



Webinaire du 18 Mai 2021

Utilisation pratique de la norme NF P 94 270 pour le calcul des soutènements en sols cloués

Séance animée par :

- | | |
|----------------------|---------------------------|
| • Fabien BORSELLINO | EGIS GEOTECHNIQUE |
| • Fahd CUIRA | TERRASOL – CST CFMS |
| • Pierre DE LAVERNEE | SOLETANCHE BACHY |
| • Nicolas NAYRAND | BUREAU VERITAS – CST CFMS |
| • Gilles VALDEYRON | CEREMA – CNJOG |

Sommaire

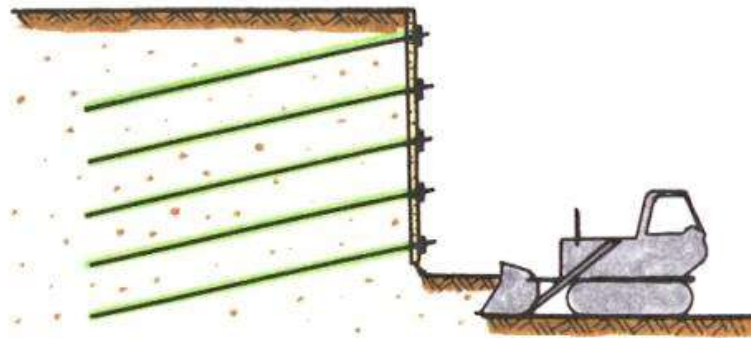
- Les soutènements en sol cloué
- Les points clés de la norme NF P 94 270
- Choix et justification STR/GEO des clous
- Exemples de dimensionnement
- Etats limites de service, ELU sismique

Sommaire

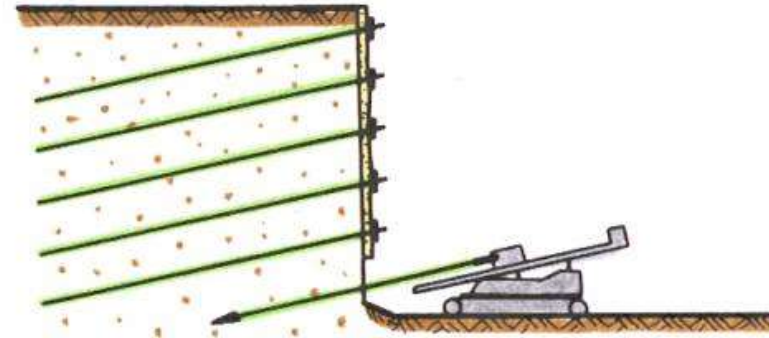
- Les soutènements en sol cloué
- Les points clés de la norme NF P 94 270
- Choix et justification STR/GEO des clous
- Exemples de dimensionnement
- Etats limites de service, ELU sismique

Les soutènements en sol cloué

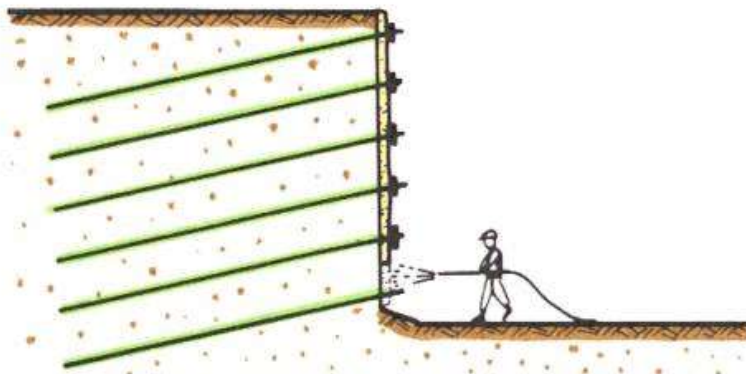
- Procédure de réalisation



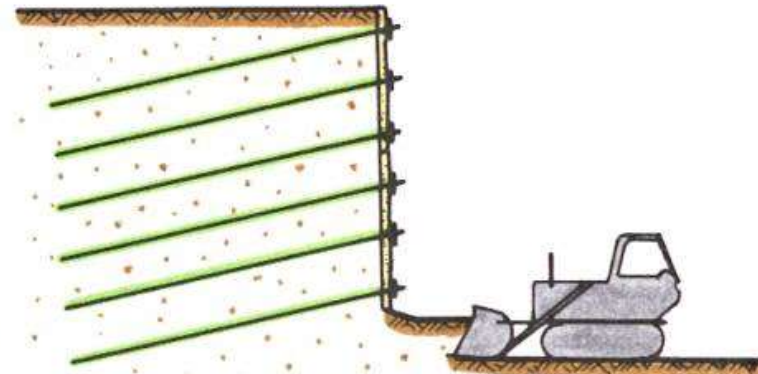
1 - Terrassement



2 - Mise en place des barres



3 - Béton projeté armé



4 - Terrassement

Les soutènements en sol cloué

- Procédure de réalisation



Les soutènements en sol cloué

- Domaines d'application



Les soutènements en sol cloué

- Domaines d'application

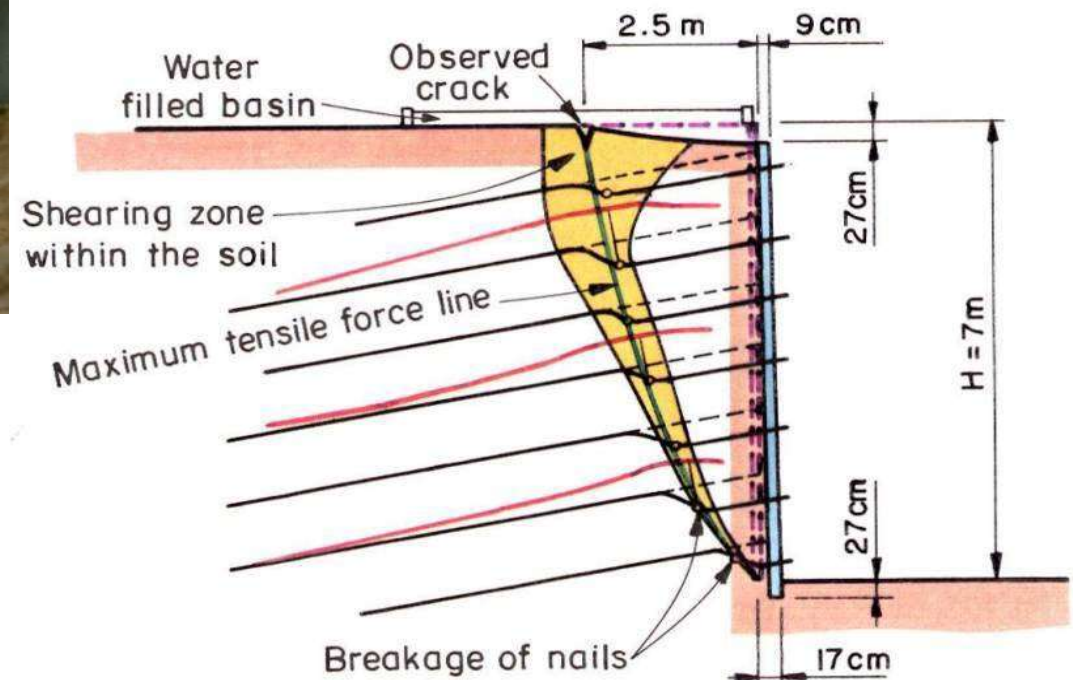


Clouage en milieu ferroviaire



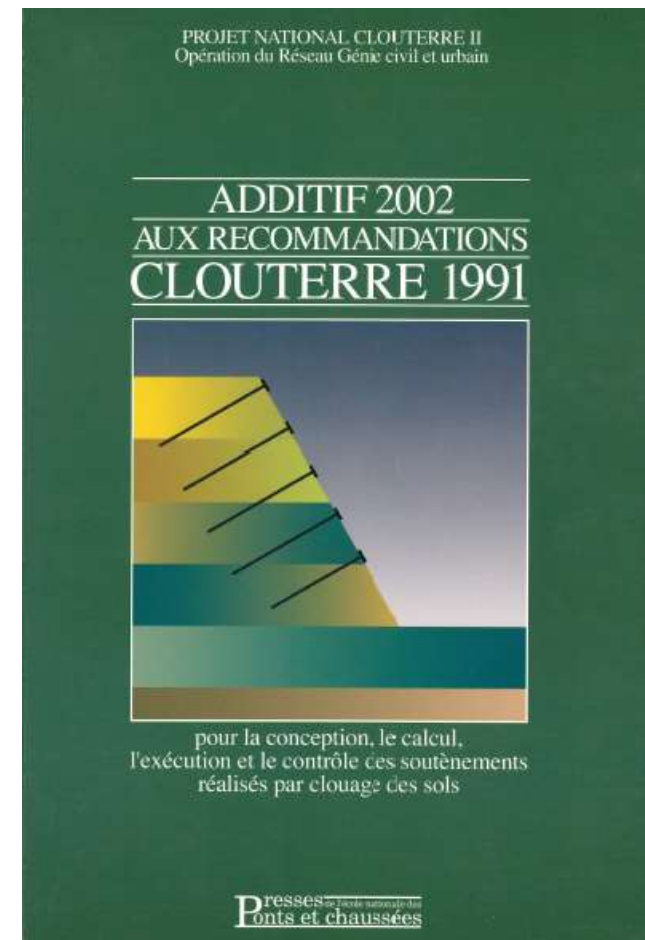
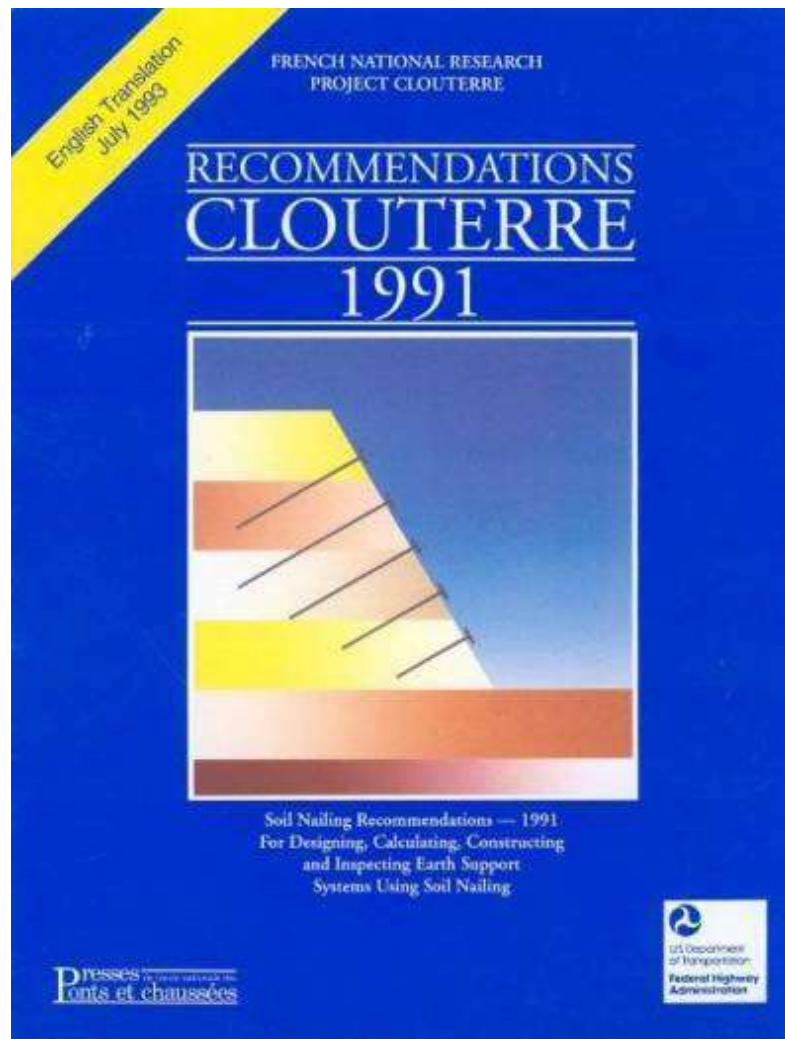
Les soutènements en sol cloué

- Projets nationaux de recherche Clouterre 1 et 2



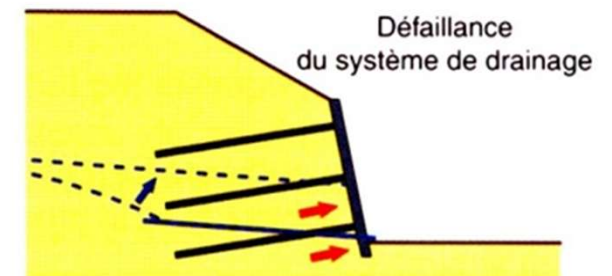
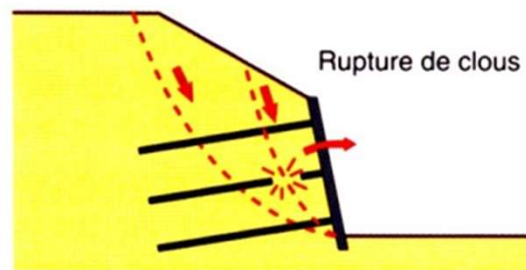
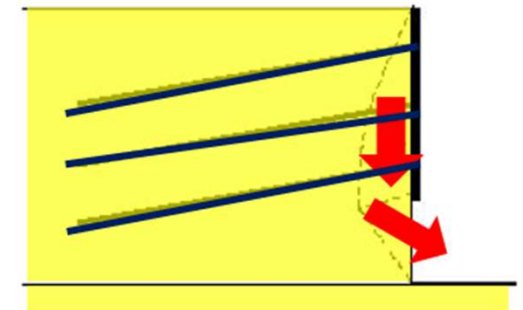
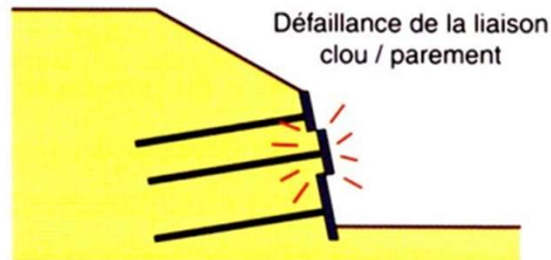
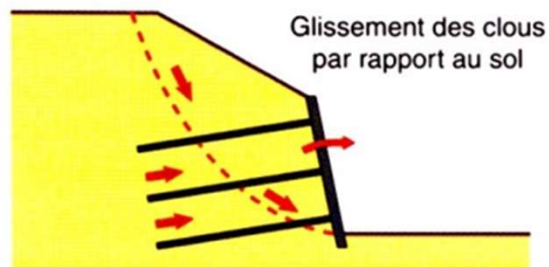
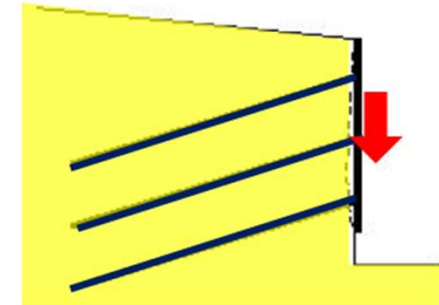
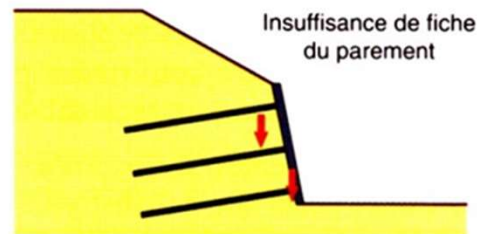
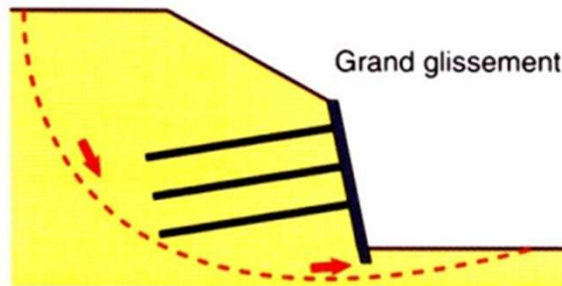
Les soutènements en sol cloué

- Projets nationaux de recherche Clouterre 1 et 2



Les soutènements en sol cloué

- Mécanismes de ruine d'un massif cloué



Sommaire

- Les soutènements en sol cloué
- Les points clés de la norme NF P 94 270
- Choix et justification STR/GEO des clous
- Exemples de dimensionnement
- Etats limites de service, ELU sismique

Les points clés de la NF P 94 270

- Les principales évolutions de la révision 2020

- **Revue du formalisme de sécurité**

- ⇒ Utilisation de l'approche de calcul 3 pour toutes les analyses de stabilité
- ⇒ Revue et homogénéisation des facteurs partiels de modèle
- ⇒ Aspects sismiques (annexe I)

- **Revue des procédures de calcul**

- ⇒ Stabilité externe locale (annexe D)
- ⇒ Stabilité interne (annexe E)
- ⇒ Justification GEO/STR des clous (annexes G et F)

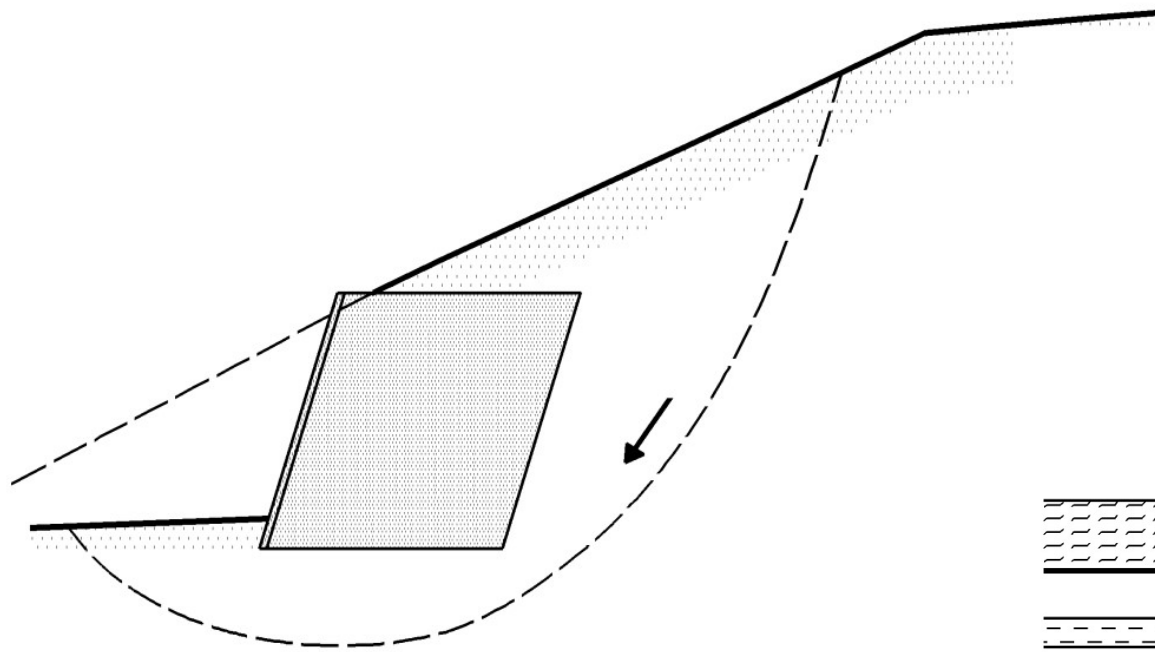
-
- A diagram of a curved beam element. The beam is represented by a blue arc. A vertical dashed line on the left indicates the reference axis, with an angle η marked between the beam's tangent and this axis. The beam's radius is denoted by r . A point on the beam is shown with a black dot, where a normal force T_n (red arrow pointing radially outward) and a shear force T_c (red arrow pointing tangentially) are applied. The beam is subjected to a distributed load σ (red arrows pointing radially outward) and a shear flow τ (red arrows pointing tangentially). The beam is supported by a fixed support at the bottom left, indicated by a hatched area. The top right end of the beam is also hatched, with an angle β marked between the beam's tangent and the horizontal.

-
- The diagram illustrates the forces acting on a ship's hull cross-section. A dashed blue line represents the 'Cercle de rupture potentielle' (potential rupture circle). The angle between this circle and the horizontal is labeled α . The forces shown are:
- P_{max} : Maximum pressure acting vertically downwards on the hull.
 - T_c : Tension force acting along the rupture circle.
 - M : Bending moment acting on the hull.
 - T_n : Normal tension force acting horizontally.
 - L_a : Length of the hull section.
 - q_s : Shear force acting horizontally.

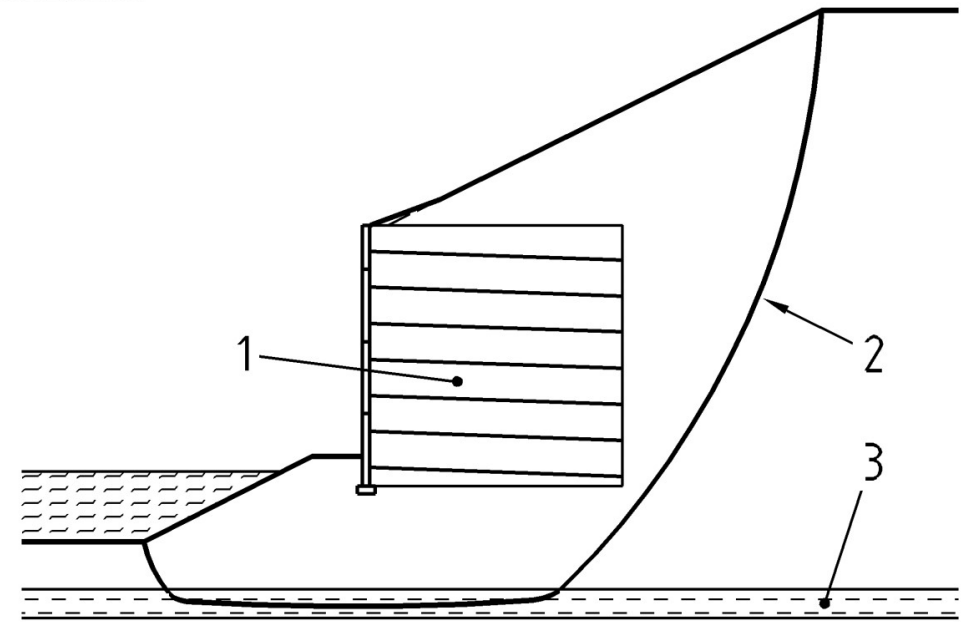
- 1 Barre : $\mathcal{T} \leq k$
- 2 Frottement sol-barre
 $T_n < \pi \cdot BL_a \cdot q_s$
- 3 Réaction normale sol-barre
 $p < p_\ell$
- 4 Sol: $\mathcal{T} \leq C + \sigma \operatorname{tg} \varnothing$

Les analyses de stabilité à mener

- Stabilité générale et mixte



Mécanisme de grand glissement englobant le massif renforcé

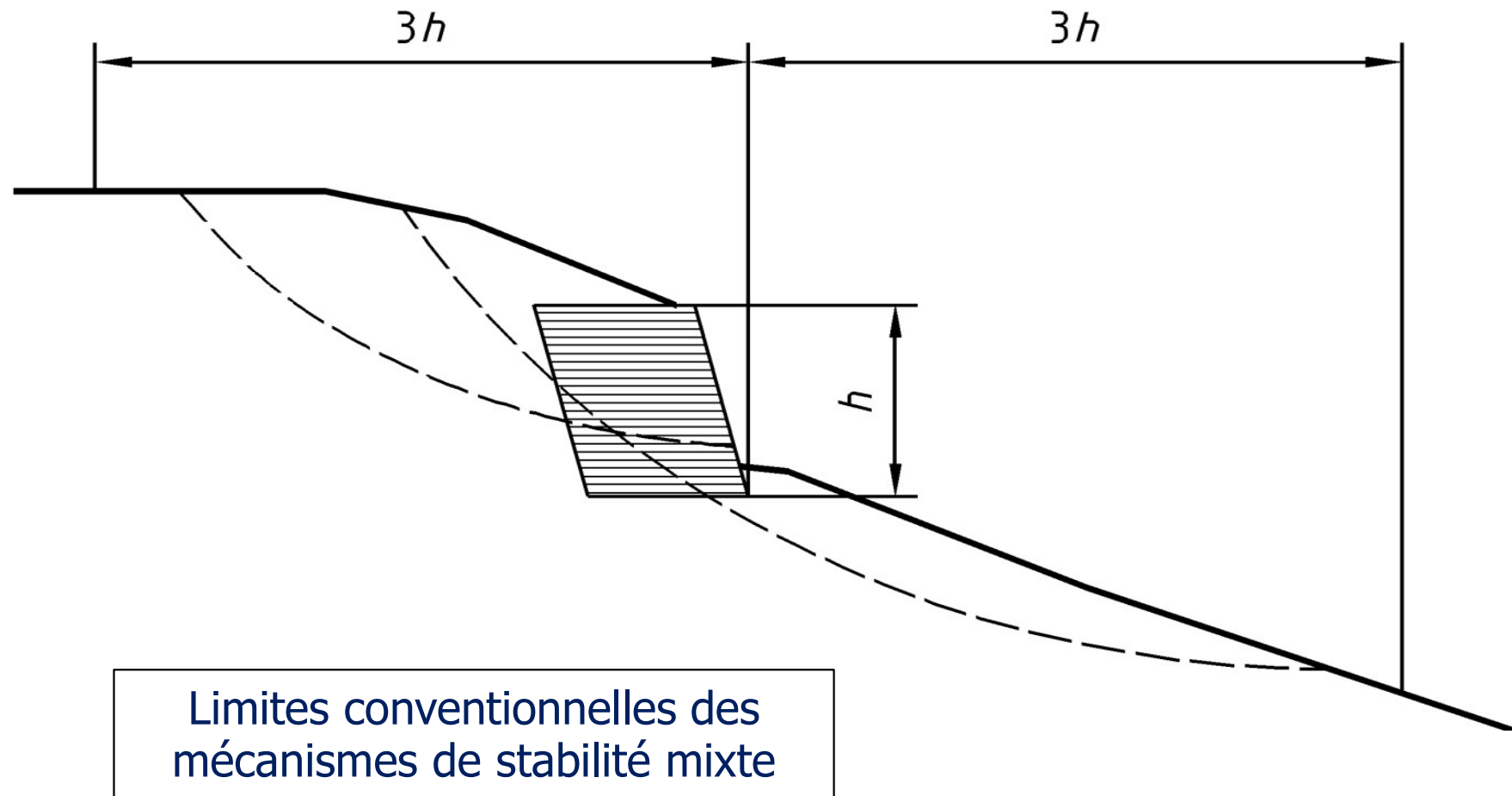


Légende

- 1 Massif renforcé
- 3 Couche de sol de mauvaise qualité
- 2 Surface de rupture non circulaire

Les analyses de stabilité à mener

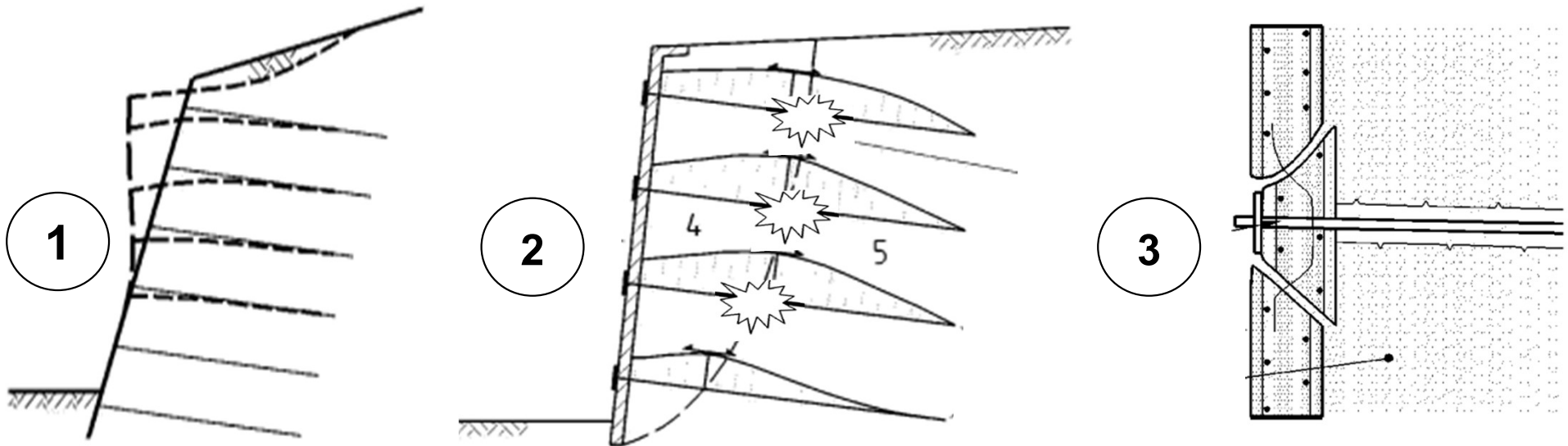
- Stabilité générale et mixte



Les analyses de stabilité à mener

- Stabilité interne

- 1) Perte d'adhérence sol/clou(s)
- 2) Défaut de résistance structurale des clous
- 3) Défaillance du parement ou des dispositifs de liaison

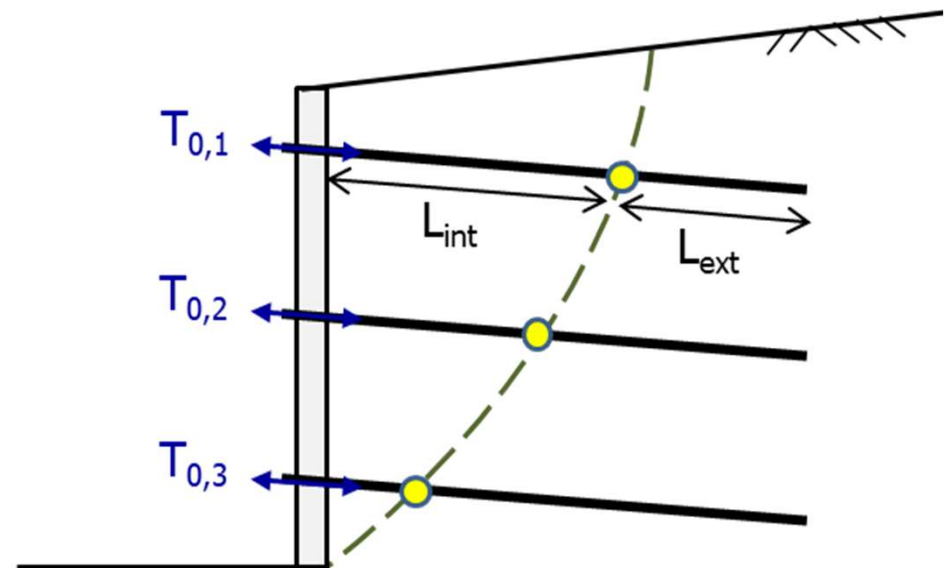
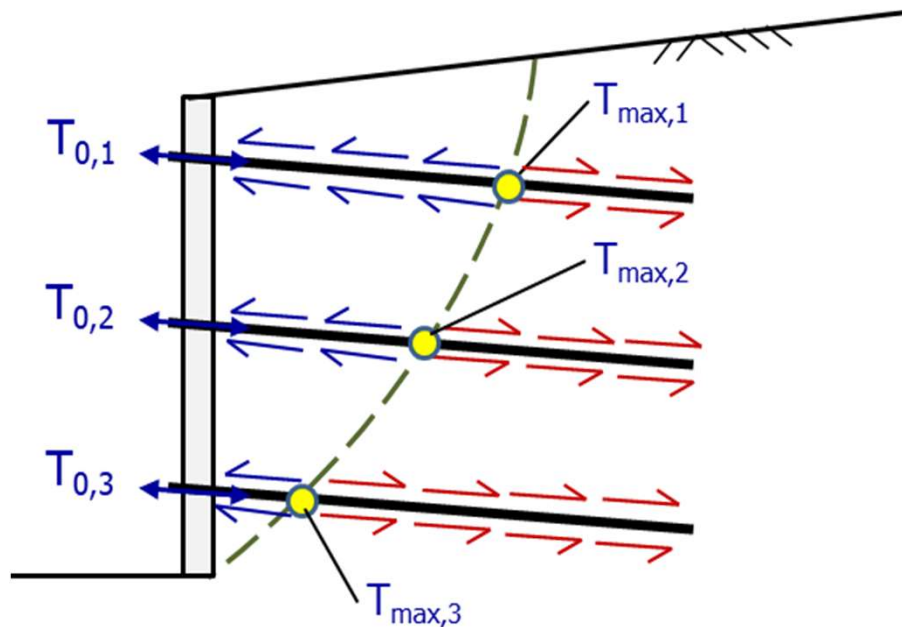


⇒ Requiert l'estimation des efforts nécessaires à l'équilibre du soutènement

Les analyses de stabilité à mener

- Stabilité interne : objectif = évaluation de $T_{\max,d}$

$$T_{\max;d} = \text{Min}(T_{0,d} + P_s q_{s;d} L_{\text{int}} ; P_s q_{s;d} L_{\text{ext}} ; R_{\text{tc};d})$$

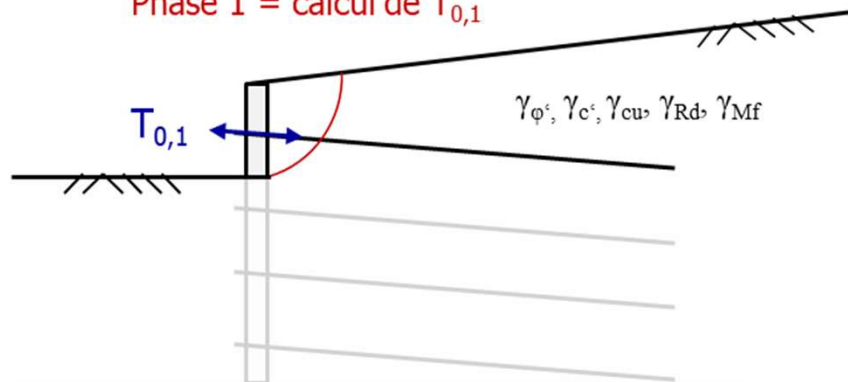


$T_{0,d}$ est tel que $F_{\min} = 1$ (tenant compte du formalisme de sécurité à la source)

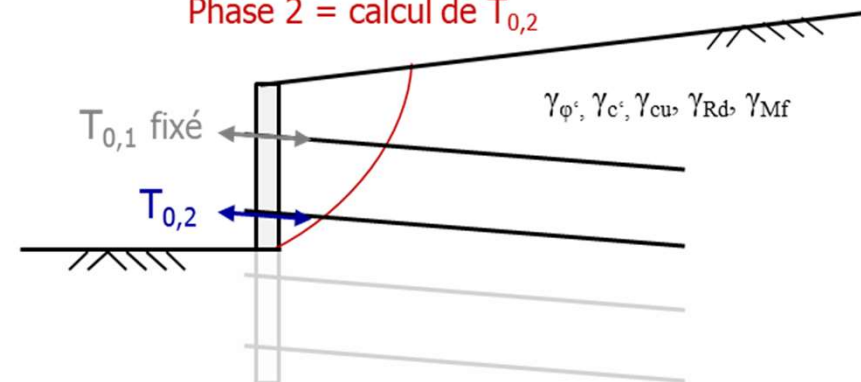
Les analyses de stabilité à mener

- Stabilité interne : objectif = évaluation de $T_{\max,d}$

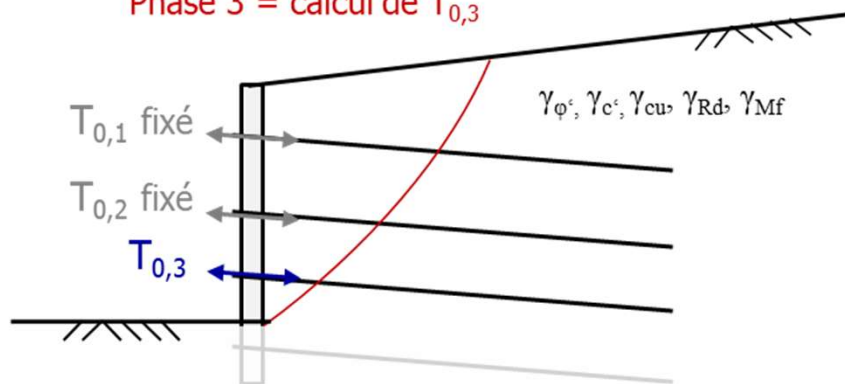
Phase 1 = calcul de $T_{0,1}$



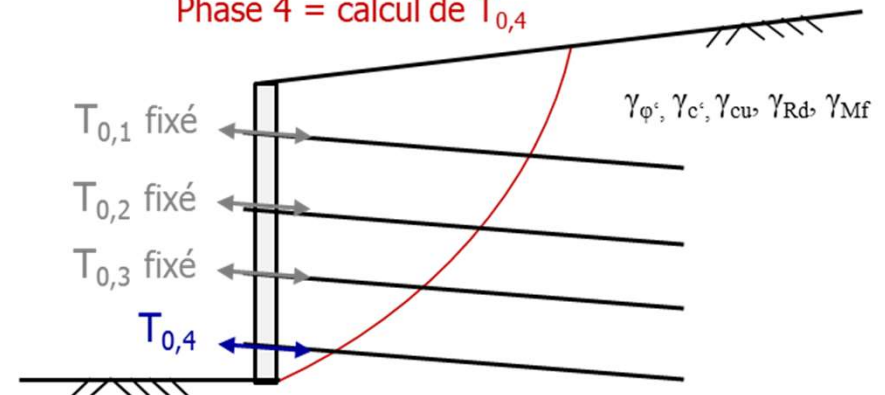
Phase 2 = calcul de $T_{0,2}$



Phase 3 = calcul de $T_{0,3}$

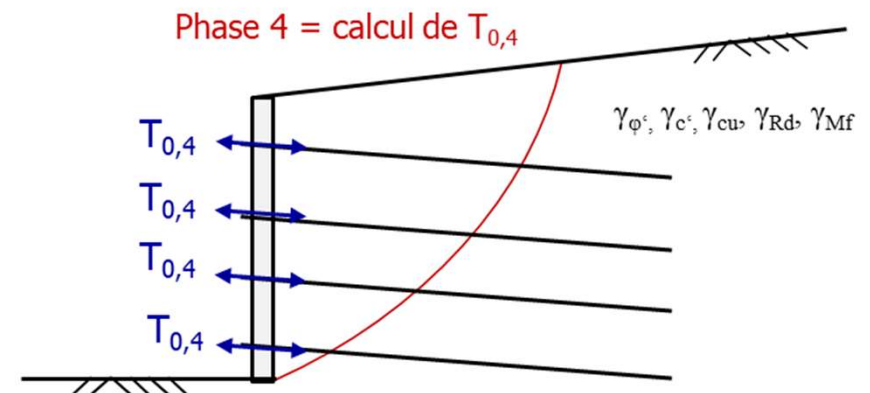
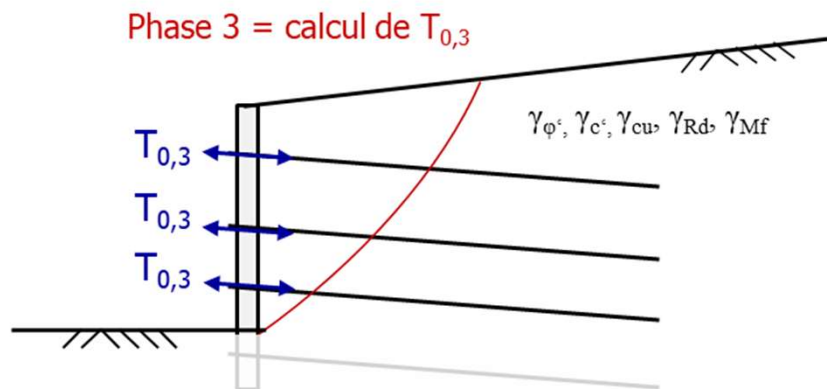
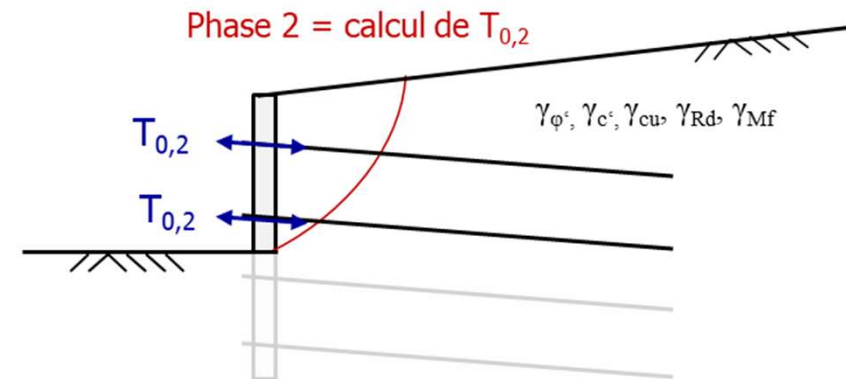
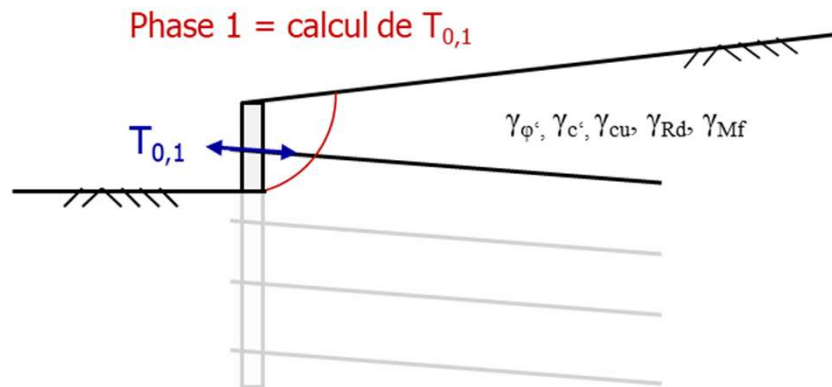


Phase 4 = calcul de $T_{0,4}$



Les analyses de stabilité à mener

- Stabilité interne : objectif = évaluation de $T_{\max,d}$

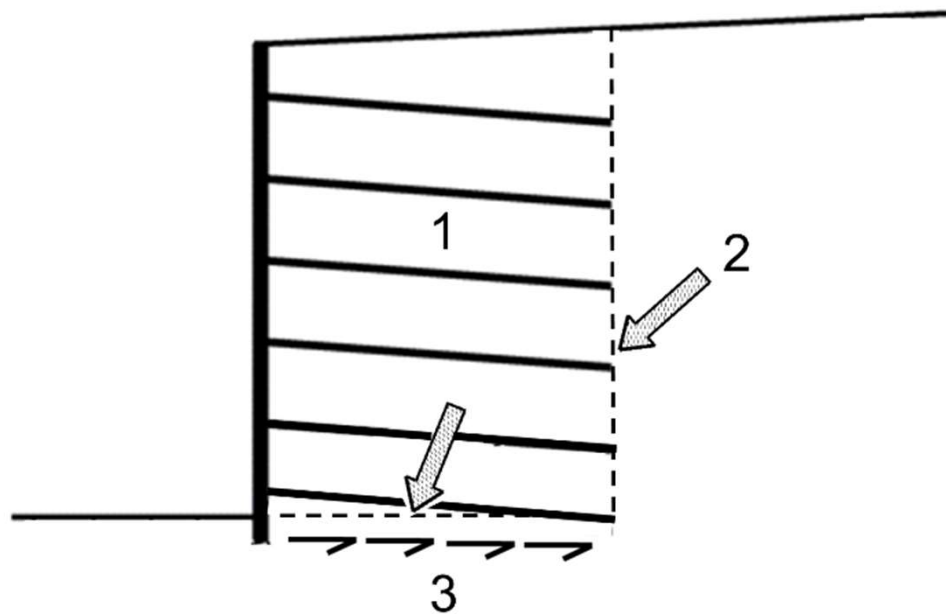


Analyse phasée avec redistribution

Les analyses de stabilité à mener

- Stabilité externe locale

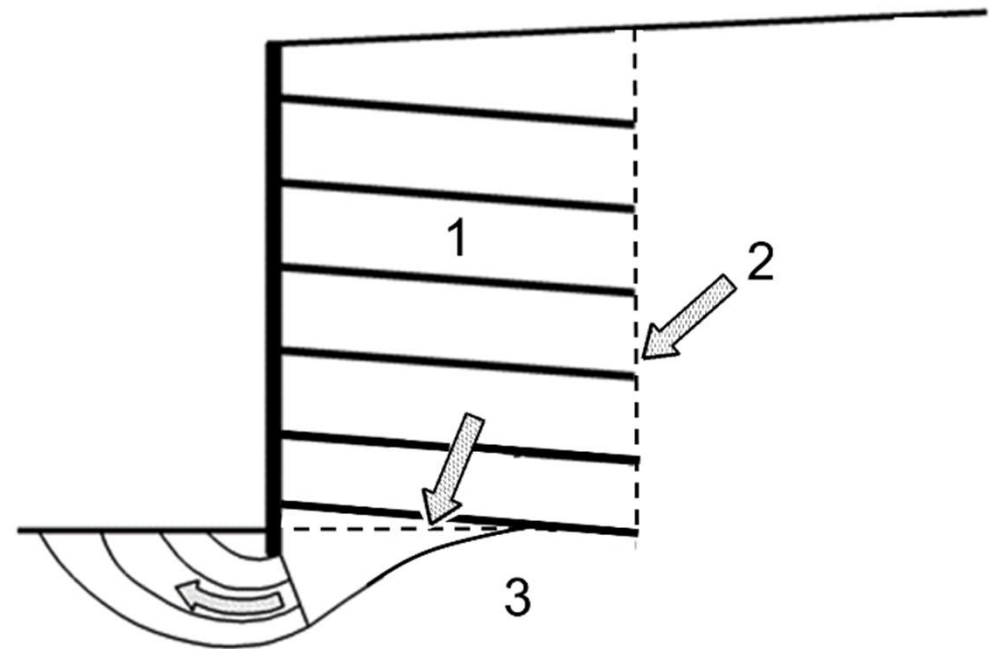
Glissement plan du massif renforcé



Légende

- 1 Mur poids fictif
- 2 Poussée
- 3 Glissement

Stabilité du fond de fouille



Légende

- 1 Mur poids fictif
- 2 Poussée
- 3 Poinçonnement

Les formalismes de sécurité

- Approche de calcul 3 pour toutes les analyses de stabilité

ELU type		Approche de calcul	
		Remblai renforcé	Sol cloué
Stabilité externe locale	GEO	2	3
Stabilité externe générale	GEO	3	3
Stabilité interne	STR	2	3
Stabilité mixte	GEO/STR	3	3

Approche 3 = pondération à la source des propriétés de résistance par $\gamma_M = 1,25$ en conditions drainées et 1,40 en conditions non drainées

Les formalismes de sécurité

- Le facteur partiel de modèle γ_{Rd}

	Ouvrage courant et peu sensible aux déformations	Ouvrage sensible aux déformations ou situé à proximité d'une structure sensible
Phase durable	$\gamma_{R;d} = 1,10$	$\gamma_{R;d} = 1,20$
Phase transitoire	$\gamma_{R;d} = 1,05$	$\gamma_{R;d} = 1,20$
Situation accidentelle	$\gamma_{R;d} = 1,00$	$\gamma_{R;d} = 1,00$

Dans le cadre des méthodes de calcul traditionnelles, ce facteur partiel joue le rôle d'une sécurité additionnelle sur la résistance au cisaillement

Les formalismes de sécurité

- Facteurs partiels de modèle sur q_s

⇒ Nécessité de proposer quelque chose pour mener un dimensionnement AVP/PRO à partir d'Abaques (Dimensionnement EXE impérativement réalisé à partir d'essai)

⇒ Valeur caractéristique de $q_{s,k}$

AVP/PRO	$q_{s,k} = \frac{q_{s,abaques}}{\gamma_{Rd,qs}}$	Clouterre 1991 et 2002 $\gamma_{Rd,qs} = 1,60$
---------	--	---

EXE	$q_{s,k} = \frac{q_{s,essais}}{\gamma_{Rd,qs}}$	$\gamma_{Rd,qs} = 1,00$
-----	---	-------------------------

$$q_{s,essais} = \min \left(\frac{q_{s,moyen}}{\xi_{a1}}, \frac{q_{s,min}}{\xi_{a2}} \right)$$

Fonction nombre et densité essais

Les annexes de calcul

- Les principales annexes de la NF P 94 270 (aspects clouage)
 - Annexe C formalisme de sécurité
 - Annexe D stabilité externe locale
 - Annexe E stabilité interne
 - Annexe F résistance STR des clous
 - Annexe G résistance GEO des clous
 - Annexe L procédure de calcul simplifiée

Sommaire

- Les soutènements en sol cloué
- Les points clés de la norme NF P 94 270
- Choix et justification STR/GEO des clous
- Exemples de dimensionnement
- Etats limites de service, ELU sismique

Résistance STR des clous

- ⇒ La résistance de calcul pour les parois provisoires
- ⇒ L'impact de la corrosion pour les parois définitives

Résistance STR des clous

- La résistance de calcul pour les parois provisoires

Solution 1 : Armatures en acier de béton armé (HA25 ; B500B)

⇒ La résistance de calcul est $R_{t;d} = f_{y;k} \times A_s / \gamma_s$ (F.2.2.1, NF P 94-270)

$$= 500 \times \pi \times 25^2 / 4 / 1,15 / 1\,000 \approx 213 \text{ kN}$$

⇒ Attention γ_s est directement pris en compte (car $\gamma_{M0} = 1,00$).



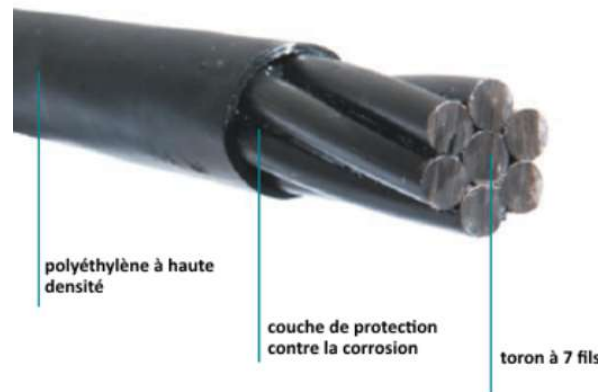
Résistance STR des clous

- La résistance de calcul pour les parois provisoires

Solution 2 : Armatures en acier de précontrainte (1T15, 7fils)

⇒ La résistance de calcul est $R_{t;d} = f_{p;y} \times A_s / \gamma_s$ (F.2.2.2, NF P 94-270)
 $= 1\,650 \times 1 \times 150 / 1,15 / 1\,000 \approx 215 \text{ kN}$

⇒ Attention, la protection est obligatoire pour ce type d'armatures.



Résistance STR des clous

- La résistance de calcul pour les parois provisoires

Solution 3 : Armatures en acier de construction ou en acier pour trempe et revenu ($B_{ext} = 80 \text{ mm}$; $e = 5 \text{ mm}$; S355) (F.2.2.3, NF P 94-270)

⇒ Partie filetée

$$R_{t;d} = k_t \times f_{u;a} \times A_s / \gamma_{M2}$$

$$= 0,9^a \times 490 \times \pi \times [80^2 - (80 - 2 \times 5)^2] / 4 / 2^b / 1,25 / 1000 \approx 208 \text{ kN}$$

⇒ Partie non filetée

$$R_{t;d} = f_{y;k} \times A_g / \gamma_{M0}$$

$$= 355 \times \pi \times [80^2 - (80 - 2 \times 5)^2] / 4 / 1,00 / 1000 \approx 418 \text{ kN}$$

⇒ Attention, la partie filetée est toujours dimensionnante

⇒ Attention, il arrive que les coefficients soient appliqués 2 fois car la plupart des logiciels du marché prennent en compte γ_{M0} et γ_{M2}

^a Par hypothèse, mais 0,6 si l'on ne tient pas compte des effets de flexion (NF EN 1993-5/NA).

^b par hypothèse, rapport de 2 entre la section courante (brute ; A_g) et la section à fond de filet (A_s).



Résistance STR des clous

- La résistance de calcul pour les parois provisoires

Cas des systèmes de barres auto-forantes qui sont « rattachés » au §F.2.2.3

- ⇒ Limite élastique d'un R32N $f_{y;k} \times A_g / \gamma_{M0} = 220 / 1,00 = 220 \text{ kN}$
- ⇒ Limite de rupture d'un R32N $k_t \times f_{u;a} \times A_s / \gamma_{M2} = 0,9^a \times 280 / 1,25 = 201,6 \text{ kN}$
- ⇒ Attention, la plupart des fiches produits renseignent directement $f_{y;k} \times A_g$ et $f_{u;a} \times A_s$
- ⇒ Attention, il arrive que les coefficients soient appliqués 2 fois car la plupart des logiciels du marché prennent en compte γ_{M0} et γ_{M2} .

^a Par hypothèse, mais 0,6 si l'on ne tient pas compte des effets de flexion (NF EN 1993-5/NA).



Résistance STR des clous

- L'impact de la corrosion pour les parois définitives

- Principaux enjeux (F.2.1.1, F.2.1.2, NF P94-270)
 - Assurer la durabilité de la paroi clouée ;
 - Étudier le risque d'allongement excessif voire de rupture fragile des clous.
- Cela implique de s'intéresser à la corrosion
- Lorsque l'on ne peut pas **retirer la source de la corrosion**, il est nécessaire de la prendre en compte lors du dimensionnement et de la préparation du chantier. Pour cela, plusieurs solutions :
 - **Prendre en compte une épaisseur sacrificielle** au niveau de l'acier. Cette solution implique :
 - Une réduction de la section dans le temps (A_s / A_g) ;
 - Une augmentation de la déformabilité (allongement) des clous dans le temps.
 - **Protéger les clous** en les galvanisant. Cette solution est intéressante mais présente des limites :
 - On doit tenir compte d'une **perte d'épaisseur de la galvanisation** ;
 - Par défaut, elle vaut **10% de l'épaisseur sacrifiée de l'acier** (non protégé).
 - Attention, **il n'est pas usuel de galvaniser sur une épaisseur supérieure à 100 μm** .
 - **Au-delà de 1 mm, il est ainsi nécessaire de galvaniser sur 100 μm et de prendre en compte une épaisseur sacrificielle dans l'acier.**

Résistance STR des clous

• L'impact de la corrosion pour les parois définitives

- Détermination de l'épaisseur sacrificielle -> effets des phases **solide** et **liquide** -> on somme les paramètres d'environnement :

- La nature du sol $0 \leq A \leq 8$
- La résistivité $0 \leq A \leq 5$ (sans mesure : $A = 5$ -> axe d'optimisation en phase étude G3!)
- L'humidité $0 \leq A \leq 8$
- Le pH $0 \leq A \leq 4$ (sans mesure : $A = 4$ -> axe d'optimisation en phase étude G3!)
- La sensibilité de l'ouvrage géotechnique $0 \leq C \leq 2$

(F.2.1.3, F.2.1.6, F.2.1.7, NF P94-270)

Indice global ($\Sigma A + C$)	Catégorie de corrosion (associée au sol et à l'eau)
≥ 13	I (fortement corrosif)
de 9 à 12	II (corrosif)
de 5 à 8	III (moyennement corrosif)
de 1 à 4	IV (peu corrosif)
0	V (très peu corrosif)



Cat. de cor. / Durée	≤ 2 ans	...	100 ans
I	Épaisseur à sacrifier à la corrosion, exprimée en mm		
...			
V			

Les valeurs sont à multiplier par 2 dans les DROM-COM

(Département-Région d'Outre-Mer – Collectivités d'Outre-Mer)

Résistance STR des clous

• L'impact de la corrosion pour les parois définitives

- Détermination de l'épaisseur sacrificielle -> effets de la phase **gazeuse**, les paramètres d'environnement ayant une influence sur la corrosion sont : **(F.2.1.5, F.2.1.8, NF P94-270)**

- L'activité humaine ;
- La salinité.

Exemples d'environnements extérieurs types dans un climat tempéré	Catégorie de corrosion	Jusqu'à 2 ans	Pour 5 ans	Pour 25 ans	Pour 50 ans	Pour 75 ans	Pour 100 ans
-	C1 (très faiblement corrosive)	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm
Atmosphères avec un faible niveau de pollution. Surtout zones rurales.	C2 (faiblement corrosive)	0,0 mm	0,0 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,2 mm	0,2 mm
Atm. urb. et indus., pollution modérée par le dioxyde de soufre. Zones côtières à faible salinité.	C3 (moyennement corrosive)	0,1 mm	0,1 mm	0,2 mm	0,4 mm	0,5 mm	0,7 mm
Zones industrielles et zones côtières à salinité modérée.	C4 (fortement corrosive)	0,1 mm	0,2 mm	0,6 mm	1,1 mm	1,6 mm	2,1 mm
Zones industrielles avec une humidité élevée et une atmosphère agressive.	C5-I (industrie) (très fortement corrosive)	0,3 mm	0,6 mm	2,1 mm	3,9 mm	5,7 mm	7,5 mm
Zones côtières et maritimes à salinité élevée.	C5-M (marine) (très fortement corrosive)						

- Approche qualitative.
- Il n'y a pas de sujet si les têtes de clous sont intégrées dans le parement en béton armé.
- Sinon le phénomène est à prendre en compte jusqu'à 1 m dans le massif cloué :
 - Mais pas de cumul ;
 - On retient l'épaisseur sacrifiée la plus importante entre la phase gazeuse et les phases solide et liquide.

Résistance d'interaction sol/clou

- Valeur de calcul du frottement axial limite

$$q_{s;d} = \frac{q_s k}{\gamma_{M,f}}$$

Tableau C.4.3.1 — Facteurs partiels de la résistance d'interaction sol-lit de renforcement

Résistance	Symbole	Ensemble	
		M1 ^a	M2 ^{b,c}
μ ^d tiré d'une base de données documentée	$\gamma_{M,f}$	1,35	1,10
q_s ^e tiré d'abaques ou d'essais	$\gamma_{M,f}$	-	1,15

a stabilité interne pour les massifs en remblai renforcé
 b stabilité interne pour les massifs en sol cloué
 c stabilité mixte
 d interaction sol-renforcement $\tau_{\max}$ pour les ouvrages en remblai renforcé
 e interaction terrain-clou $\tau_{\max}$ pour les massifs cloués

Résistance d'interaction sol/clou

- Valeur caractéristique du frottement axial limite $q_{s,k}$
 - ⇒ Valeur définie à partir d'essais d'arrachement de clous menés à la rupture (essai de clou sacrificiel, NF P 14 490)
 - ⇒ Possibilité d'utiliser les abaques Clouterre pour estimer $q_{s,k}$
 - 1) pour les ouvrages de catégorie 1
 - 2) phases AVP/PRO des ouvrages de catégorie 2 et 3

Résistance d'interaction sol/clou

- Estimation de $q_{s,k}$ à partir d'essais

$$q_{s,k} = \frac{1}{\gamma_{R;d;q_s}} \min \left(\frac{q_{s,moy}}{\xi_{a1}} ; \frac{q_{s,min}}{\xi_{a2}} \right)$$

ξ_{a1} et ξ_{a2} facteurs de corrélation
 $\gamma_{R;d;q_s}$ facteur partiel de modèle pris égal à 1

		Nombre d'essais d'arrachements par couche de sol		
Surface de parement m ²	ξ_{a1}	1,2	1,1	1,0
	ξ_{a2}	1,05	1,0	1,0
< 400		3*	4	5
400 à 800		5*	7	9
800 à 2000		7*	10	12
2000 à 4000		9*	12	15
4000 à 8000		11*	15	19
8000 à 16000		13*	18	22
> 16000		15*	20	25
Pour une surface de parement inférieure à 100 m ² , le nombre d'essai d'arrachement peut être réduit à 1, dans ce cas $\xi_{a1} = \xi_{a2} = 1,4$				

Résistance d'interaction sol/clou

- Estimation de $q_{s,k}$ à partir d'essais : exemple d'un mur 380 m²
 - ⇒ 3 essais réalisés donnant 80 kPa, 120 kPa et 130 kPa
 - ⇒ $q_{s,min} = 80$ kPa, $q_{s,moy} = 110$ kPa
 - ⇒ $\xi_{a1} = 1,05$ et $\xi_{a2} = 1,20$
 - ⇒ $q_{s,k} = \min (80/1,05 ; 110/1,20) = 76$ kPa ($q_{s,d} = 76/1,15 = 66$ kPa)

		Nombre d'essais d'arrachements par couche de sol		
Surface de parement m ²	ξ_{a1}	1,2	1,1	1,0
	ξ_{a2}	1,05	1,0	1,0
< 400		3*	4	5
400 à 800		5*	7	9
800 à 2000		7*	10	12
2000 à 4000		9*	12	15
4000 à 8000		11*	15	19
8000 à 16000		13*	18	22
> 16000		15*	20	25
Pour une surface de parement inférieure à 100 m ² , le nombre d'essai d'arrachement peut être réduit à 1, dans ce cas $\xi_{a1} = \xi_{a2} = 1,4$				

Résistance d'interaction sol/clou

- Estimation de $q_{s,k}$ à partir d'abaques (Clouterre 1991, 2002)

$$q_{s,k} = \frac{1}{\gamma_{R;d;qs}} q_{s,abaques}$$

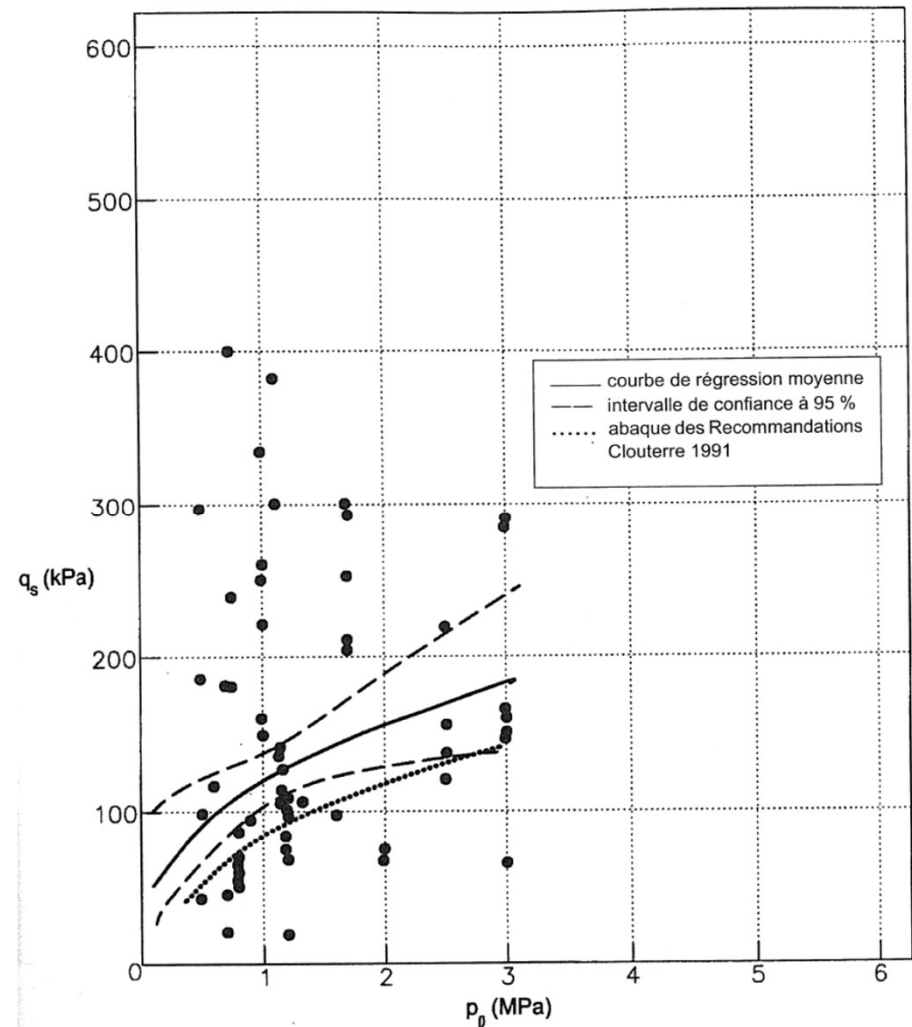
$$\gamma_{R;d;qs} = 1,60$$

Exemple :

$$p_l = 0,6 \text{ MPa} \Rightarrow q_s = 100 \text{ kPa}$$

$$q_{s,k} = q_s / 1,60 = 62 \text{ kPa}$$

$$q_{s,d} = q_{s,k} / 1,15 = 55 \text{ kPa}$$

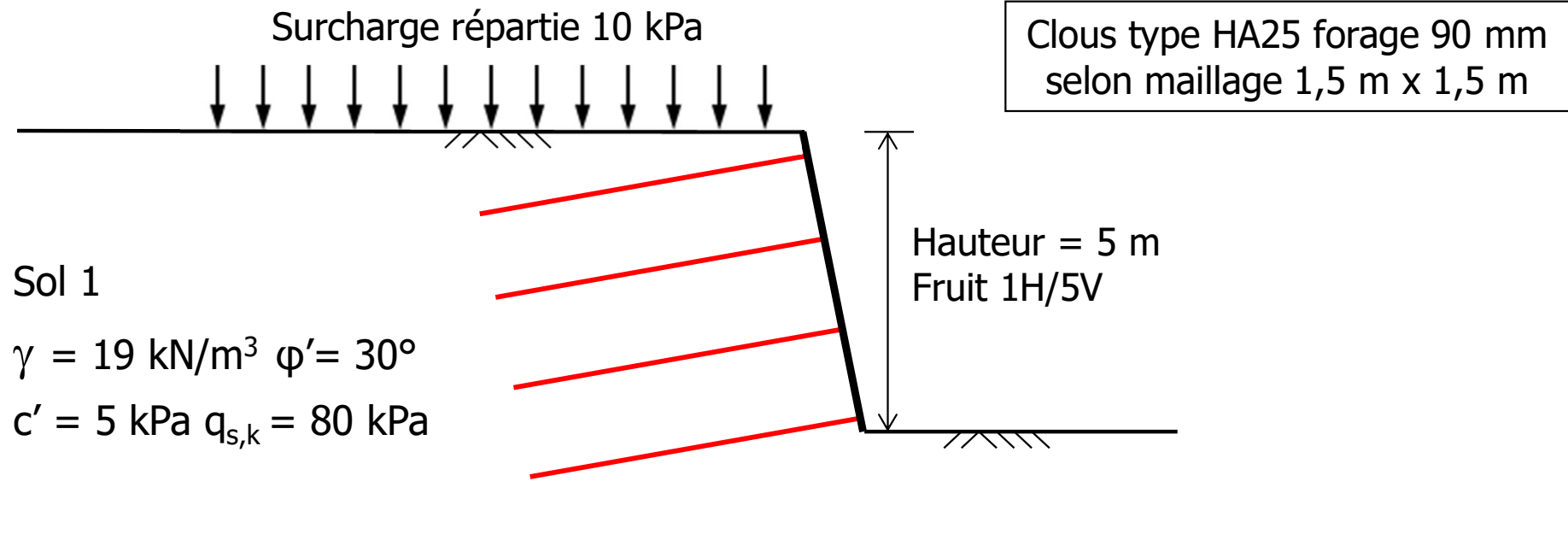


Sommaire

- Les soutènements en sol cloué
- Les points clés de la norme NF P 94 270
- Choix et justification STR/GEO des clous
- Exemples de dimensionnement
- Etats limites de service, ELU sismique

Exemple d'application 1

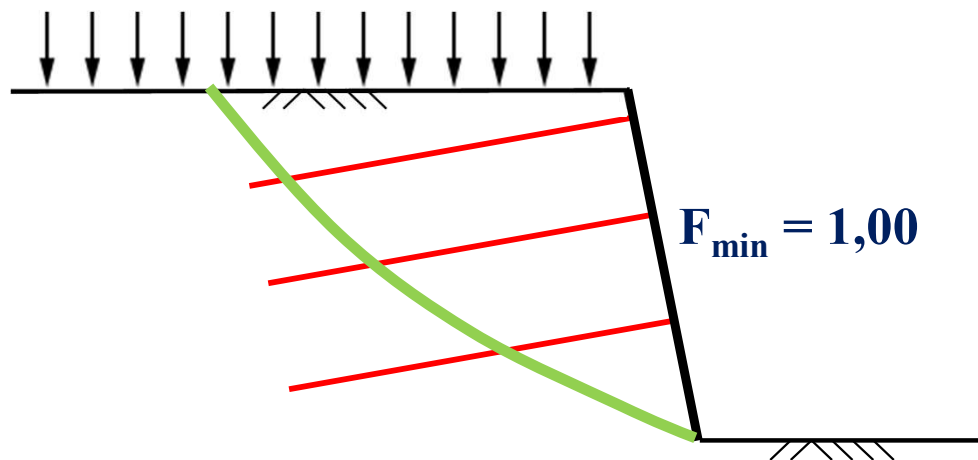
- Paroi clouée de 5 m de hauteur



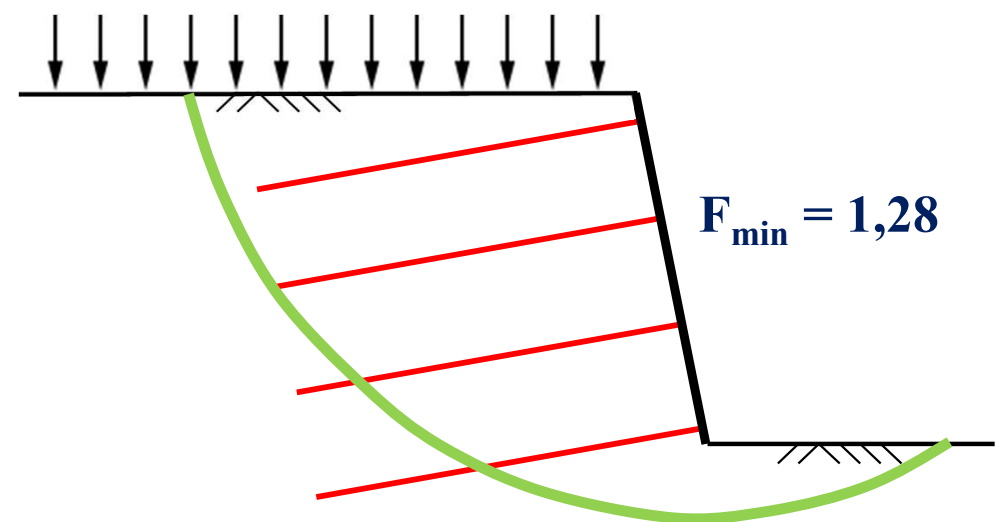
Ouvrage de catégorie géotechnique 2, pour lequel le déplacement n'est pas un critère de dimensionnement

Exemple d'application 1

- Analyses de stabilité générale et mixte (§10 et §11)
 - ⇒ Approche 3 : $\gamma_{\phi'} = \gamma_c = 1,25$, $\gamma_Q = 1,30$
 - ⇒ Ouvrage peu sensible aux déformations : $\gamma_{R;d} = 1,05$ en phase transitoire et $\gamma_{R;d} = 1,10$ en phase durable
 - ⇒ Longueur optimale des clous = 4,7 m



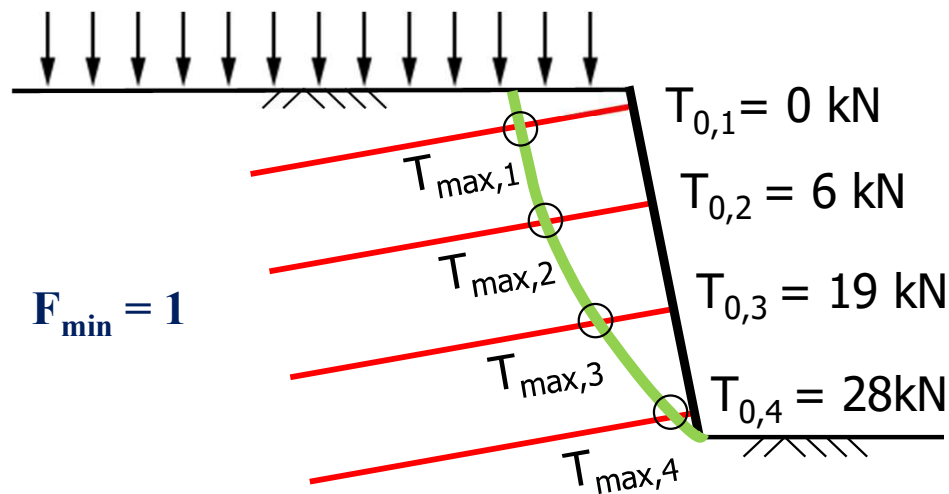
Phase transitoire : $\gamma_{R;d} = 1,05$



Phase durable : $\gamma_{R;d} = 1,10$

Exemple d'application 1

- Analyse de stabilité interne (§11 et §E.3)
 - ⇒ Approche 3 : $\gamma_{\phi'} = \gamma_{c'} = 1,25$, $\gamma_Q = 1,30$
 - ⇒ Ouvrage peu sensible aux déformations : $\gamma_{R;d} = 1,10$
 - ⇒ Calcul de l'effort $T_{\max,d}$ nécessaire à l'équilibre limite ultime du soutènement



$T_{0,i}$ est recherché itérativement de sorte que $F_{\min} = 1$ à chacune des phases de terrassement

	clou 1	clou 2	clou 3	clou 4
$T_{\max,d}$	26 kN	31 kN	36 kN	31 kN

Exemple d'application 1

- Analyse de stabilité interne (§11 et §E.3)
 - ⇒ Approche 3 : $\gamma_{\phi'} = \gamma_{c'} = 1,25$, $\gamma_Q = 1,30$
 - ⇒ Ouvrage peu sensible aux déformations : $\gamma_{R;d} = 1,10$
 - ⇒ Calcul de l'effort $T_{\max;d}$ nécessaire à l'équilibre limite ultime du soutènement
 - ⇒ Calcul de la contrainte au parement

$$\sigma_{\text{par};d} = \alpha \cdot \frac{T_{\max;d}}{s_v \cdot s_h}$$

$\alpha = \max (0,60 ; 0,40 + 0,20s)$ avec $s = \max (s_v, s_h)$

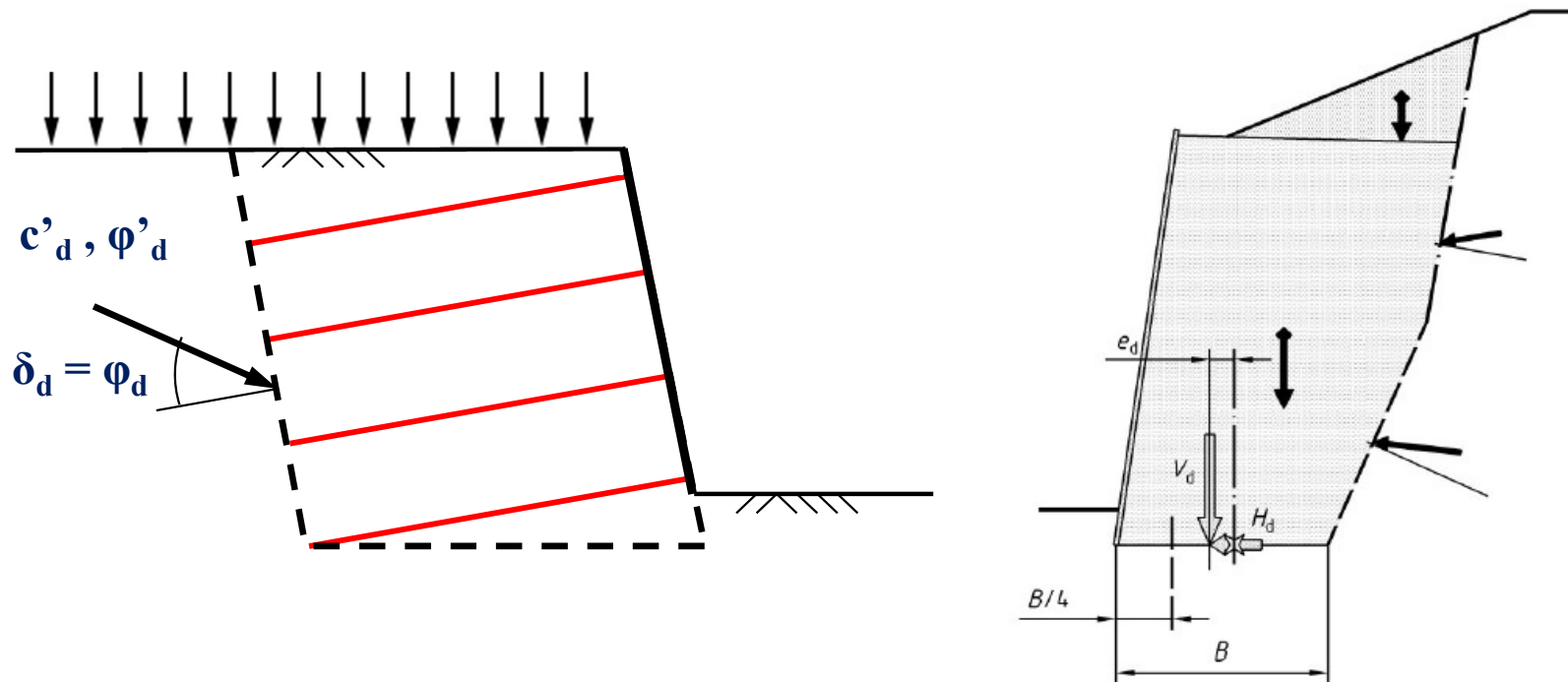
s_h distance horizontale entre les clous

s_v est la distance verticale entre les clous

Application numérique : $\sigma_{\text{par};d} \sim 10 \text{ à } 15 \text{ kPa}$

Exemple d'application 1

- Analyse de stabilité externe locale (§9.3 et §D3.2 + §D4.2)



- ⇒ Massif renforcé assimilé à un mur poids équivalent
- ⇒ Bilan des forces sur le massif : poids propre et poussée du terrain amont
- ⇒ Poussée du terrain amont = $k_a(\phi'_d) \cdot \sigma'_v - k_{ac}(\phi'_d) \cdot c'_d$
- ⇒ c'_d et ϕ'_d obtenus en pondérant c'_k et $\tan \phi'_k$ par $\gamma_M \times \gamma_{R;d}$

Exemple d'application 1

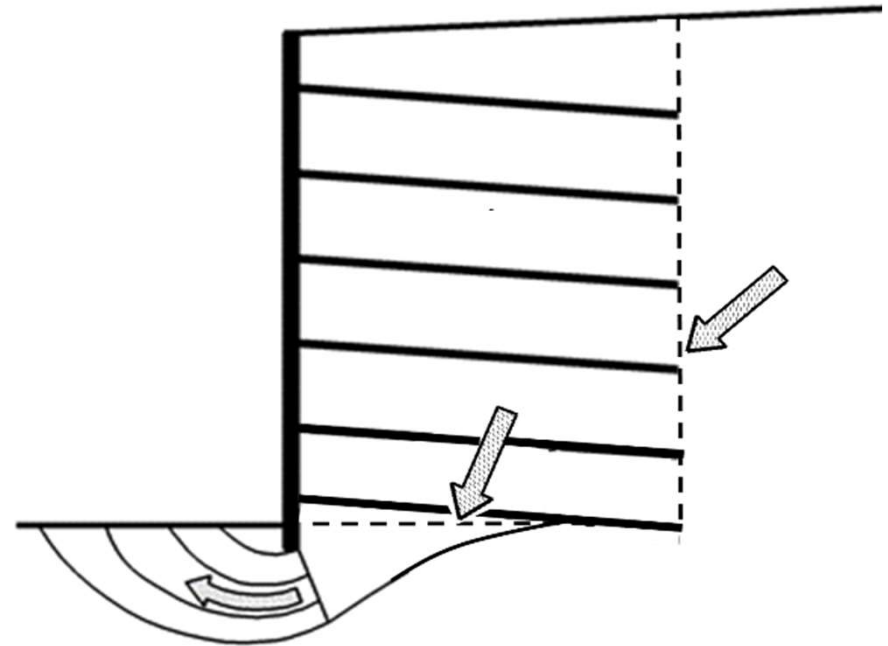
- Analyse de stabilité externe locale (§9.3 et §D3.2)

⇒ Stabilité au poinçonnement

$$V_d - R_0 \leq R_{v;d}$$

$$R_{v;d} = \underbrace{(B - 2e)}_{\text{Largeur effective}} \cdot q_{\text{net}}(c'_d, \varphi'_d)$$

Largeur
effective



- ⇒ Contrainte de rupture du terrain q_{net} évaluée à partir des valeurs de calcul des propriétés de cisaillement du terrain c'_d et φ'_d (méthode « c- φ » avec approche 3)
- ⇒ c'_d et φ'_d obtenus en pondérant c'_k et $\tan\varphi'_k$ par $\gamma_M \times \gamma_{R;d}$
- ⇒ Application numérique : $V_d \sim 0,5 \text{ MN}$ et $R_{v;d} \sim 1,0 \text{ MN} \Rightarrow \text{OK}$

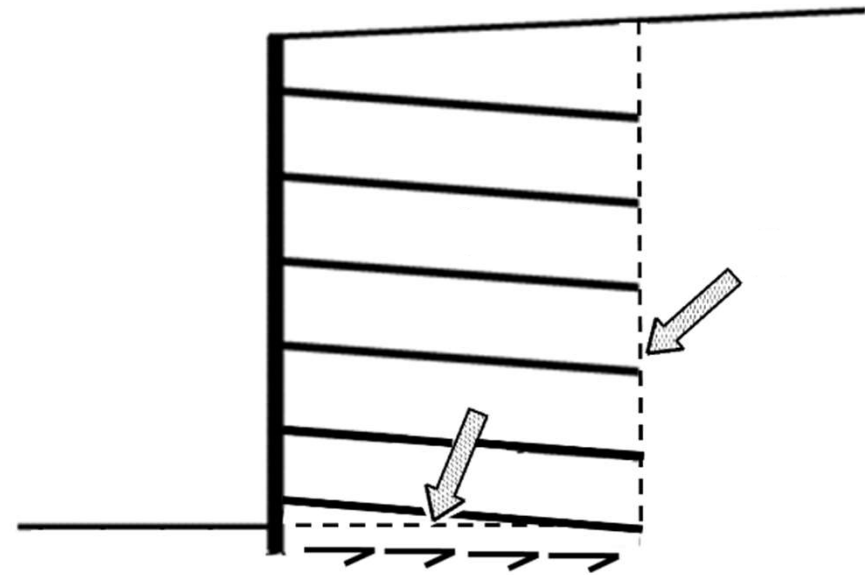
Exemple d'application 1

- Analyse de stabilité externe locale (§9.3 et §D4.2)

⇒ Stabilité au glissement

$$H_d \leq R_{h;d}$$

$$R_{h;d} = V_d \tan \varphi'_d + B c'_d$$

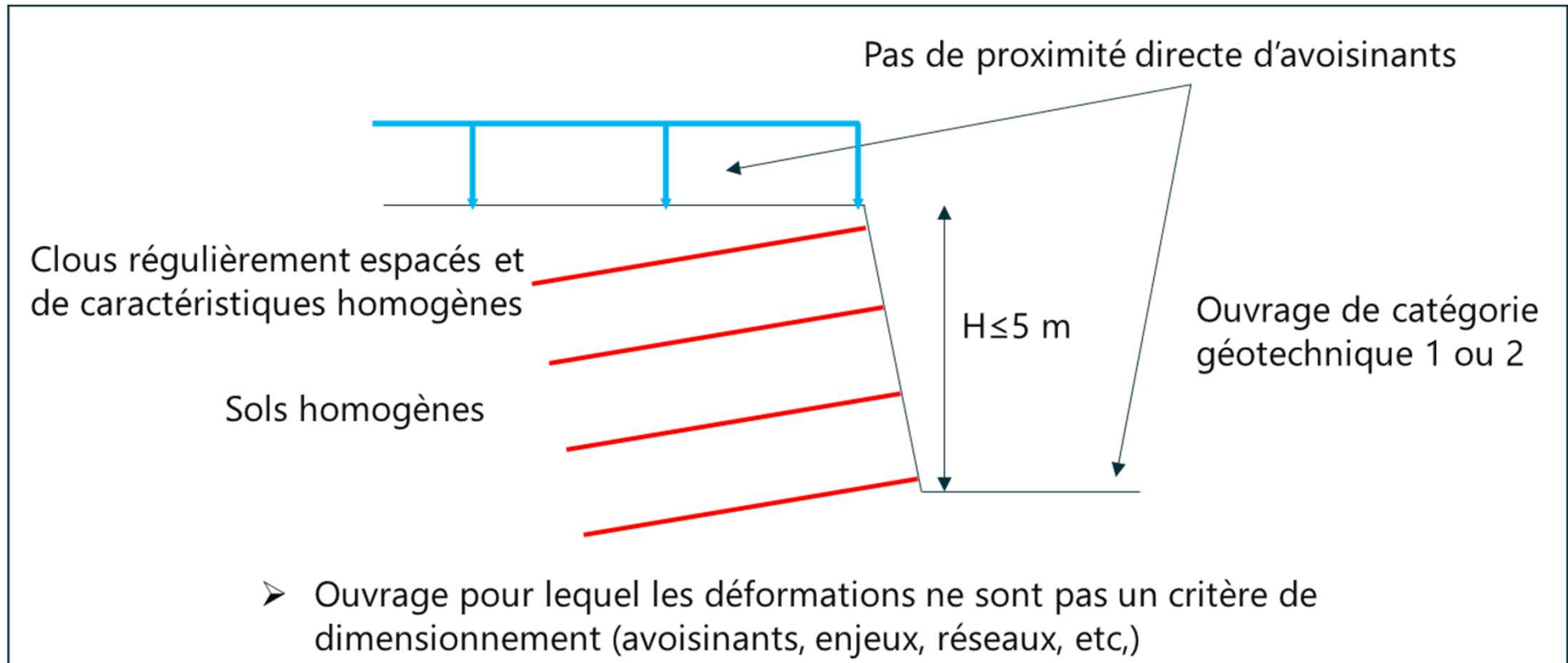


⇒ c'_d et φ'_d obtenus en pondérant c'_k et $\tan \varphi'_k$ par $\gamma_M \times \gamma_{R;d}$

⇒ Application numérique : $H_d \leq 0,1 \text{ MN}$ et $R_{h;d} \sim 0,2 \text{ MN} \Rightarrow \text{OK}$

Procédure simplifiée de l'annexe L

- Domaine d'application



⇒ Vise à s'affranchir de certaines justifications pour des ouvrages « simples »

Procédure simplifiée de l'annexe L

- Principe de la procédure simplifiée

- ⇒ S'affranchir des vérifications de stabilité interne et externe locale (stabilité du fond de fouille)
- ⇒ Mener les analyses de stabilité mixte et externe générale avec un niveau de sécurité plus élevé (via le facteur partiel de modèle $\gamma_{R;d}$)
- ⇒ Surdimensionner le parement et les organes de liaison par une estimation enveloppe des sollicitations (calées forfaitairement sur la capacité maximale des clous)

	Procédure complète	Procédure simplifiée de l'annexe L
Phase durable	$\gamma_{R;d} = 1,10$	$\gamma_{R;d} = 1,25$
Phase transitoire	$\gamma_{R;d} = 1,05$	$\gamma_{R;d} = 1,20$
Situation accidentelle	$\gamma_{R;d} = 1,00$	$\gamma_{R;d} = 1,10$

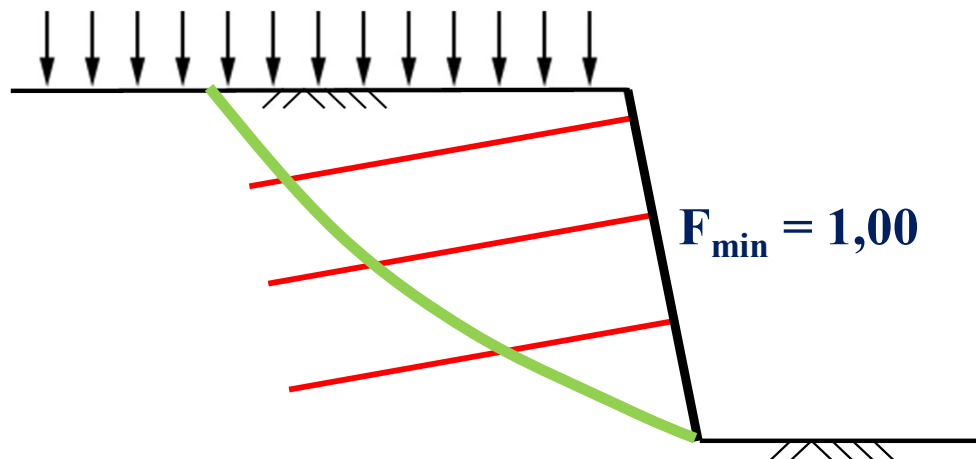
Procédure simplifiée de l'annexe L

- Retour à l'exemple d'application 1

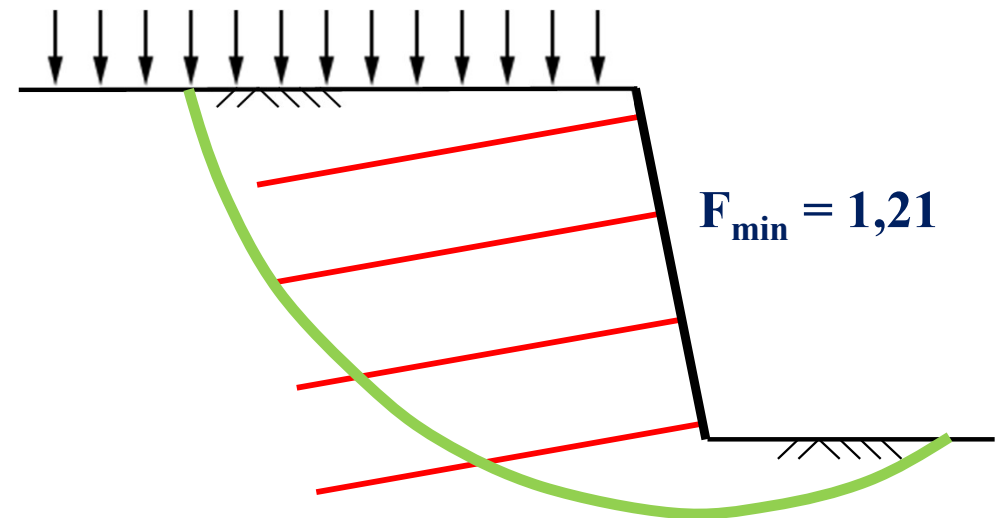
⇒ Approche 3 : $\gamma_{\phi'} = \gamma_{c'} = 1,25$, $\gamma_Q = 1,30$

⇒ Facteur partiel de modèle $\gamma_{R;d} = 1,20$ en phase transitoire et $\gamma_{R;d} = 1,25$ en phase durable

⇒ Longueur optimale des clous = 5,4 m (+15%)



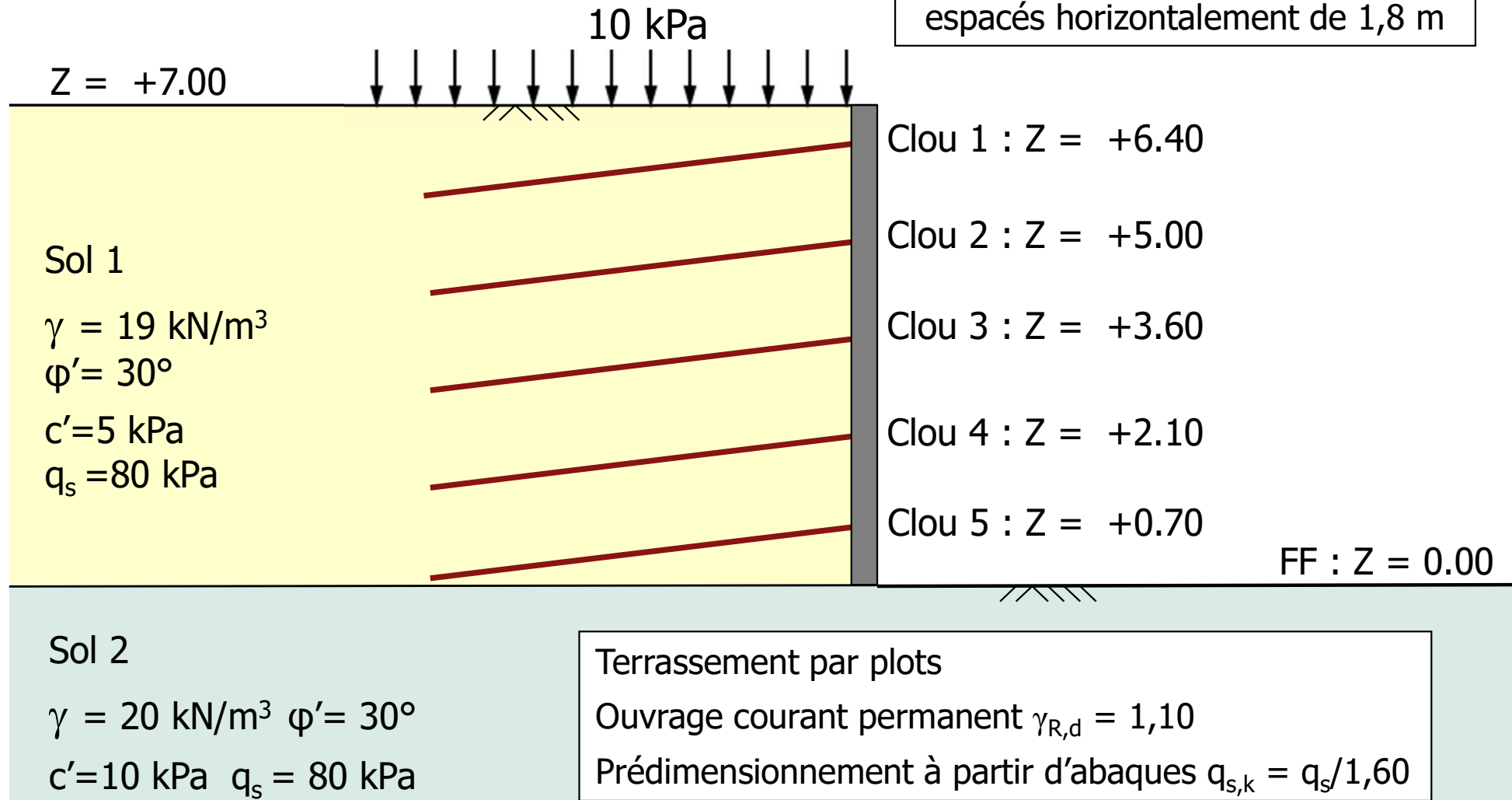
Phase transitoire : $\gamma_{R;d} = 1,20$



Phase durable : $\gamma_{R;d} = 1,25$

Exemple d'application 2

- Paroi clouée de 7 m de hauteur



Exemple d'application 2

- Principe = utiliser de la procédure de stabilité interne (§E.3.2) pour guider et optimiser la conception de la paroi clouée
 - ⇒ Clous de longueurs identiques fixées initialement à 6 m
 - ⇒ Résistance STR des clous prise, initialement, suffisamment élevée pour que l'analyse de stabilité ne soit pas limitée par l'acier ($R_{t,d} = 150 \text{ kN}$)
 - ⇒ Démarche adoptée :

Démarche adoptée:

Suivant la procédure décrite dans l'annexe E.3.2, on calcule chaque phase de terrassement et on évalue les efforts mobilisés dans les clous pour avoir l'équilibre limite des surface de rupture ($F = 1$, pondérations à la source).

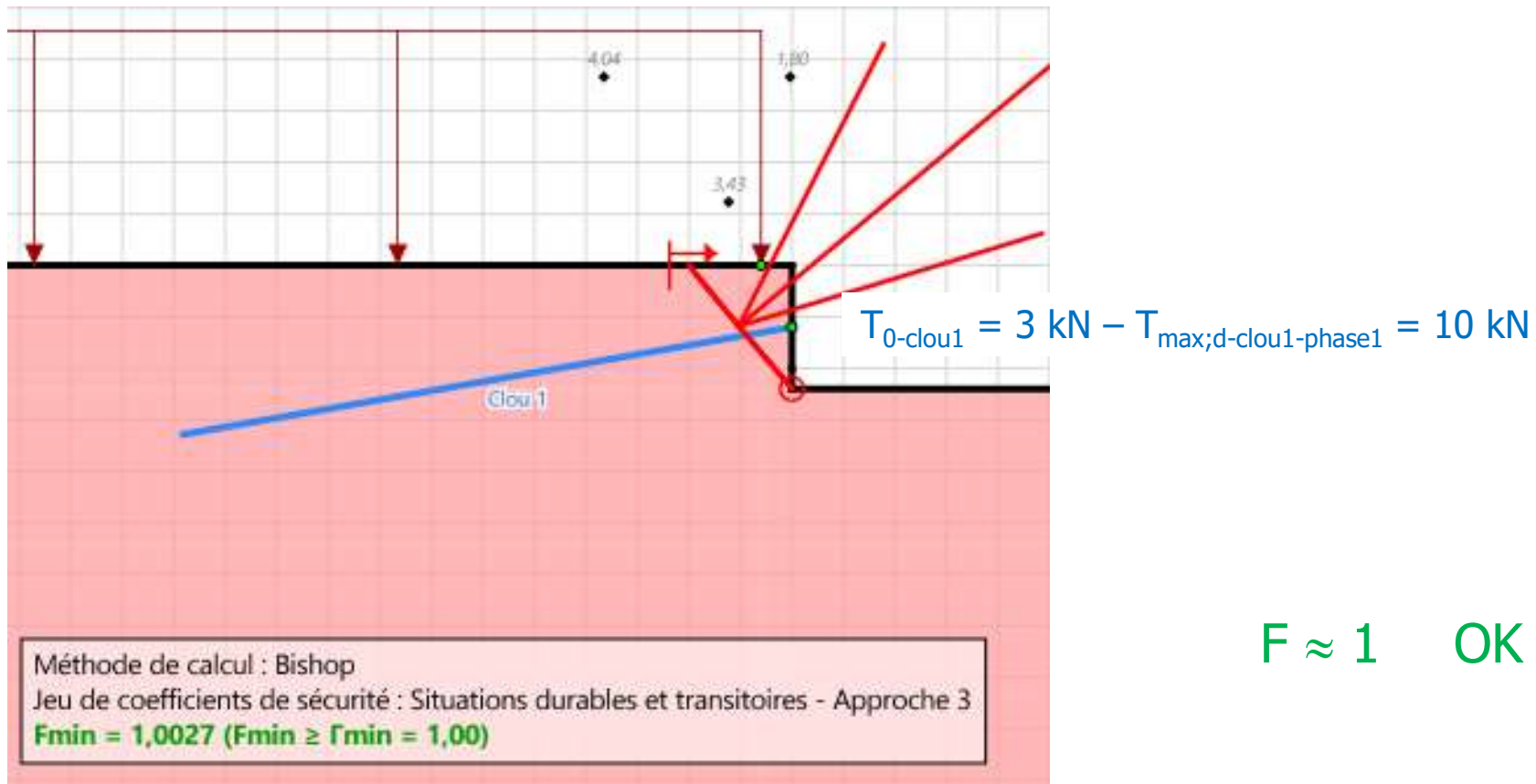
A chaque phase, l'effort considéré en tête de clou ($=T_0$) reste égal à celui calculé lors de la phase de première mobilisation du clou.

Si, à une phase donnée, l'équilibre n'est pas possible (par ex. limitation de l'effort mobilisable par la longueur externe d'un ou plusieurs clous), on rallonge les clous uniformément.

Peut être automatisé dans les logiciels de calcul

Exemple d'application 2

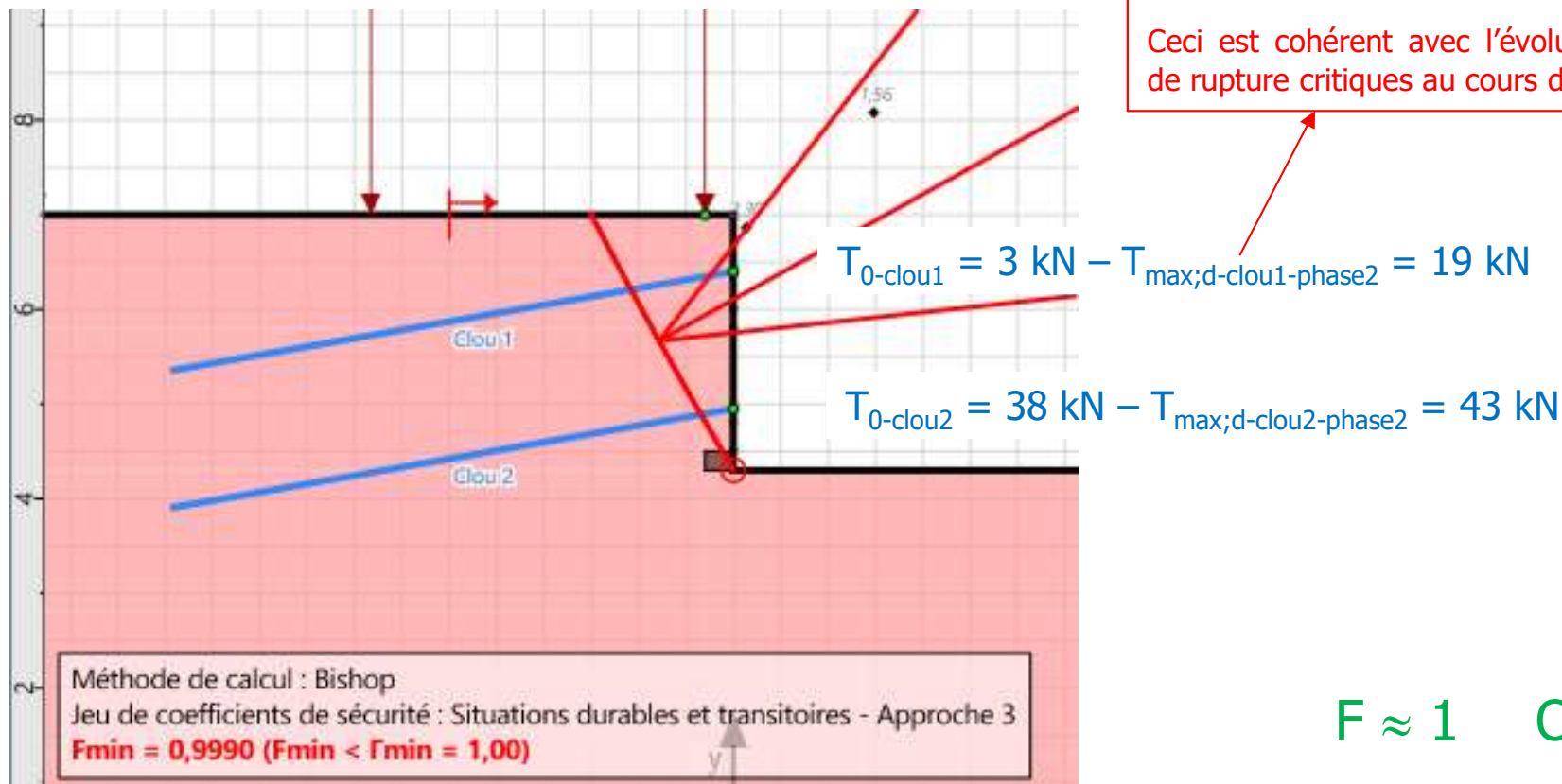
Phase 1 : Calcul de T_0 dans le clou 1



$F \approx 1$ OK

Exemple d'application 2

Phase 2 : Calcul de T_0 dans le clou 2



Commentaire: $T_{\text{max phase2}} > T_{\text{max phase 1}}$

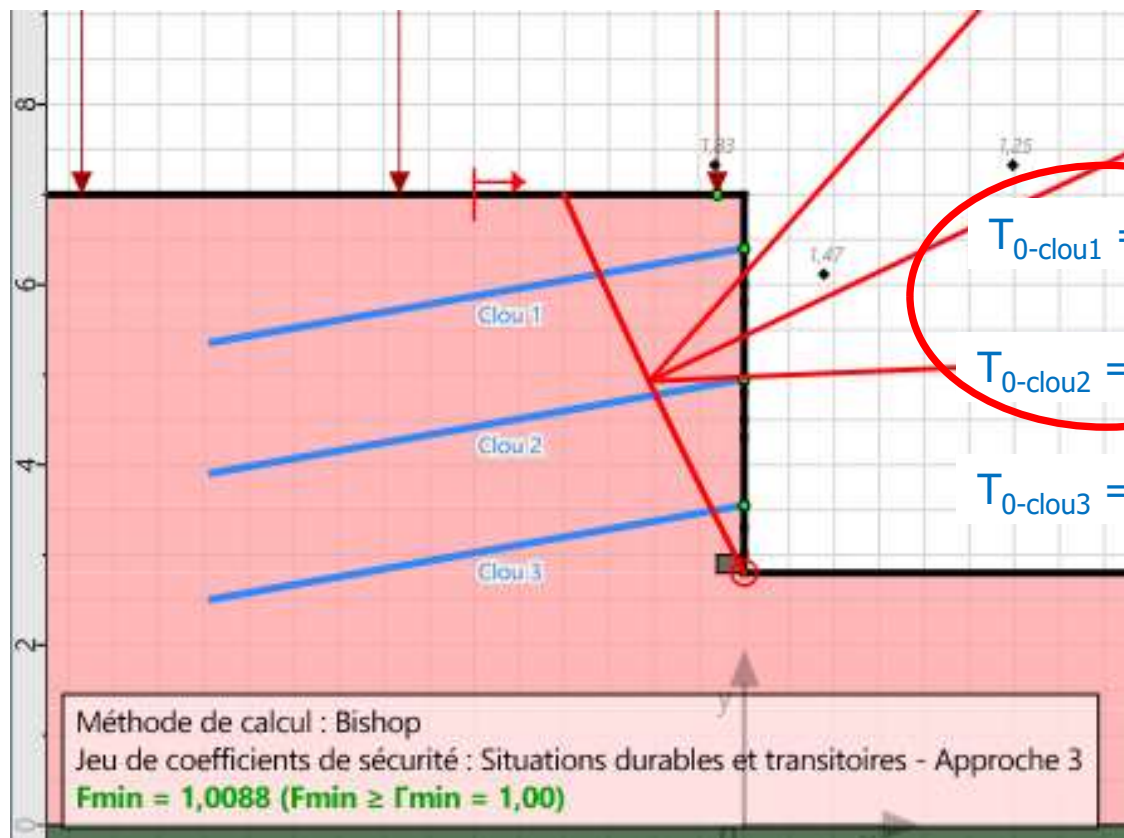
En effet, l'effort mobilisé est augmenté du fait d'une longueur de frottement plus importante sur la partie interne du clou.

Ceci est cohérent avec l'évolution des surfaces de rupture critiques au cours des terrassements

$F \approx 1$ OK

Exemple d'application 2

Phase 3 : Calcul de T_0 dans le clou 3



T_0 fixés et égaux aux phases précédentes

$$T_{0-clou1} = 3 \text{ kN} - T_{\max;d-clou1-phase3} = 27 \text{ kN}$$

$$T_{0-clou2} = 38 \text{ kN} - T_{\max;d-clou2-phase3} = 53 \text{ kN}$$

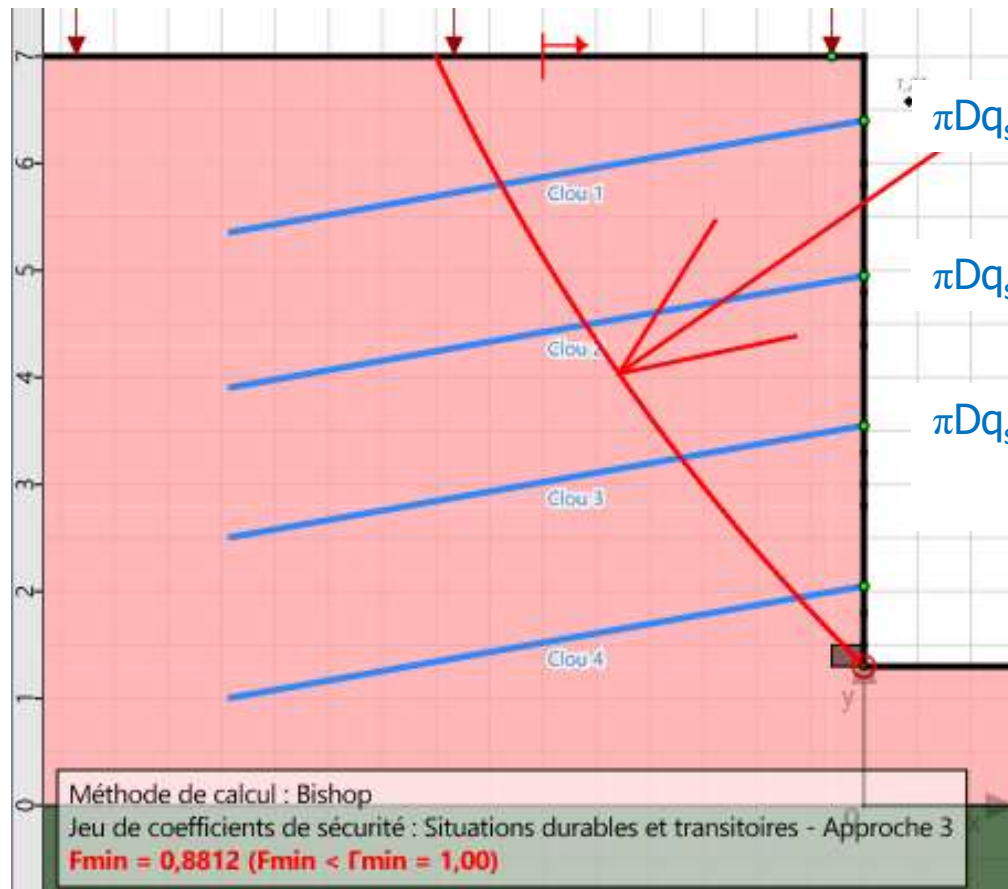
$$T_{0-clou3} = 69 \text{ kN} - T_{\max;d-clou3-phase3} = 74 \text{ kN}$$

$F \approx 1$ OK

Exemple d'application 2

Phase 4 : Calcul de T_0 dans le clou 4

Limitation des efforts mobilisés par la longueur externe du scellement



$$\pi D q_{sd} L_{ext} = 38 \text{ kN} > T_{\max\text{-clou1-phase3}} = 27 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$\pi D q_{sd} L_{ext} = 51 \text{ kN} < T_{\max\text{-clou2-phase3}} = 53 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

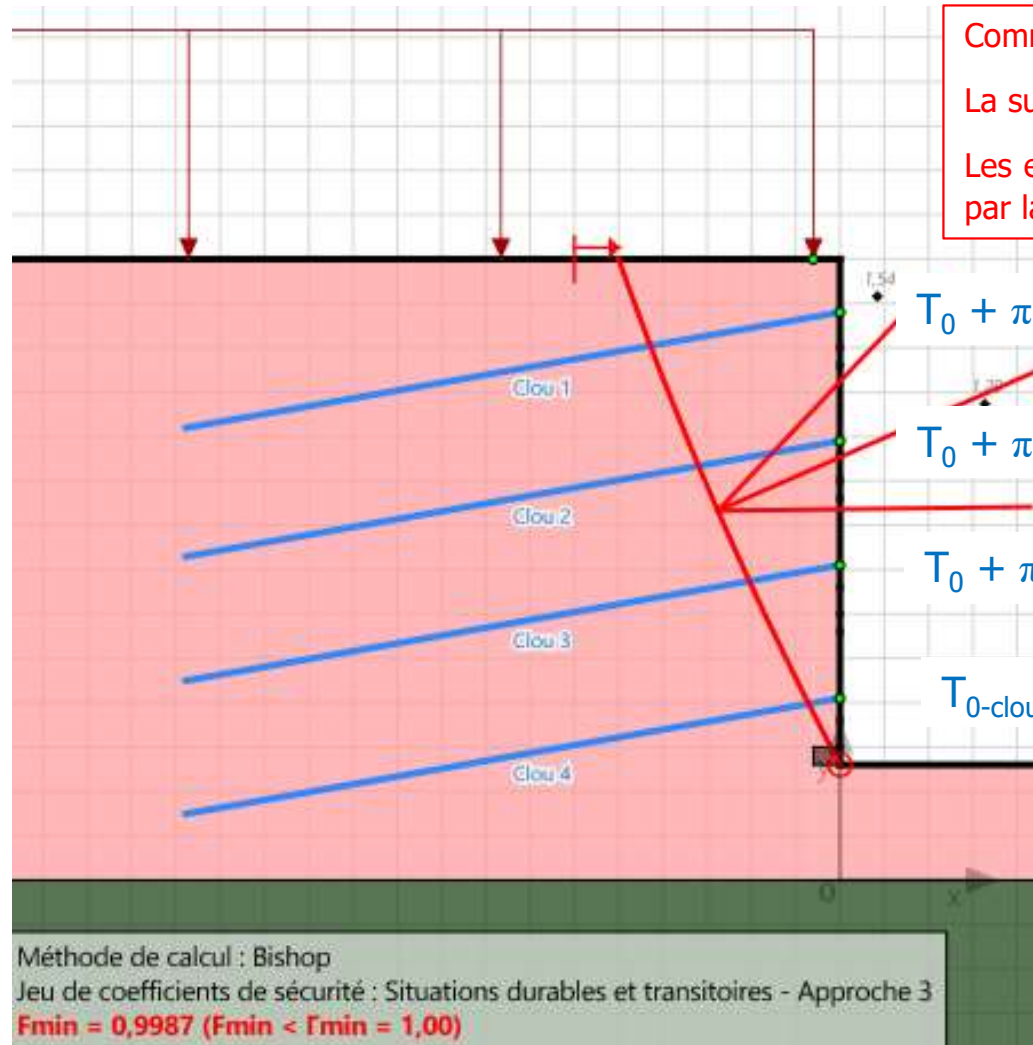
$$\pi D q_{sd} L_{ext} = 64 \text{ kN} < T_{\max\text{-clou3-phase3}} = 74 \text{ kN}$$

$$< T_{0\text{-clou3}} = 69 \text{ kN}$$

$F < 1 \rightarrow$ augmenter l'effort mobilisable dans les clous en les rallongeant

Exemple d'application 2

Phase 4bis : Calcul de T_0 dans le clou 4 après avoir rallongé les clous à 7,5 m



Commentaire:

La surface critique est différente du cas avec les clous de 6 m.

Les efforts mobilisés pour cette surface sont à nouveau limités par la longueur interne du scellement des clous

$$T_0 + \pi D q_{sd} L_{int} = 36 \text{ kN} > T_{\max\text{-clou1-phase3}} = 27 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$T_0 + \pi D q_{sd} L_{int} = 62 \text{ kN} > T_{\max\text{-clou2-phase3}} = 53 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$T_0 + \pi D q_{sd} L_{int} = 83 \text{ kN} > T_{\max\text{-clou3-phase3}} = 74 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$T_{0\text{-clou4}} = 98 \text{ kN} - T_{\max;d\text{-clou4-phase4}} = 103 \text{ kN}$$

$$F \approx 1 \quad \text{OK}$$

Limitation des efforts
mobilisés par la longueur
externe du scellement



$$\pi D q_{sd} L_{ext} = 62 \text{ kN} \approx T_{\text{max-clou2-phase4}} = 62 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$\pi D q_{sd} L_{ext} = 75 \text{ kN} < T_{\text{max-clou3-phase4}} = 83 \text{ kN}$$

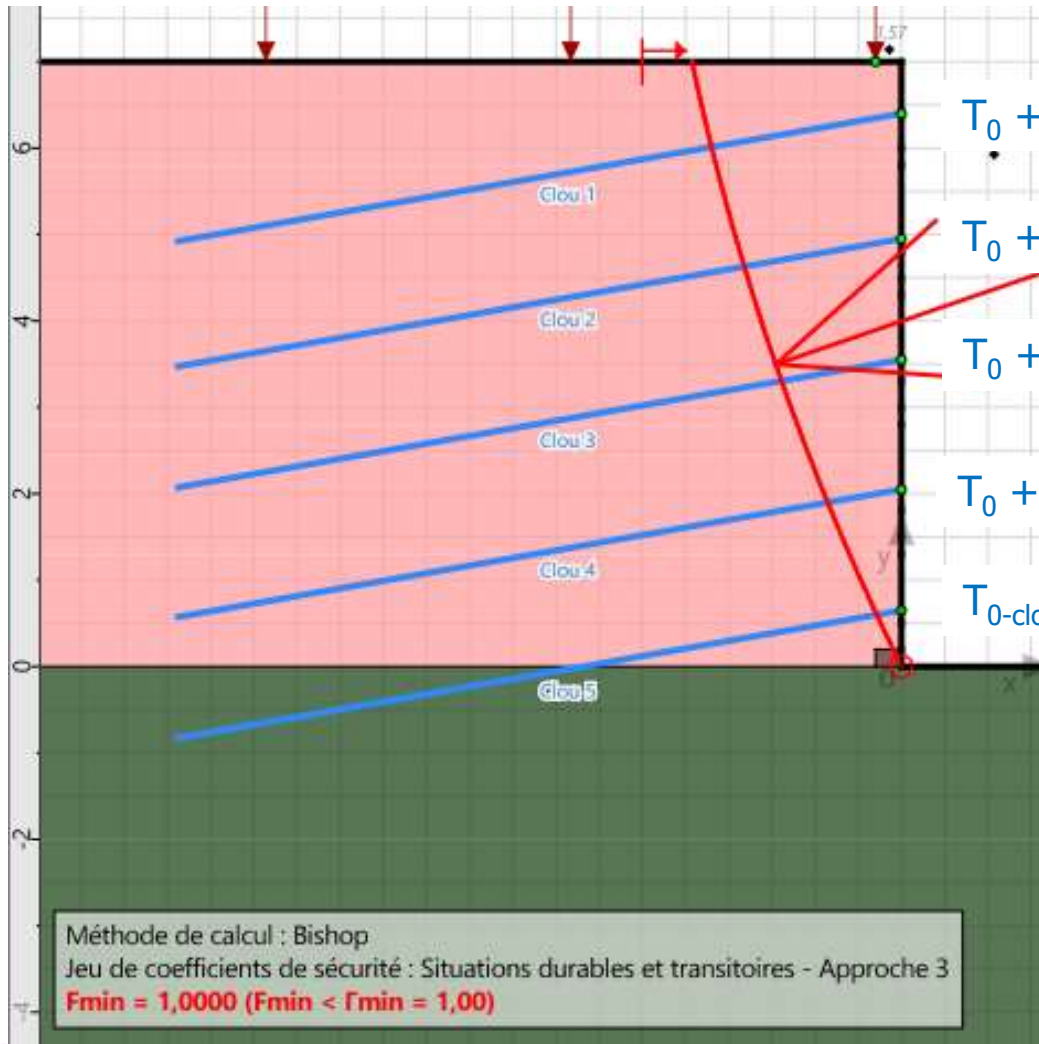
$$\pi D q_{sd} L_{ext} = 90 \text{ kN} < T_{\text{max-clou4-phase4}} = 103 \text{ kN}$$

$$< T_{0\text{-clou}4} = 98 \text{ kN}$$

F < 1 → augmenter l'effort mobilisable dans les clous en les rallongeant

Exemple d'application 2

Phase 5bis : Calcul de T_0 dans le clou 5 après avoir rallongé les clous à 8,5m



$$T_0 + \pi D q_{sd} L_{int} = 36 \text{ kN} \approx T_{\max\text{-clou1-phase4}} \quad \text{OK}$$

$$T_0 + \pi D q_{sd} L_{int} = 65 \text{ kN} > T_{\max\text{-clou2-phase4}} = 62 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$T_0 + \pi D q_{sd} L_{int} = 89 \text{ kN} > T_{\max\text{-clou3-phase4}} = 83 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$T_0 + \pi D q_{sd} L_{int} = 112 \text{ kN} > T_{\max\text{-clou4-phase4}} = 103 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$T_{0\text{-clou5}} = 107 \text{ kN} - T_{\max;d\text{-clou5-phase5}} = 111 \text{ kN}$$

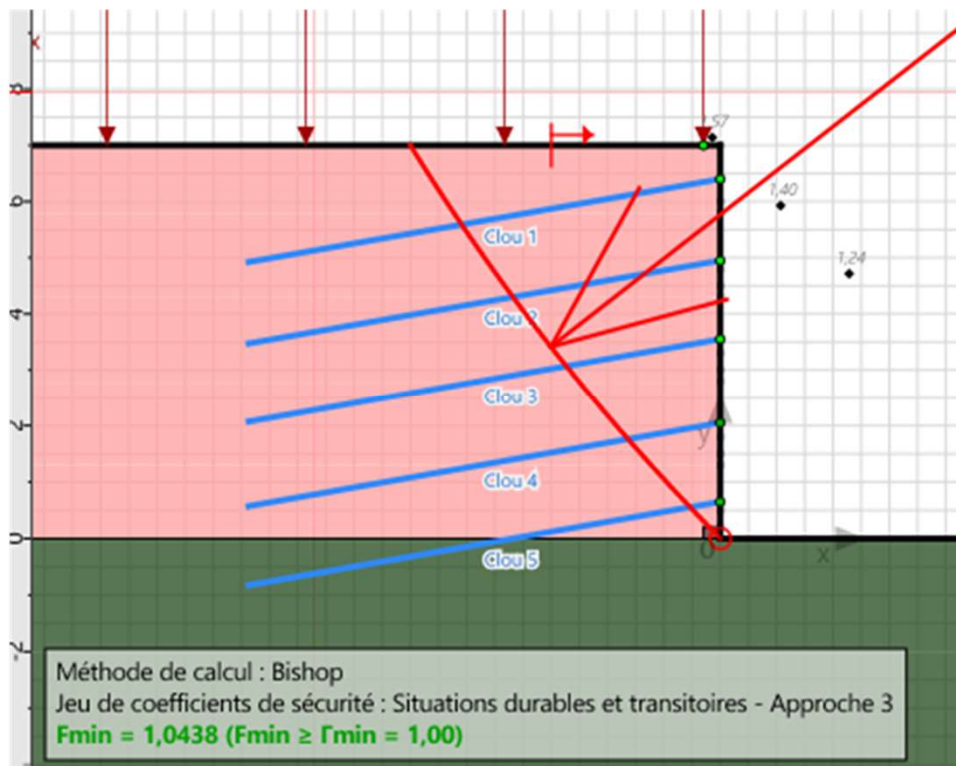
$$F = 1 \quad \text{OK}$$

$$\Sigma \text{ Efforts mobilisés} = 229 \text{ kN/ml}$$

Exemple d'application 2

Vérification de la stabilité mixte en homogénéisant les barres

- L_{clou} identiques aux résultats donnés par l'étude de stabilité interne; $\Sigma L_i = 42,5 \text{ ml @ } 1,8 \text{ ml}$
- Résistance des armatures prises au moins égales à $T_{\text{max};d;i}$ (ici homogénéisée par des Freyssis SD R25N $\rightarrow 113 \text{ kN}$)
- Frottement sur la partie **externe** des clous



$$R_{t;d-\text{clou}1} = 113 \text{ kN}; L_{\text{clou}1} = 8,5 \text{ m}$$

$$R_{t;d-\text{clou}2} = 113 \text{ kN}; L_{\text{clou}2} = 8,5 \text{ m}$$

$$R_{t;d-\text{clou}3} = 113 \text{ kN}; L_{\text{clou}3} = 8,5 \text{ m}$$

$$R_{t;d-\text{clou}4} = 113 \text{ kN}; L_{\text{clou}4} = 8,5 \text{ m}$$

$$R_{t;d-\text{clou}5} = 113 \text{ kN}; L_{\text{clou}5} = 8,5 \text{ m}$$

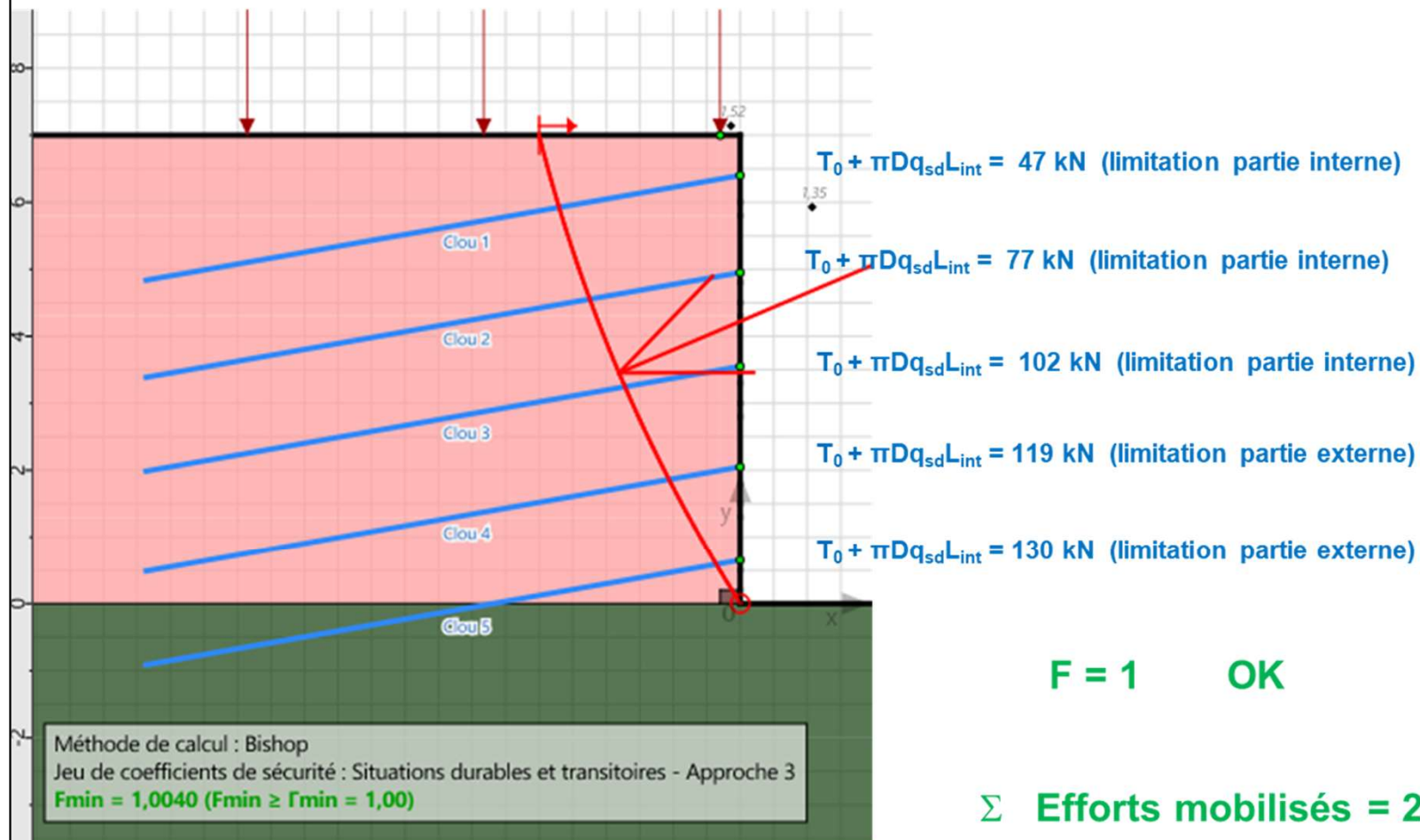
$$F = 1,04$$

OK

Exemple d'application 2

Vérification stabilité interne avec coeff. de modèle de 1,2 (avoisinants sensibles):

Clous rallongés à 9,0 m



F = 1 OK

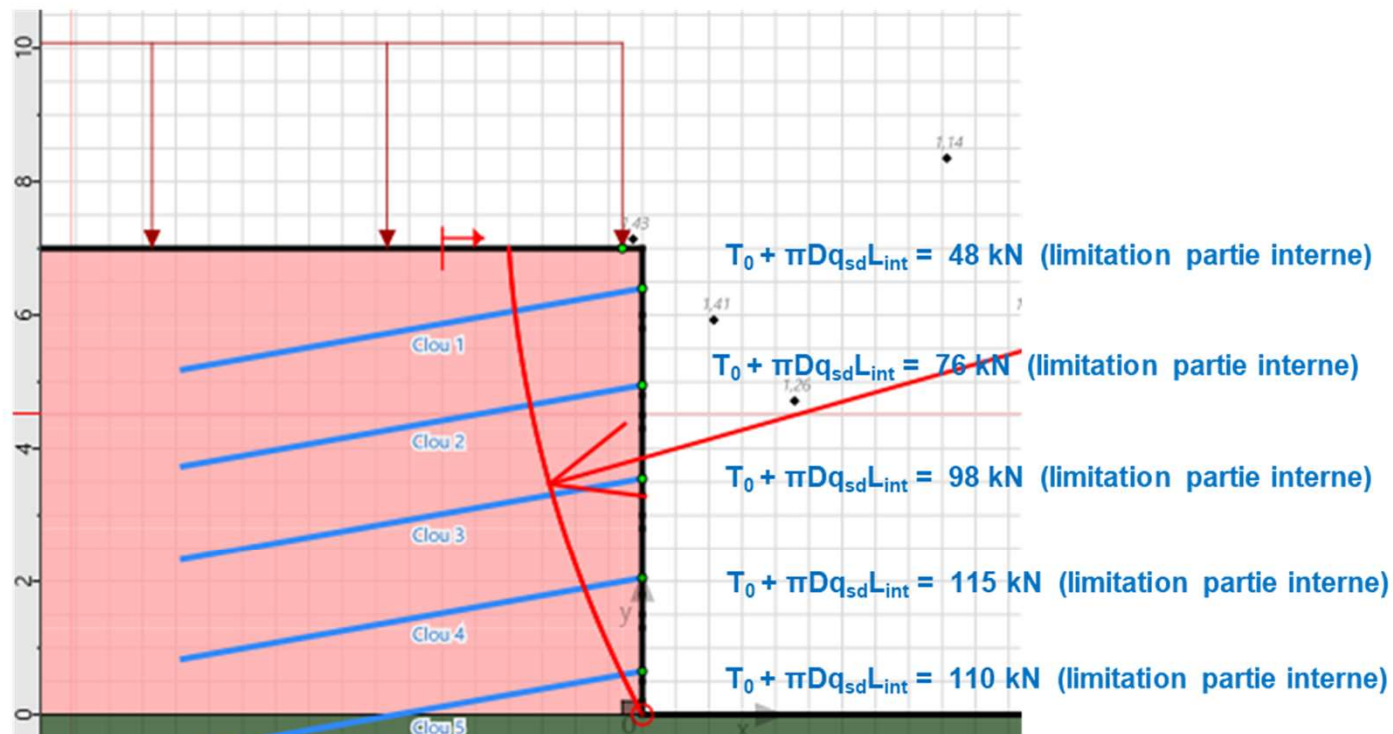
Σ Efforts mobilisés = 264 kN/ml

(au lieu de 229 kN/ml avec $\gamma_{Rd} = 1,1$)

Exemple d'application 2

Vérification stabilité interne avec coeff. de modèle de 1,2 (avoisinants sensibles) + essais de clous permettant de prendre $q_{s,k} = q_s$

Clous raccourcis à 7 m



$F \approx 1$ OK

Σ Efforts mobilisés = 248 kN/ml

Méthode de calcul : Bishop
 Jeu de coefficients de sécurité : Situations durables et transitoires - Approche 3
 $F_{min} = 0,9967$ ($F_{min} < F_{min} = 1,00$)

Exemple d'application 2

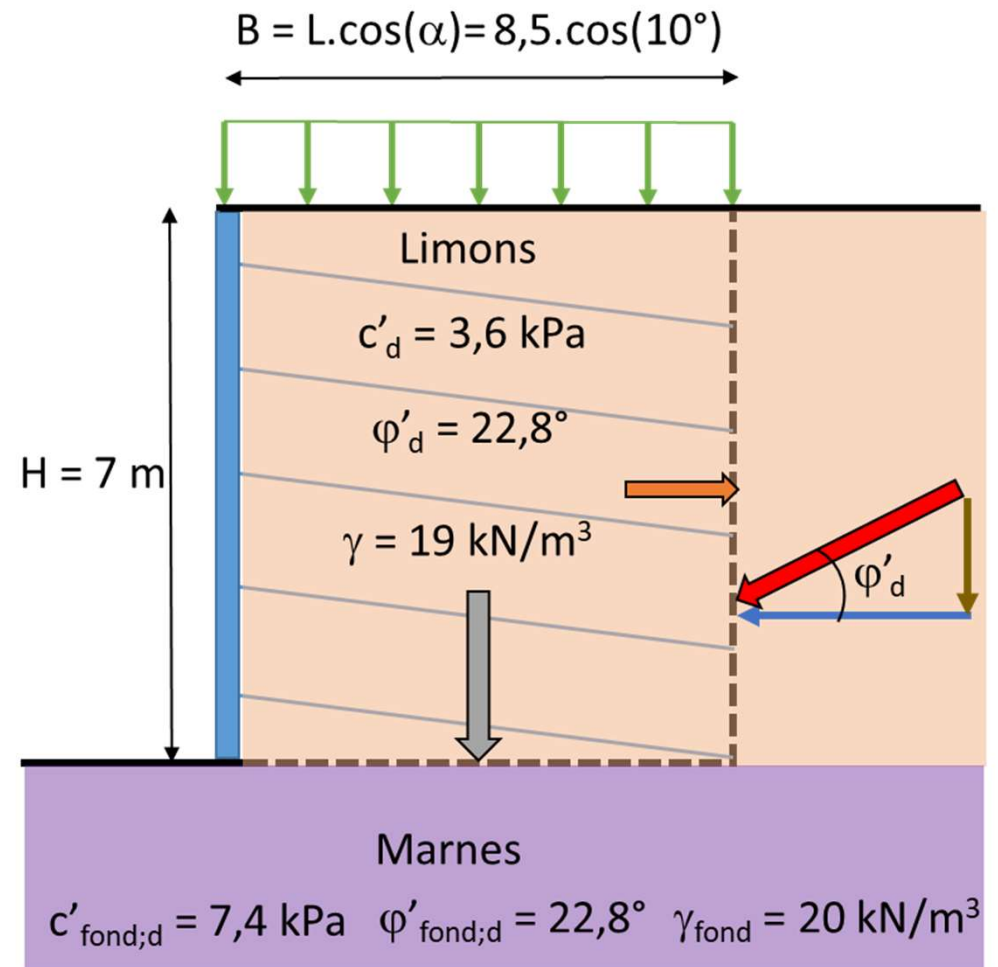
- Vérification de la stabilité externe locale

⇒ Poinçonnement (stabilité FF)

$$V_d - R_0 \leq R_{v;d} \Rightarrow \text{OK}$$

⇒ Glissement plan

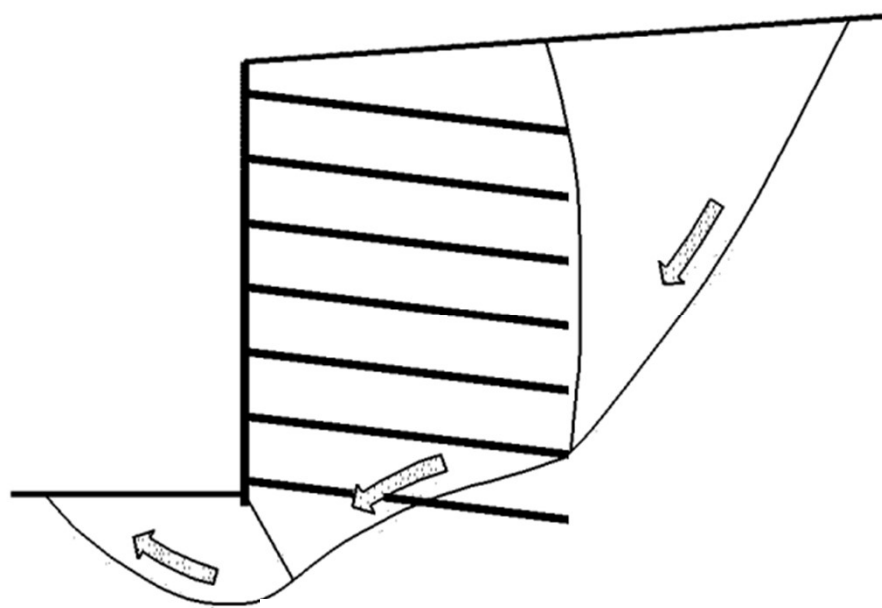
$$H_d \leq R_{h;d} \Rightarrow \text{OK}$$



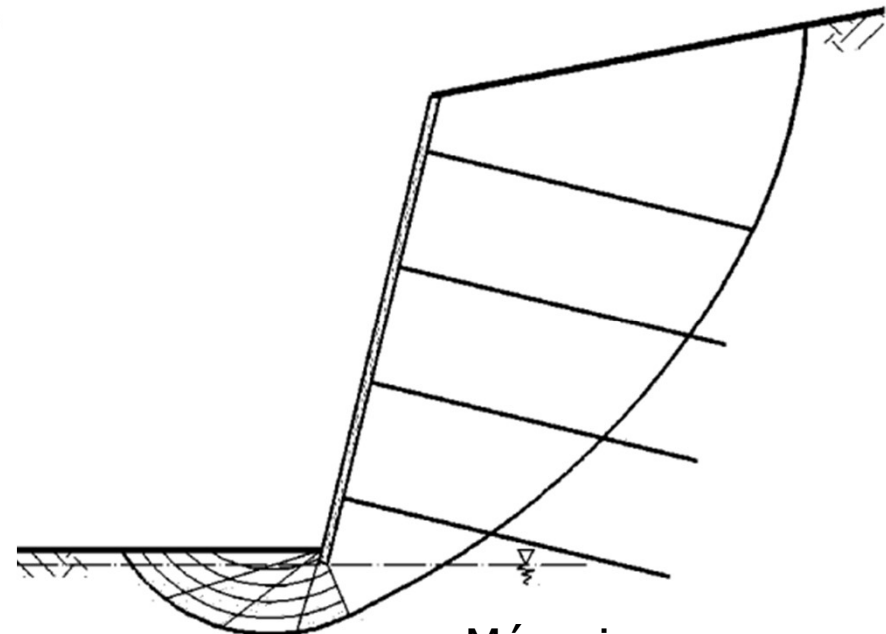
Exemple d'application 2

- Mécanismes composites

- ⇒ Interaction entre les mécanismes de stabilité mixte et externe locale
- ⇒ Susceptibles de se développer dans certains cas particuliers
 - ⇒ Présence d'une couche de faible caractéristique sous le niveau du fond de fouille
 - ⇒ Présence d'une nappe en fond de fouille
 - ⇒ Excentrement important des charges (séisme, massif élané etc.)



Mécanisme
à trois blocs

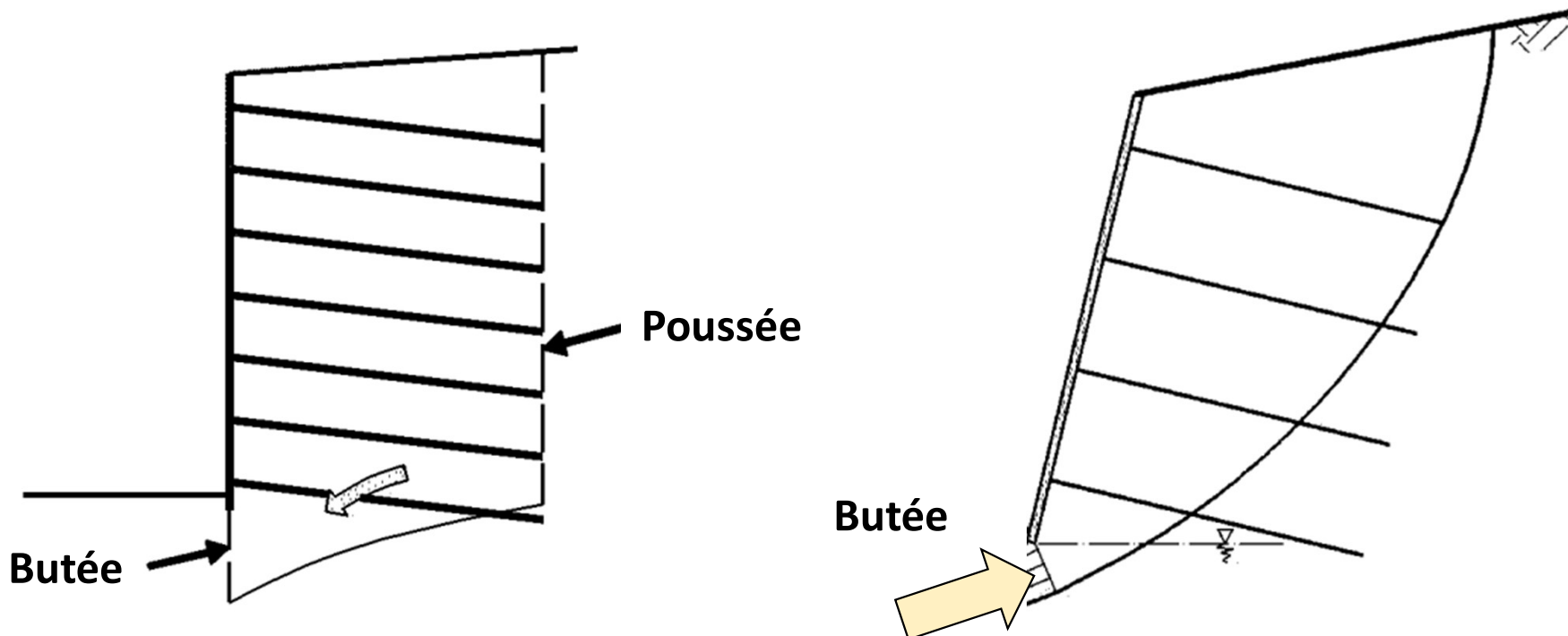


Mécanisme
à deux blocs

Exemple d'application 2

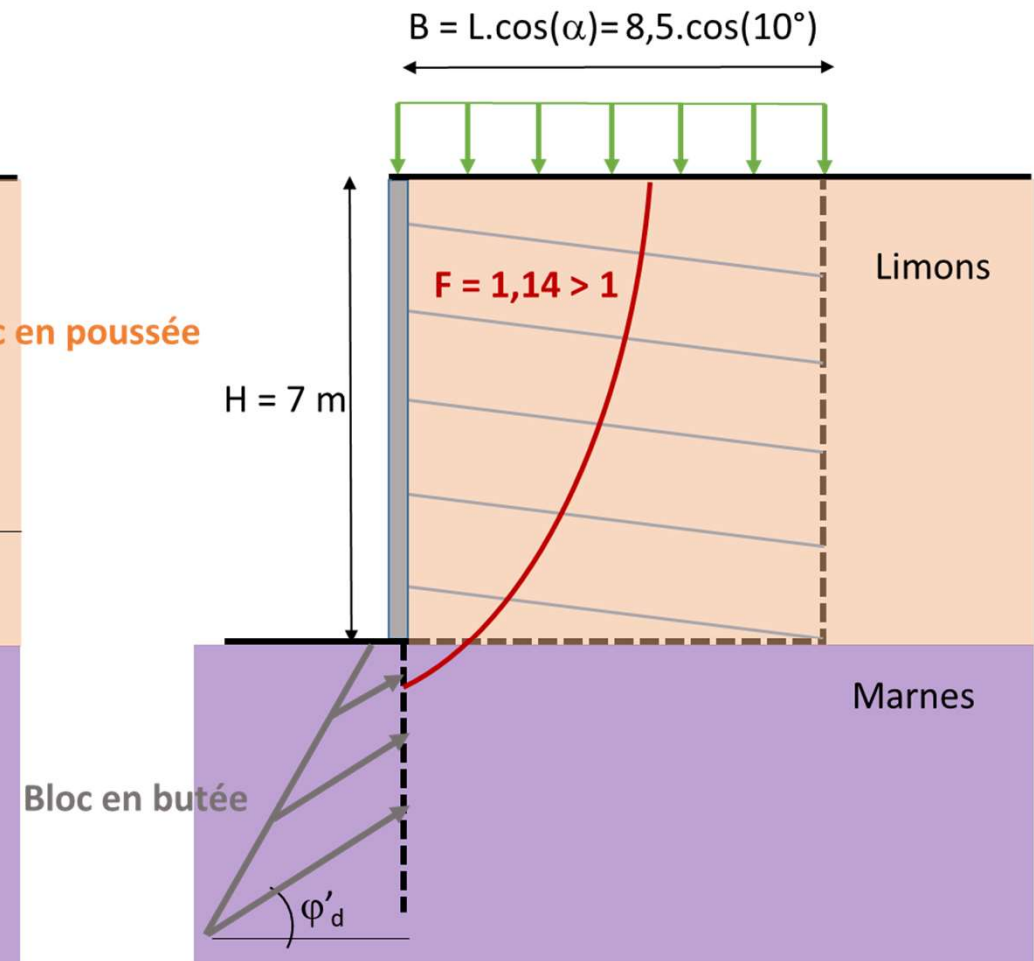
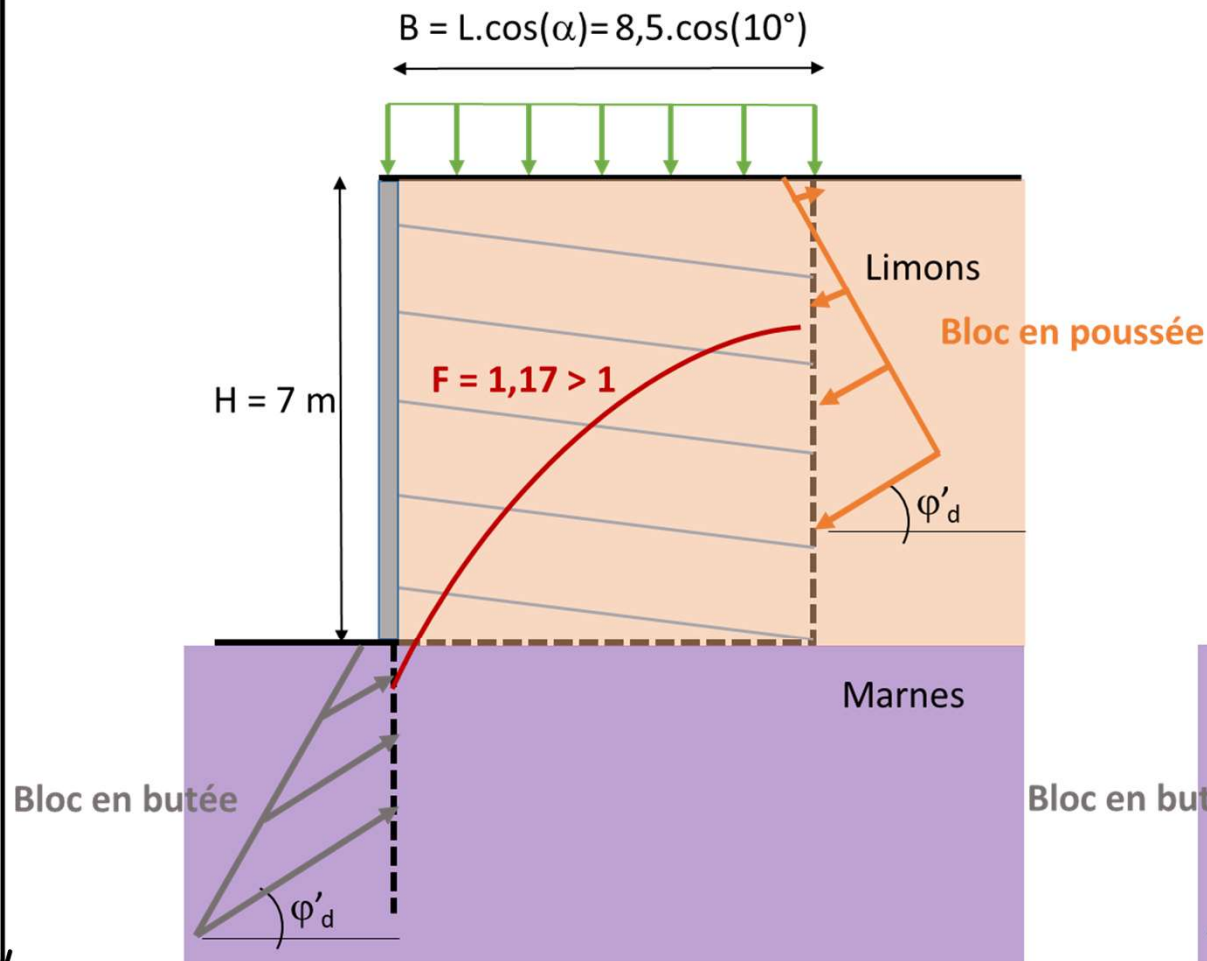
- Mécanismes composites

- ⇒ Interaction entre les mécanismes de stabilité mixte et externe locale
- ⇒ Susceptibles de se développer dans certains cas particuliers
 - ⇒ Présence d'une couche de faible caractéristique sous le niveau du fond de fouille
 - ⇒ Présence d'une nappe en fond de fouille
 - ⇒ Excentrement important des charges (séisme, massif élané etc.)

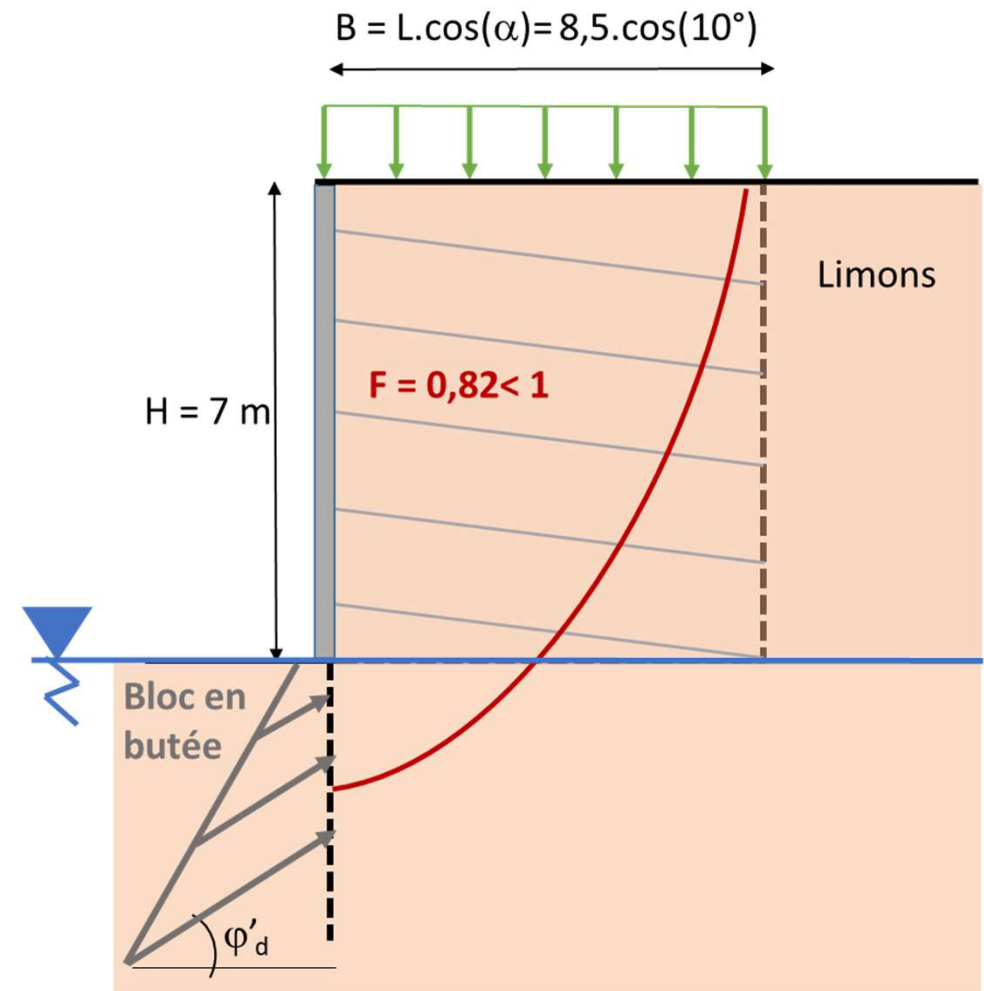


Exemple d'application 2

- Mécanismes composites : cas de l'exemple 2



-
- The diagram illustrates a retaining wall cross-section with the following details:
- Surcharge:** A horizontal line at the top represents a surcharge with a value $B = L \cdot \cos(\alpha) = 8,5 \cdot \cos(10^\circ)$.
 - Wall Height:** The vertical height of the wall is labeled $H = 7 \text{ m}$.
 - Soil Layers:** The soil is divided into two layers: "Limon" (silt) in the upper part and "Blocs en poussée" (pushed blocks) in the lower part.
 - Failure Surfaces:** Two failure surfaces are shown as dashed lines. The upper one is a straight line at an angle φ'_d to the horizontal. The lower one is a curved line, also at an angle φ'_d at its base.
 - Force Factor:** A red curved line represents the force factor, with a value $F = 0,86 < 1$ indicated in the middle of the diagram.
 - Labels:** "Bloc en butée" (blocked block) is labeled near the base of the wall, and "Blocs en poussée" (pushed blocks) is labeled in the lower soil region.



Sommaire

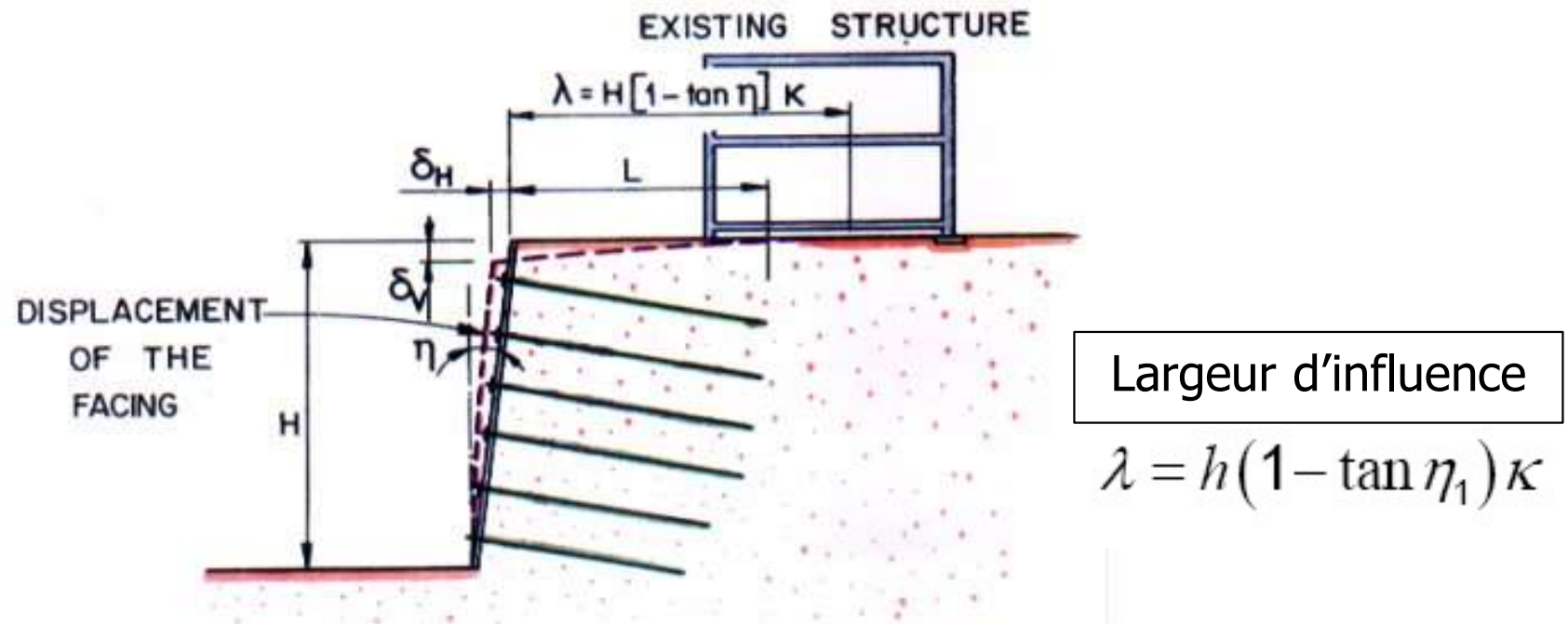
- Les soutènements en sol cloué
- Les points clés de la norme NF P 94 270
- Choix et justification STR/GEO des clous
- Exemples de dimensionnement
- Etats limites de service, ELU sismique

Les états limites de service

- La question des déplacements
 - ⇒ Le choix d'un facteur partiel de modèle de 1,2 permet implicitement de garantir un faible niveau de déformation (typiquement 1 à 4H/1000)
 - ⇒ Il faut accepter l'idée qu'un travail optimal des clous nécessite par construction un déplacement. Pas de déplacement = pas d'efforts (« ancrage » passif).
 - ⇒ Prévoir un suivi sur site lorsque le déplacement est un critère de conception
 - ⇒ La finalité étant le déplacement induits sur ouvrages portés ou voisins
 - ⇒ Estimation par modèles empiriques ou numériques
 - ⇒ Une précision inférieure au centimètre est illusoire

Les états limites de service

- Méthode empirique pour avoir un ordre de grandeur



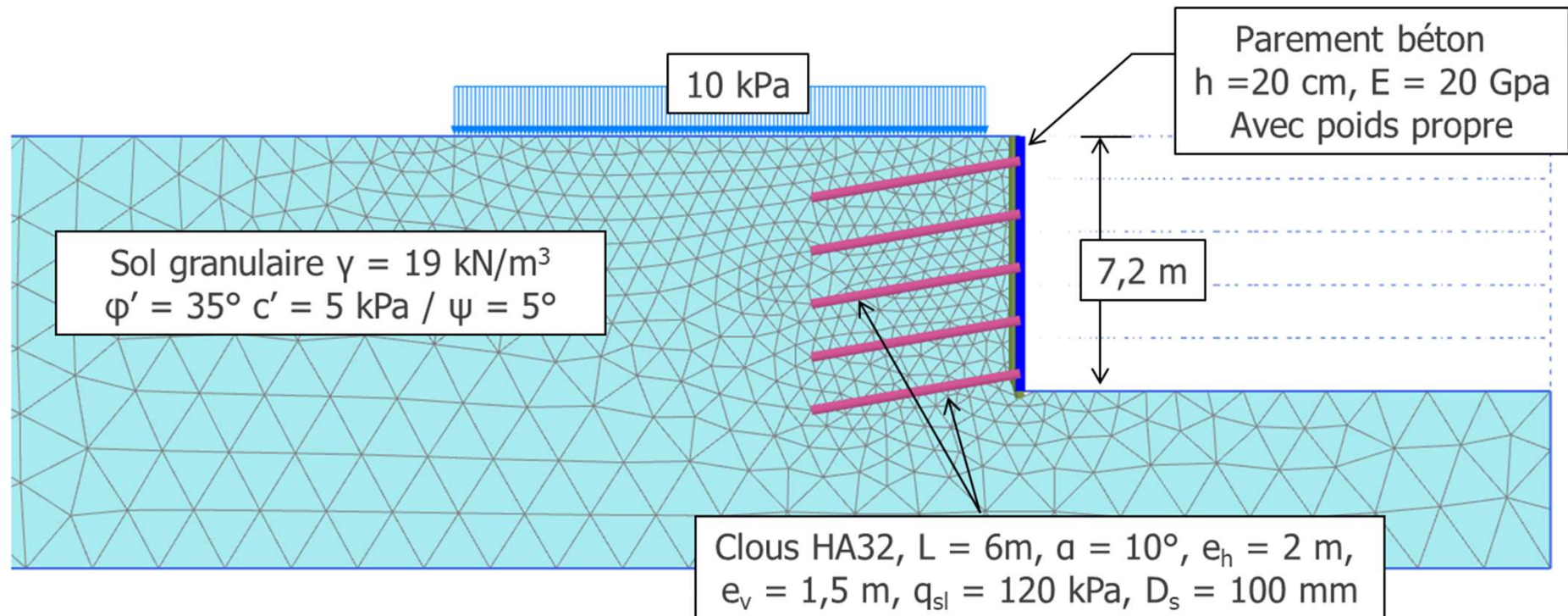
Largeur d'influence

$$\lambda = h(1 - \tan \eta_1) K$$

	Semi-rocheux	Sables	Argiles
$\delta_v = \delta_h$	$H/1000$	$2H/1000$	$4H/1000$
K	0.8	1.25	1.5

Les états limites de service

- Utilisation des modèles numériques : Benchmark du GT 94 270



Deux enseignements :

- ⇒ divergence notable sur les efforts ELS qui se révèlent très dépendant de la loi de comportement du sol et d'interaction sol-clou (et du logiciel...)
- ⇒ convergence sur les efforts ELU obtenus par réduction de la résistance au cisaillement du sol

Les états limites de service

- Utilisation des modèles numériques
 - ⇒ Vocation à affiner l'estimation des déplacements... dans la continuité des ordres de grandeur usuels !
 - ⇒ Les modèles numériques obéissent au même formalisme de sécurité (notamment pour l'obtention des efforts « ELU »)
 - ⇒ Surtout utiles pour apprécier par comparaison l'incidence favorable ou défavorable d'une disposition particulière, ou pour identifier les phases de terrassement critiques
 - ⇒ Modèles numériques (correctement calibrés) = capacité à rendre compte de mécanismes de ruine plus complexes

Aspects sismiques

- Prise en compte du séisme dans la NF P 94 270 (annexe I)
 - ⇒ Etat limite sismique = « état limite pour lequel il y a apparition de déplacements irréversibles d'une amplitude inacceptable » (EC8-5)
 - ⇒ Le recours à un modèle **pseudo-statique** avec un formalisme de sécurité est un moyen « détourné » de couvrir ces déplacements irréversibles
 - ⇒ On peut également utiliser des **analyses « en déplacement »** (modèle de bloc rigide, modèle dynamique non linéaire etc.) visant à quantifier l'amplitude des déplacements induits et en vérifier l'acceptabilité vis-à-vis de l'ouvrage projeté
 - ⇒ Ouvrage en sol cloué (également le cas d'un ouvrage en remblai renforcé) = ouvrage disposant d'une capacité certaine à dissiper de l'énergie et autoriser les déformations

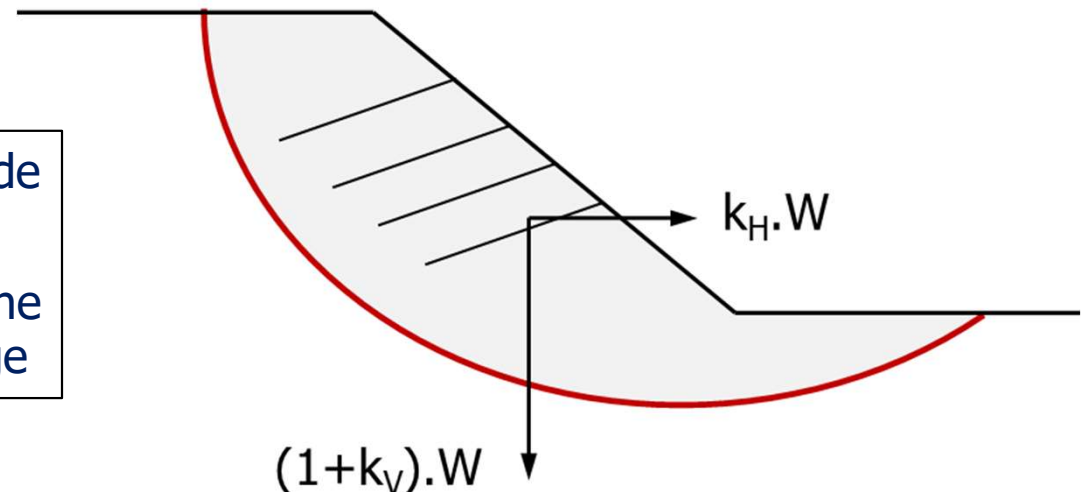
Aspects sismiques

- Utilisation d'un modèle pseudo-statique

- ⇒ En cas d'utilisation d'un modèle pseudo-statique : le formalisme de sécurité recommandé est une pondération des propriétés de résistance au cisaillement par un facteur partiel global de $\gamma_M \times \gamma_{Rd} = 1,00$
- ⇒ Simulation de l'action sismique par deux forces d'inertie équivalentes calculées à partir des coefficients sismiques k_H et k_V

$$k_H = 1/r \times a_N/g \text{ et } k_V = \pm 0,5 \times k_H$$

- ⇒ $r = 2$ pour les mécanismes de stabilité mixte et générale
- ⇒ $r = 1$ à 2 pour la stabilité externe locale selon la sensibilité de l'ouvrage



Synthèse

- Les principales évolutions de la révision 2020

- **Revue du formalisme de sécurité**

- ⇒ Utilisation de l'approche de calcul 3 pour toutes les analyses de stabilité
- ⇒ Revue et homogénéisation des facteurs partiels de modèle
- ⇒ Aspects sismiques (annexe I)

- **Revue des procédures de calcul**

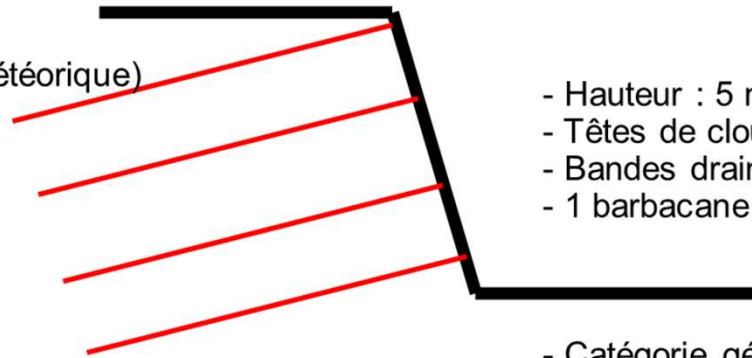
- ⇒ Stabilité externe locale (annexe D)
- ⇒ Stabilité interne (annexe E)
- ⇒ Justification GEO/STR des clous (annexes G et F)
- ⇒ Procédure simplifiée pour des ouvrages simples (annexe L)

Merci de votre attention

Annexes

• Résistance STR des clous : exemple d'une paroi définitive

- Terrain naturel, sablo-limoneux
- Humide (circulations d'eaux d'origine météorique)
- pH # 7
- Résistivité # 4 000 Ω .cm



- Hauteur : 5 m
- Têtes de clous non apparentes
- Bandes drainantes continues (50% de couverture)
- 1 barbacane tous les 6 m²

- Catégorie géotechnique 2
- 50 ans
- Suivi du comportement -> Cibles topo mises en place au fur et à mesure

▪ **$\Sigma A + C = 5$** (1 (texture argilo-sableuse) + 2 (2 000 < ρ < 5 000) + 2 (sol humide) + 0 (pH > 6) + 0 (structure courante))

- Catégorie de corrosion III (moyennement corrosif) :

- Epaisseur sacrifiée à la corrosion si :

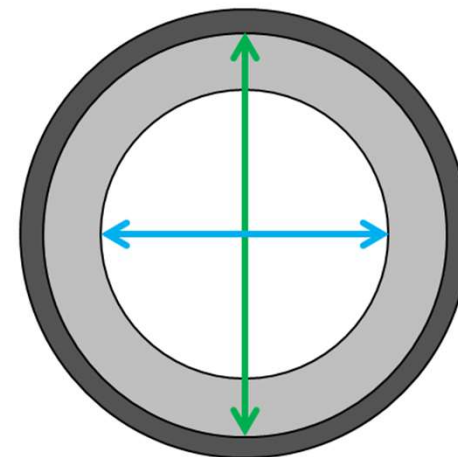
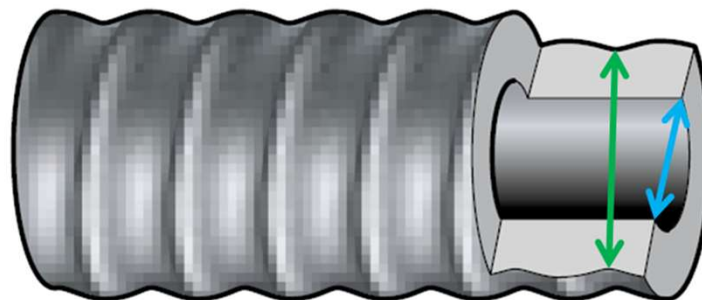
- Barres HA (NF EN 10080) et assimilées (rainurées) ^a : **2,70 mm** ;
- Aciers doux (profilés métalliques (NF EN 10025) ou tubes lisses (NF EN 10210, NF EN 10219)) : **1,80 mm**.

^a la corrosion des systèmes de barres autoforantes, bien que non décrits dans la NF P94-270, se rapproche davantage des barres HA (crénelées) que de l'acier doux (lisse).

Annexes

- Résistance STR des clous : exemple d'une paroi définitive
 - Si une solution de protection par galvanisation d'un système de barres autoforantes est envisagée alors son épaisseur sera à priori de 270 μm .
 - **Attention car au-delà d'environ 100 μm , l'épaisseur devient problématique.** Il est alors nécessaire de prendre en compte une épaisseur sacrificielle de l'acier de 1,70 mm (2,70 mm - 1,00 mm « économisé » par 100 μm de galvanisation -> 1,70 mm). Attention encore car pour calculer la section réduite, il faut connaître :
 - **Le diamètre extérieur de la barre autoforante en fond de file ;**
 - **Le diamètre intérieur de la barre autoforante.**

} A préciser par le fournisseur



Annexes

- Résistance STR des clous : petit point sur les produits

- La NF P94-270, et il en est de même pour les autres Normes d'Application Nationale de l'Eurocode 7, ne fait pas référence aux ETE ^a ; seulement aux normes européennes harmonisées et aux normes internationales (ISO, EN ISO ou NF EN ISO).
- Les barres pleines comme les GEWI® et les systèmes de barres autoforantes ont une ETE ; elles ne sont donc pas référencées dans la NF P94-270.
- Pour mettre en application "l'esprit" de la norme, il convient de "rattacher" ces produits à ceux qui sont référencés dans la NF P94-270. Typiquement :
 - les barres pleines sont à rattacher aux armatures en acier de béton armé pour caractériser le facteur partiel de sécurité (idem pour la corrosion car ce sont des barres crénelées et non lisses) ;
 - les systèmes de barres autoforantes sont à rattacher aux armatures en acier de construction pour caractériser le facteur partiel de sécurité (mais aux armatures en acier de béton armé pour caractériser la corrosion car ce sont des barres crénelées et non lisses).

^a L'Evaluation Technique Européenne (ETE), qui remplace l'Agrément Technique Européen (ATE), est un document d'évaluation des caractéristiques d'un produit qui n'est pas couvert par une norme européenne harmonisée.