

Applications du calcul à la rupture utiles au géotechnicien....

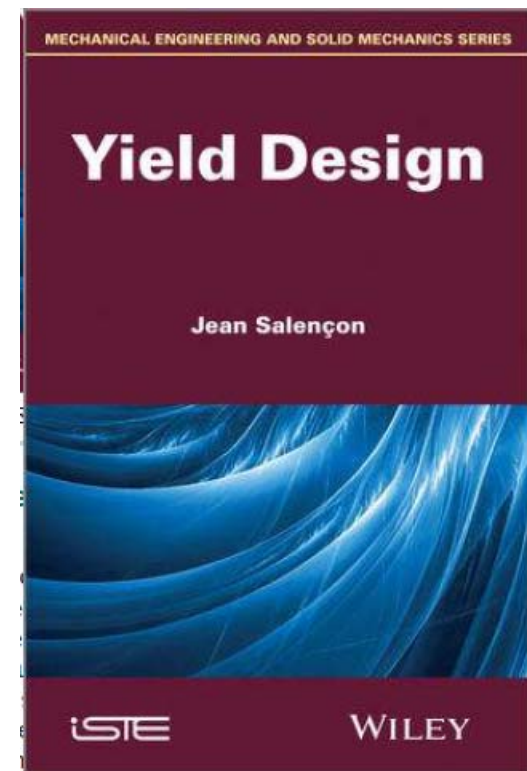
Bruno Simon (Terrasol)



... pour dimensionner
les massifs en sol
cloué

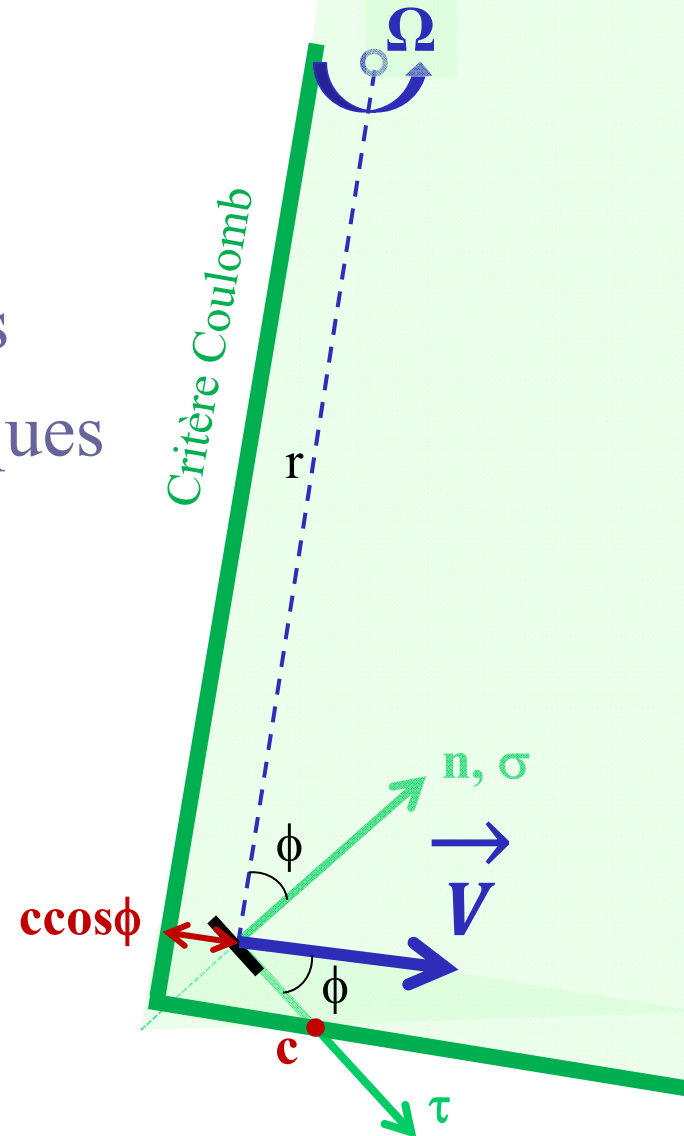
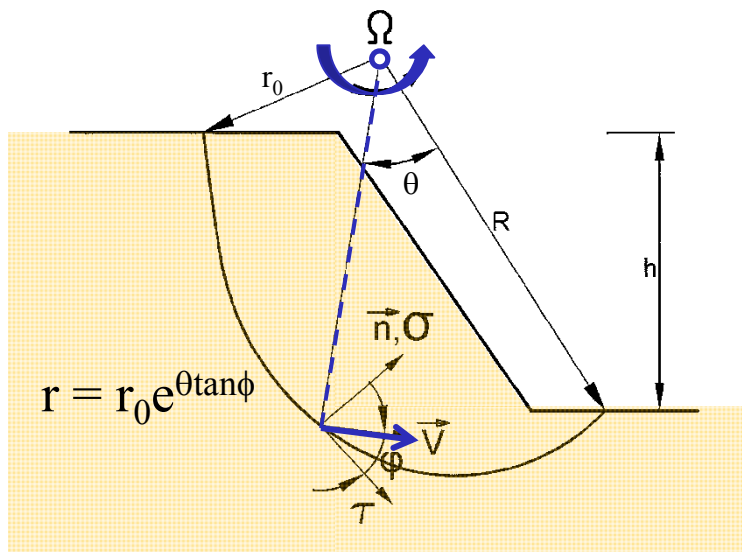
Méthode du calcul à la rupture

- Théorie générale (J. Salençon, 1983) d'évaluation de la charge de rupture d'un système mécanique
 - Approche statique :
 - charge de rupture par défaut
 - Approche cinématique
 - charge de rupture par excès



Méthode du calcul à la rupture

- Cas particulier
 - Critère de Mohr Coulomb
 - Mouvement de blocs rigides
 - Arcs de spirales logarithmiques



Trois applications aux sols cloués

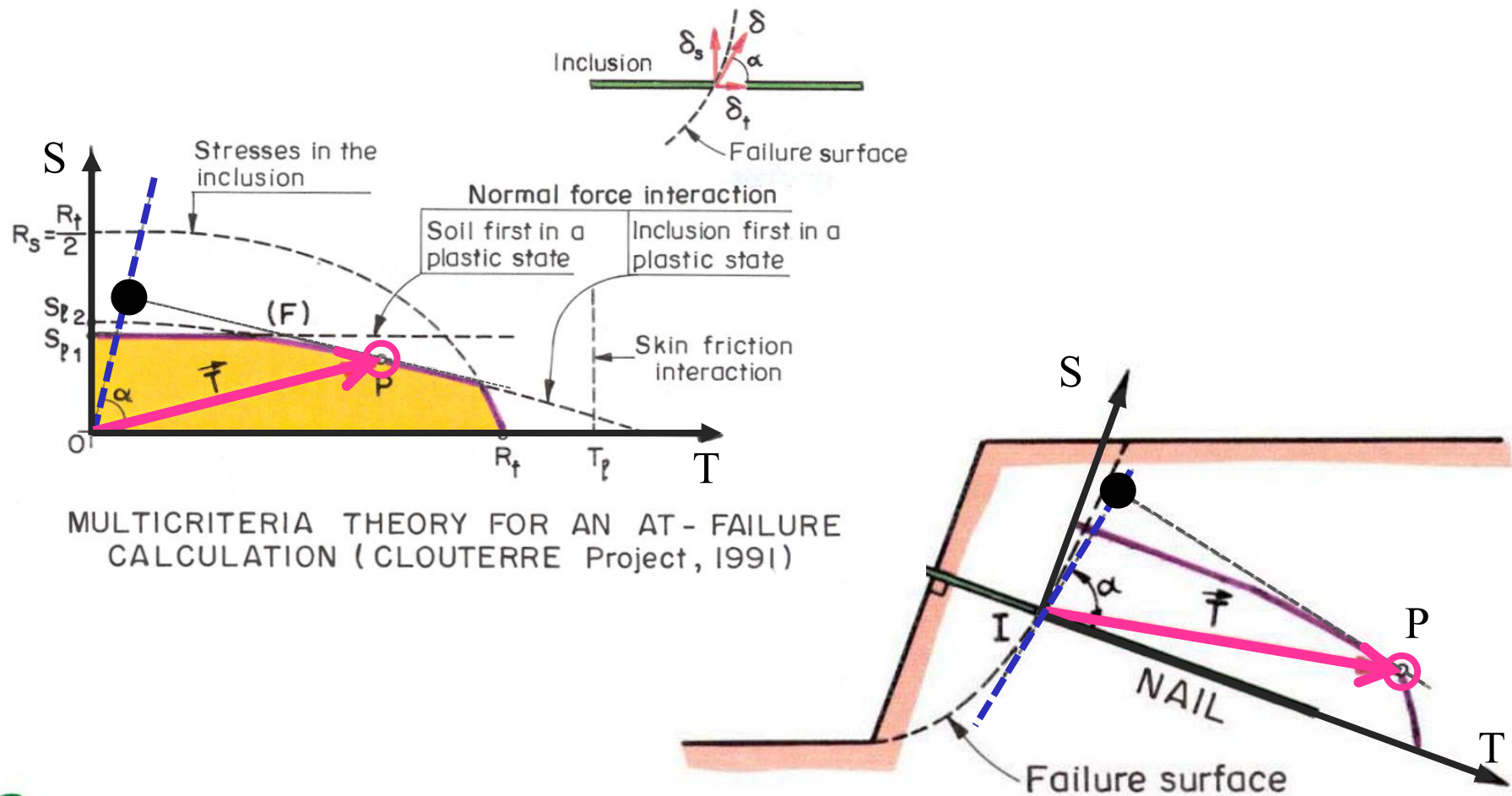
- Appliquer correctement le multicritère
- Intégrer l'influence de la fondation
- Evaluer les efforts au parement

Trois applications aux sols cloués

- **Appliquer correctement le multicritère**
- Intégrer l'influence de la fondation
- Evaluer les efforts au parement

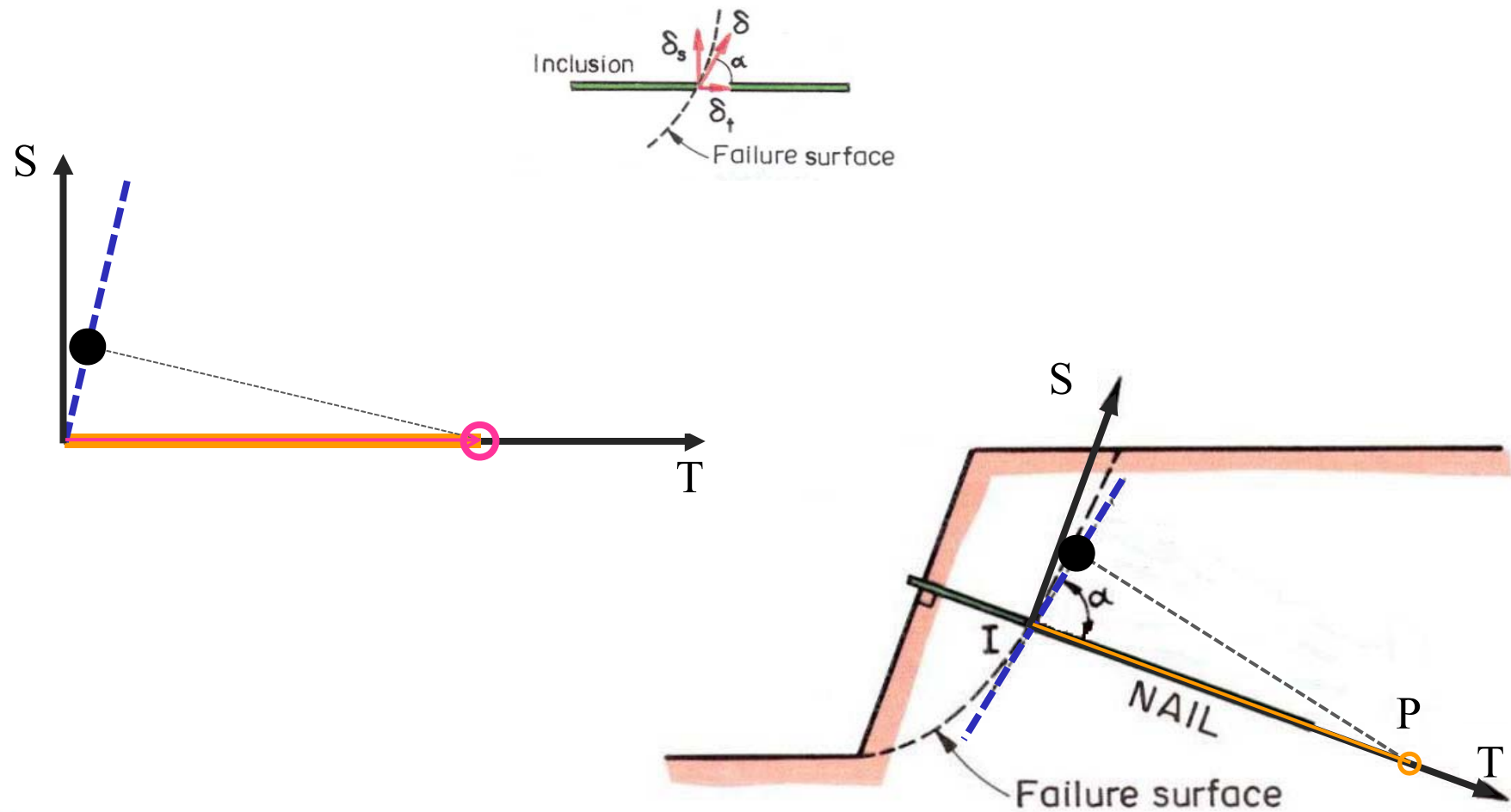
Appliquer correctement le multicritère

- Clou sollicité en traction et cisaillement



Appliquer correctement le multicritère

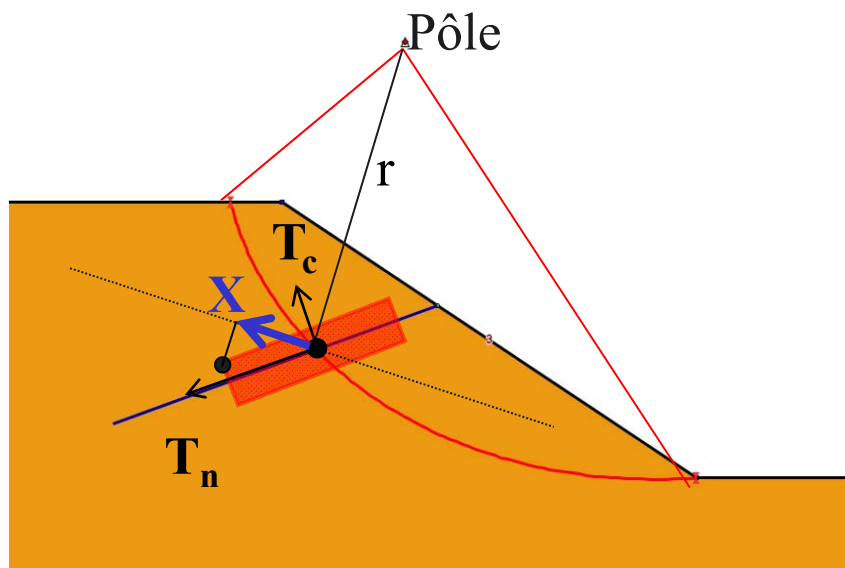
- Clou sollicité en traction seule



Appliquer correctement le multicritère

- Approche cinématique du calcul à la rupture

$$F = \frac{M_{rm}}{M_e}$$

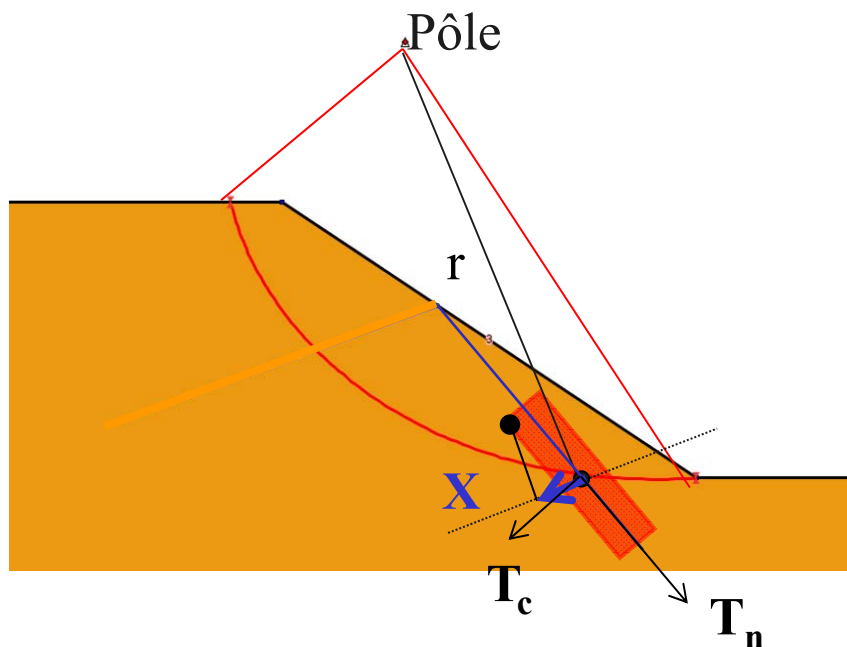


- **M_{rm} majorant du moment résistant**
 - cohésion
 - éléments passifs de renforcement,
 $\Delta M_{rm} = \Sigma (Xr) \dots$
- **M_e moment des actions extérieures**

Appliquer correctement le multicritère

- Approche cinématique du calcul à la rupture

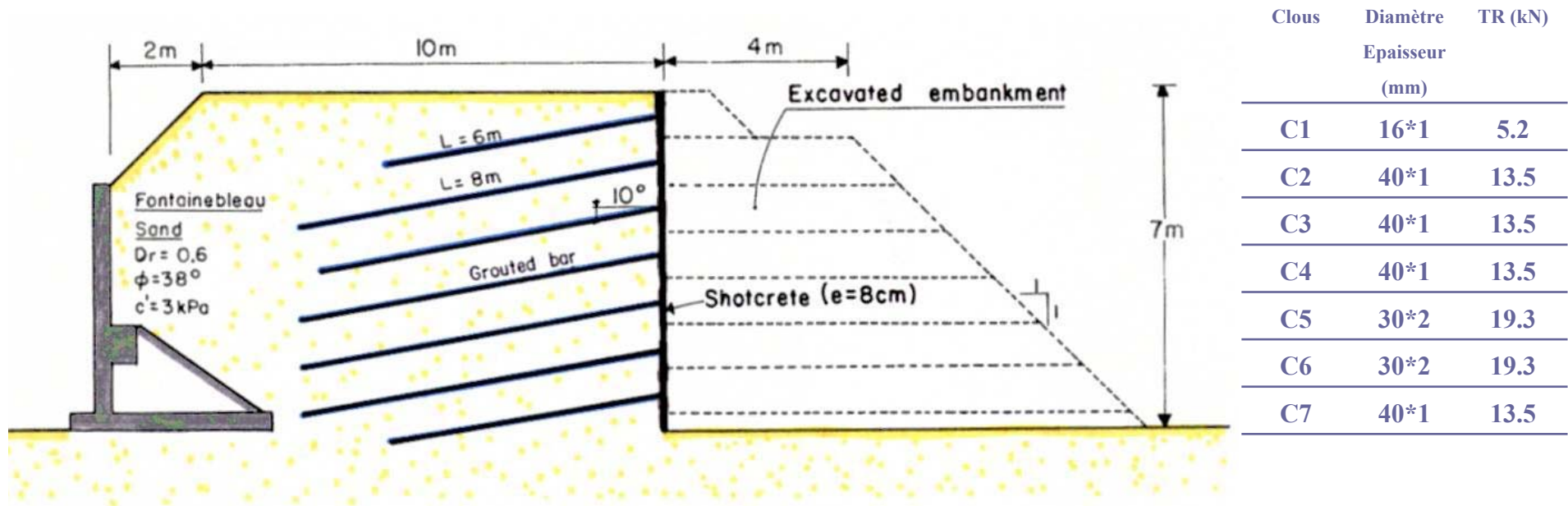
$$F = \frac{M_{rm}}{M_e}$$



- M_{rm} majorant du moment résistant
 - cohésion
 - éléments passifs de renforcement,
 $\Delta M_{rm} = \Sigma (Xr) \dots$
- M_e moment des actions extérieures

Appliquer correctement le multicritère

- Mur expérimental Clouterre 1

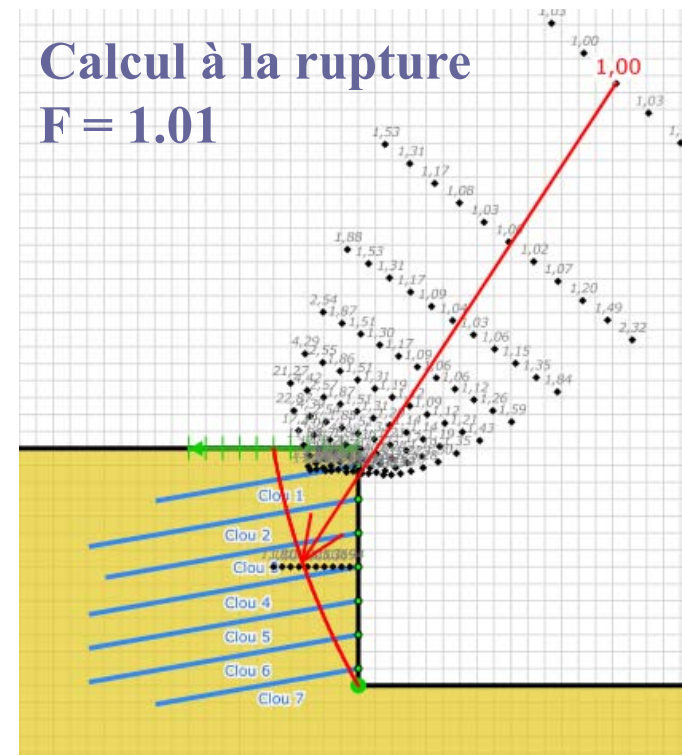


Appliquer correctement le multicritère

- **Mur expérimental Clouterre 1**

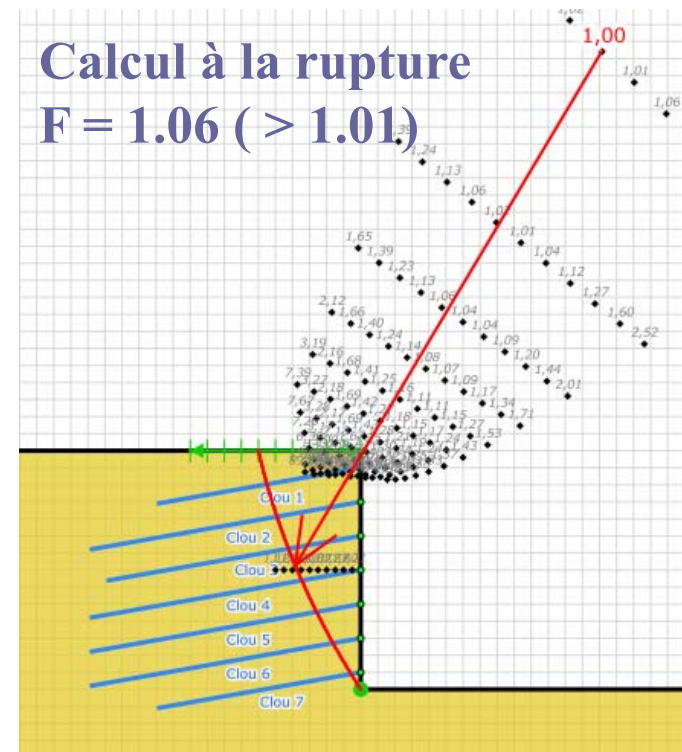
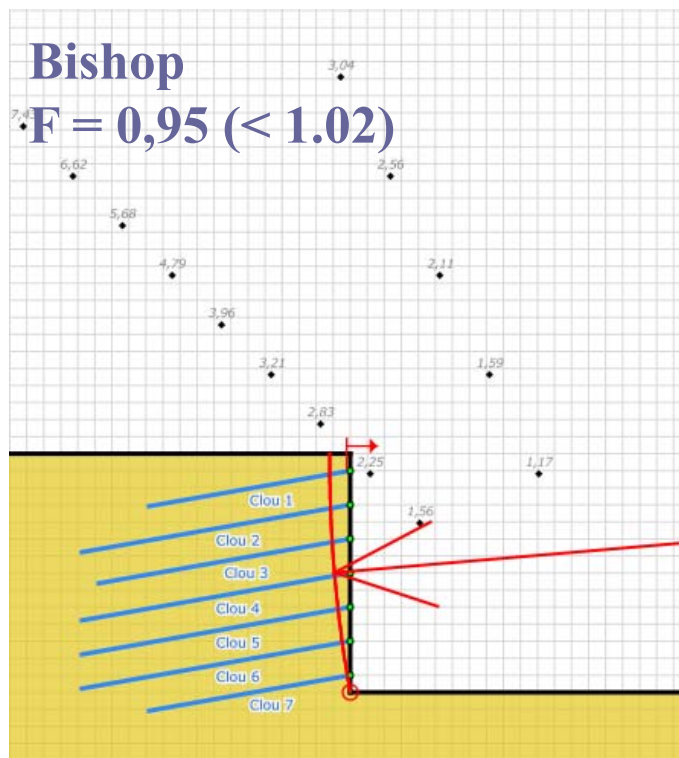


- **Mur expérimental Clouterre 1 (état sec initial)**
 - Calcul avec effort axial seul (T_n)



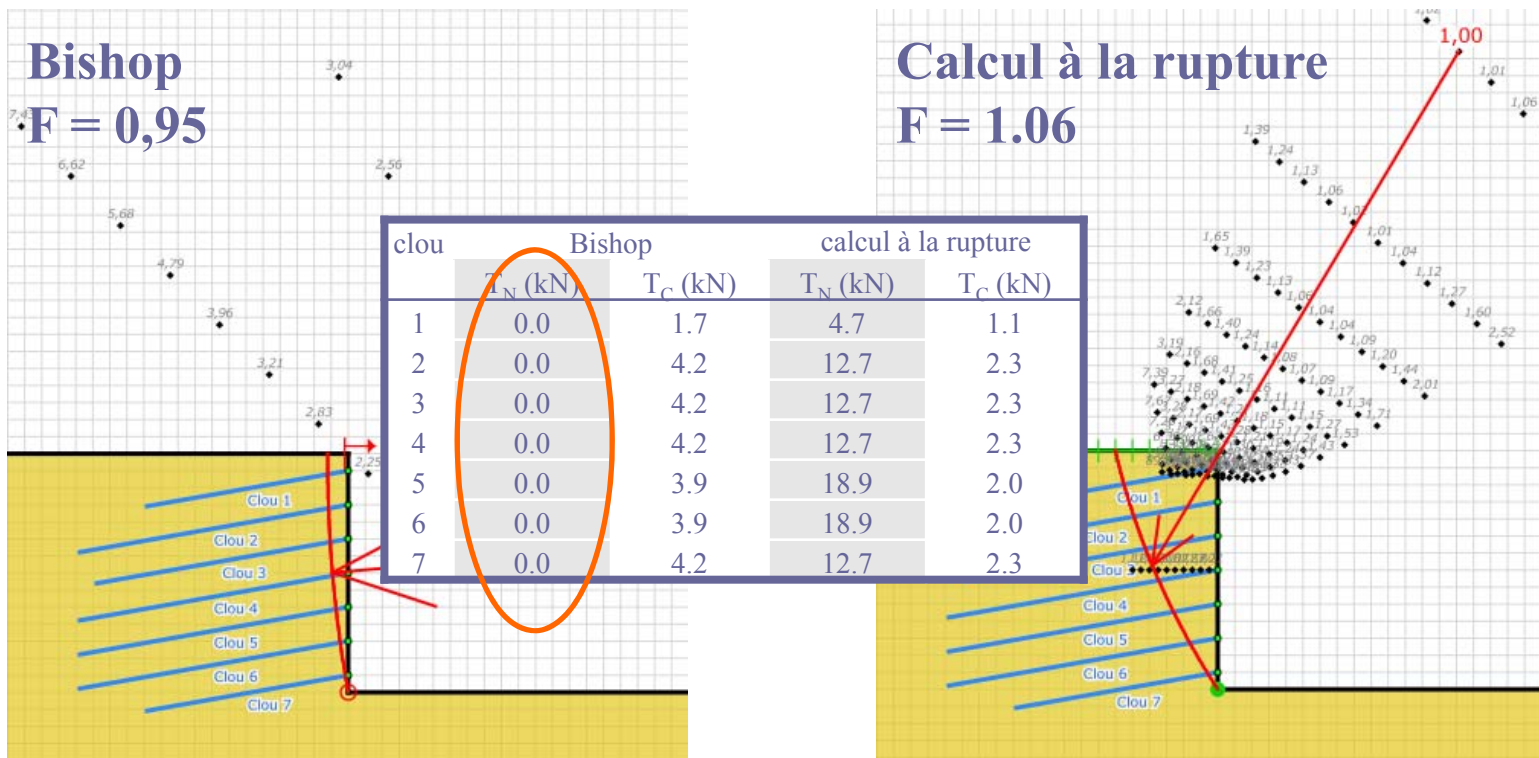
Appliquer correctement le multicritère

- **Mur expérimental Clouterre 1 (état sec initial)**
 - Calcul avec effort axial et effort tranchant ($T_n + T_c$)



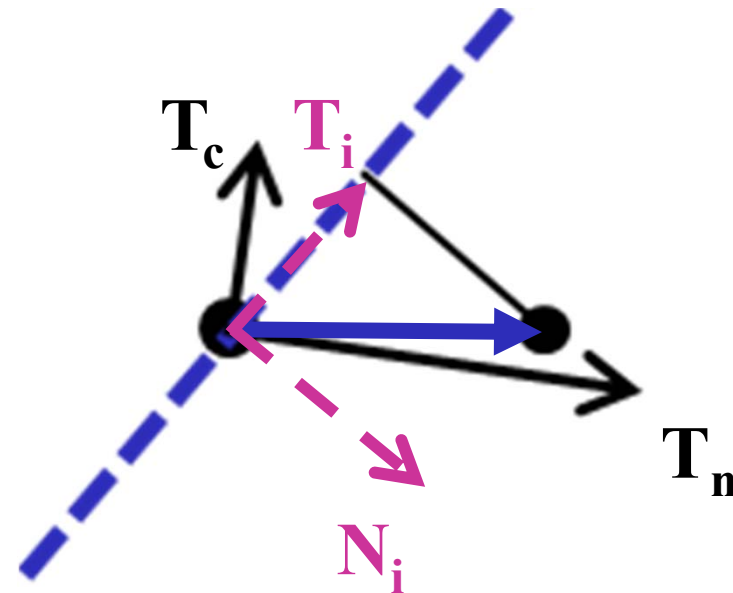
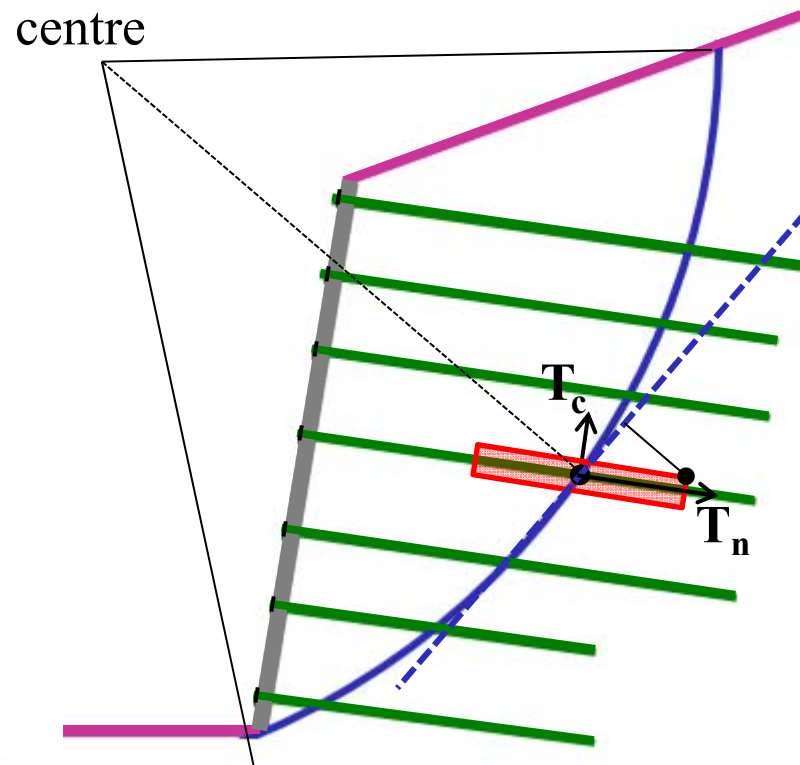
Appliquer correctement le multicritère

- **Mur expérimental Clouterre 1 (état sec initial)**
 - Calcul avec effort axial et effort tranchant ($T_n + T_c$)



Appliquer correctement le multicritère

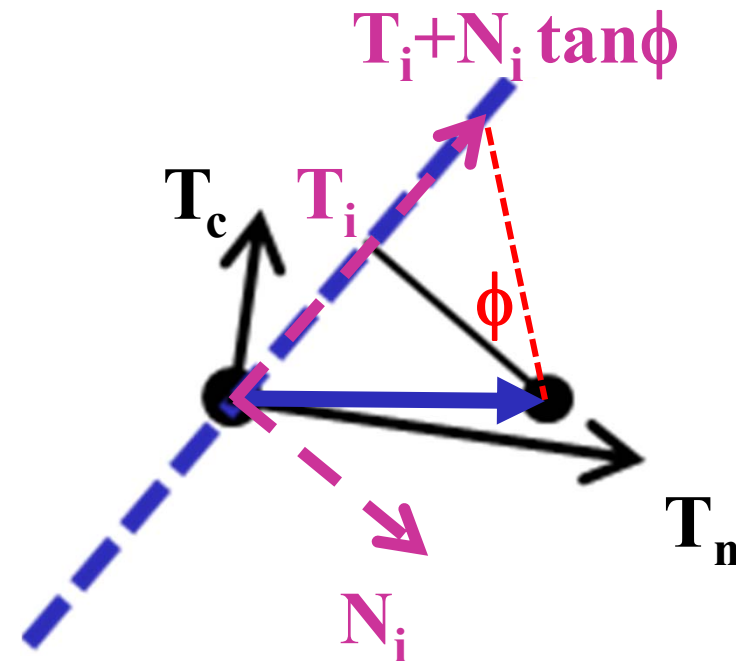
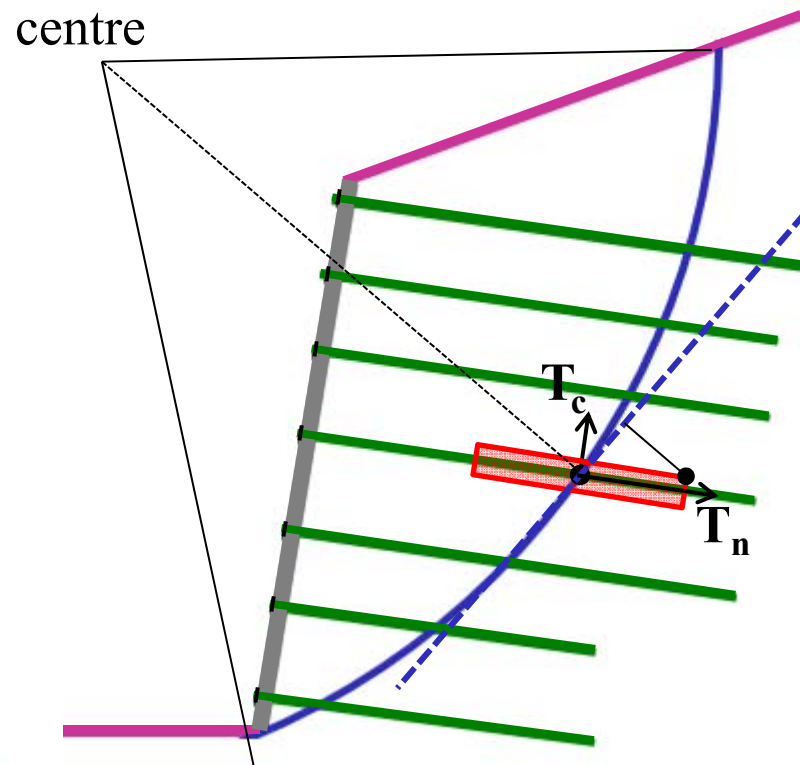
- Méthode des tranches
 - Moment moteur diminué par T_i



Appliquer correctement le multicritère

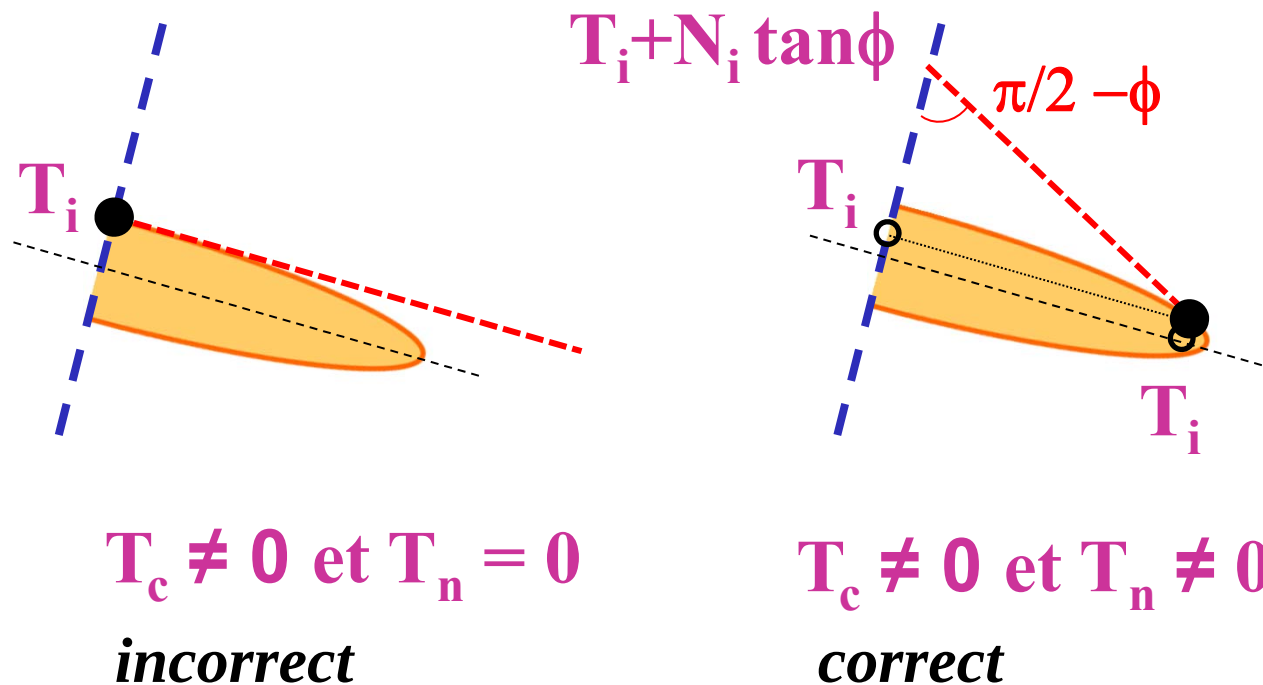
- Méthode des tranches

- Moment moteur diminué par T_i
- Moment résistant augmenté par $N_i \tan \phi$



Appliquer correctement le multicritère

- Méthode des tranches
 - cas particulier des clous quasi perpendiculaires à la surface de rupture



Appliquer correctement le multicritère

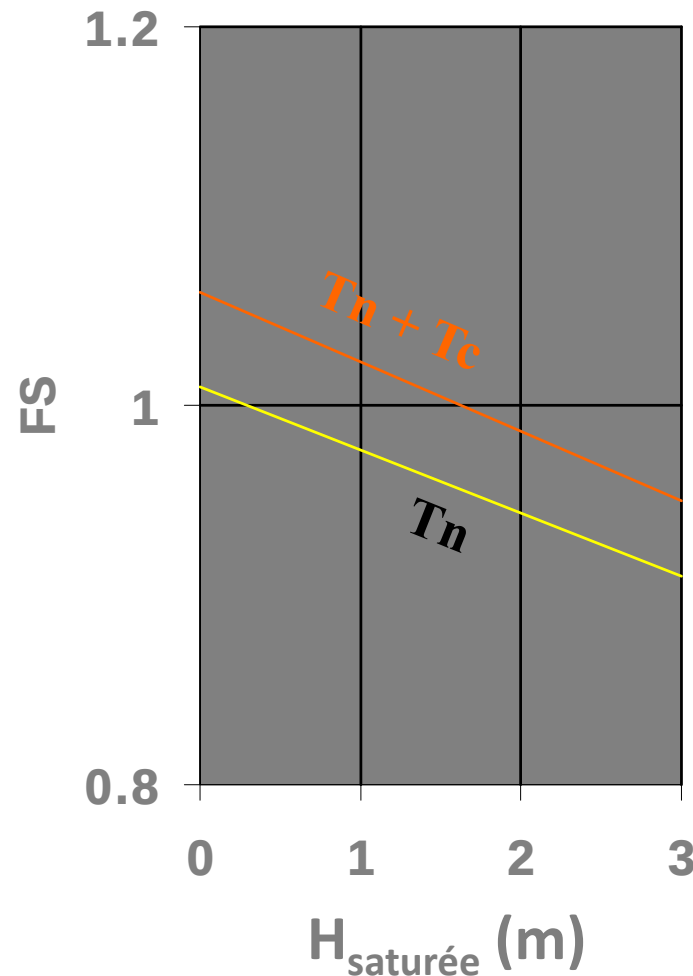
- **Mur expérimental Clouterre 1 (selon saturation)**
 - Calcul à la rupture

Non saturé

- $\gamma = 16.1 \text{ kN/m}^3$
- $\phi' = 38^\circ$
- $c' = 3 \text{ kPa}$

Saturé

- $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$
- $\phi' = 38^\circ$
- $c' = 0 \text{ kPa}$

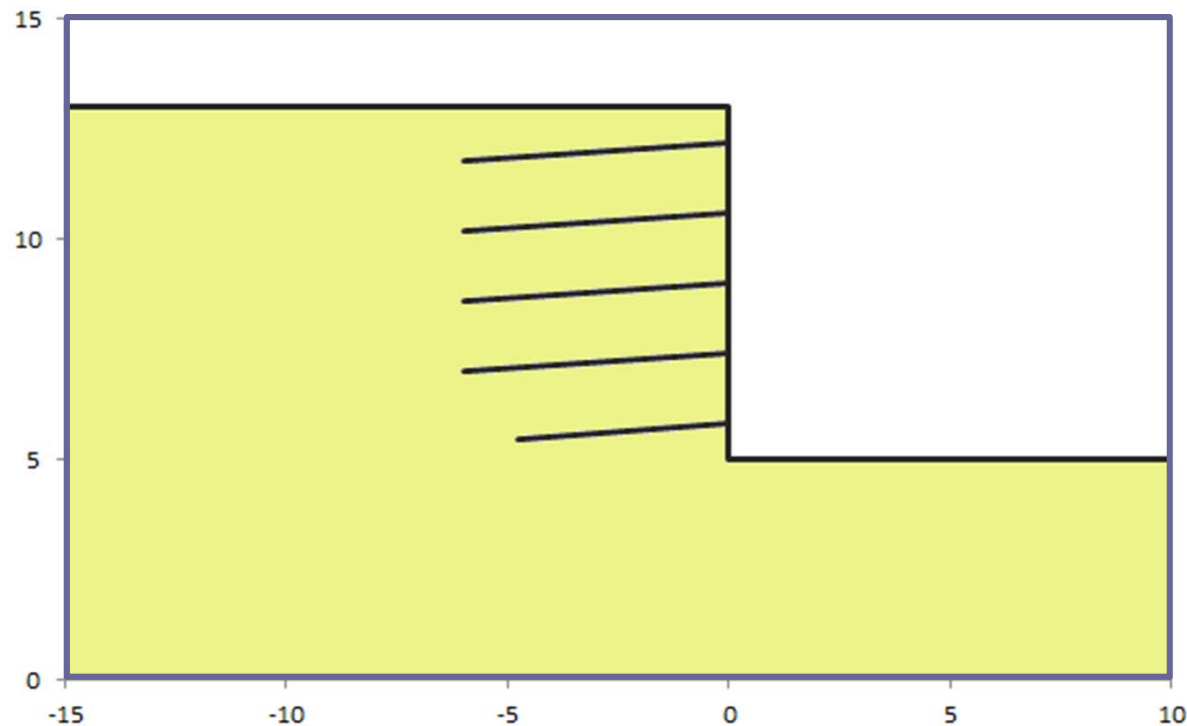


Trois applications aux sols cloués

- Appliquer correctement le multicritère
- **Intégrer l'influence de la fondation**
- Evaluer les efforts au parement

Intégrer l'influence de la fondation

- **Exemple simple (massif homogène, sans nappe)**
 - calcul d'un bloc rigide



Sol

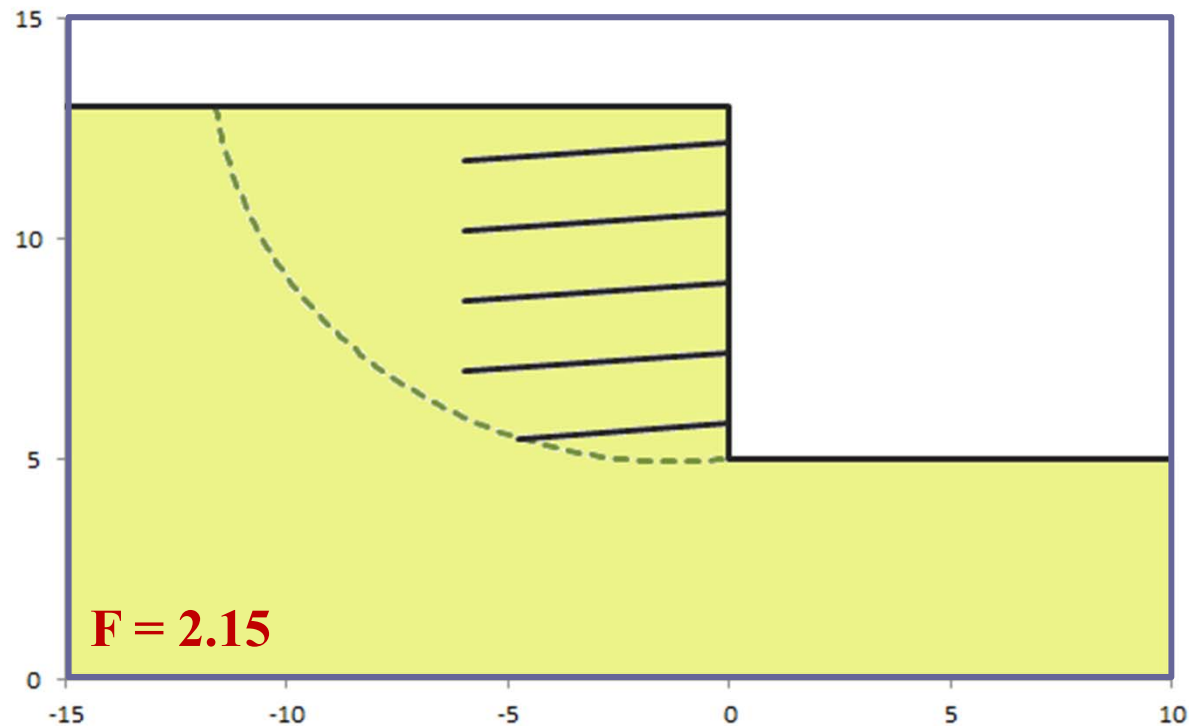
- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Clous

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

Intégrer l'influence de la fondation

- Exemple simple (massif homogène, sans nappe)
 - calcul d'un bloc rigide



Sol

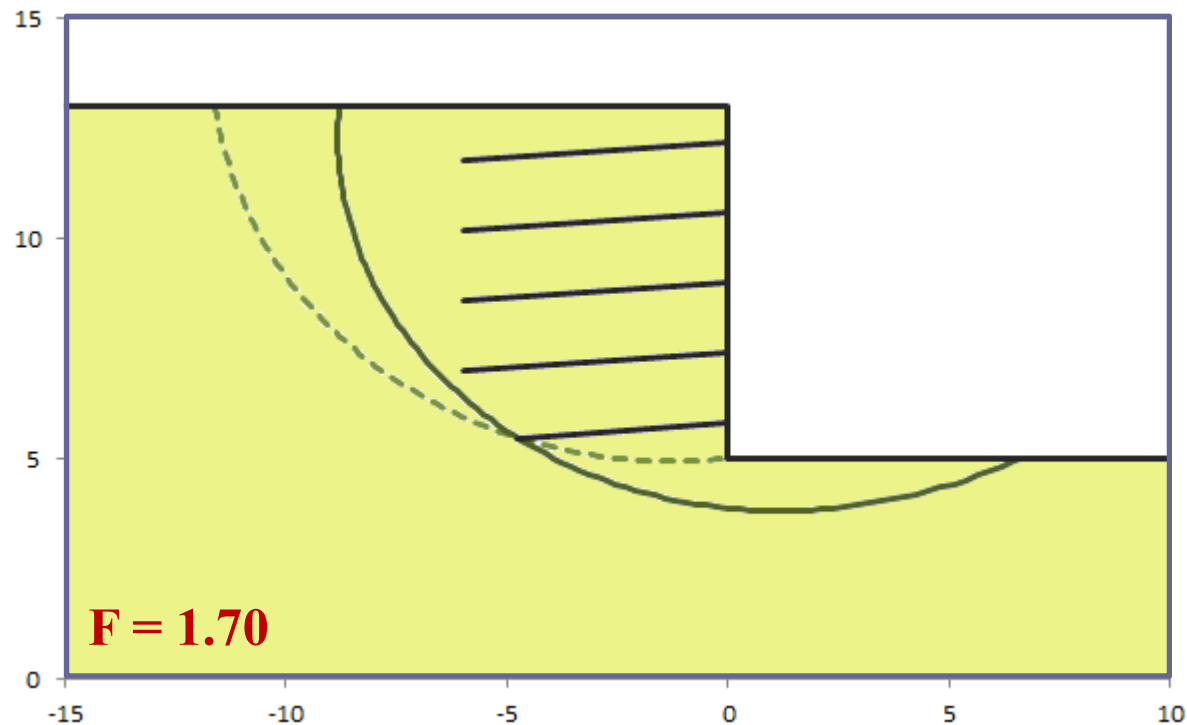
- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Clous

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

Intégrer l'influence de la fondation

- Exemple simple (massif homogène, sans nappe)
 - calcul d'un bloc rigide



Sol

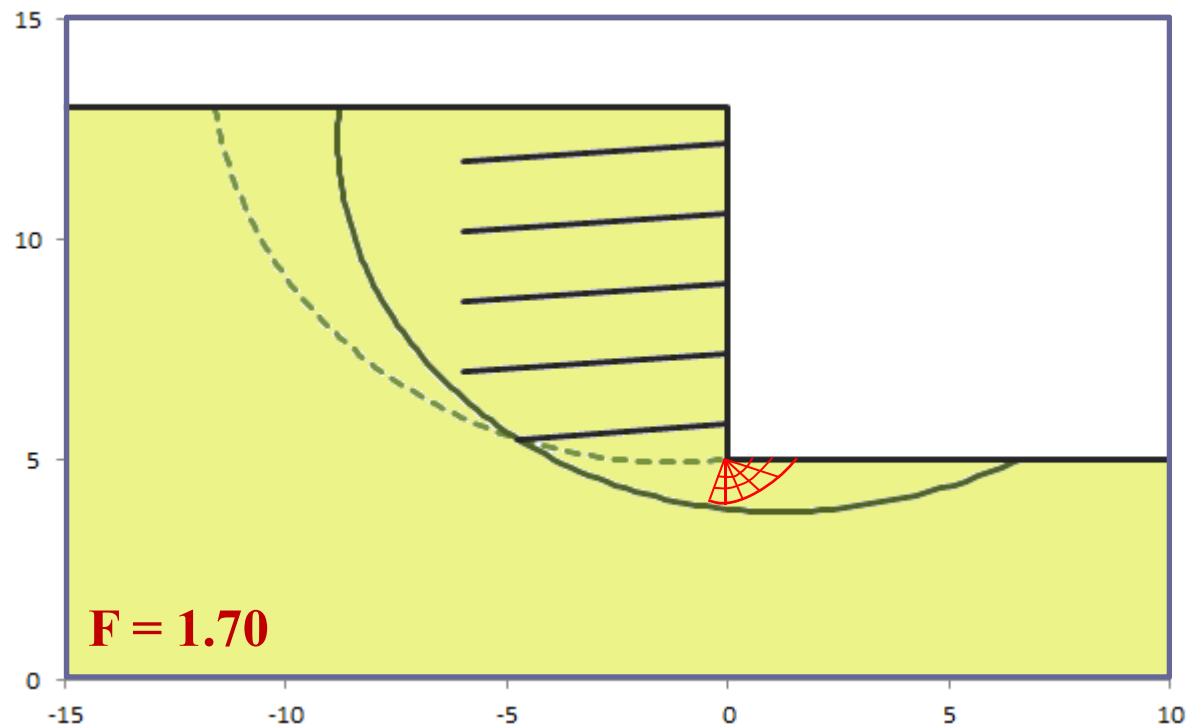
- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Clous

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

Intégrer l'influence de la fondation

- Exemple simple (massif homogène, sans nappe)
 - calcul d'un bloc rigide / validité ?



Sol

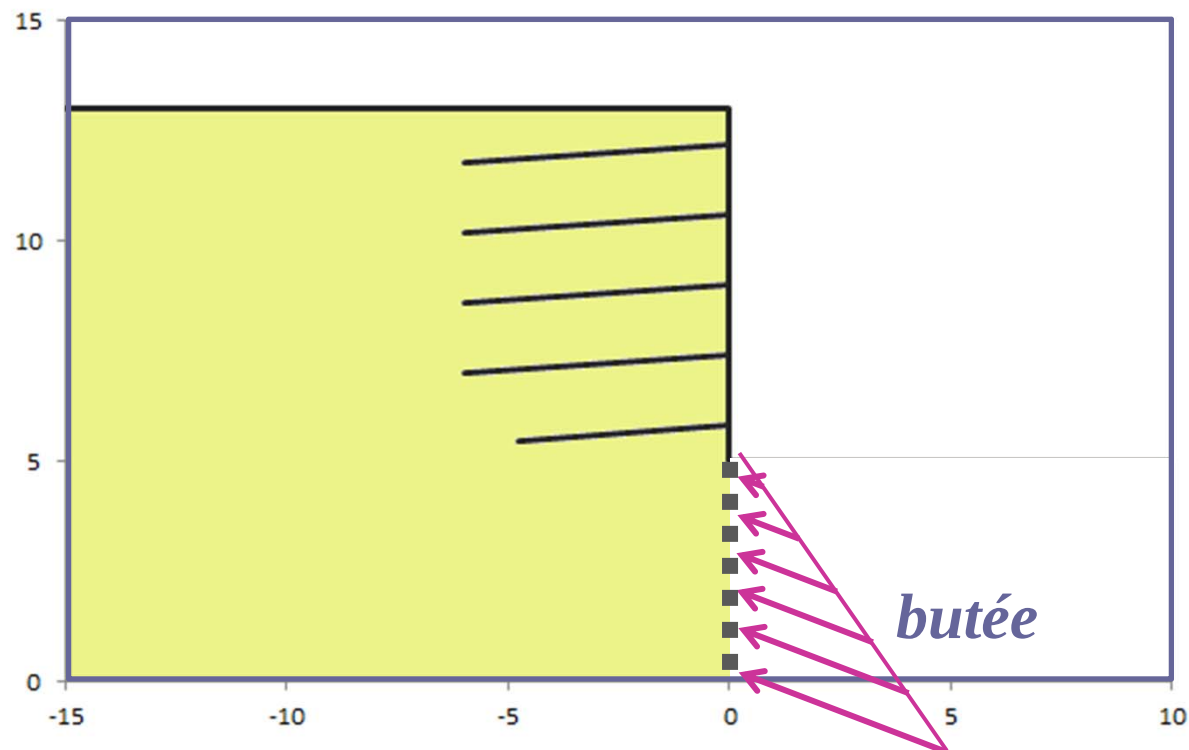
- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Clous

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

Intégrer l'influence de la fondation

- **Approche simplifiée (norme NF P 94 270)**
 - Butée limite dans le plan vertical sous le parement



Intégrer l'influence de la fondation

- **Caquot-Kerisel**

- $q(\phi^*, \delta)$

$$q_h = k_{ph} \sigma'_v + (k_{qh} - 1) \frac{c^*}{\tan \varphi^*}$$

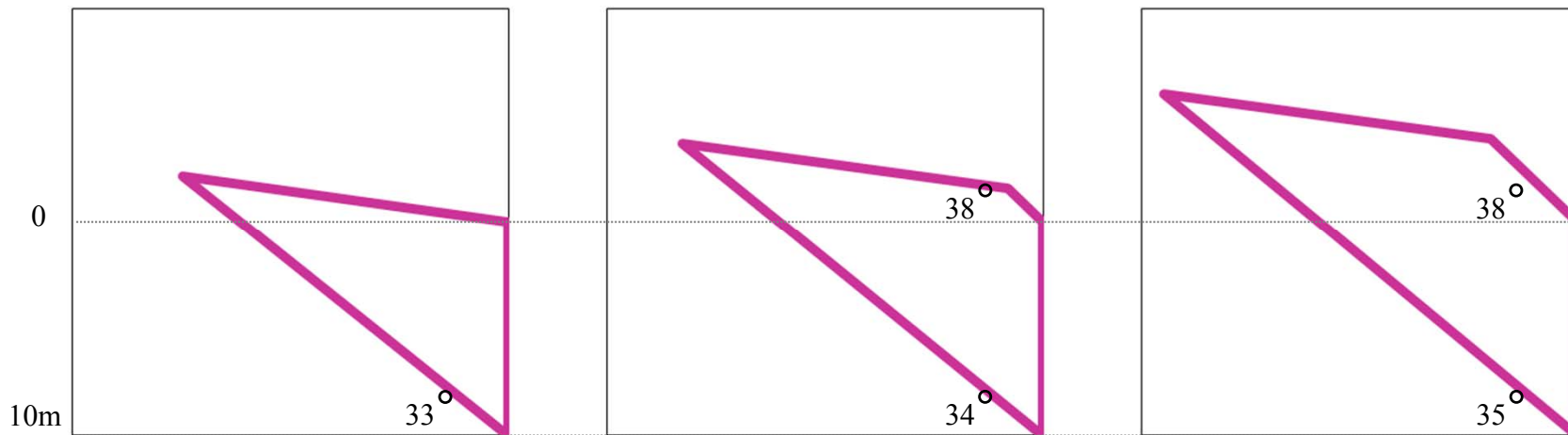
$$q_v = k_{pv} \sigma'_v + k_{qv} \frac{c^*}{\tan \varphi^*}$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} F = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi^*} = \frac{c}{c^*} \\ \frac{\delta}{\varphi} = -1 \end{array} \right.$

$$\phi' = 33^\circ \quad c' = \mathbf{0} \quad (F = 1)$$

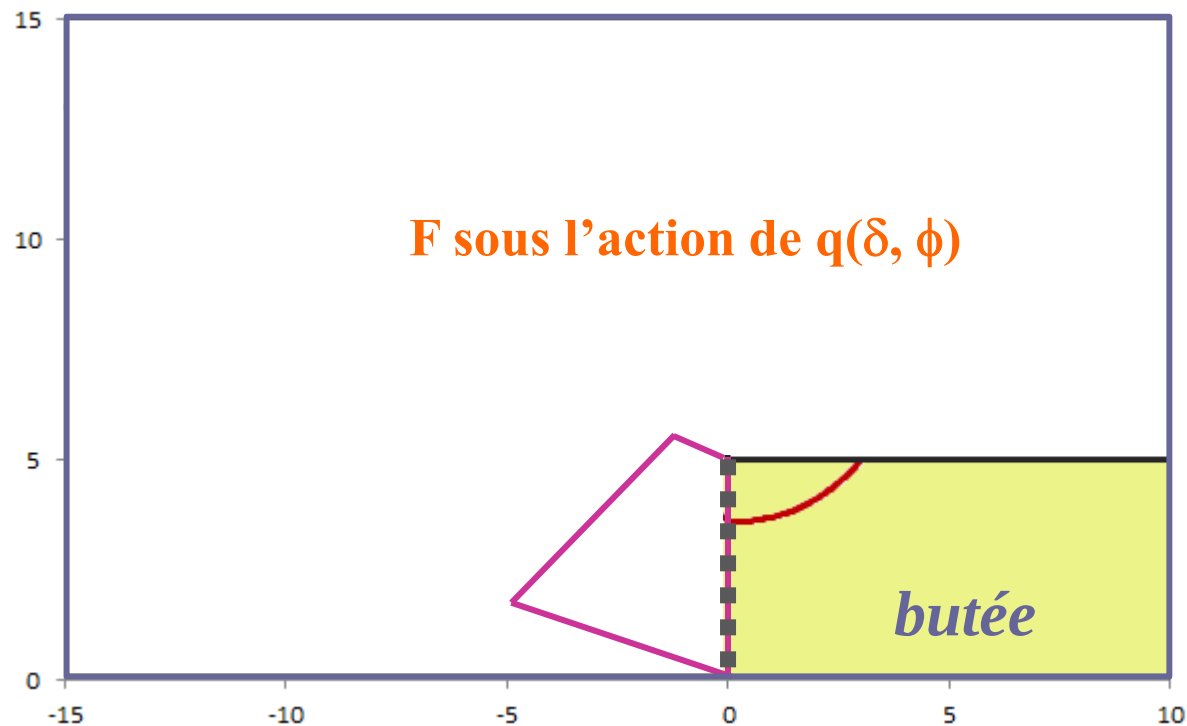
$$\phi' = 33^\circ \quad c' = \mathbf{20 \text{ kPa}} \quad (F = 1)$$

$$\phi' = 33^\circ \quad c' = \mathbf{50 \text{ kPa}} \quad (F = 1)$$



Intégrer l'influence de la fondation

- calcul à rupture



Intégrer l'influence de la fondation

- **Caquot-Kerisel**

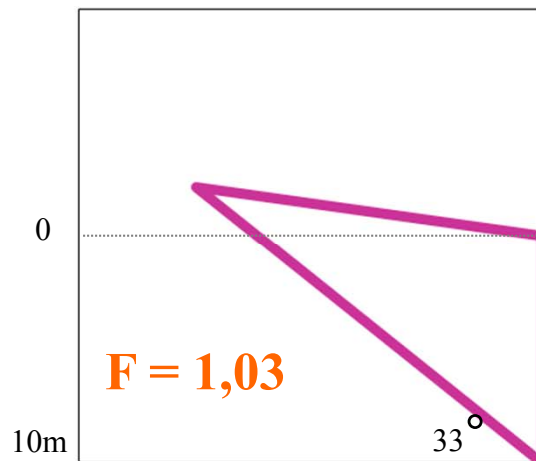
– $q(\phi, \delta)$

$$q_h = k_{ph} \sigma'_v + (k_{qh} - 1) \frac{c^*}{\tan \varphi^*}$$

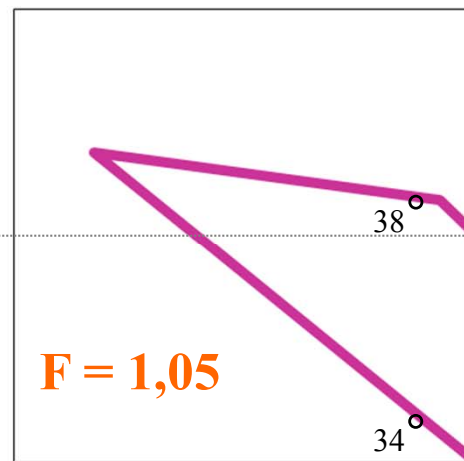
$$q_v = k_{pv} \sigma'_v + k_{qv} \frac{c^*}{\tan \varphi^*}$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} F = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi^*} = \frac{c}{c^*} \\ \frac{\delta}{\varphi} = -1 \end{array} \right.$

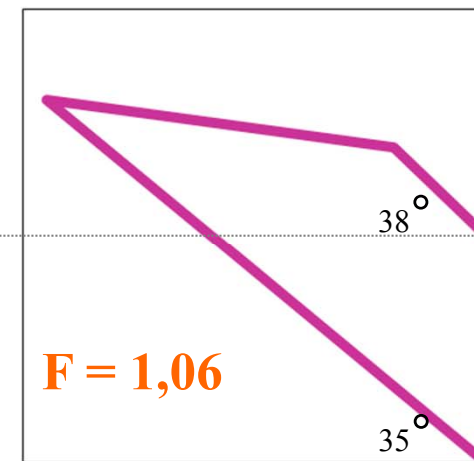
$\phi' = 33^\circ$ $c' = 0$ ($F = 1$)



$\phi' = 33^\circ$ $c' = 20$ kPa ($F = 1$)

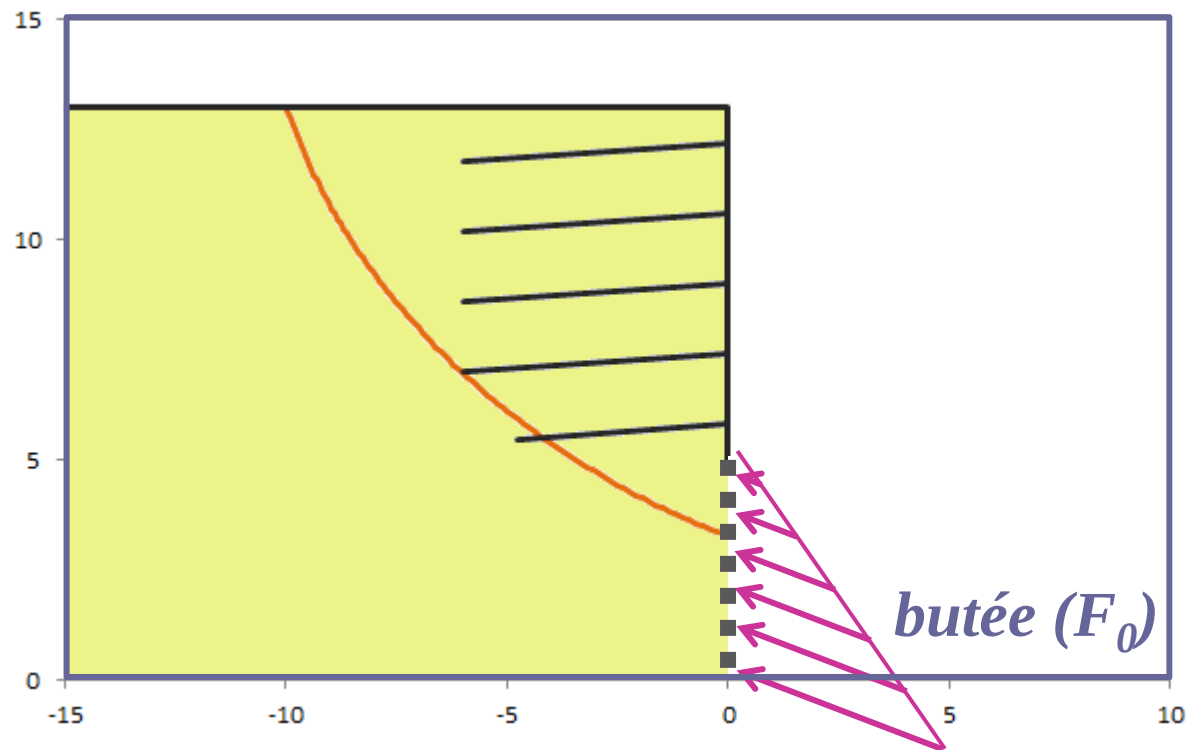


$\phi' = 33^\circ$ $c' = 50$ kPa ($F = 1$)



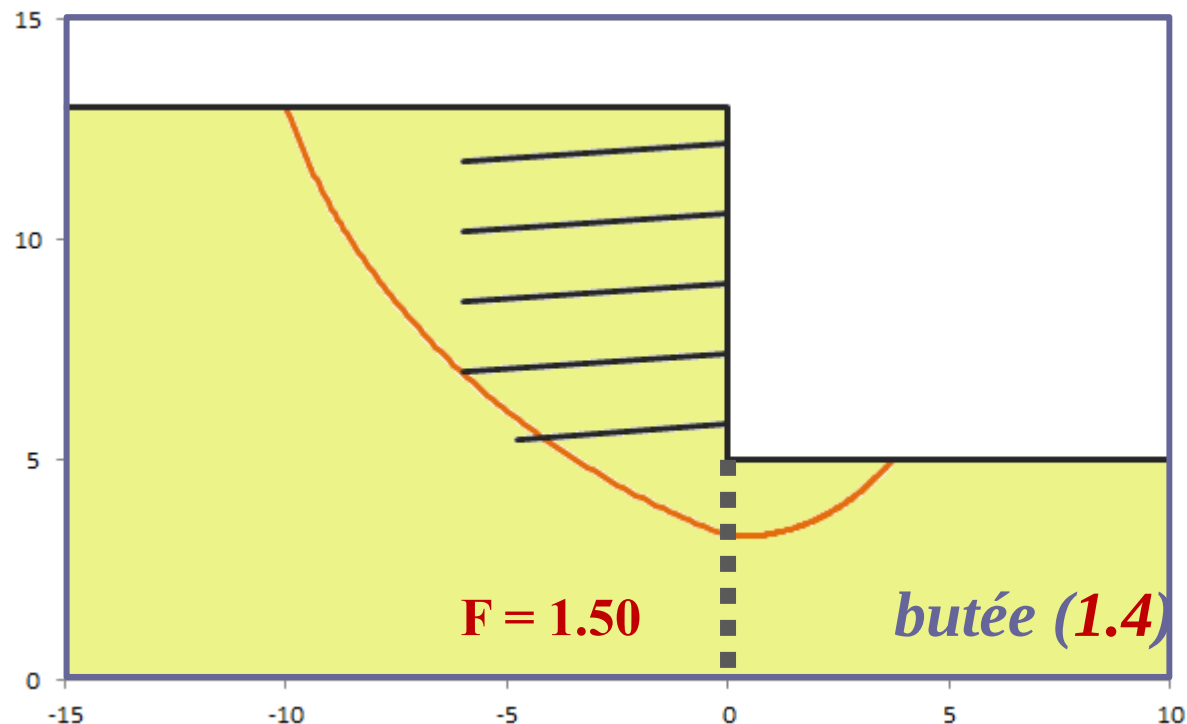
Intégrer l'influence de la fondation

- Approche simplifiée (norme NF P 94 270)
 - décomposition en deux secteurs



Intégrer l'influence de la fondation

- Approche simplifiée (norme NF P 94 270)
 - décomposition en deux secteurs



Sol

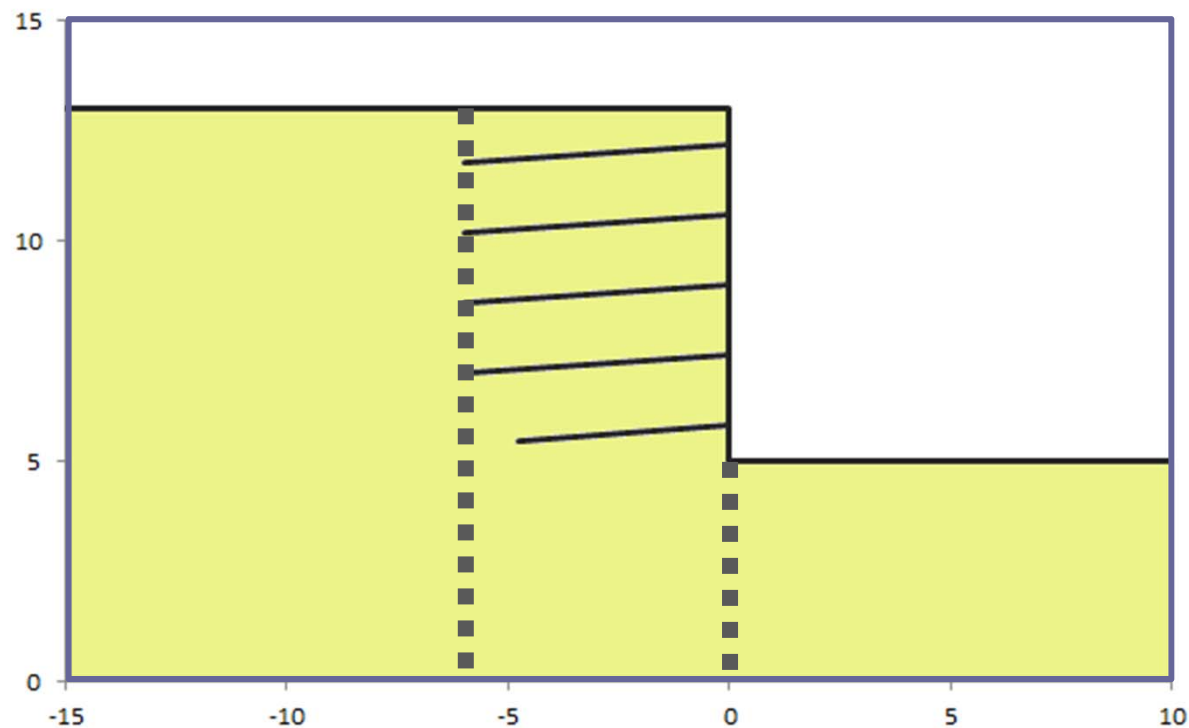
- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Clous

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

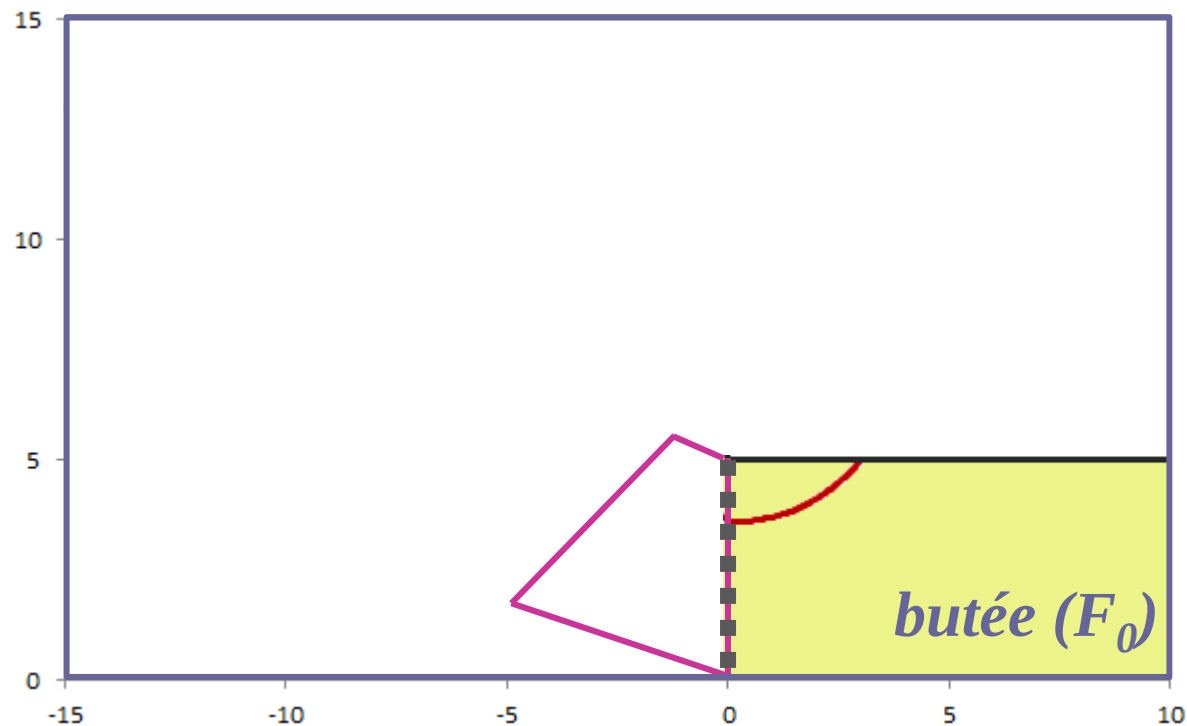
Intégrer l'influence de la fondation

- **Approche simplifiée (norme NF P 94 270)**
 - décomposition en trois secteurs



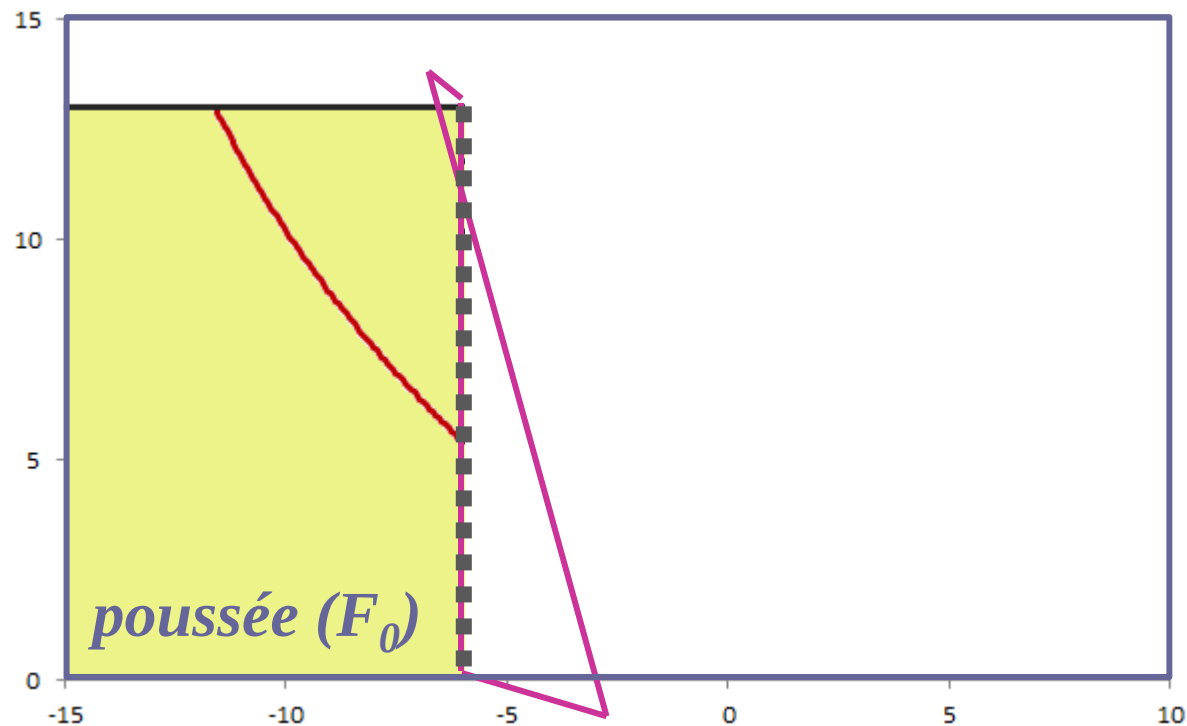
Intégrer l'influence de la fondation

- Approche simplifiée (norme NF P 94 270)
 - décomposition en trois secteurs



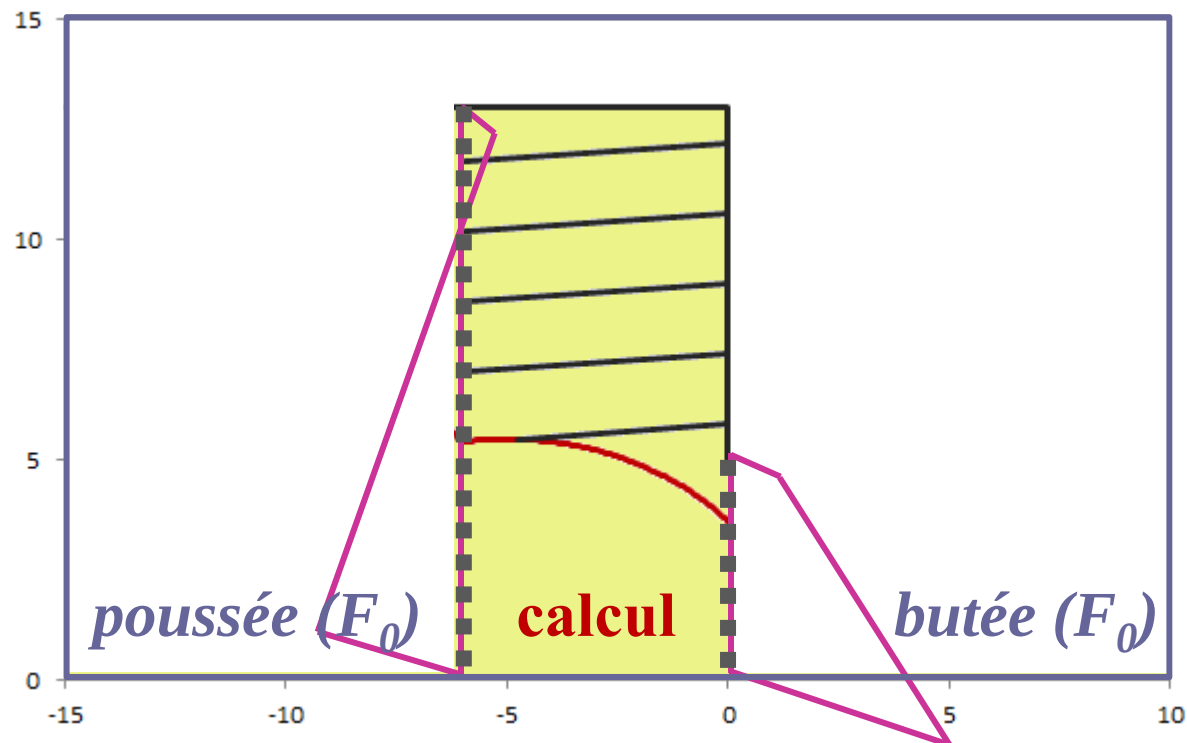
Intégrer l'influence de la fondation

- Approche simplifiée (norme NF P 94 270)
 - décomposition en trois secteurs



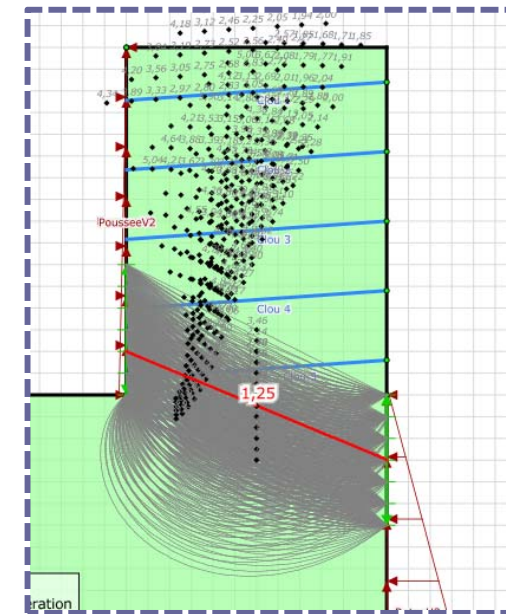
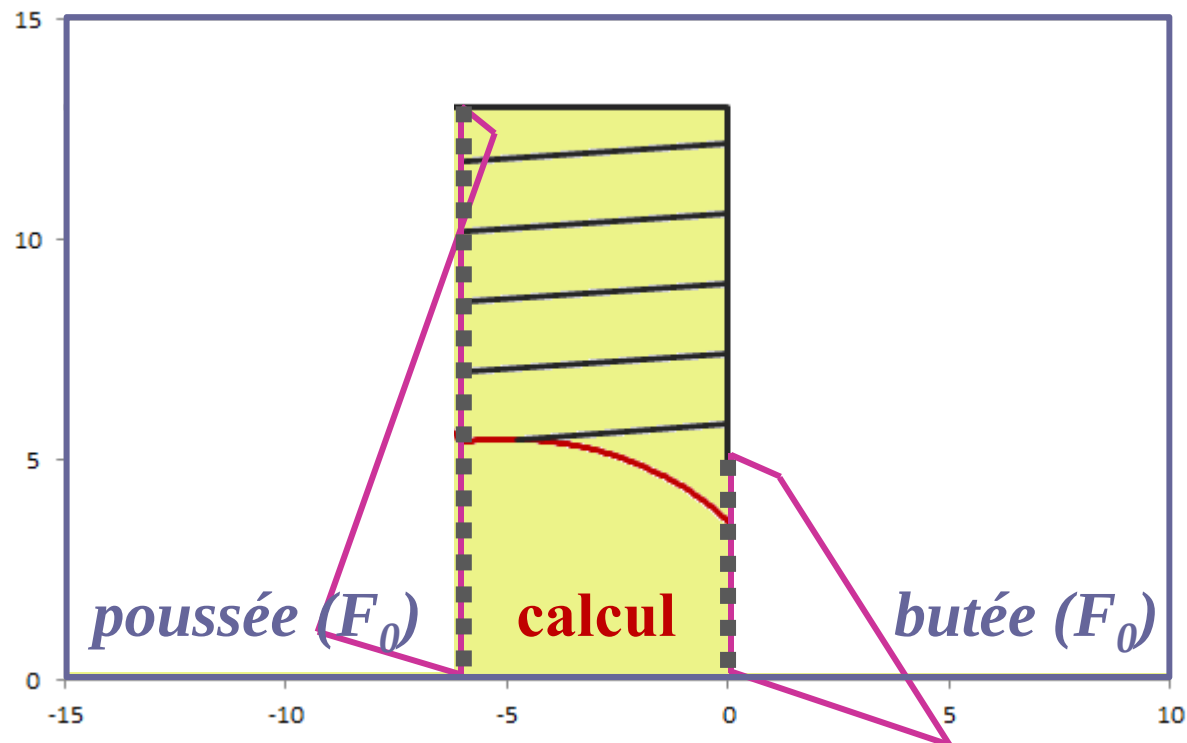
Intégrer l'influence de la fondation

- Approche simplifiée (norme NF P 94 270)
 - décomposition en trois secteurs



Intégrer l'influence de la fondation

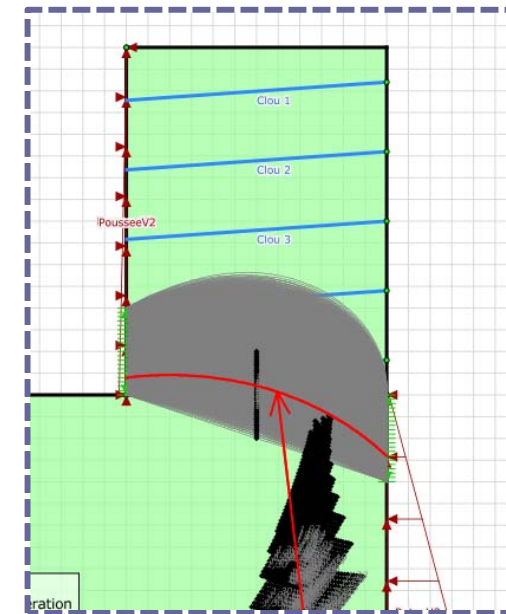
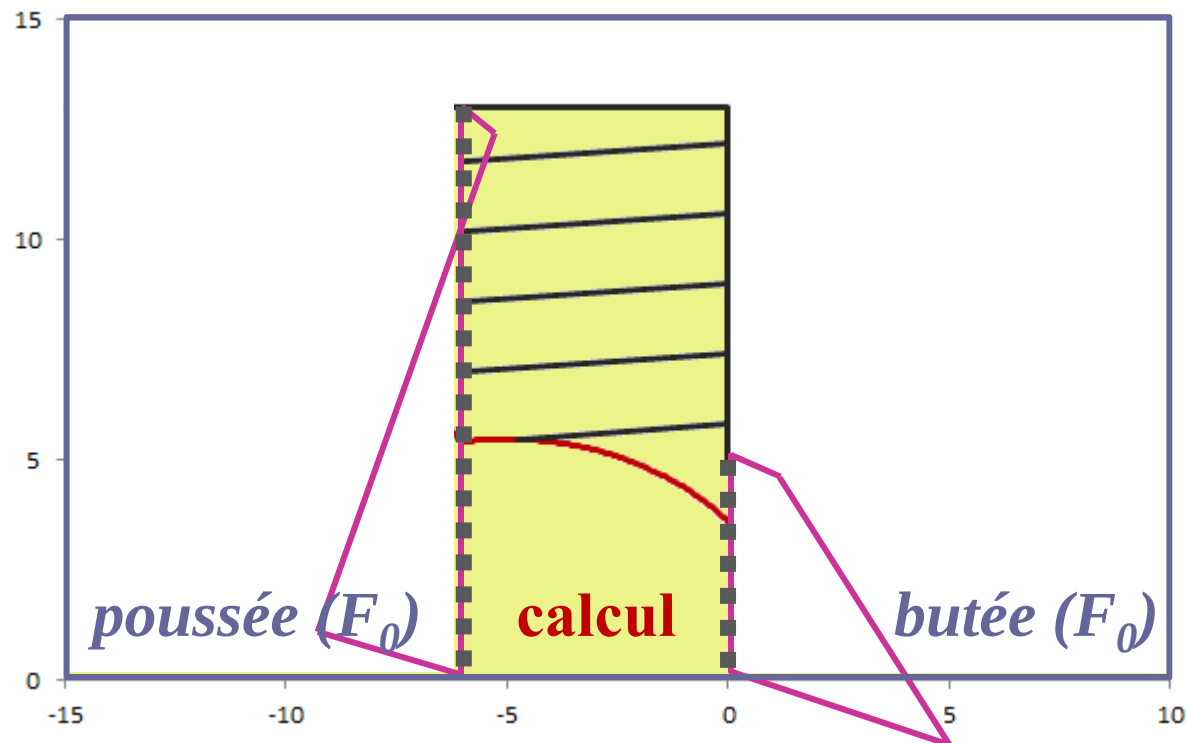
- Approche simplifiée (norme NF P 94 270)
 - décomposition en trois secteurs



pôles supérieurs

Intégrer l'influence de la fondation

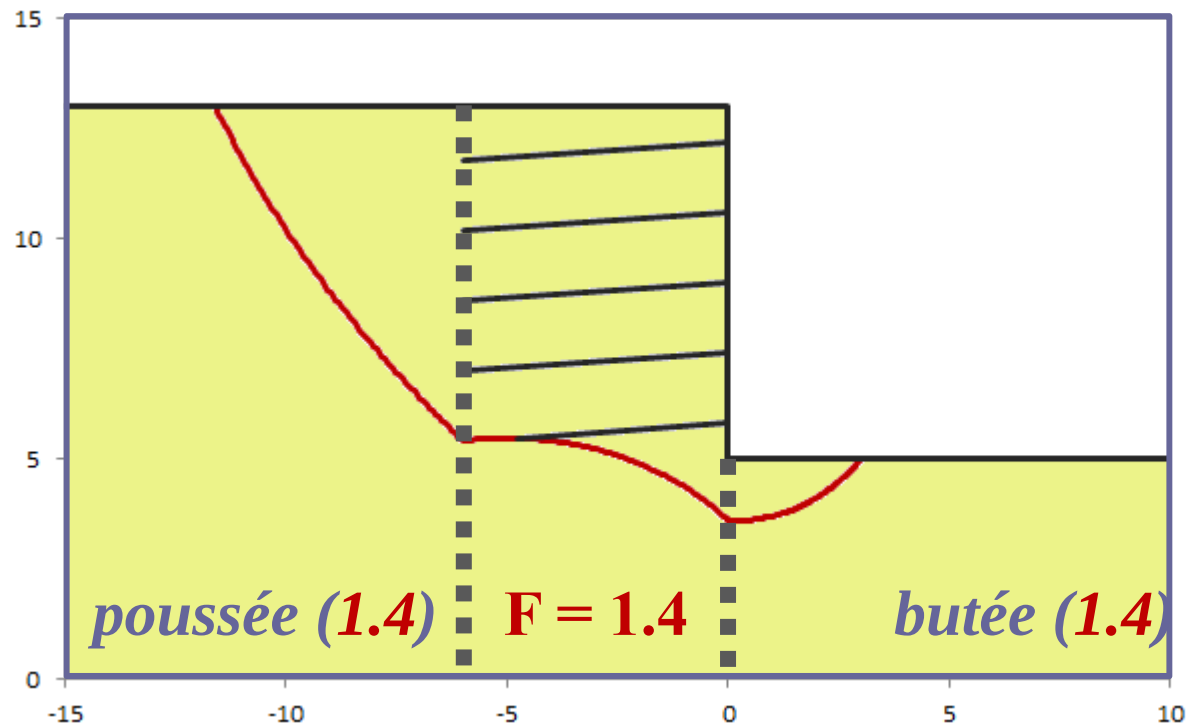
- Approche simplifiée (norme NF P 94 270)
 - décomposition en trois secteurs



pôles inférieurs

Intégrer l'influence de la fondation

- Approche simplifiée (norme NF P 94 270)
 - décomposition en trois secteurs



Sol

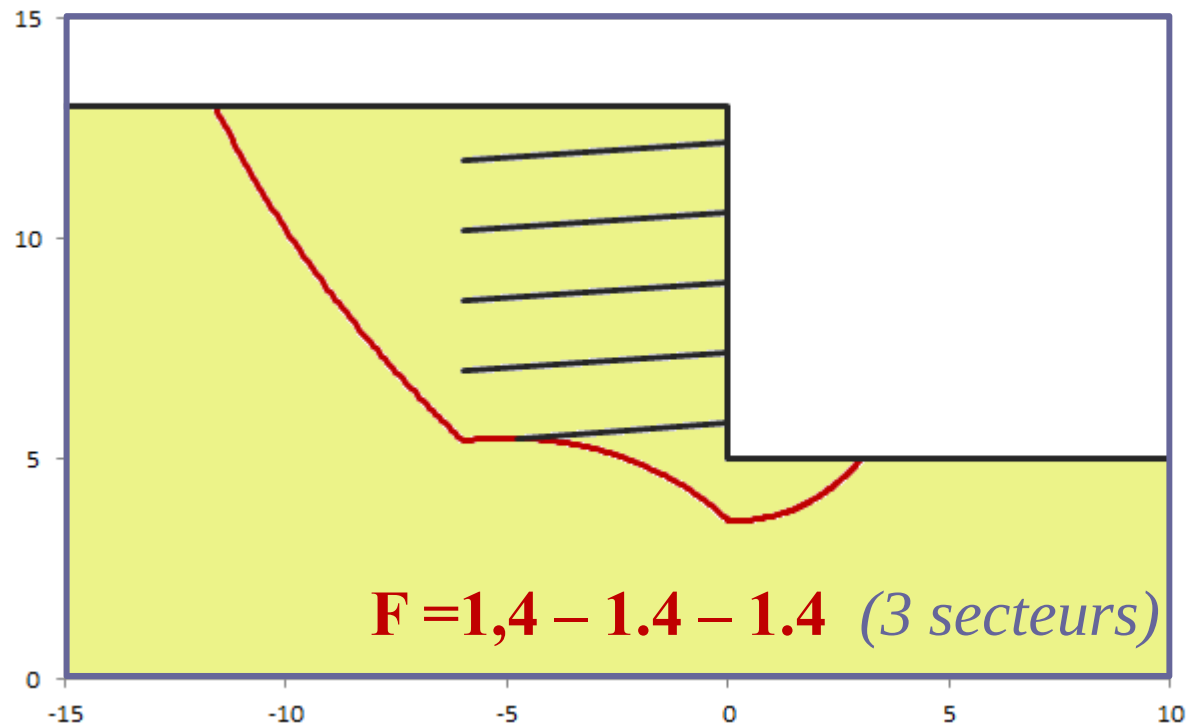
- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Clous

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

Intégrer l'influence de la fondation

- Approche simplifiée (norme NF P 94 270)
 - décomposition en secteurs



Sol

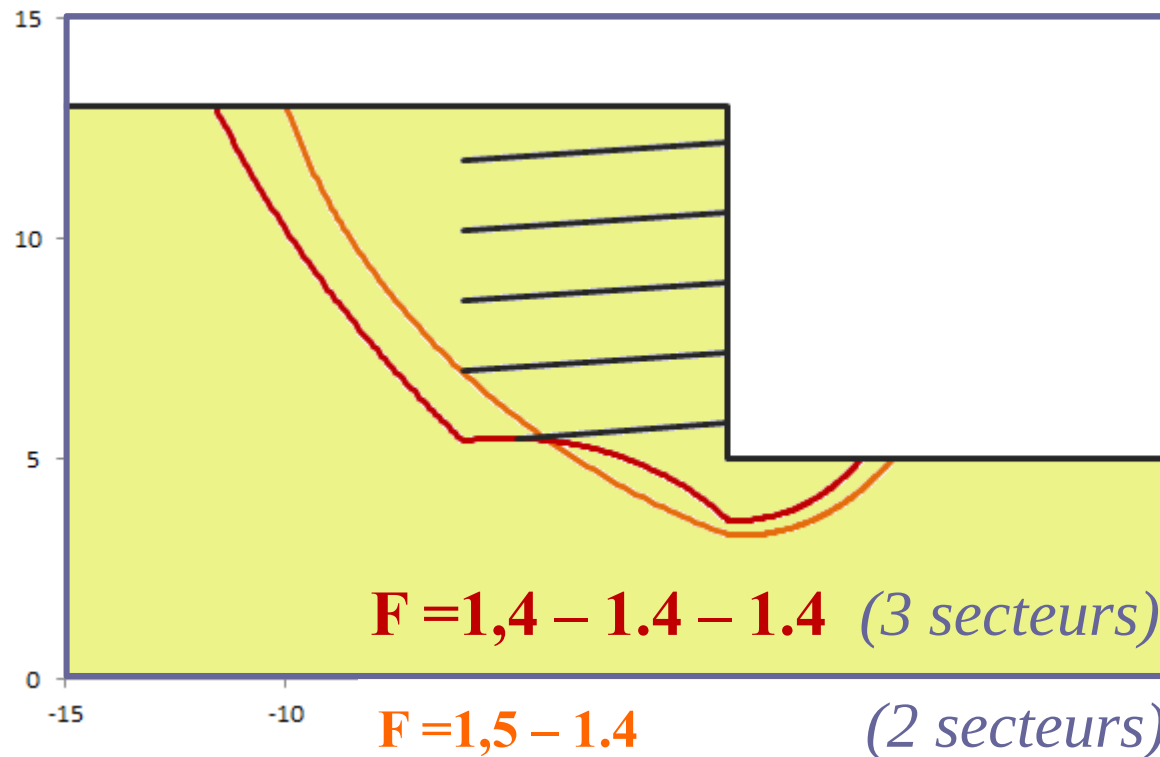
- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Clous

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

Intégrer l'influence de la fondation

- Approche simplifiée (norme NF P 94 270)
 - décomposition en secteurs



Sol

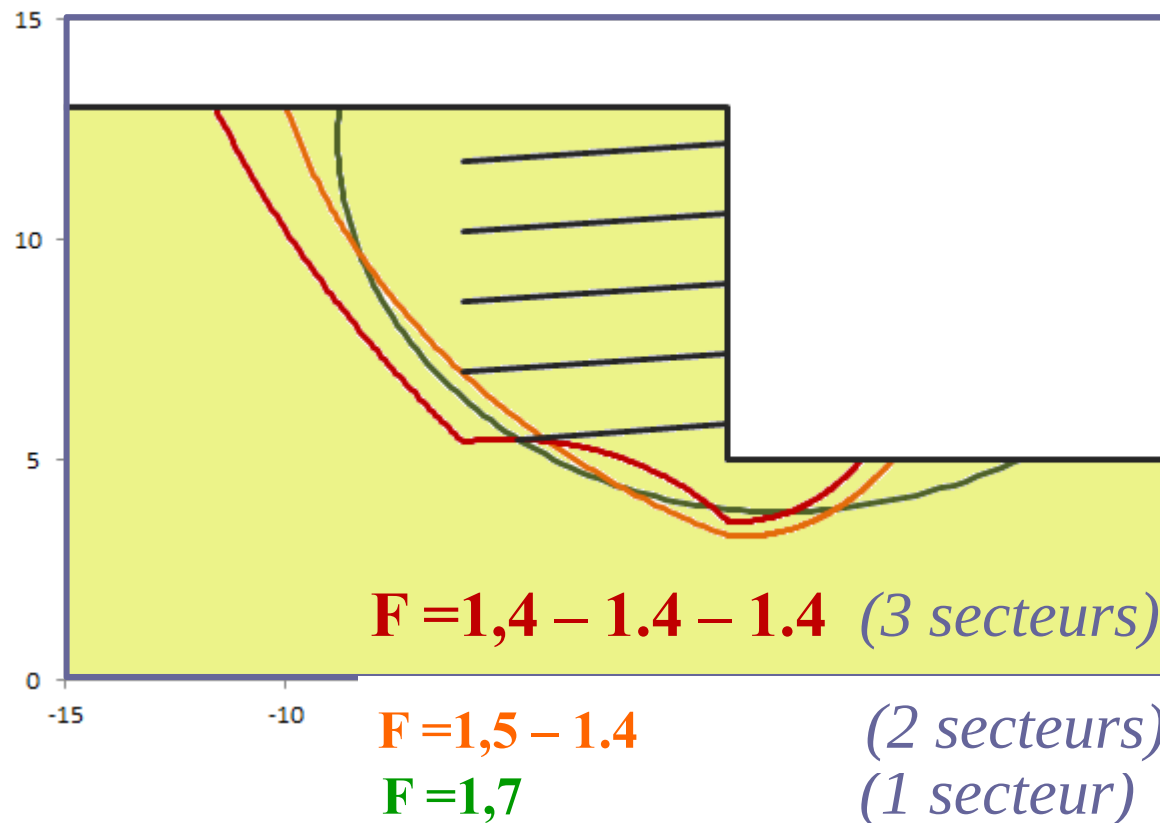
- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Clous

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

Intégrer l'influence de la fondation

- Approche simplifiée (norme NF P 94 270)
 - décomposition en secteurs



Sol

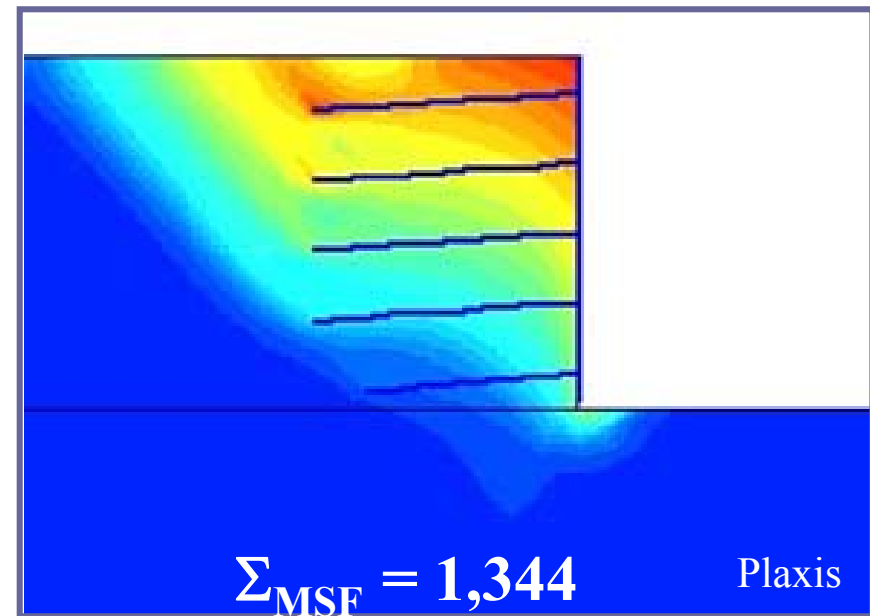
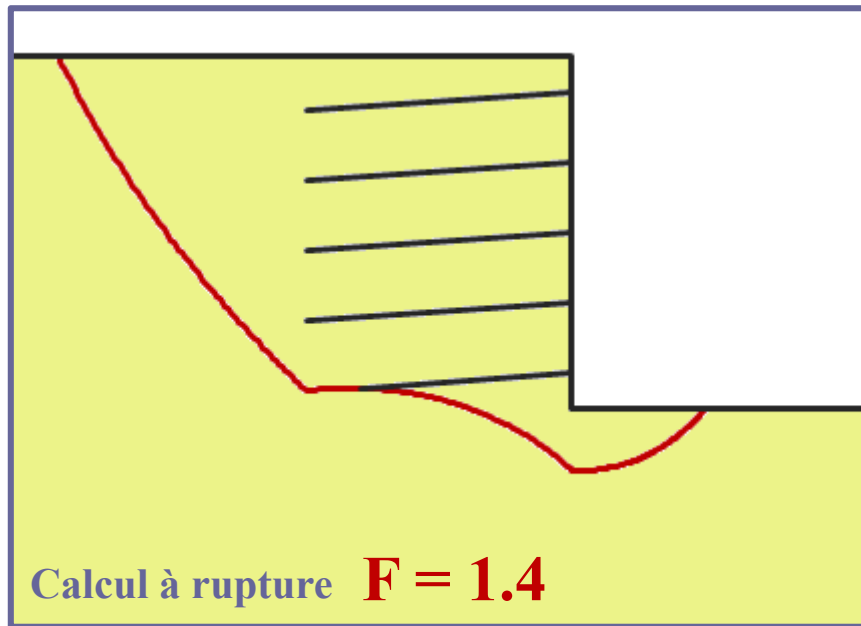
- $\phi = 33^\circ$
- $c = 4 \text{ kPa}$
- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Clous

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

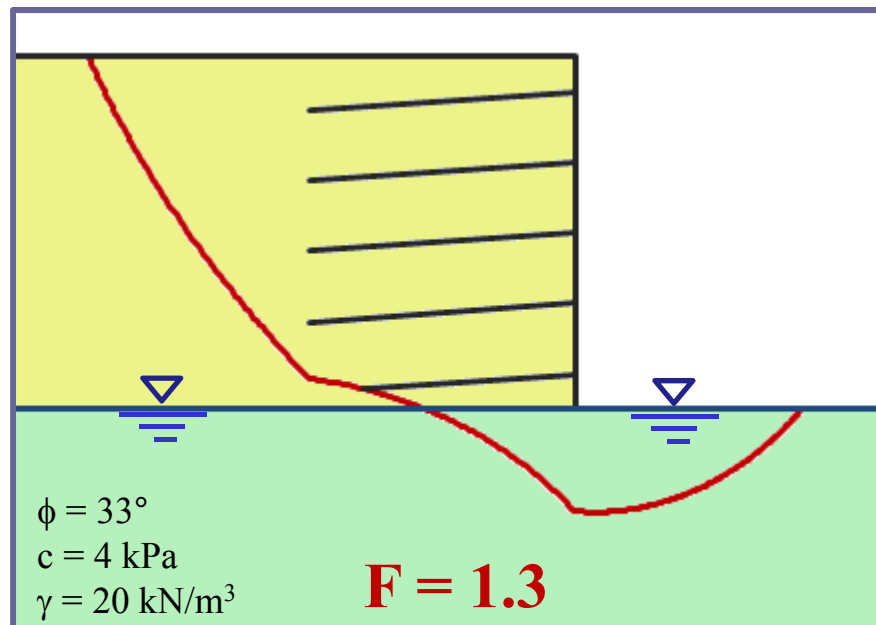
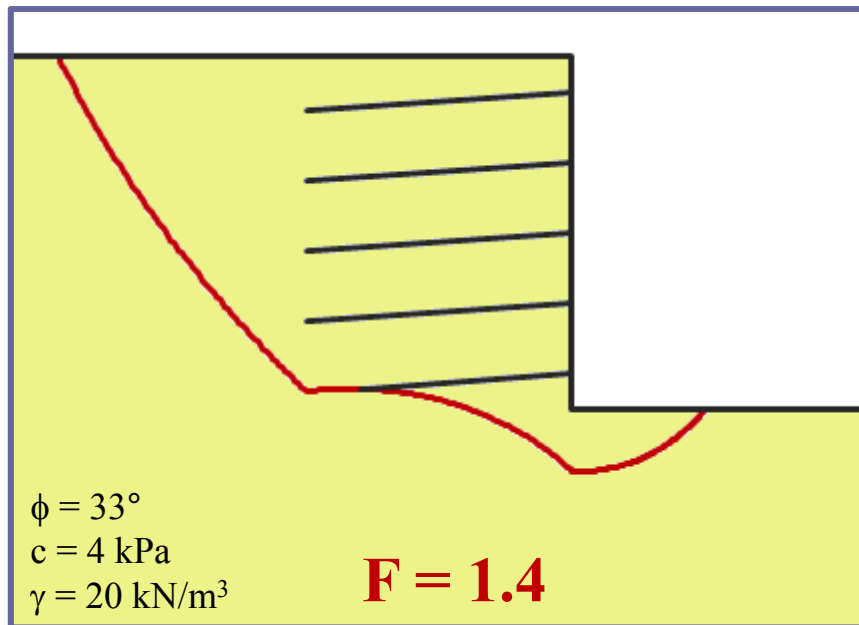
Intégrer l'influence de la fondation

- Comparaison avec calcul éléments finis



Intégrer l'influence de la fondation

- Influence d'une nappe au pied du massif cloué
 - Décomposition en 3 secteurs

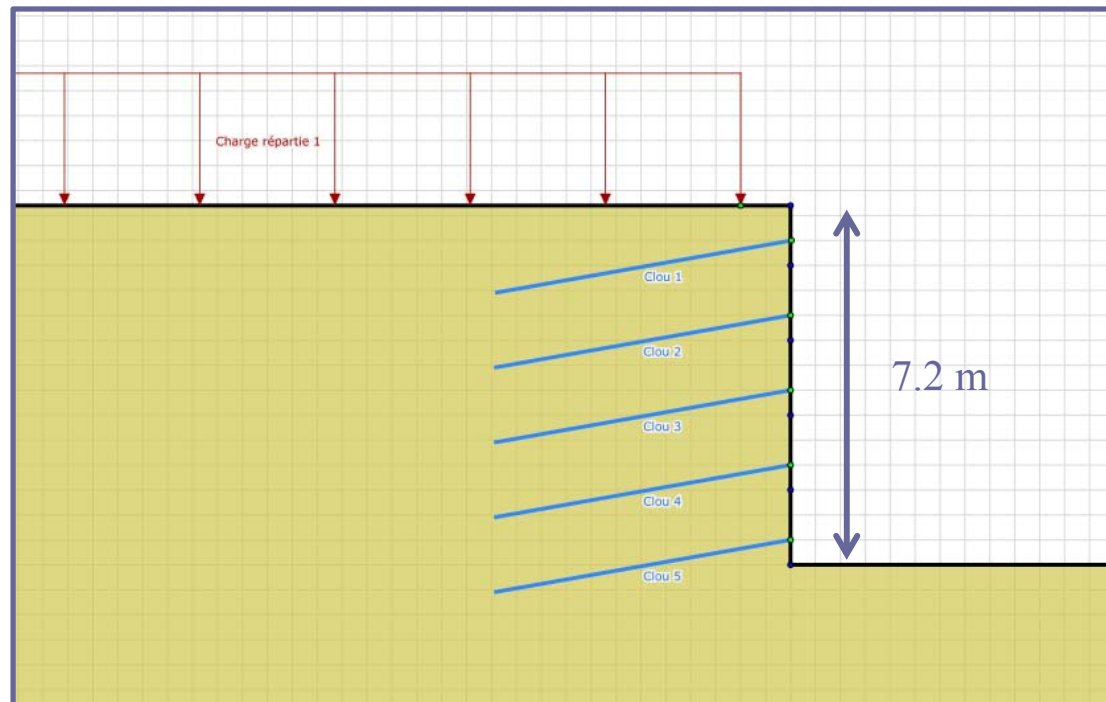


Trois applications aux sols cloués

- Appliquer correctement le multicritère
- Intégrer l'influence de la fondation
- **Evaluer les efforts au parement**

Evaluer les efforts au parement

- Selon recommandations Clouterre 1991
 - À partir des tractions limites mobilisées à rupture



Sol

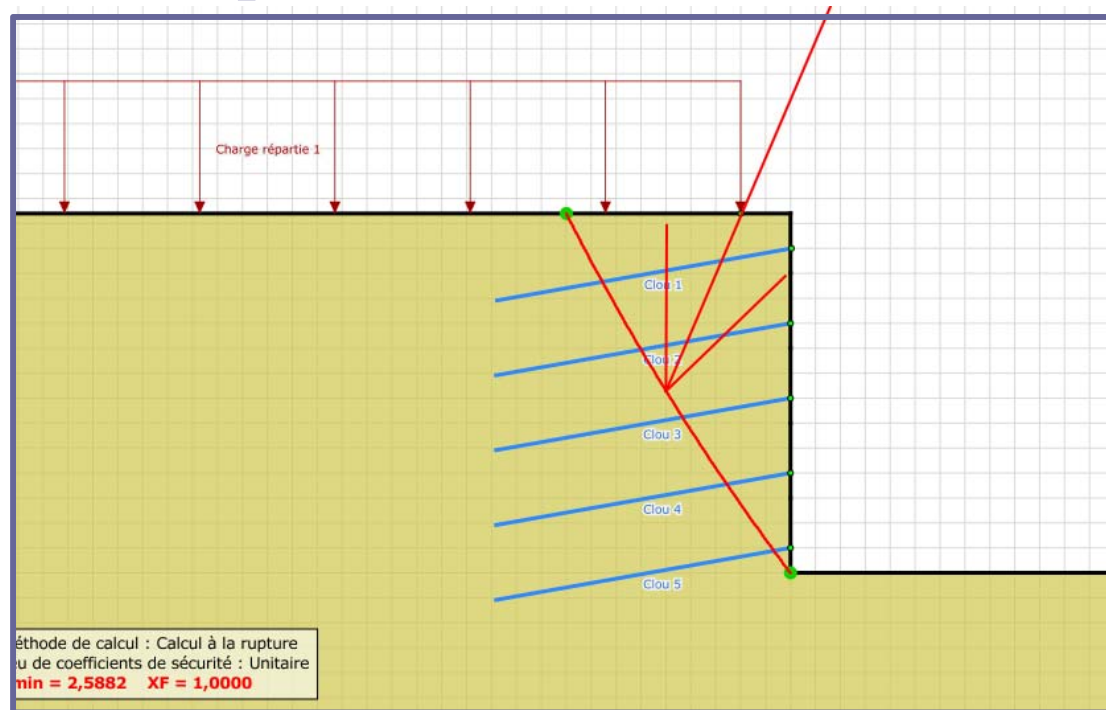
- $\phi = 35^\circ$
- $c = 5 \text{ kPa}$
- $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$

Clous HA32 ($\sigma_e = 500 \text{ MPa}$)

- $L = 6 \text{ m}$
- Forage 100 mm
- $\alpha = 10^\circ$
- $S_h = 2 \text{ m}$

Evaluer les efforts au parement

- Selon recommandations Clouterre 1991
 - À partir des tractions limites mobilisées à rupture



Sol

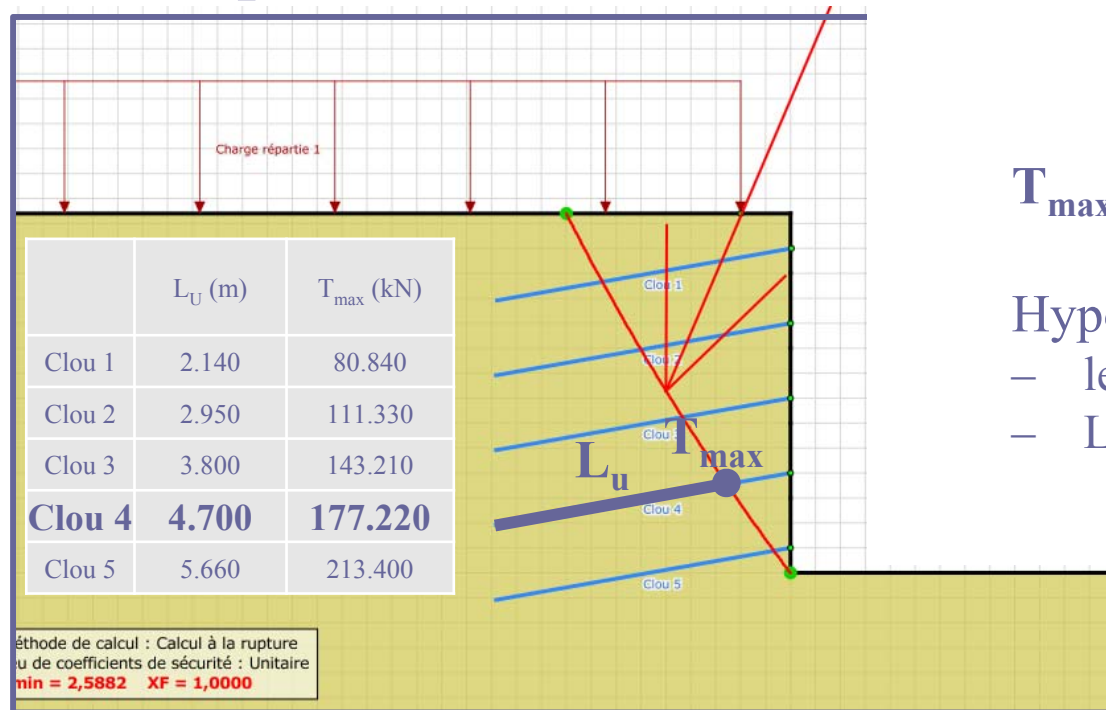
- $\phi = 35^\circ$
- $c = 5 \text{ kPa}$
- $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$

Clous HA32 ($\sigma_e = 500 \text{ MPa}$)

- $L = 6 \text{ m}$
- Forage 100 mm
- $\alpha = 10^\circ$
- $S_h = 2 \text{ m}$

Evaluer les efforts au parement

- Selon recommandations Clouterre 1991
 - À partir des tractions limites mobilisées à rupture



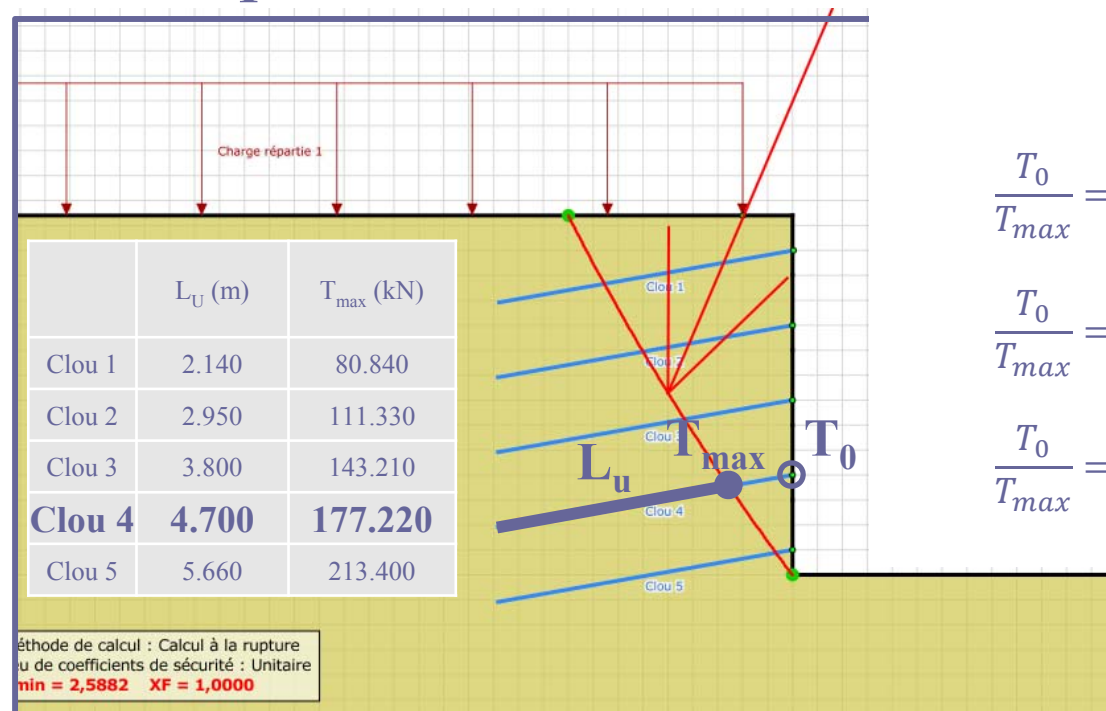
$$T_{max} = \inf (T_R, L_u \cdot q_s)$$

Hypothèse implicite

- le parement permet équilibrer T_{max}
- $L_u = L_{externe}$

Evaluer les efforts au parement

- Selon recommandations Clouterre 1991
 - À partir des tractions limites mobilisées à rupture



$$\frac{T_0}{T_{max}} = 1 \quad \text{si } S \geq 3 \text{ m}$$

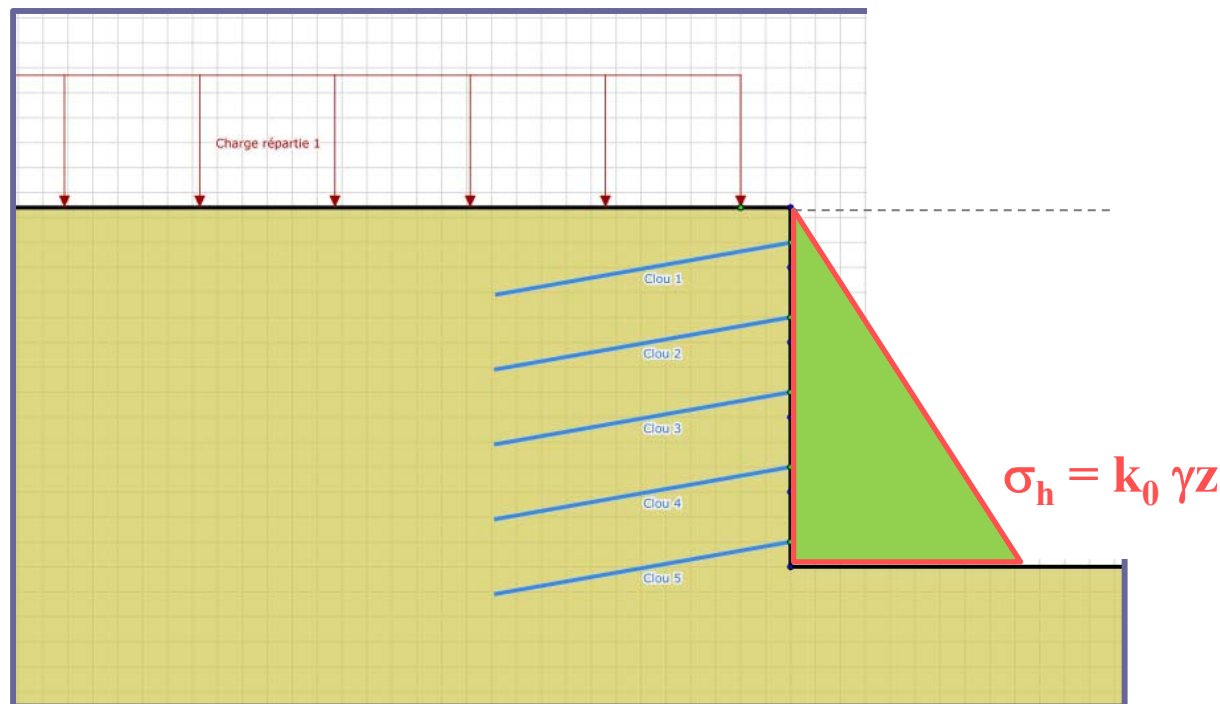
$$\frac{T_0}{T_{max}} = 0.5 + \frac{S - 0.5}{5} \quad \text{si } 1 \leq S \leq 3 \text{ m}$$

$$\frac{T_0}{T_{max}} = 0.6 \quad \text{si } S \leq 1 \text{ m}$$

...les efforts du parement augmentent si les clous sont allongés !

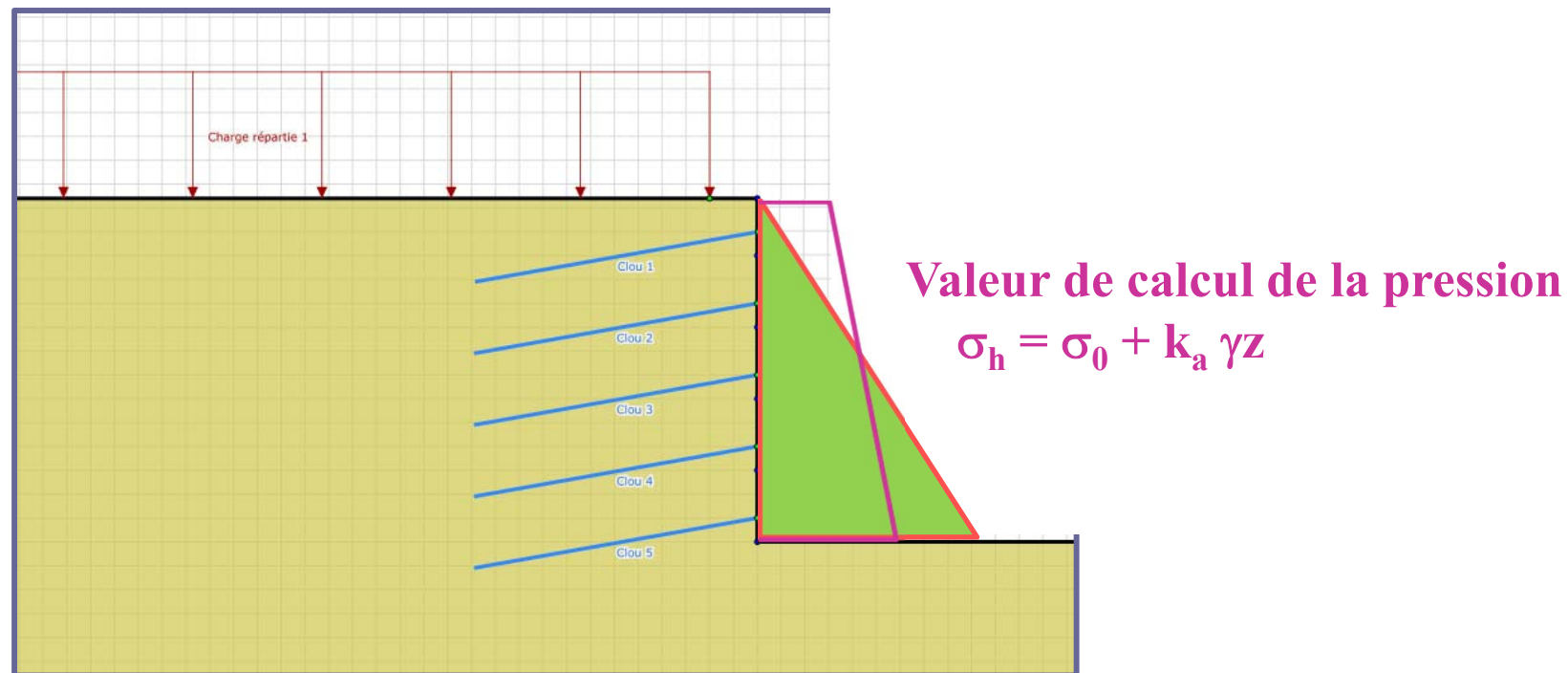
Evaluer les efforts au parement

- Selon norme NF P 94 270 (2009)
 - À partir de l'état des pressions au repos



Evaluer les efforts au parement

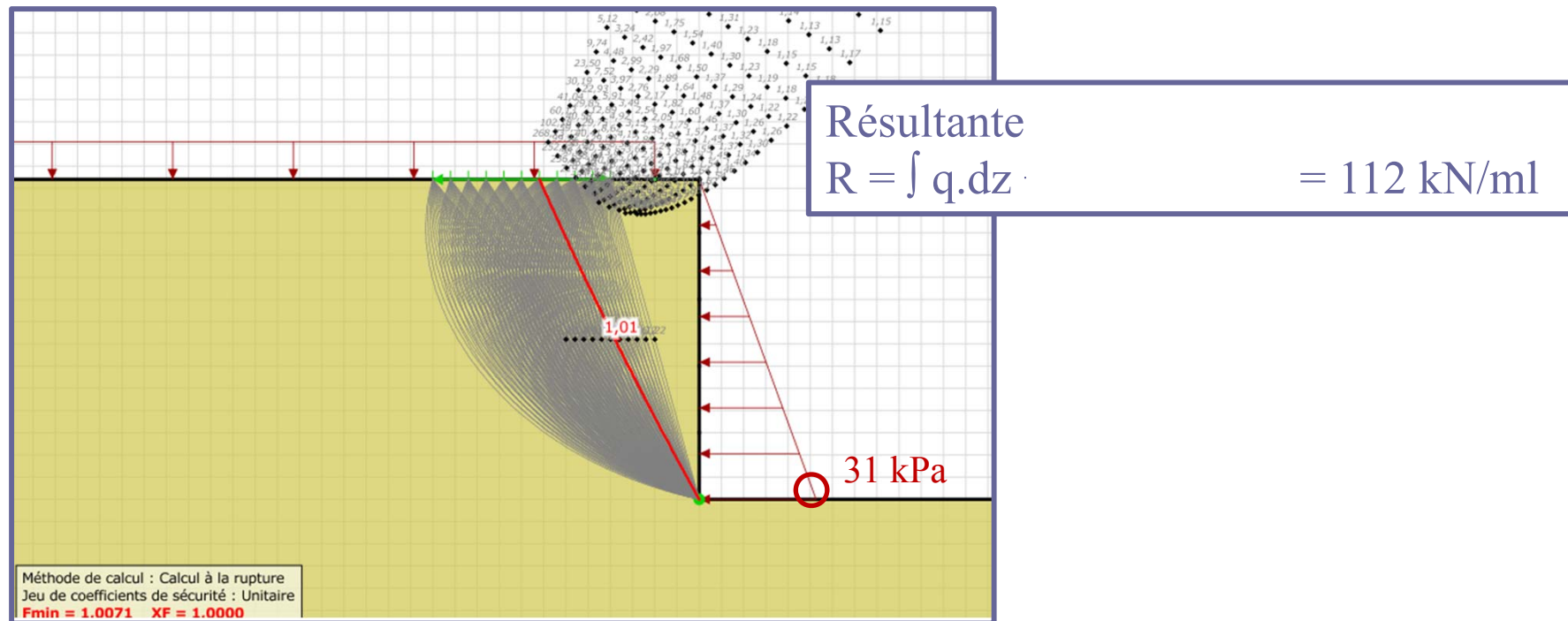
- Selon norme NF P 94 270 (2009)
 - À partir de l'état des pressions au repos



...ignore le cisaillement mobilisé sous le massif cloué !
...application pratique délicate (stratification, inclinaison parement..)

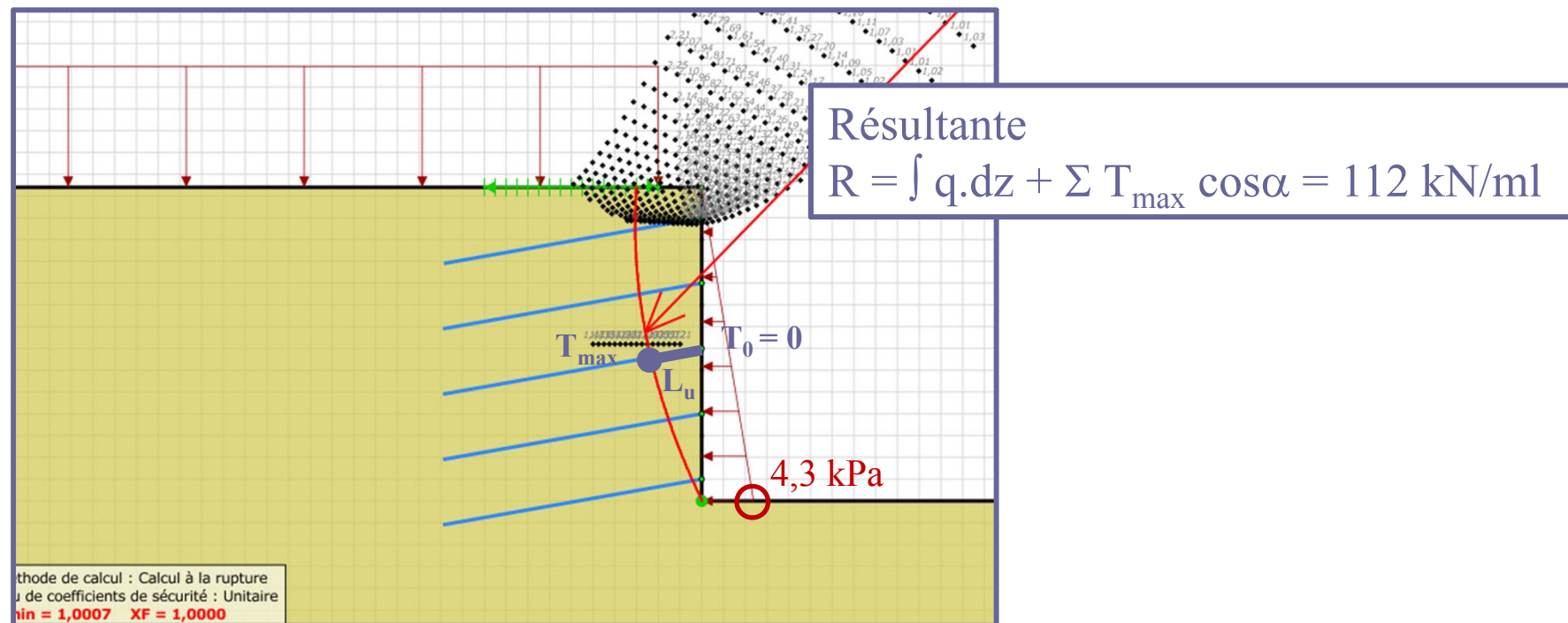
Evaluer les efforts au parement

- Avec la méthode cinématique du calcul à la rupture
 - Clous non pris en compte



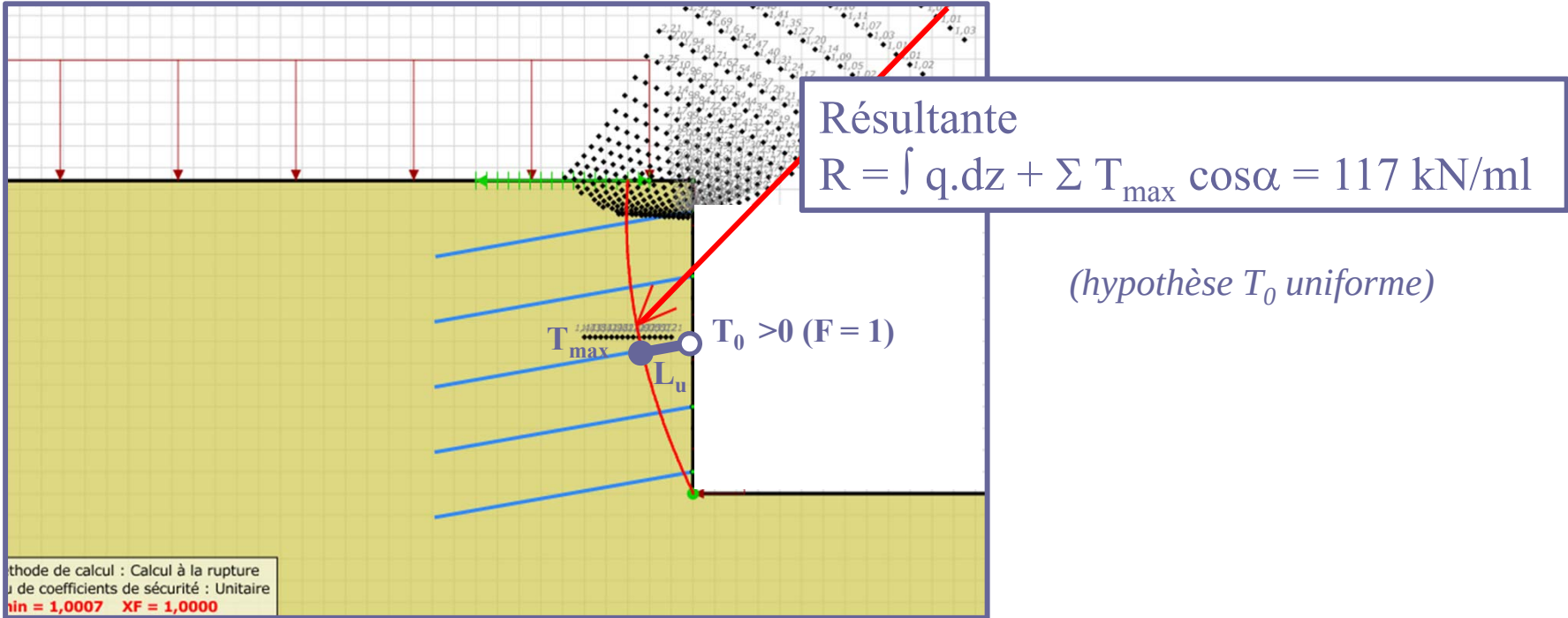
Evaluer les efforts au parement

- Avec la méthode cinématique du calcul à la rupture
 - Clous pris en compte : $\min(T_{\text{interne}}, T_{\text{externe}})$



Evaluer les efforts au parement

- Avec la méthode cinématique du calcul à la rupture
 - Clous pris en compte : $\min(T_{\text{interne}}, T_{\text{externe}})$

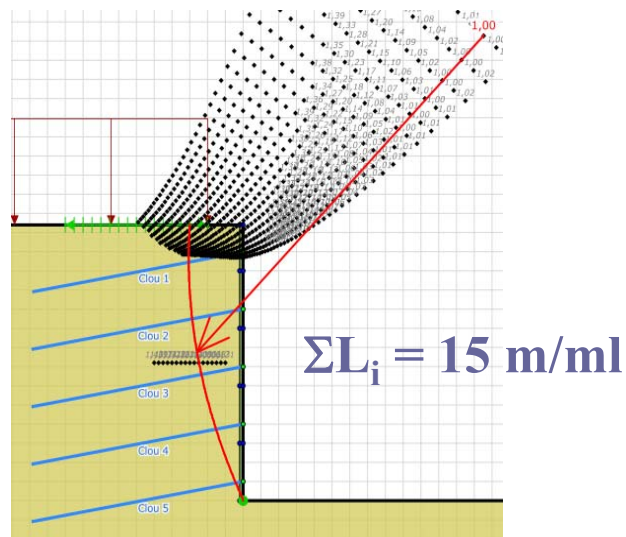


Evaluer les efforts au parement

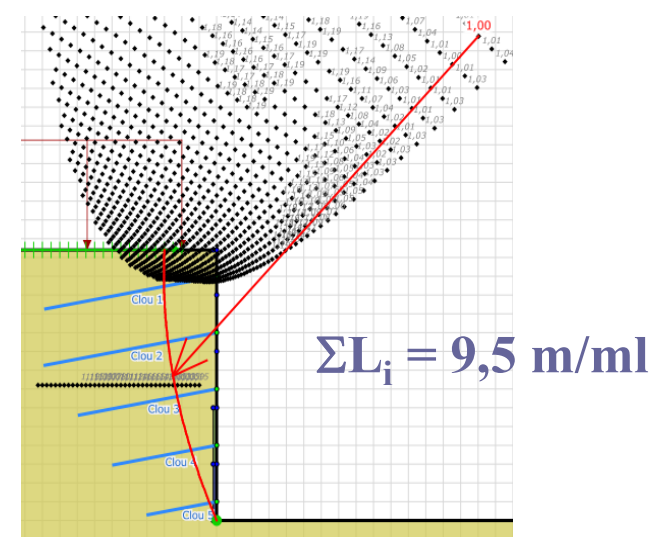
- Avec la méthode cinématique du calcul à la rupture
 - Démarche proposée
 - Calcul systématique avec $\min(T_{\text{interne}}, T_{\text{externe}})$
 - Introduire effort T_0 en tête des clous
 - Avec ou sans hypothèse de redistribution sur clous supérieurs
 - Ajuster valeurs T_0 en tête des clous pour obtenir $F = 1$
 - Le parement est dimensionné pour ces efforts T_0

Evaluer les efforts au parement

- Optimisation efforts clous / efforts parement
 - Lorsque critère T_{externe} redevient dimensionnant



	L (m)	T0 imposé (kN)	Tmax (kN)
Clou 1	6	12.3	67.0
Clou 2	6	12.3	63.0
Clou 3	6	12.3	53.0
Clou 4	6	12.3	37.4
Clou 5	6	12.3	16.2



	L (m)	T0 imposé (kN)	Tmax (kN)
Clou 1	5	12.3	66,8
Clou 2	5	12.3	63.3
Clou 3	4	12.3	53.3
Clou 4	3	12.3	37.5
Clou 5	2	12.3	16.4

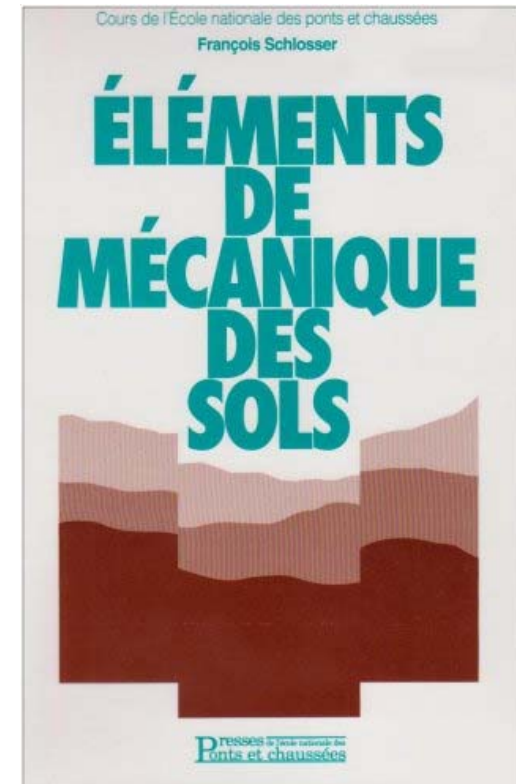
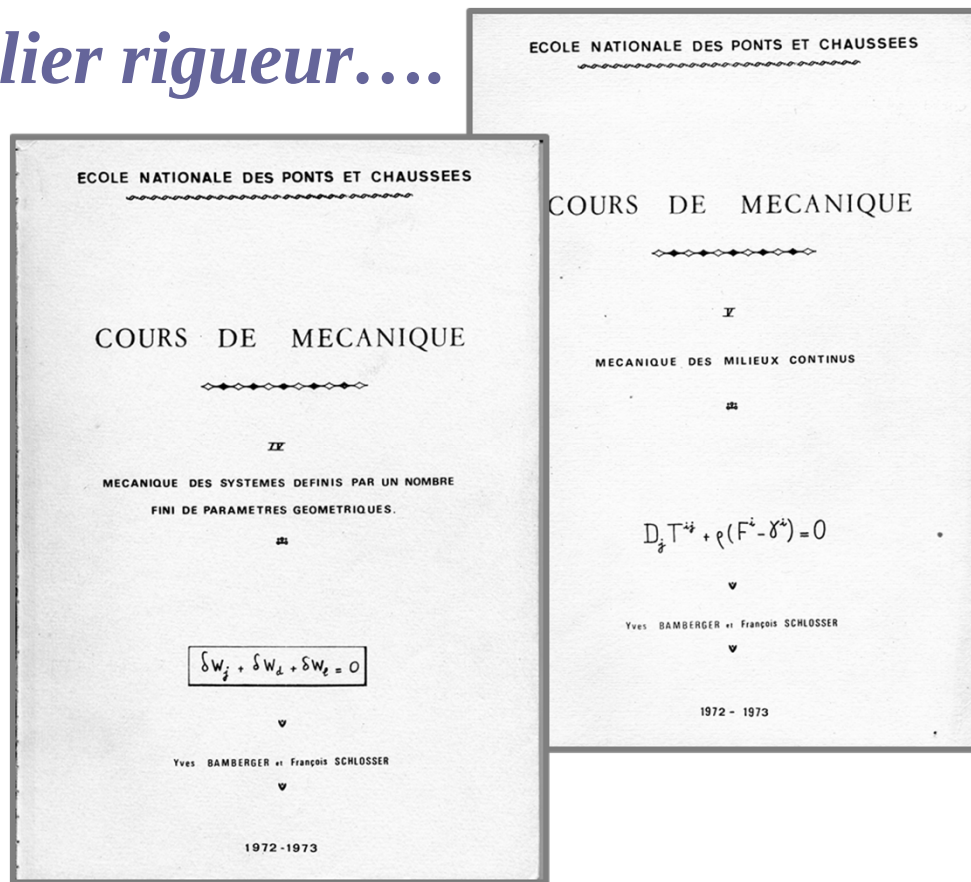
CONCLUSION (1)

- **Le calcul à la rupture**
 - une approche rigoureuse de la stabilité des ouvrages géotechniques
 - un outil pratique pour l'ingénieur géotechnicien en charge du dimensionnement des ouvrages en sol cloué
 - évaluer les méthodes de dimensionnement existantes
 - mieux approcher les mécanismes de ruine
 - contribuer à l'optimisation des ouvrages

CONCLUSION (2)

- L'art de l'ingénieur...

allier rigueur....



.... et sens pratique

