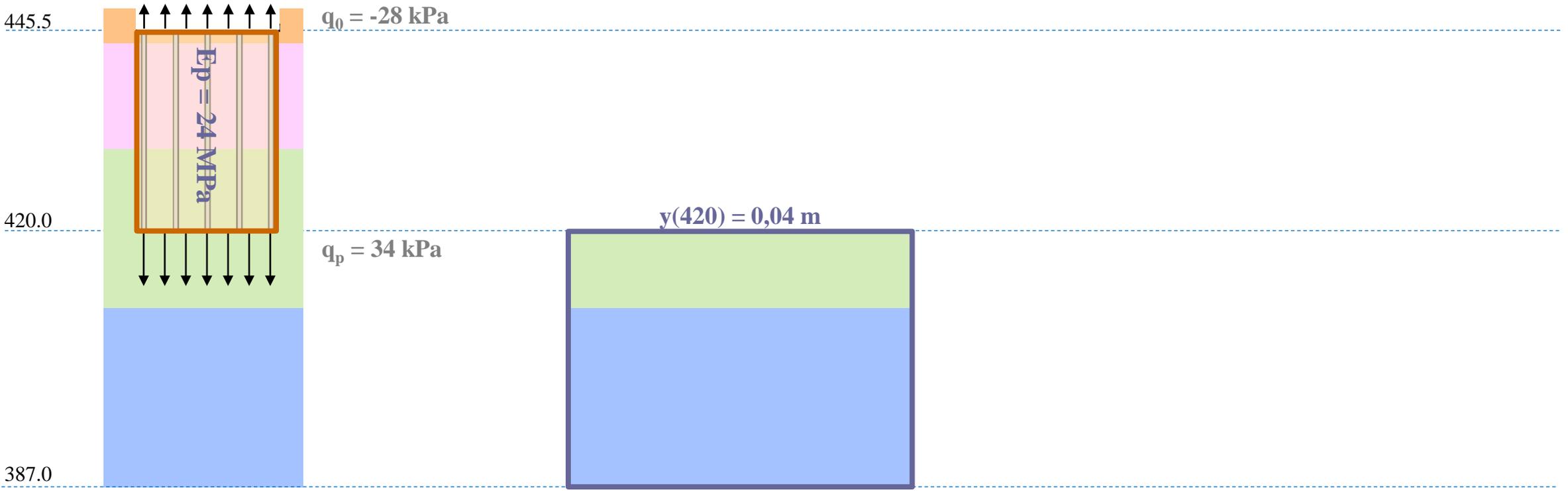
(q = 88 kPa)

Pieux ϕ 0.6 m
Maille 2 m x 2 m

Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu

Étape 2



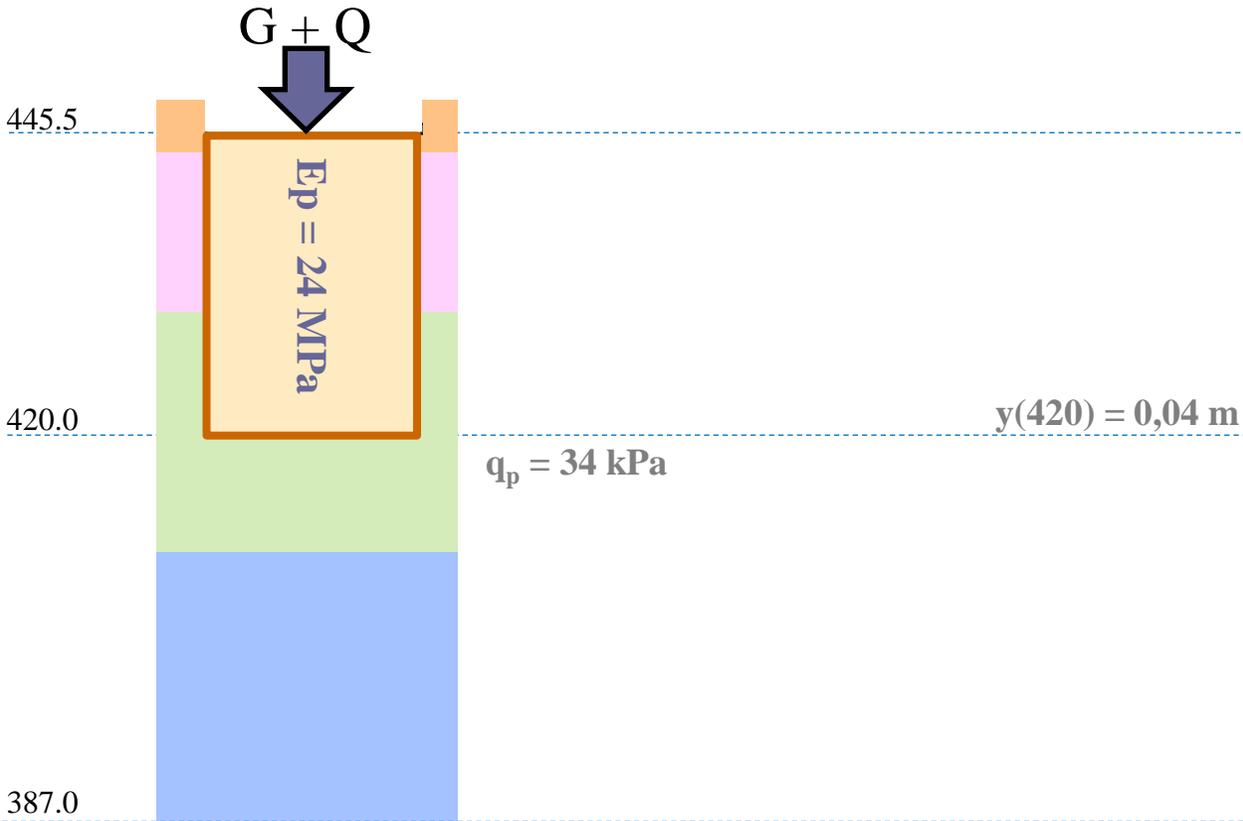
$$G + Q = 49 \text{ MN}$$

($q = 88 \text{ kPa}$)

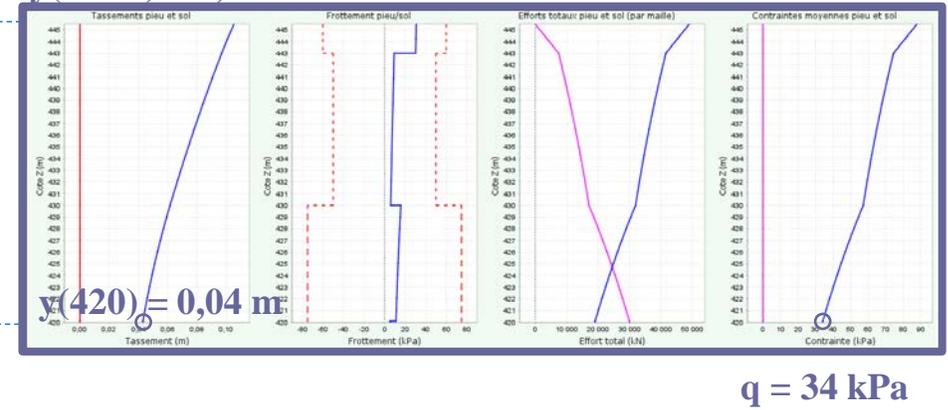
Pieux $\phi 0.6 \text{ m}$
Maille $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu



Étape 3
 $y(445.5) = 0,105 \text{ m}$

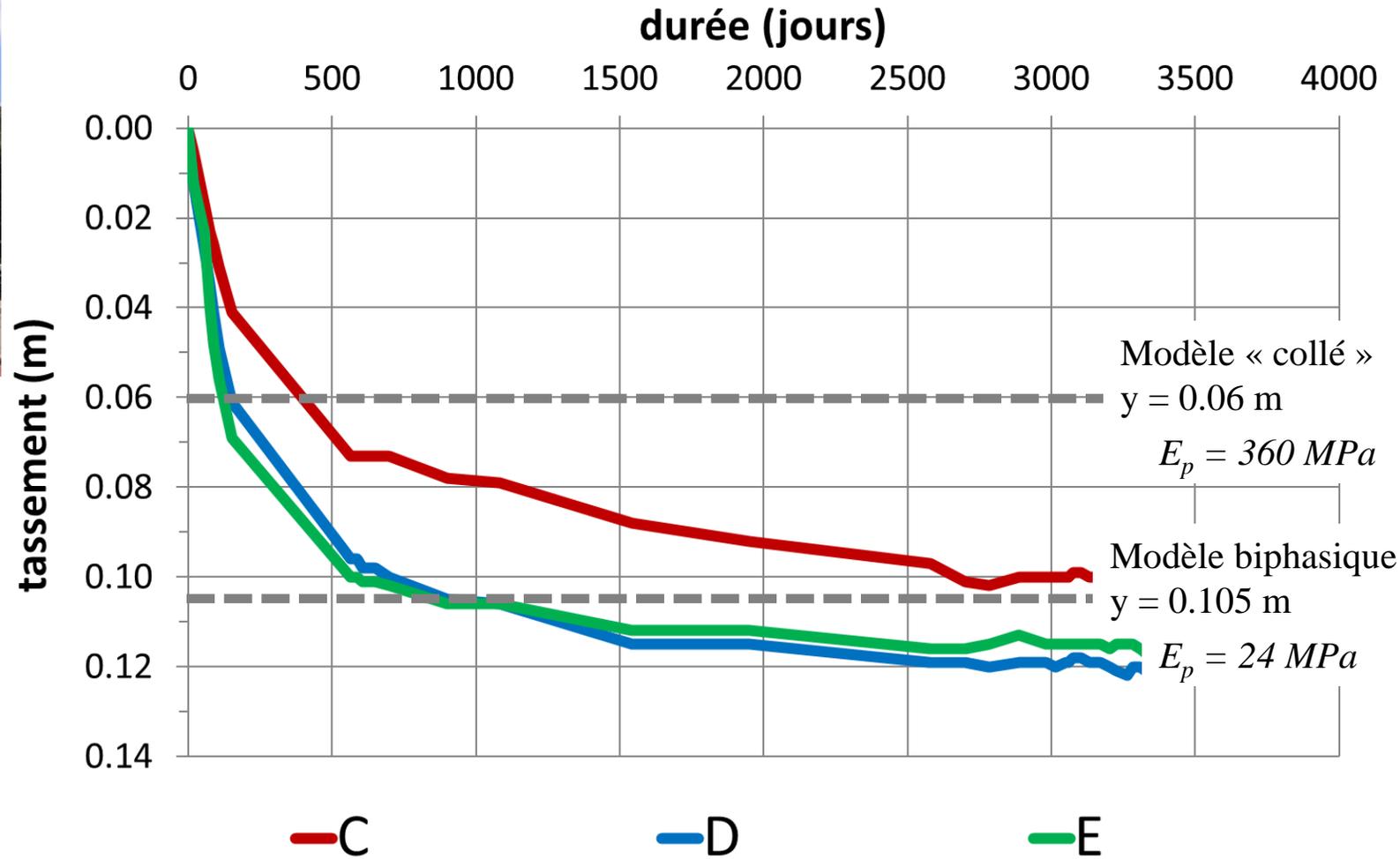
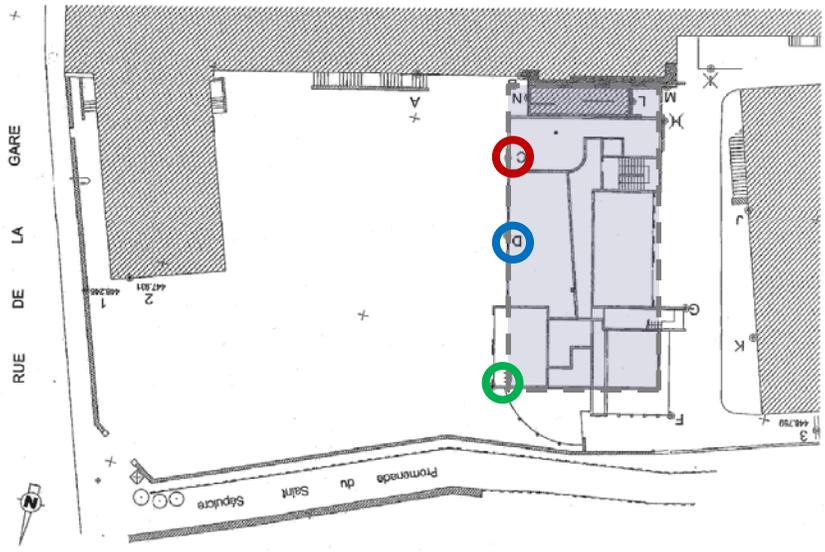


$G + Q = 49 \text{ MN}$
 $(q = 88 \text{ kPa})$

Pieux $\phi 0.6 \text{ m}$
 Maille $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

Décomposer un réseau fini...

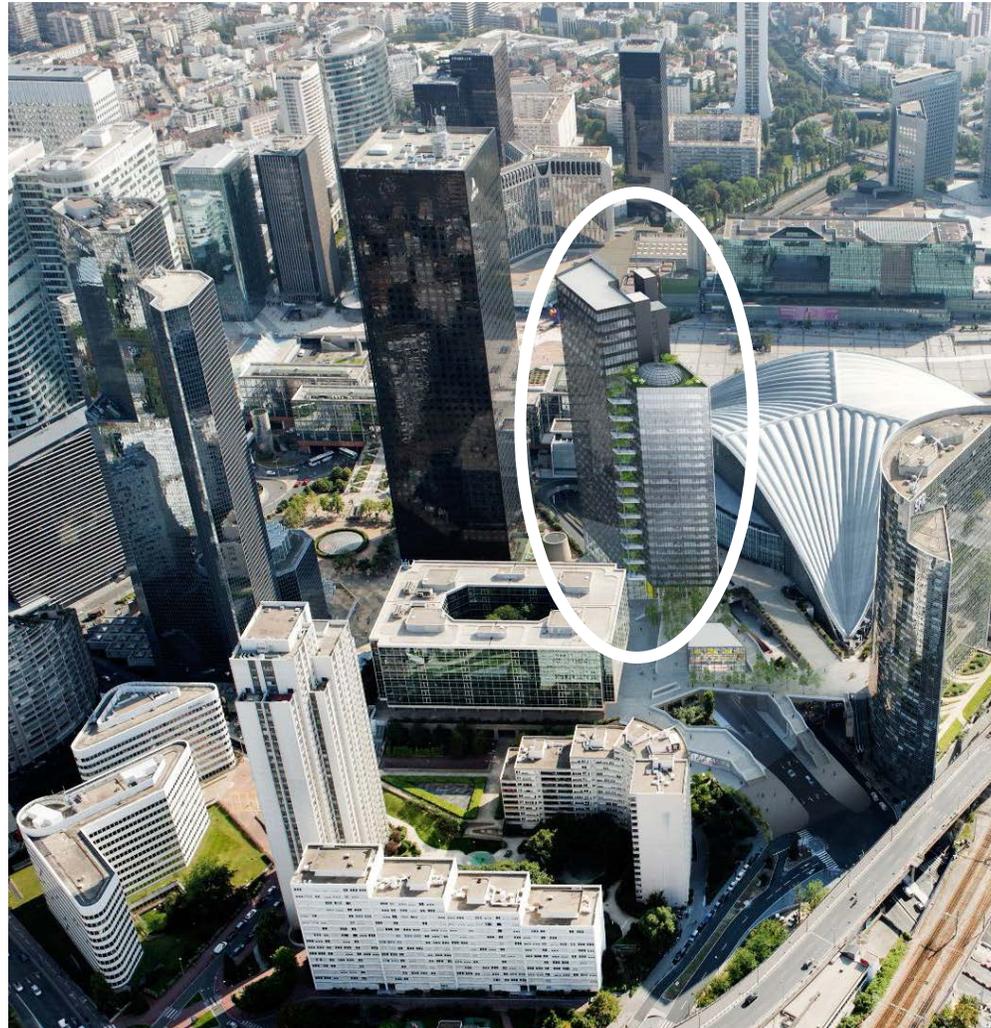
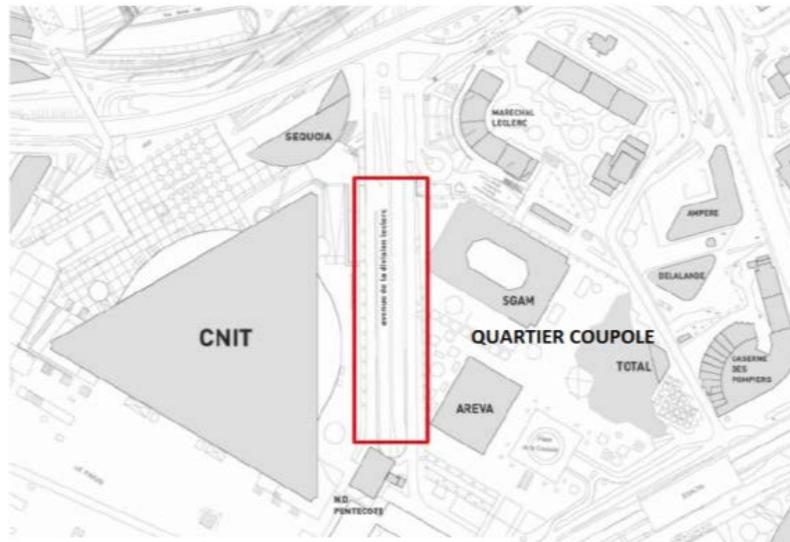
... le modèle biphasique étendu



Décomposer un réseau **fini**...

... le modèle biphasique **étendu**

- Tour Trinity - La Défense

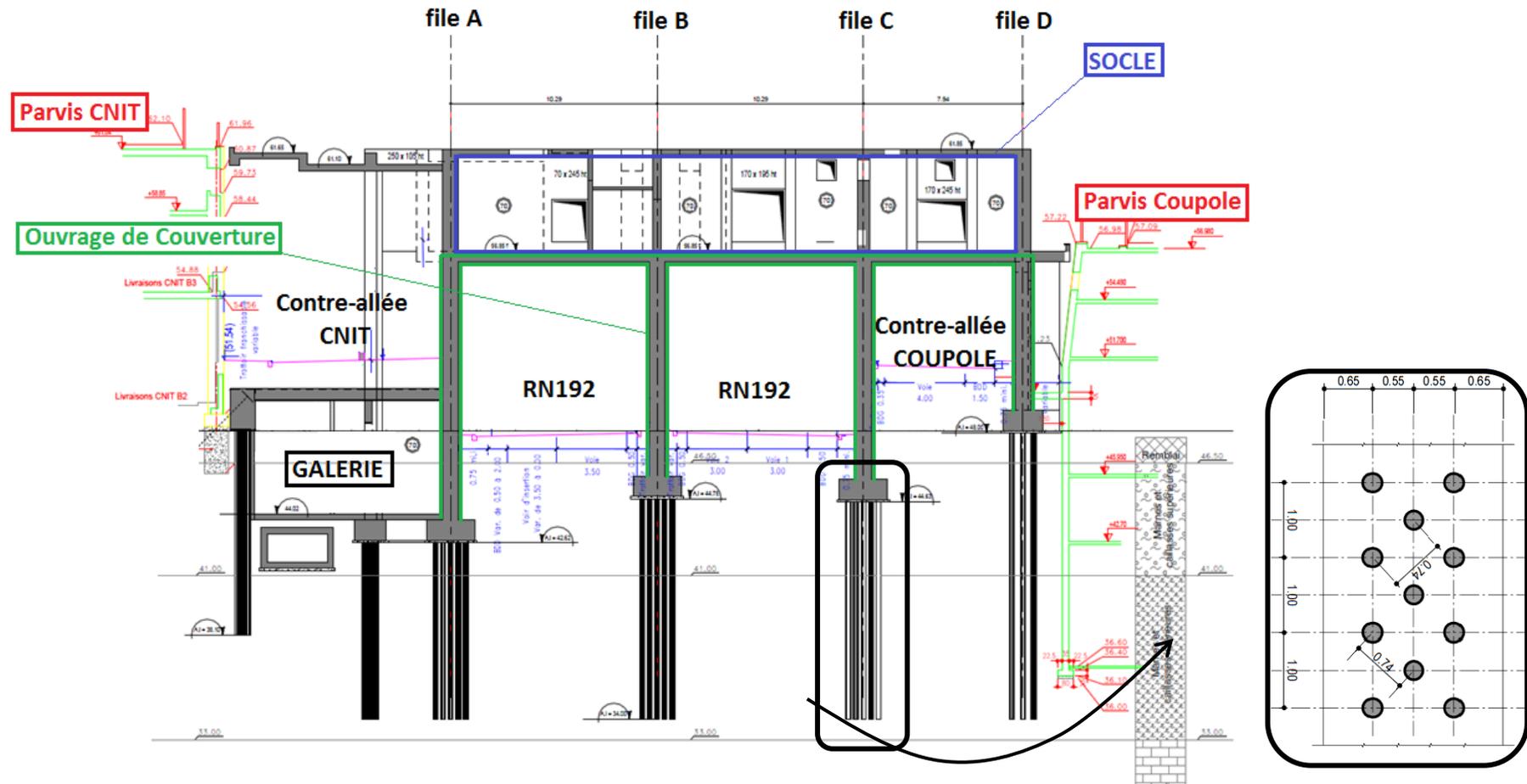


Hauteur 120 m

Cazes E., Bergère A., Cuira F., Simon B. 2016

Tour Trinity - La Défense

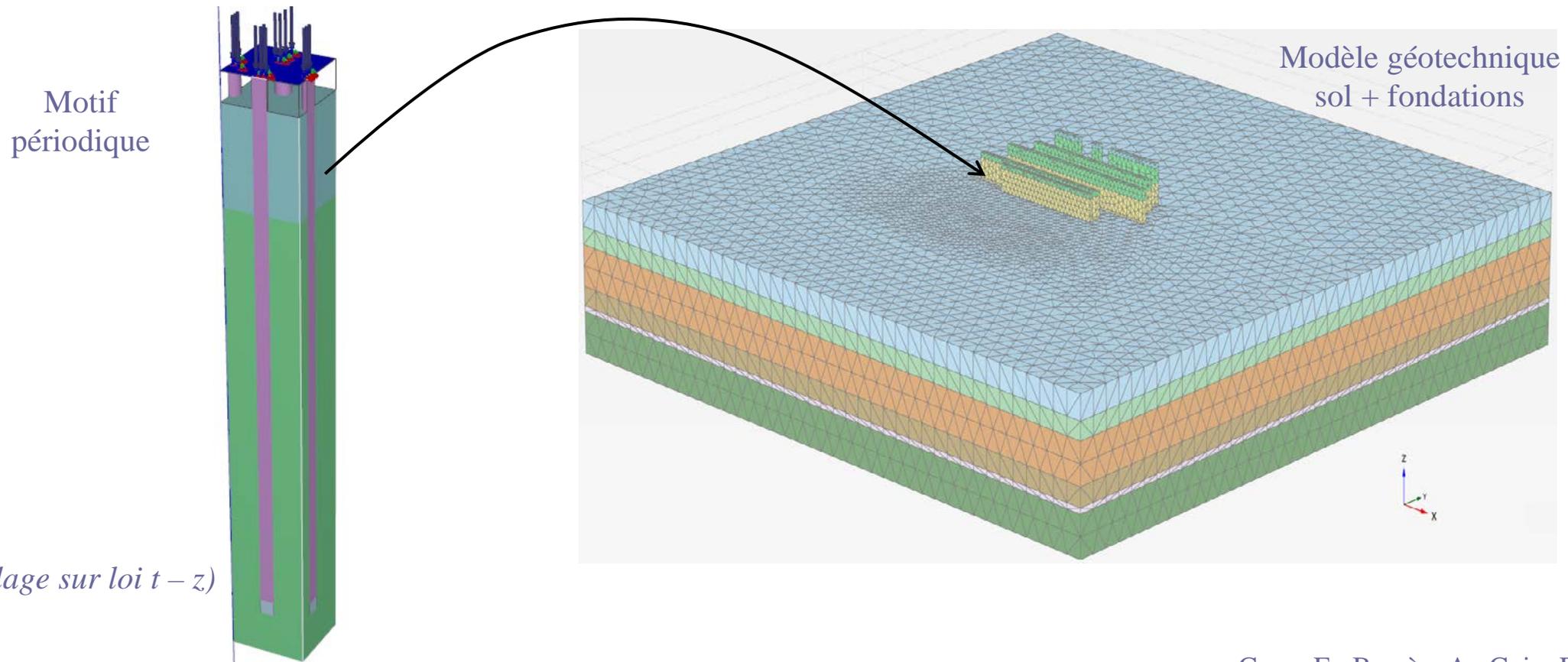
- Fondation sur massifs de micro-pieux



Cazes E., Bergère A., Cuirra F., Simon B. 2016

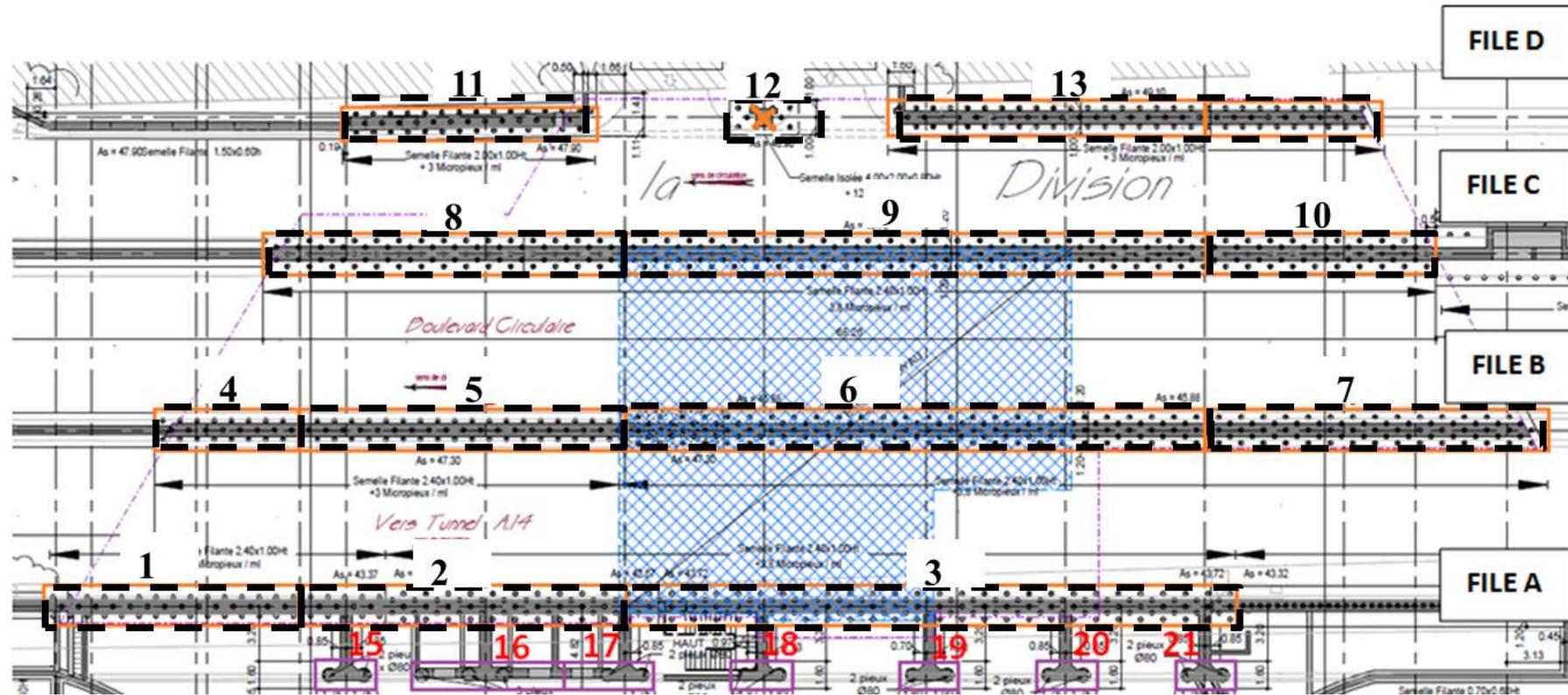
Tour Trinity - La Défense

- Modèle EF 3D de la fondation et son environnement
 - homogénéisation des motifs périodiques



Tour Trinity - La Défense

- Modèle EF 3D de la fondation et son environnement
 - décomposition de l’emprise de fondation en 13 massifs “homogénéisés”



Tour Trinity - La Défense

- Modèle EF 3D de la fondation et son environnement
 - établit la **matrice de souplesse** entre les 13 massifs → base du modèle structure SETEC TPI

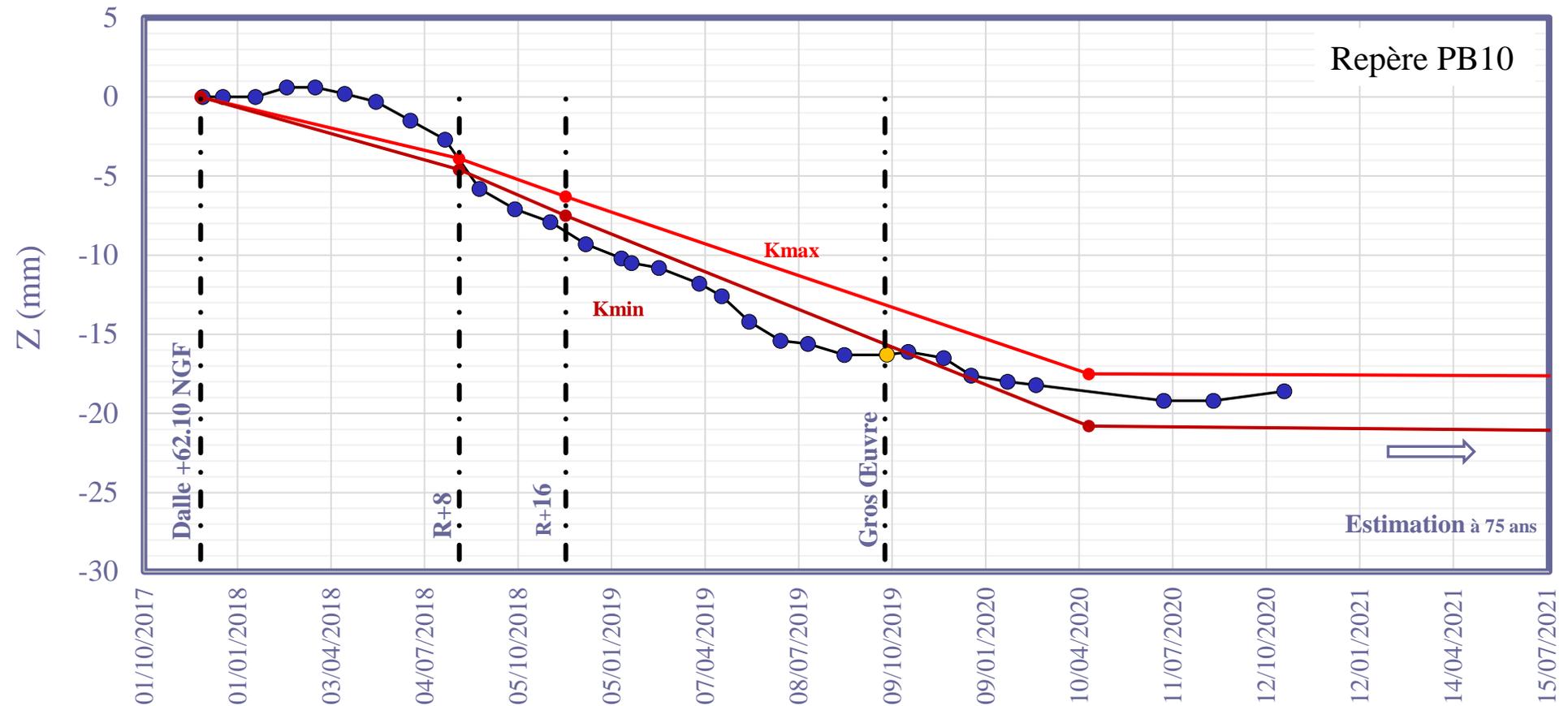
$\tau_{ij} =$	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5	zone 6	zone 7	zone 8	zone 9	zone 10	zone 11	zone 12	zone 13
zone 1	1.54E-07	3.02E-08	7.58E-09	3.28E-08	2.13E-08	7.52E-09	2.04E-09	1.44E-08	6.43E-09	2.42E-09	1.03E-08	7.06E-09	4.40E-09
zone 2	2.84E-08	1.26E-07	1.85E-08	2.44E-08	3.13E-08	1.55E-08	4.66E-09	1.72E-08	1.11E-08	4.86E-09	1.20E-08	1.03E-08	7.15E-09
zone 3	7.01E-09	1.54E-08	8.34E-08	7.70E-09	1.42E-08	2.83E-08	1.50E-08	1.04E-08	1.64E-08	1.22E-08	8.47E-09	1.15E-08	1.16E-08
zone 4	3.19E-08	2.44E-08	8.40E-09	2.44E-07	4.56E-08	9.05E-09	2.77E-09	2.42E-08	9.08E-09	3.57E-09	1.62E-08	1.06E-08	6.64E-09
zone 5	2.11E-08	3.11E-08	1.51E-08	3.64E-08	1.47E-07	1.97E-08	5.15E-09	2.91E-08	1.53E-08	6.08E-09	1.85E-08	1.49E-08	9.86E-09
zone 6	7.06E-09	1.47E-08	2.80E-08	8.39E-09	1.62E-08	1.00E-07	1.57E-08	1.40E-08	2.68E-08	1.60E-08	1.21E-08	1.76E-08	1.75E-08
zone 7	2.04E-09	4.67E-09	1.58E-08	2.73E-09	5.18E-09	1.91E-08	1.40E-07	5.25E-09	1.50E-08	2.97E-08	5.71E-09	9.53E-09	1.45E-08
zone 8	1.43E-08	1.71E-08	1.05E-08	2.40E-08	2.91E-08	1.46E-08	5.25E-09	1.31E-07	1.83E-08	6.87E-09	3.52E-08	1.98E-08	1.22E-08
zone 9	6.20E-09	1.10E-08	1.64E-08	8.56E-09	1.46E-08	2.67E-08	1.43E-08	1.56E-08	9.41E-08	1.78E-08	1.58E-08	2.93E-08	3.05E-08
zone 10	2.46E-09	4.90E-09	1.22E-08	3.58E-09	6.16E-09	1.68E-08	2.88E-08	6.90E-09	2.42E-08	1.74E-07	8.17E-09	1.33E-08	2.36E-08
zone 11	4.91E-09	1.12E-08	8.99E-09	4.58E-08	1.75E-08	1.22E-08	5.98E-09	3.18E-08	1.69E-08	8.56E-09	2.63E-07	2.46E-08	1.54E-08
zone 12	7.16E-09	9.86E-09	1.10E-08	1.09E-08	1.46E-08	1.65E-08	9.71E-09	2.04E-08	2.73E-08	1.37E-08	2.48E-08	6.28E-07	2.71E-08
zone 13	4.44E-09	6.97E-09	1.09E-08	6.77E-09	9.71E-09	1.62E-08	1.45E-08	1.23E-08	2.68E-08	2.38E-08	1.50E-08	2.50E-08	2.14E-07

ΔF_8 (pointing to zone 8) and Δy_{11} (pointing to zone 11) are indicated with arrows and boxes.

- réutilisé en fin du processus pour vérifier cohérence avec modèle structure

Tour Trinity - La Défense

- Suivi altimétrique



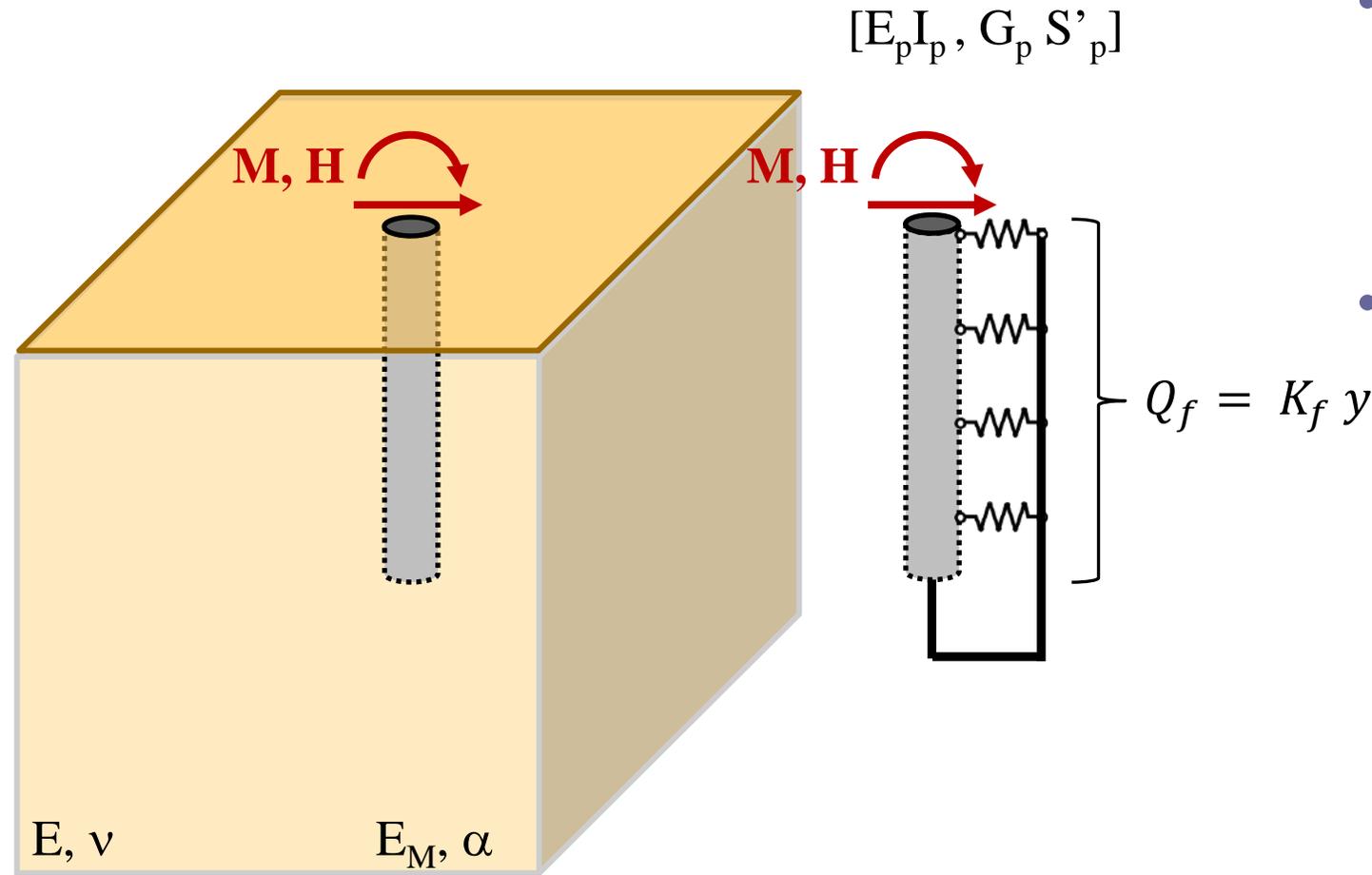
Décomposer... un réseau fini

... le modèle biphasique étendu (*suite*)
... sous chargement transversal

Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu

- Élément de fondation profonde sous chargement transversal



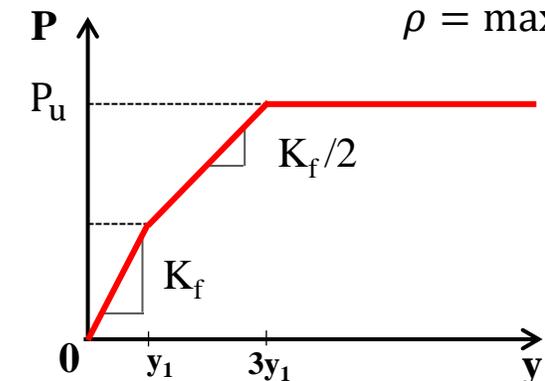
- Élasticité (R. Frank)

$$K_f = \frac{6}{5} E$$

- Semi-empirique (L. Ménard)

$$K_f = k_f B = 12 \frac{E_M}{4 (2.65 \rho)^\alpha + \alpha}$$

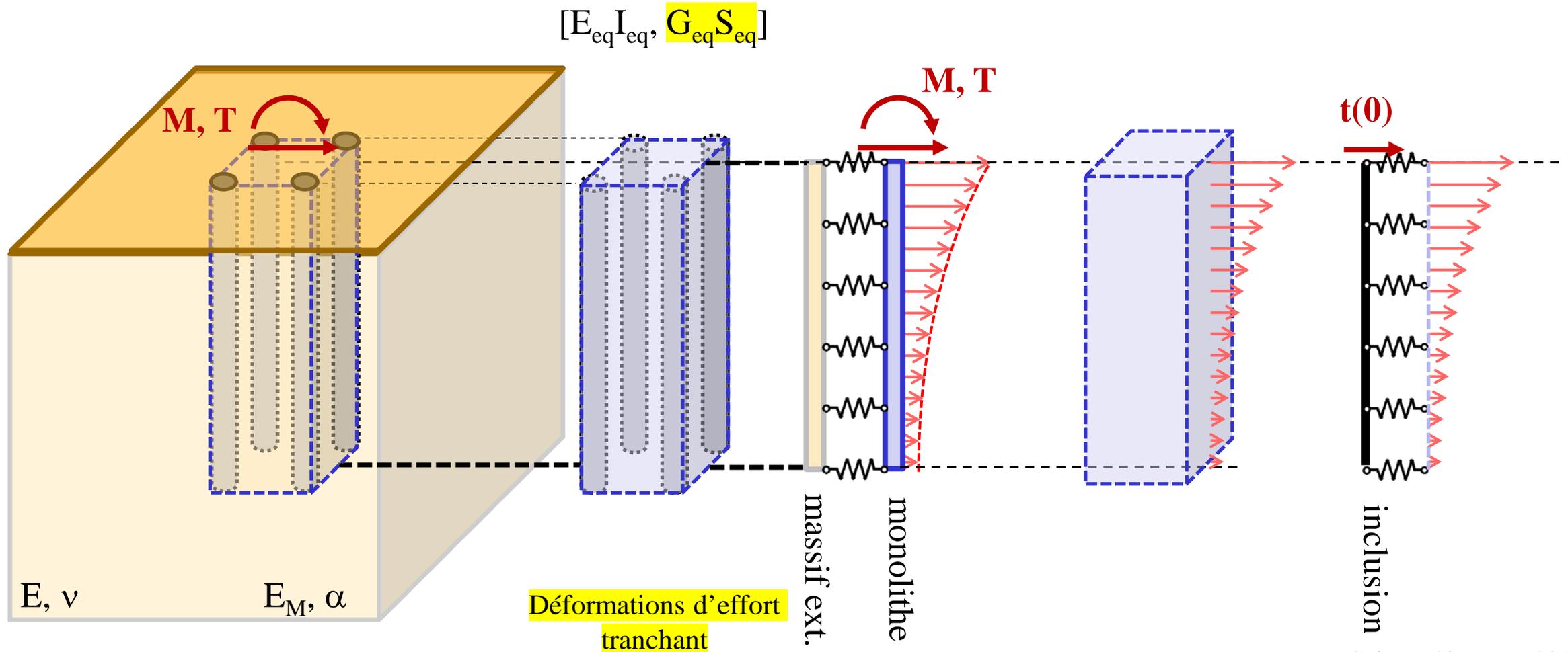
$$\rho = \max \left(\frac{B}{B_0}, 1 \right)$$



Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu

- Groupe d'inclusions rigides sous chargement transversal

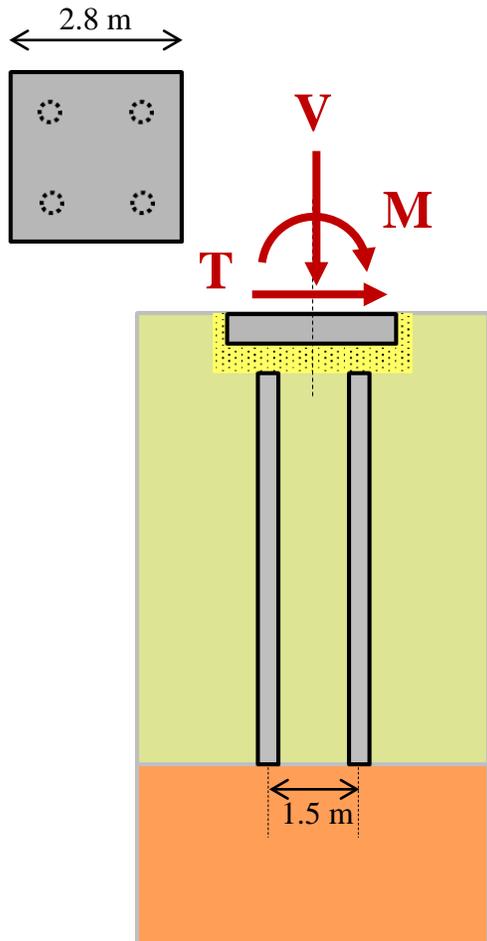


Cuira F. Simon B. 2013

Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu

- Semelle sur sol renforcé par inclusions rigides

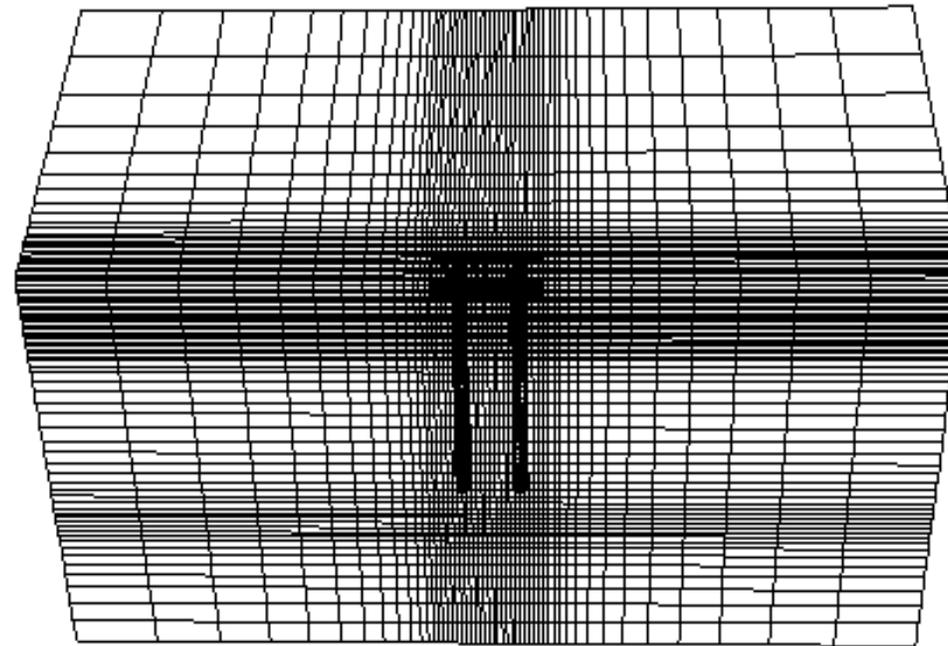


Semelle 2.8 x 2.8 m²

- $q = 200$ kPa

Inclusion

- $\phi = 0.34$ m
- $s = 1.5$ m



Matelas de transfert

$$\phi' = 35^\circ$$

$$E = 50 \text{ MPa}$$

Sol compressible

$$E_M = 2.5 \text{ MPa}$$

$$c_c / (1 + e_0) = 0.065$$

$$\sigma'_c - \sigma'_0 = 10 \text{ kPa}$$

$$q_s = 30 \text{ kPa}$$

Couche d'ancrage

$$E = 120 \text{ MPa}$$

$$E_M = 8.0 \text{ MPa}$$

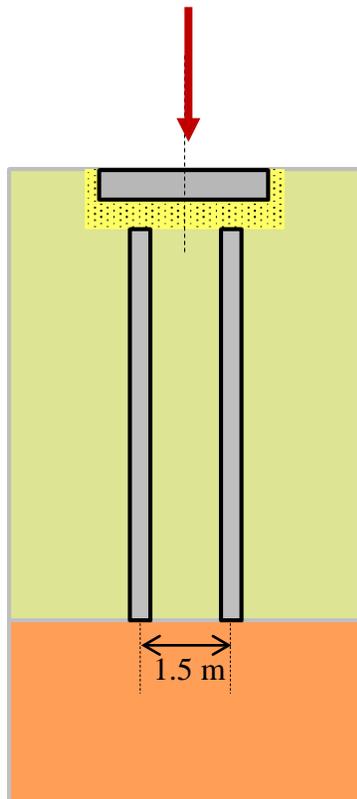
$$q_p = 7.2 \text{ MPa}$$

Décomposer un réseau fini...

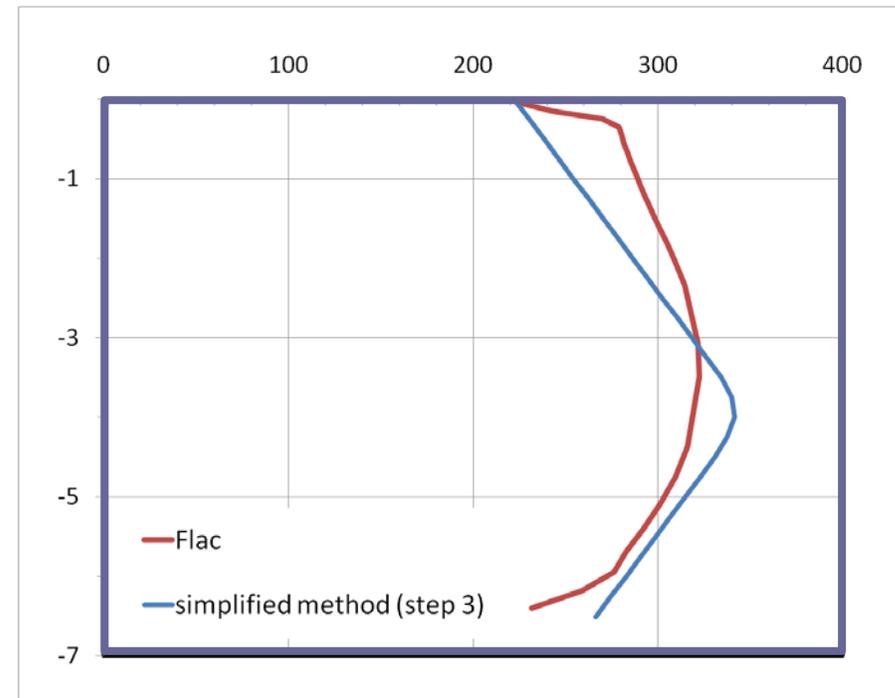
... le modèle biphasique étendu

- Semelle sur sol renforcé par inclusions rigides
 - Chargement vertical

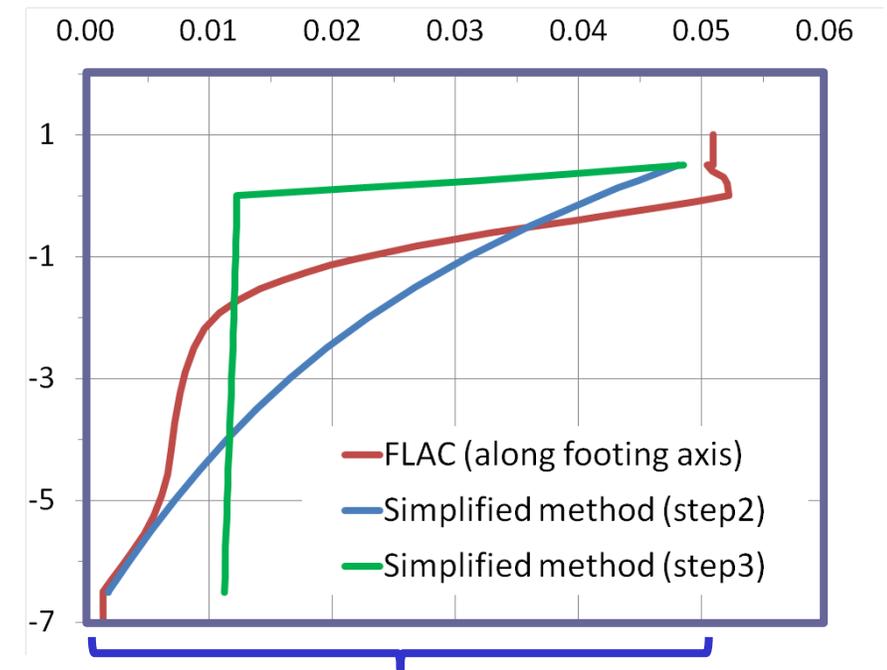
V = 1570 kN



Effort normal (kN)



Tassement (m)



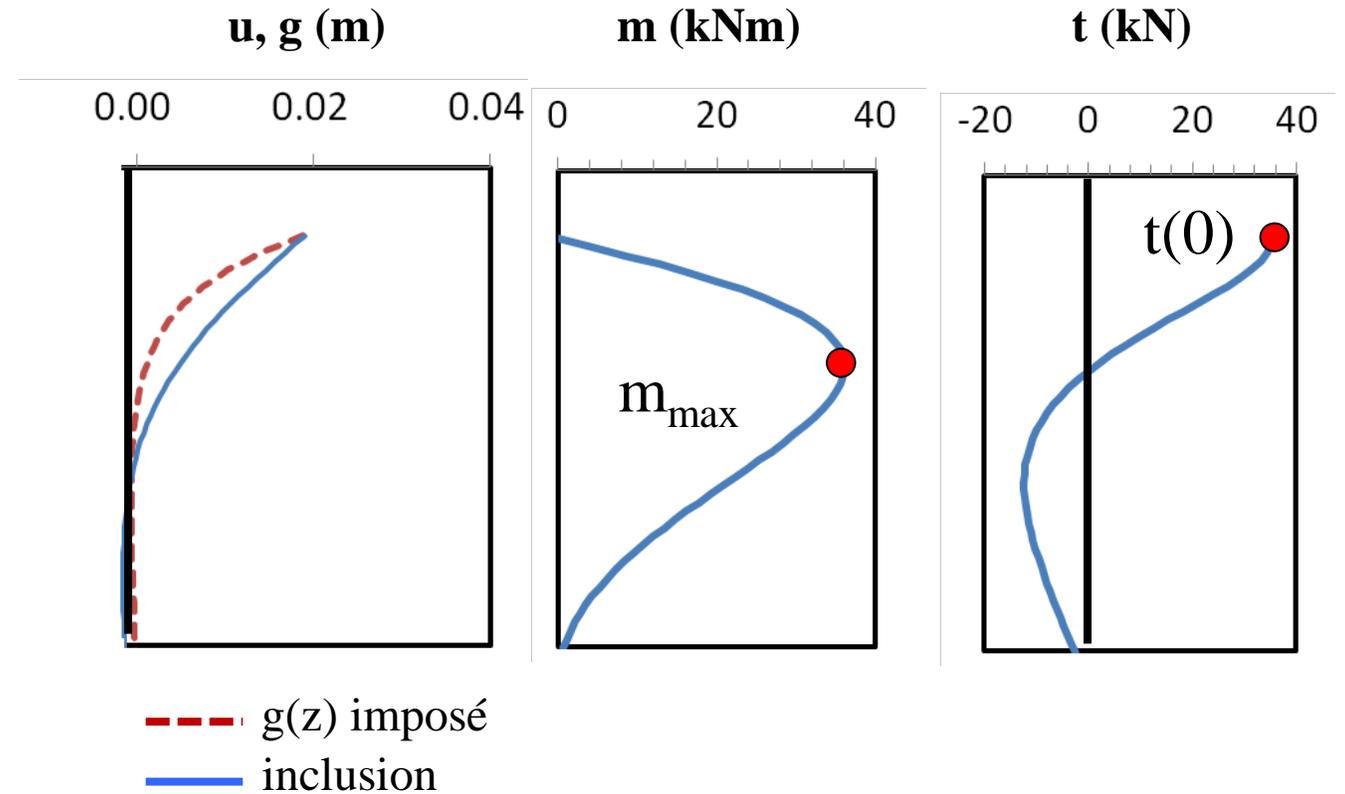
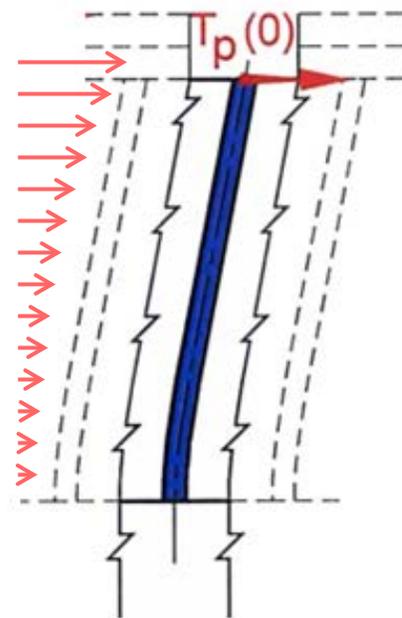
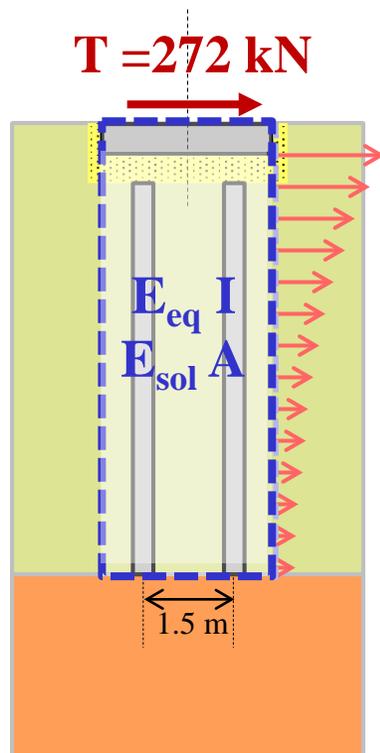
$$E_{eq} = 14.6 \text{ MPa}$$

Dias D., Simon B. 2012

Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu

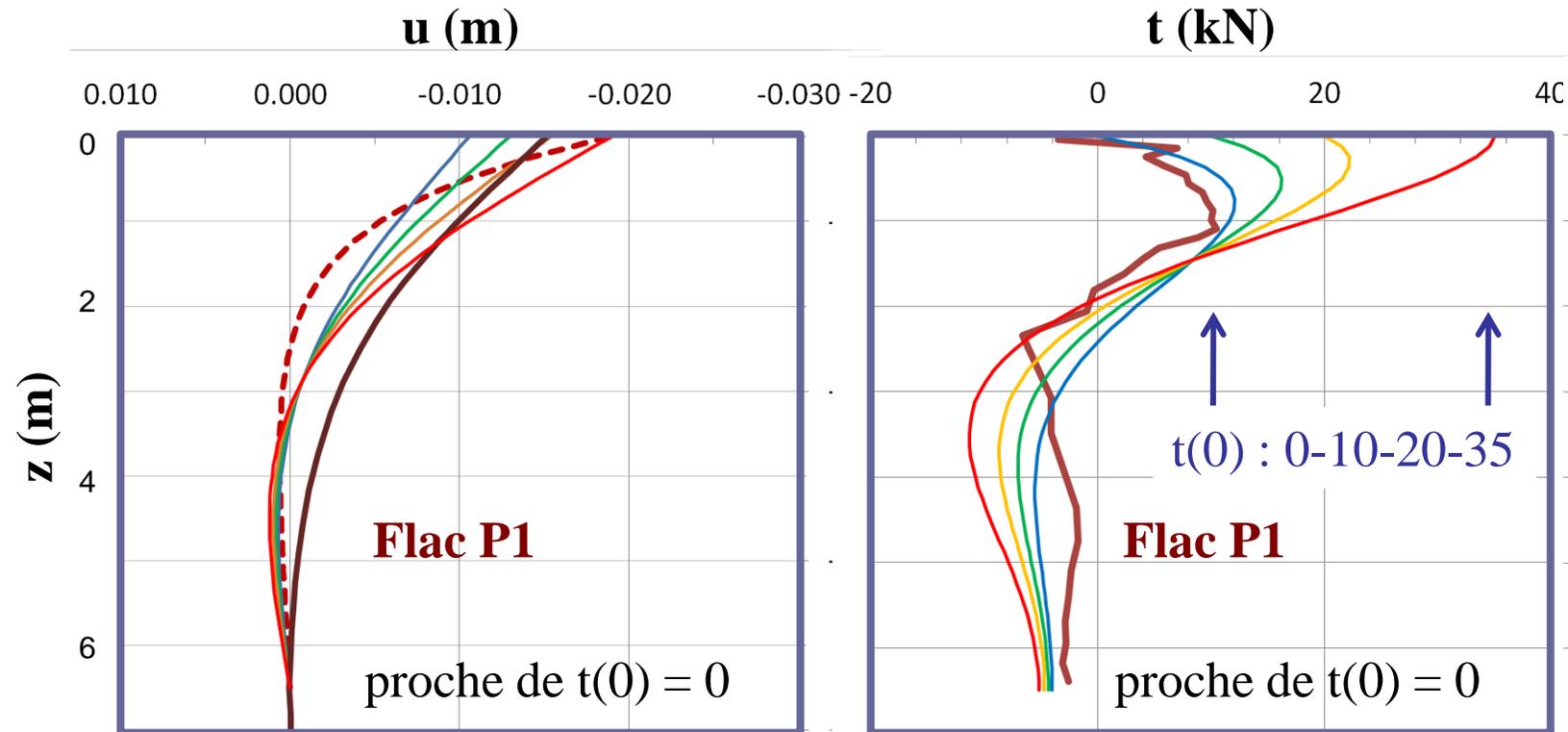
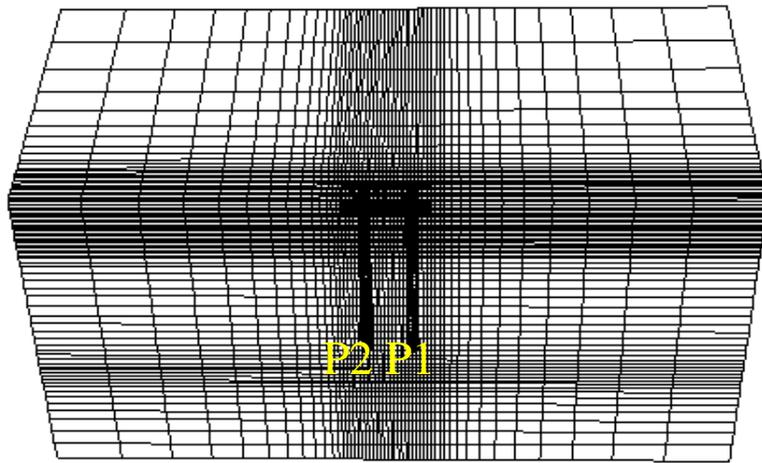
- Semelle sur sol renforcé par inclusions rigides
 - Chargement transversal



Décomposer un réseau fini...

... le modèle biphasique étendu

- Semelle sur sol renforcé par inclusions rigides
 - Chargement latéral



Dias D., Simon B. 2012

Décomposer un réseau fini...

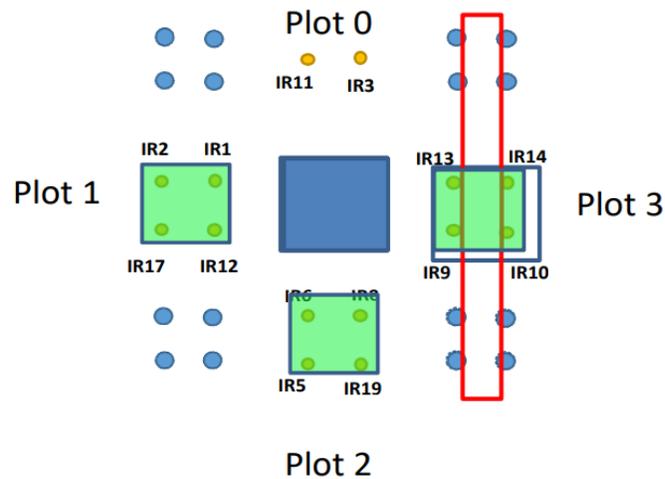
... le modèle biphasique étendu

- Semelle sur sol renforcé par inclusions rigides
- Évaluations en cours dans le cadre du Projet National

– Sous chargement statique (V, H, M)

Essais en vraie grandeur (2020-2021)

Essais en centrifugeuse (2022-2023)



Bohn C., Lambert S. 2020 - Briançon et al., 2020

UGE

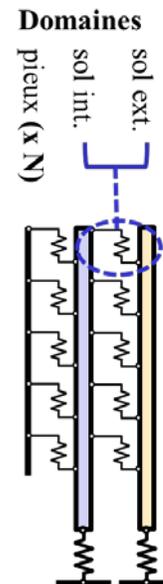
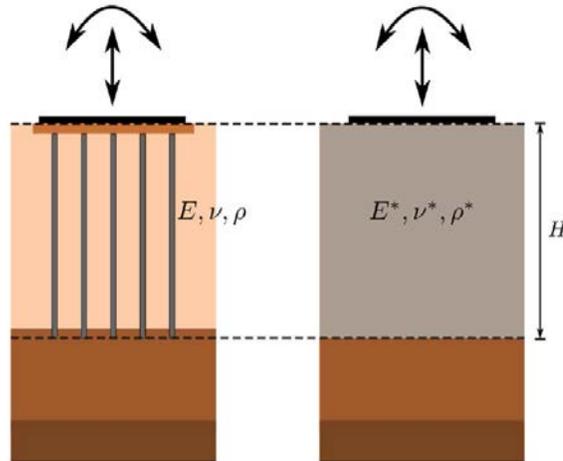
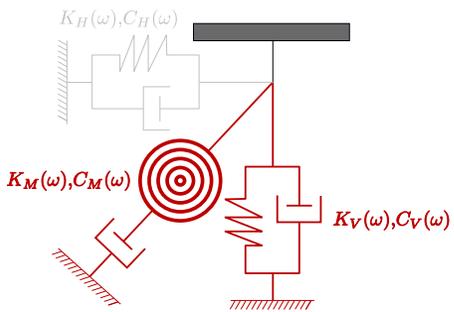
Décomposer un réseau fini...

- Semelle sur sol renforcé par inclusions rigides
- Évaluations en cours dans le cadre du Projet National

– En situations sismiques (approche pseudo-statique)

Validations numériques (2019-2023)

- Sollicitations d'origine inertielle



Shen Y., Pérez-Herreros J., Cuira F. 2022

... le modèle biphasique étendu



Essais en centrifugeuse (2022-2023)

Action ANR



Générateur de séisme embarqué

UGE

En guise de conclusion

... quelques convictions

Décomposer, recomposer un problème géotechnique (1/2)

C'est pour l'ingénieur

- pouvoir se l'approprier
- le réduire à des situations qu'il peut mieux appréhender au plan physique
- pouvoir évaluer le comportement de l'ouvrage à l'aune des deux questions fondamentales :

est-ce que l'ouvrage tient ? de combien il tasse ?

- pouvoir se forger une conviction indépendamment de l'exploitation des modèles détaillés qu'il a aussi à disposition,
- être en mesure d'accompagner le développement des techniques de fondation ou de renforcement des sols
- lui permettre de développer, si nécessaire, ses propres outils de conception

Décomposer, recomposer un problème géotechnique (2/2)

En somme

- Se mettre en retrait de la simplification radicale consistant à assimiler à un milieu continu, l'amoncellement de particules de toutes tailles et toutes formes qui constitue un massif de sol
- En conservant les deux clés de compréhension, applicables à l'échelle des grains comme à celle du massif, que sont :
 - la **loi de frottement de Coulomb**
 - les **concepts d'élasticité**, toujours fructueux **sous sollicitations de service**

Remerciements

- **Le CFMS et son président**
- **Le comité d'organisation JNGG 2022**
- **Terrasol** pour son soutien dans la préparation de cette conférence
- Mon collègue Fahd Cuira pour les nombreux échanges qui ont nourri cette présentation
- Mes collègues de **Terrasol** pour leur implication dans certains des dossiers évoqués

