

Principes de stabilité interne et de dimensionnement



Alain GUILLOUX & Fahd CUIRA, TERRASOL
(a.guilloux@terrasol.com et f.cuira@terrasol.com)

Journée d'étude SBGIMR – Namur - 10/03/2015
Les techniques de Clouage des parois



Sommaire

- Développement du clouage dans les sols
- Principes de comportement
- Principes de dimensionnement
- Aspects réglementaires



Sommaire

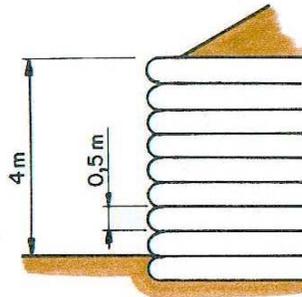
- **Développement du clouage dans les sols**
- Principes de comportement
- Principes de dimensionnement
- Aspects réglementaires



Les domaines d'application des techniques de renforcement

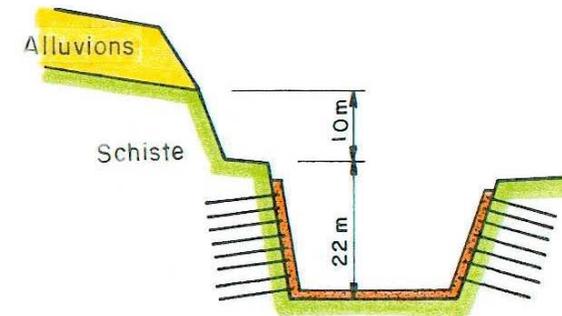
Un peu d'histoire

TERRE ARMEE



MUR DE PRAGNIERES (1965)

CONFORTATION DE TALUS ROCHEUX



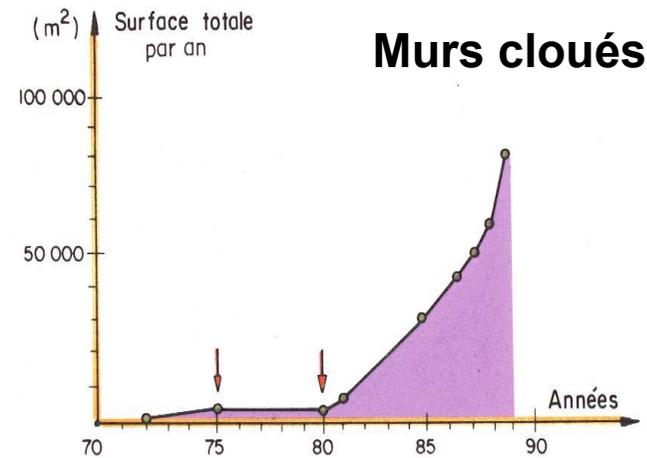
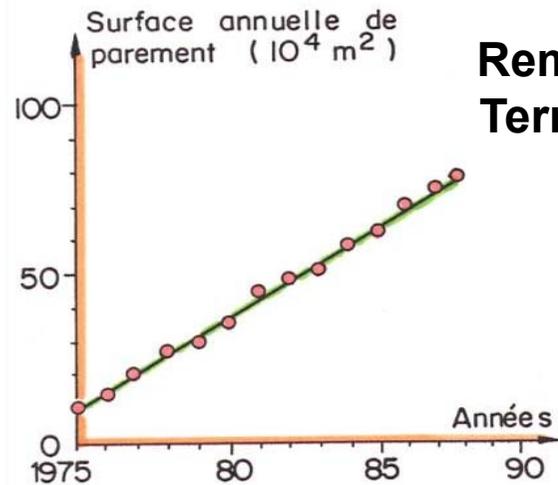
BARRE DE NOTRE DAME DE COMMIERS (1961)
(d'après Bonazzi et Colombet, 1984)

①	Soutènements	
②	Stabilisation des pentes	
③	Tunnels	
④	Fondations	

- **Ouvrages de soutènement**
- **Stabilisation de pente**
- **Voûtes et fronts de taille des tunnels**
- **Fondations**

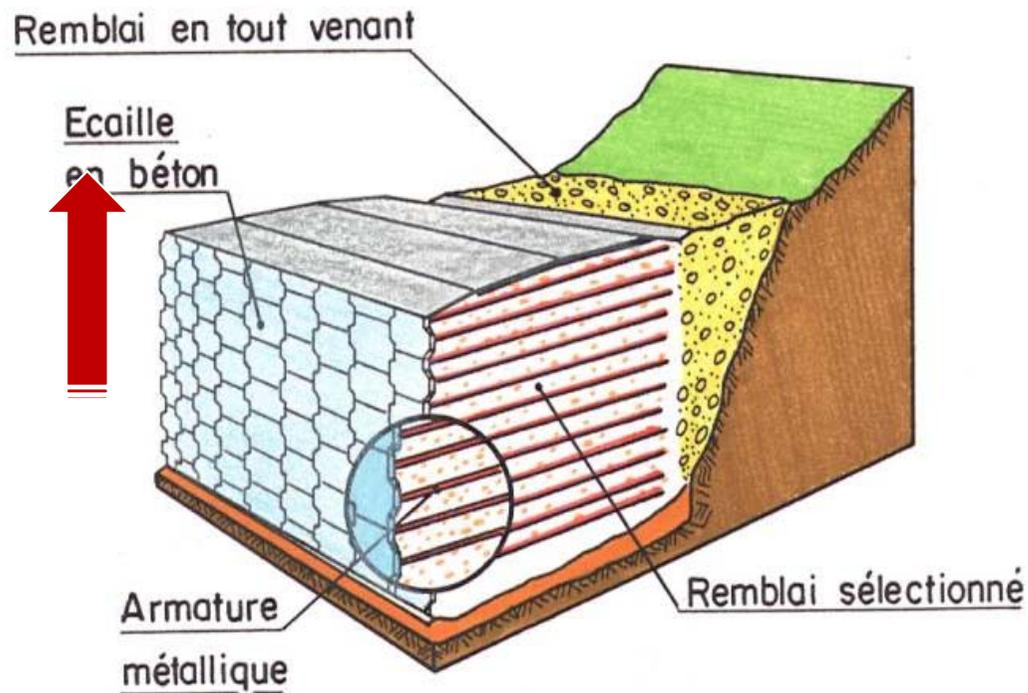
Développement des techniques depuis 1970

- Sol rapporté : Remblais en sol renforcé : Terre Armée puis
- Sol en place : Pentes et terrassement : Clouage
Fondations : Colonnes verticales (colonnes ballastées et inclusions « rigides »)

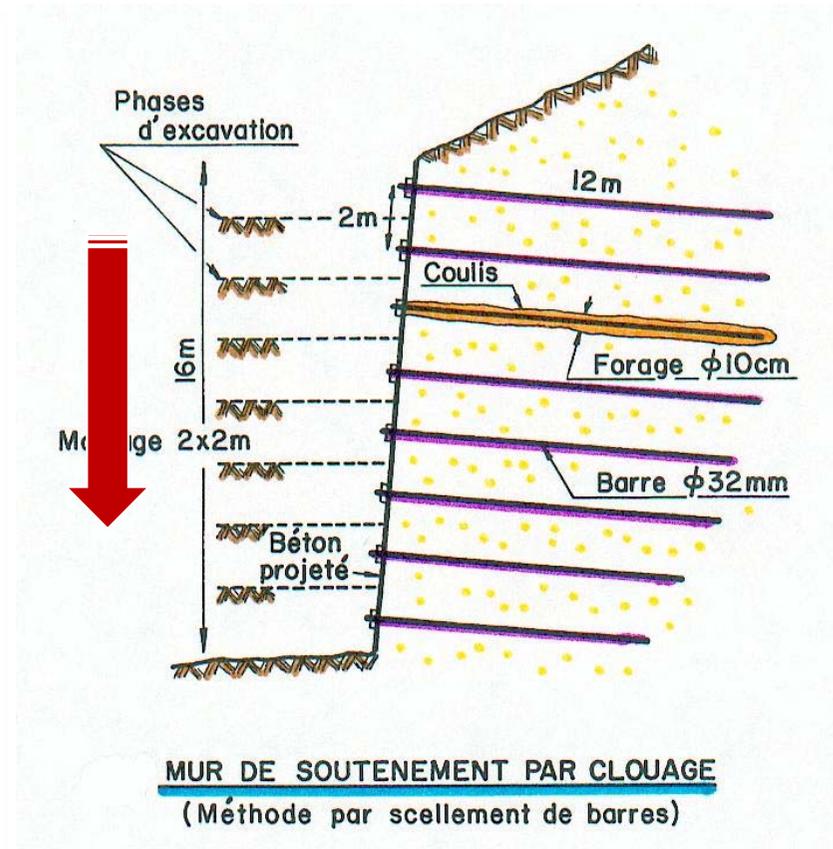


Soutènements

- En remblais : sol renforcé (Terre Armée)
- En déblais : murs cloués



Remblais en sol renforcé



Murs cloués

Sommaire

- Développement du clouage dans les sols
- **Principes de comportement**
- Principes de dimensionnement
- Aspects réglementaires



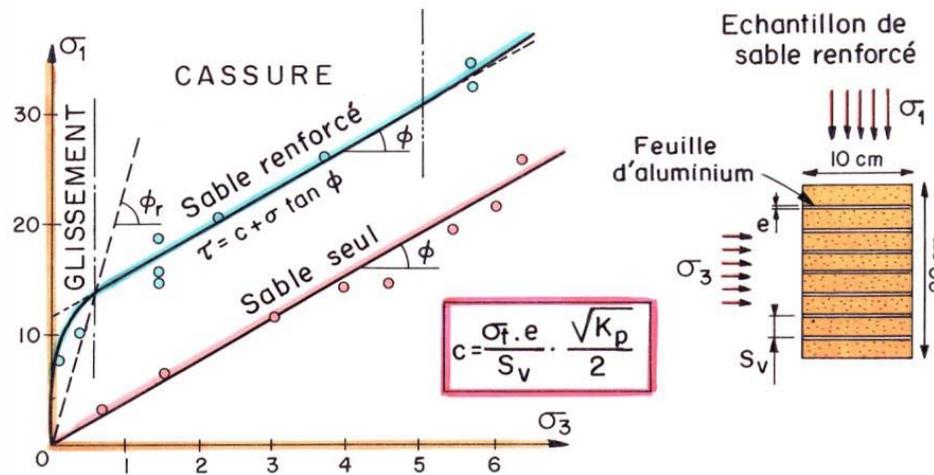
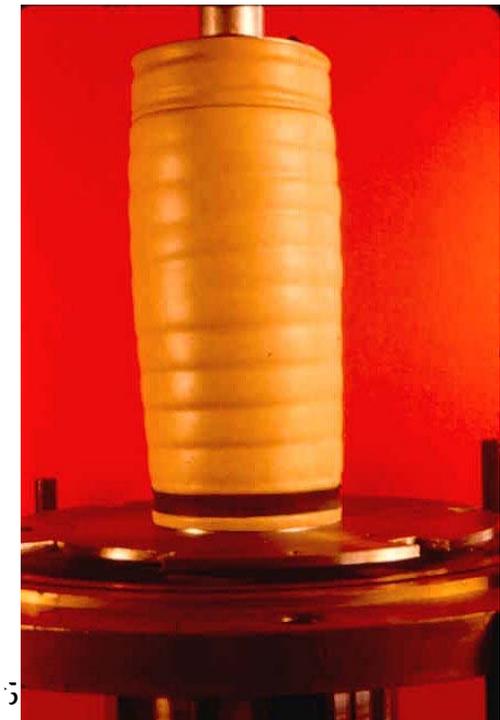
Le matériau « composite » sol + renforcement

- Matériaux rapportés :
 - Nature : acier, plastiques, ciment, etc...
 - Forme : fibres continues, barres, bandes et nappes
- Sol : divers selon les applications (soit en place soit rapporté)
- Comportement du matériau composite : divers types de rupture
- Essai triaxial sur sable renforcé par feuilles d'aluminium

Rupture par cassures des armatures



Rupture par glissement du sol entre les armatures



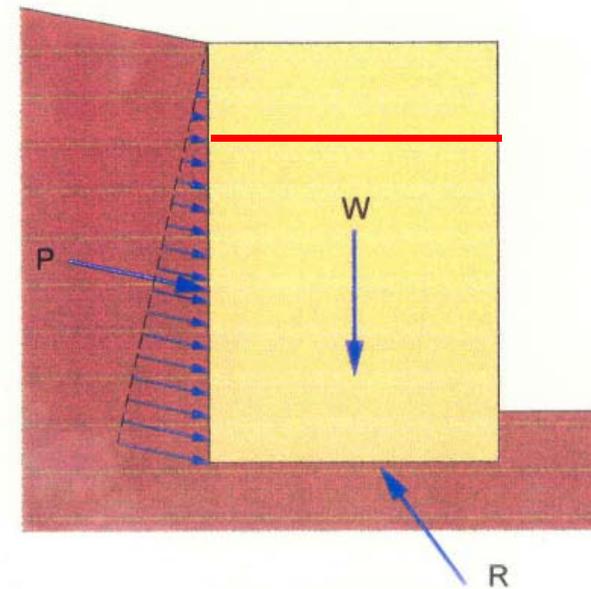
Terre Armée : calcul d'Équilibre local

Traction mobilisée dans l'armature

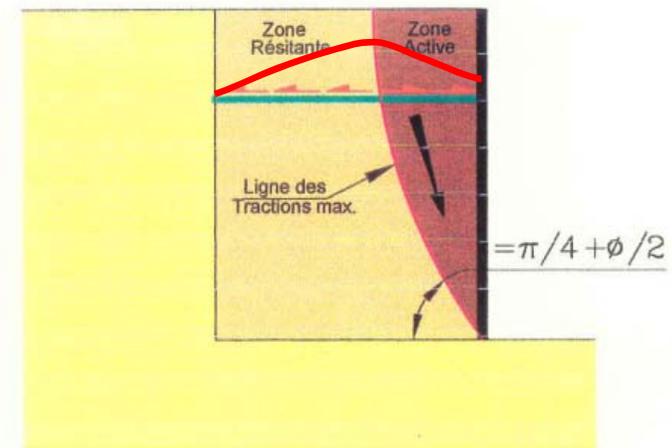
T_{max} calculée à partir de $K \cdot \sigma'_v$ (K variable entre K_a et K_o) doit être inférieure à :

- **Résistance en traction** du matériau (acier ...)
- **Résistance à l'arrachement** sur la partie d'armature en arrière de la ligne des tractions maximales

Non applicable au clouage ...



STABILITE EXTERNE



STABILITE INTERNE

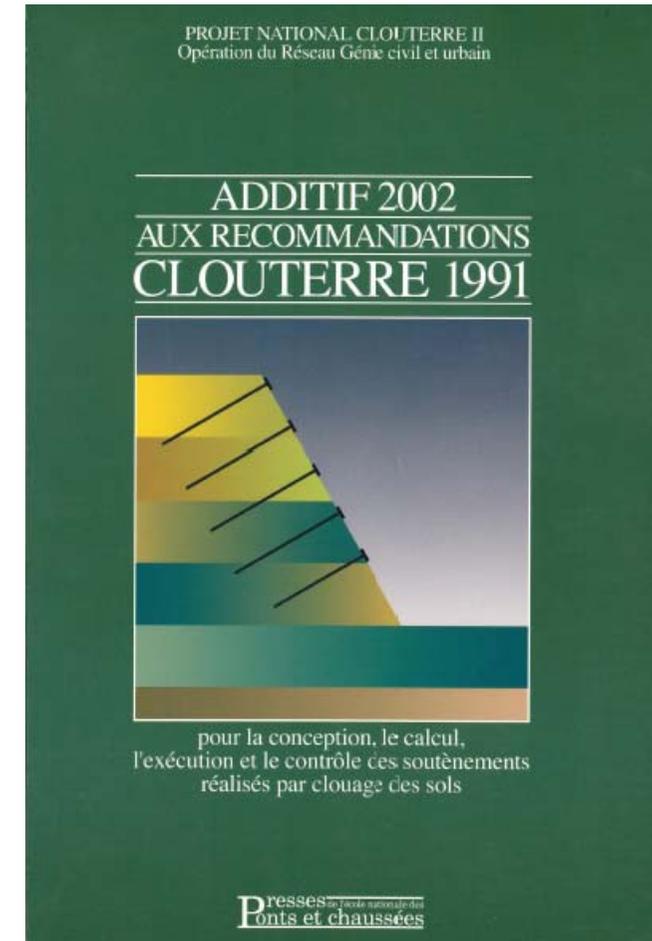
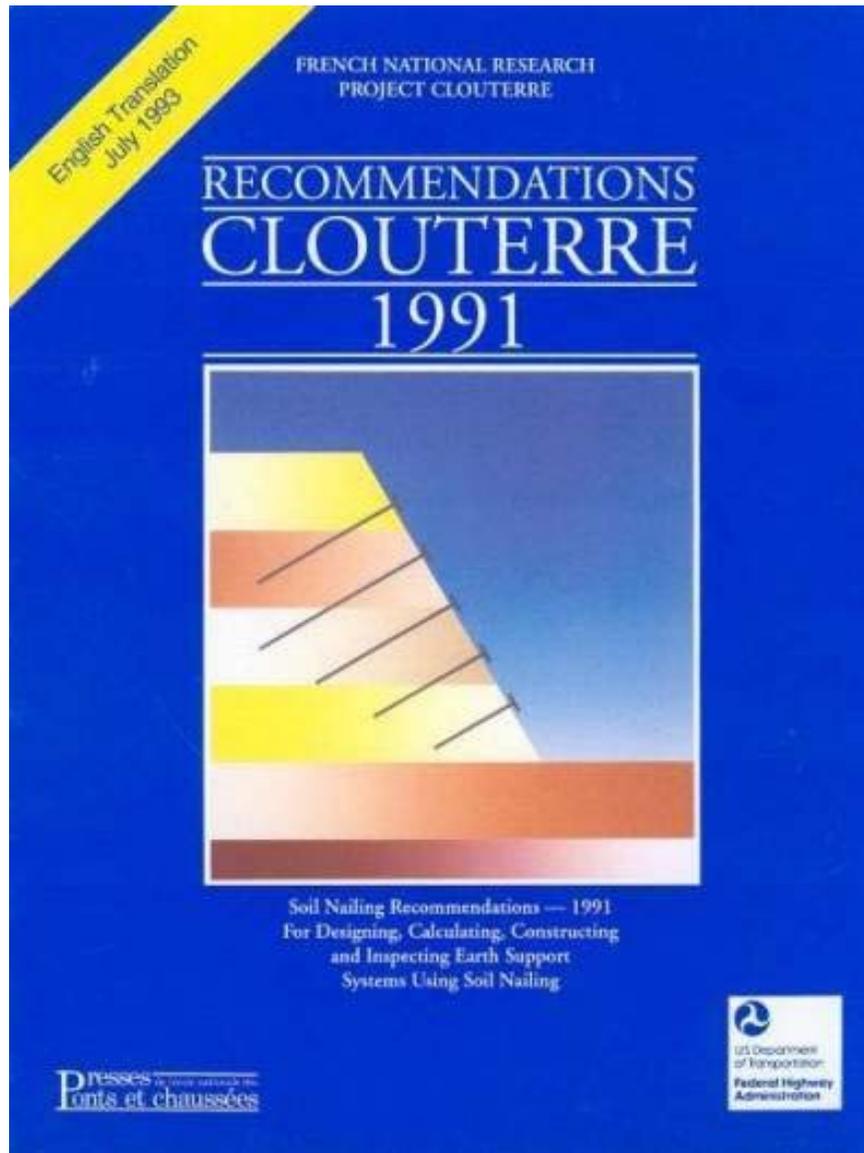
Clouage : méthode de l'équilibre local non applicable, car :

- ✓ **Dans la Terre Armée** – géométrie rectangulaire « constante », toujours les mêmes armatures, sol sélectionné et homogène – il a été possible de définir a priori les paramètres de dimensionnement :
 - Ligne des tractions maximales
 - Coefficient $K = \sigma_h / \sigma_v$
 - Frottement sol-inclusion μ

- ✓ **Dans le clouage** tous ces paramètres varient du fait de :
 - Géométries variables et plus complexes
 - Sols variables et hétérogènes
 - Types d'inclusion et modes de mise en place variables
 - Construction « en descendant »



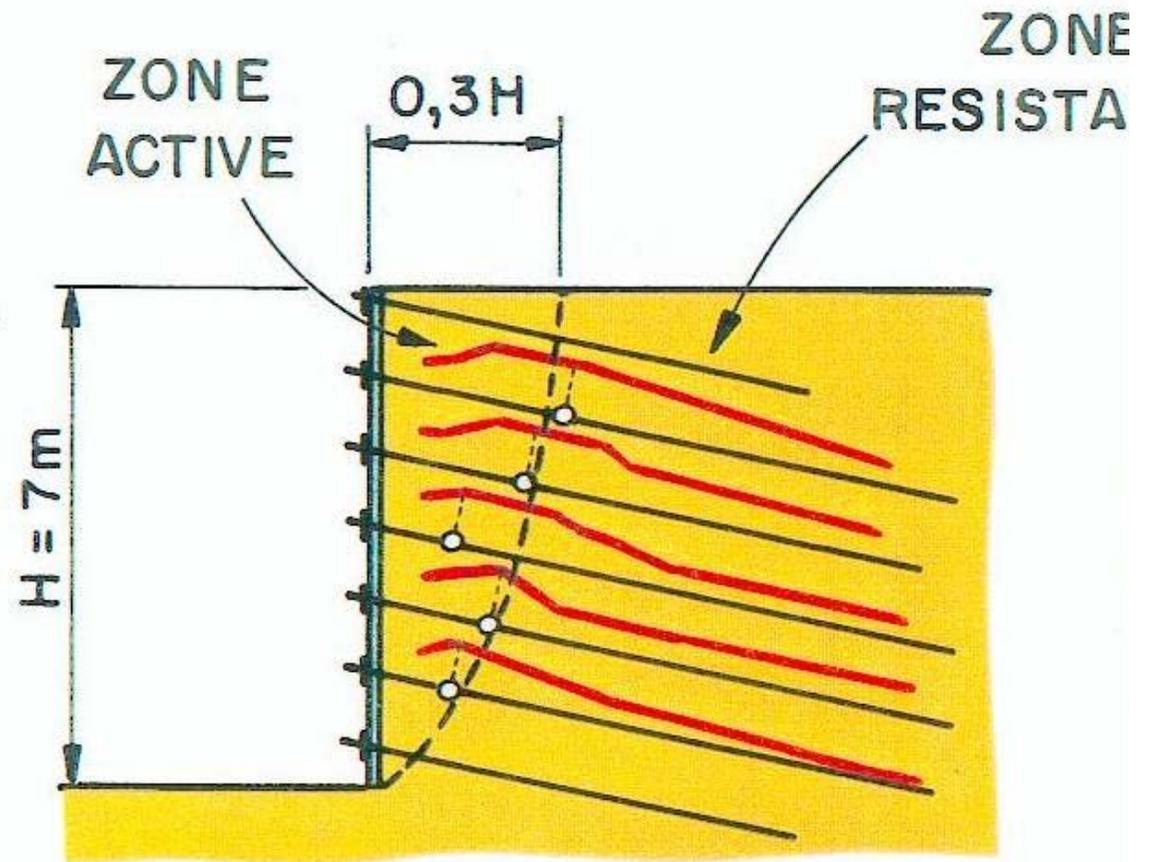
Projet National de Recherches



Mécanismes d'interaction sol – inclusion : comportement comparable à la Terre Armée

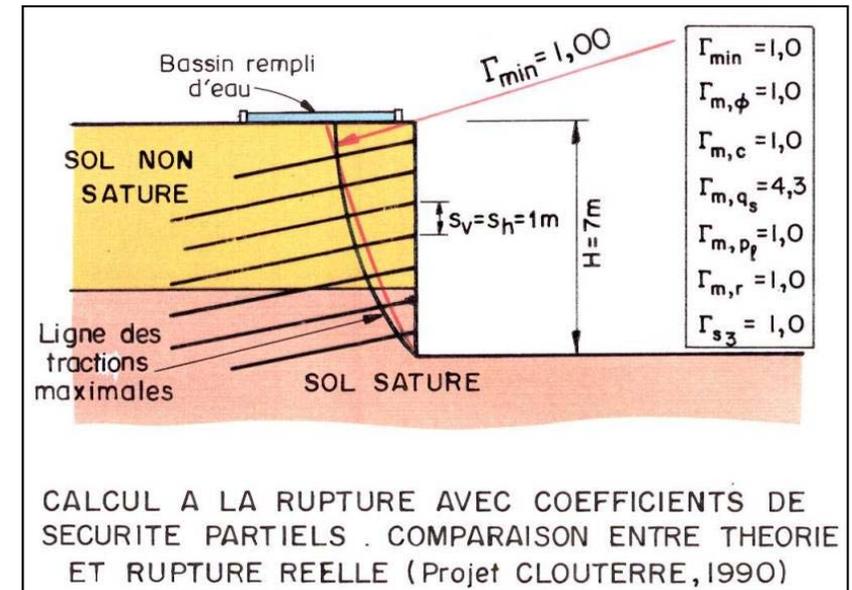
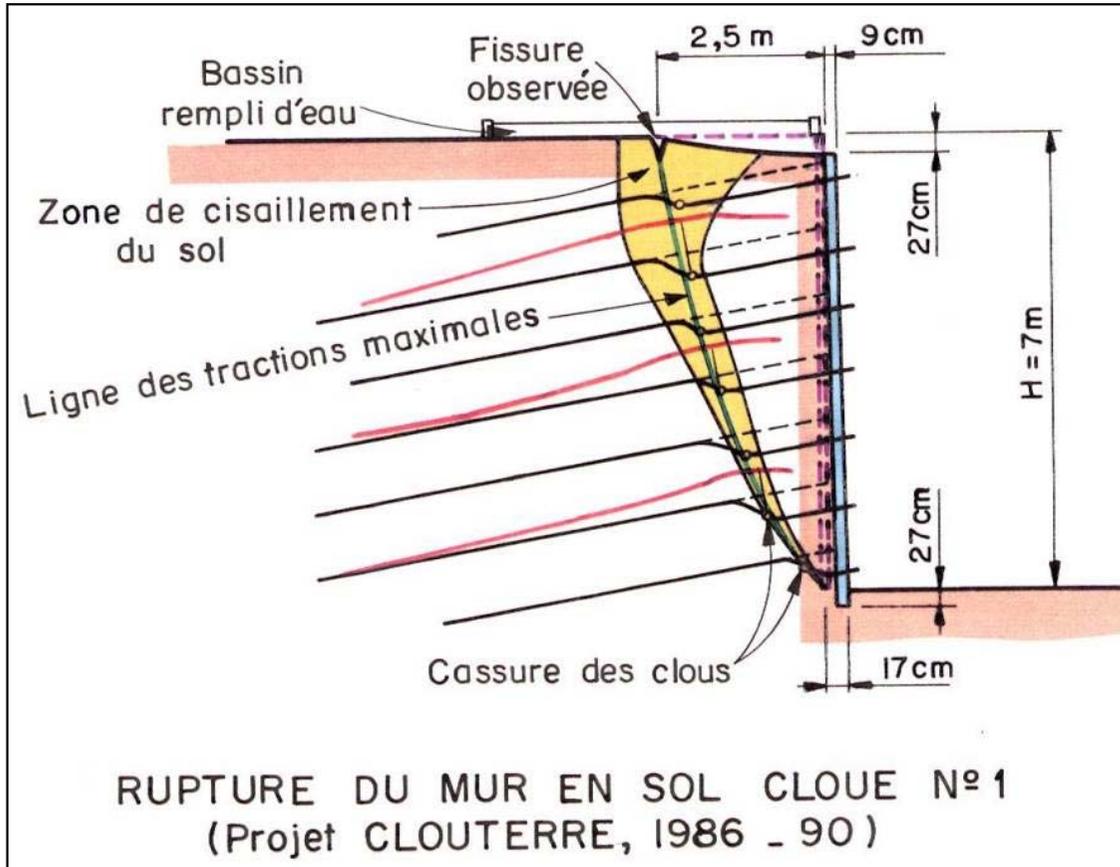
Efforts dans les inclusions

- Tractions le long des inclusions
- Zones active / résistante



Mur expérimental en vraie grandeur - Clouterre n° 1

Rupture par saturation du massif

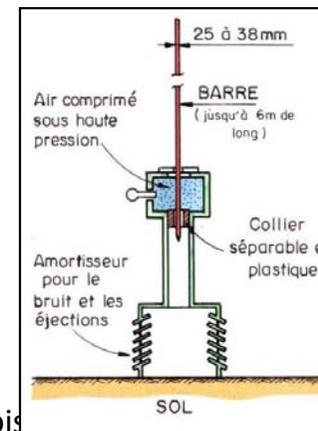
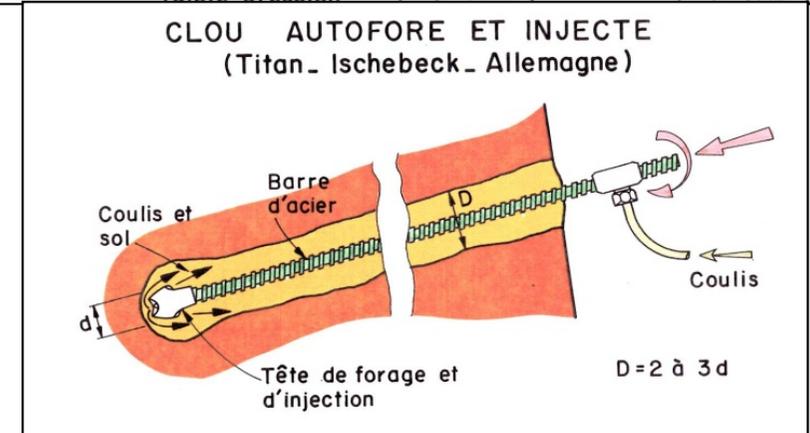
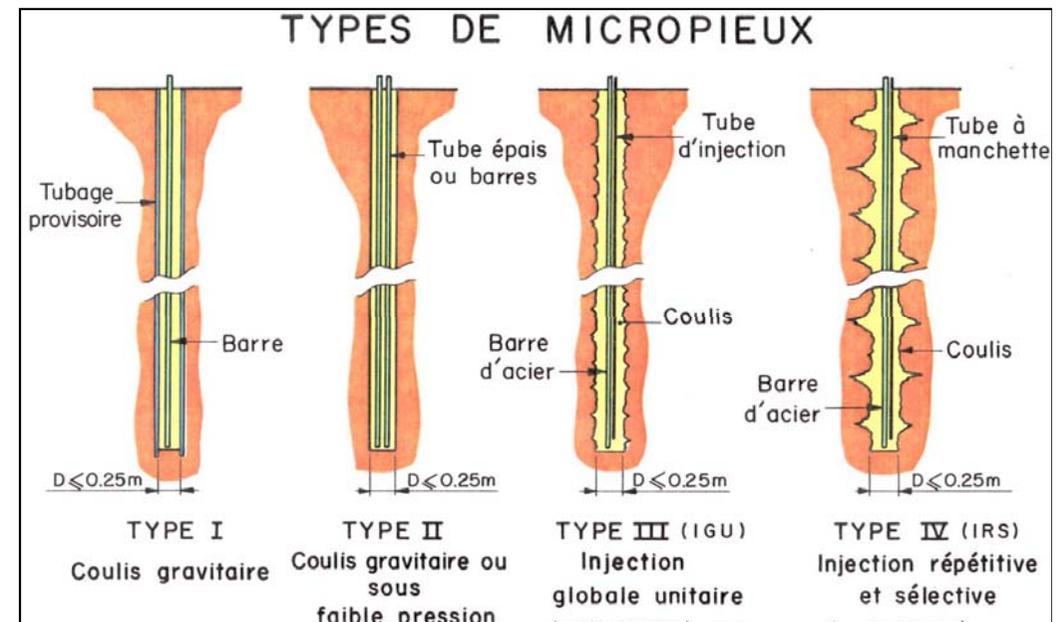
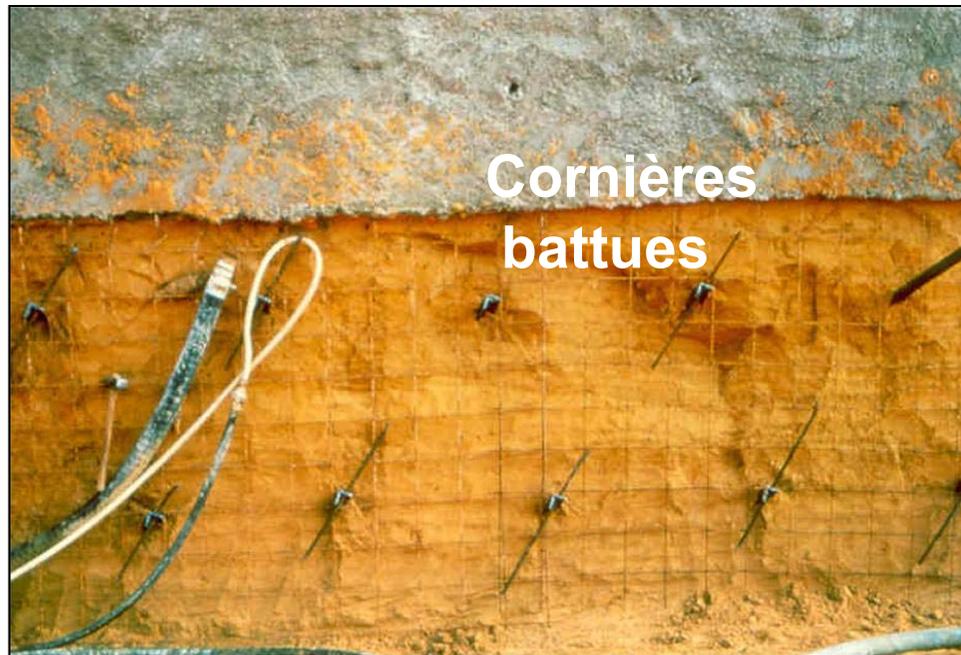


Différents types de clous

➤ Clous

- Clous forés (type micropieux) ou « autoforés »
- Clous battus
- Clous lancés

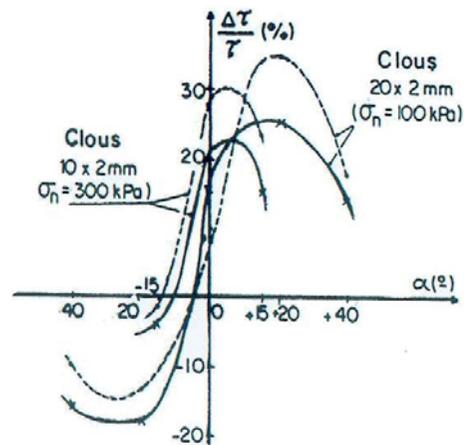
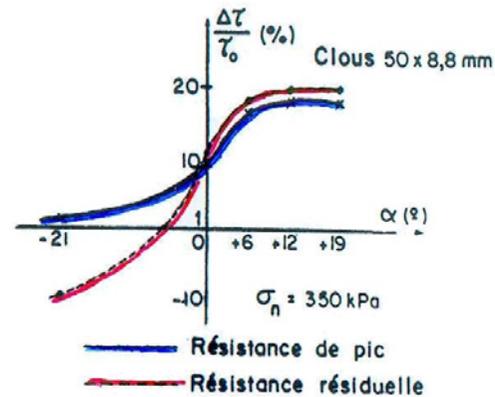
➤ Tirants



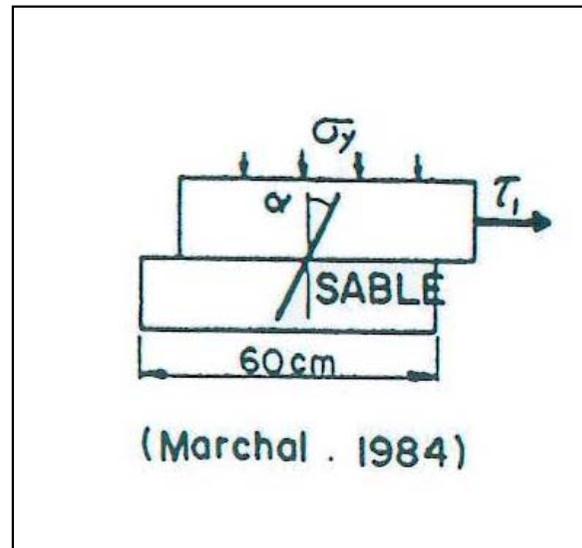
Mécanismes d'interaction sol - inclusion

Influence de l'orientation des clous

Influence de l'inclinaison

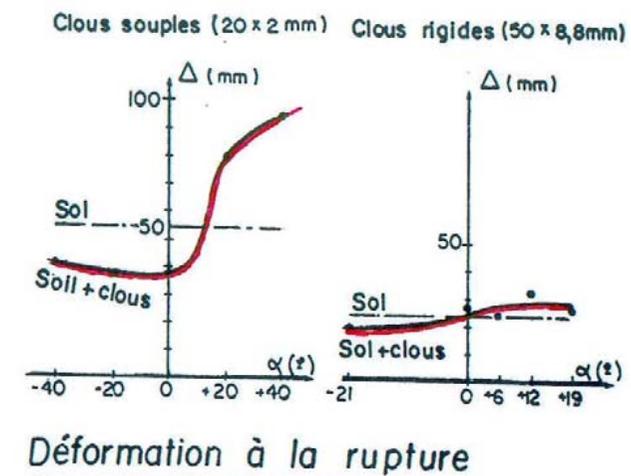


Influence de l'inclinaison



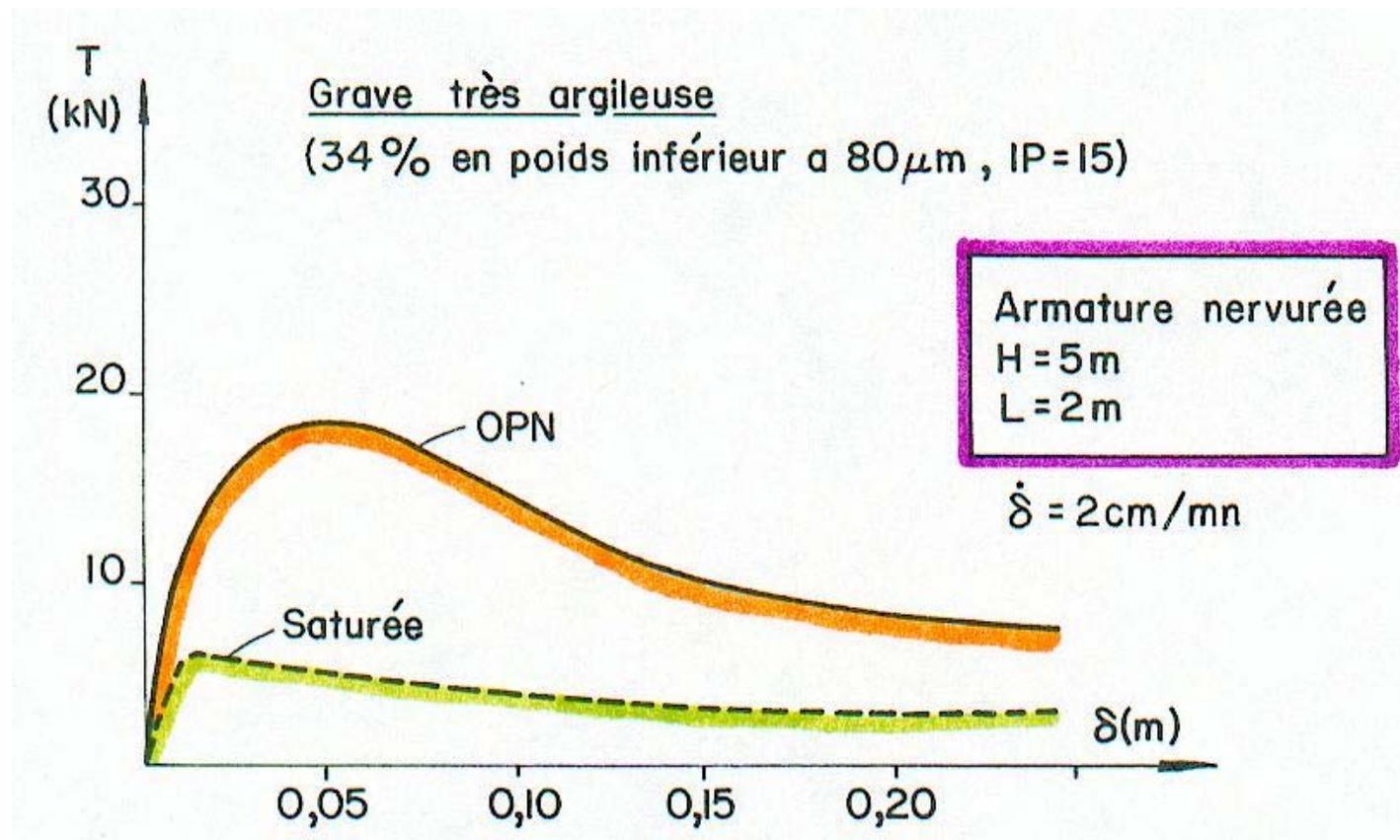
Pression latérale = équivalence pieu sollicité horizontalement : mise en butée du terrain

Déformation à la rupture



Frottement latéral sol – inclusion

Influence de la teneur en eau dans les sols fins



Mécanismes de frottement sol - inclusion

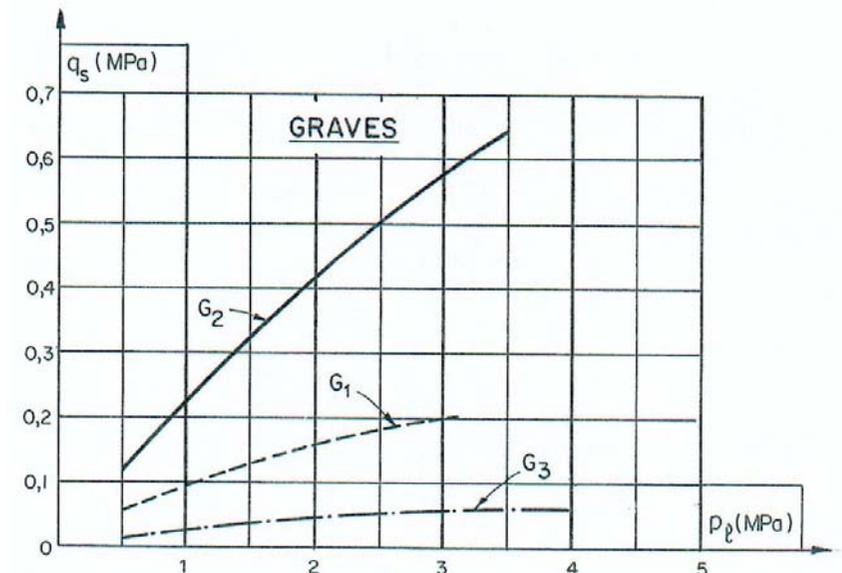
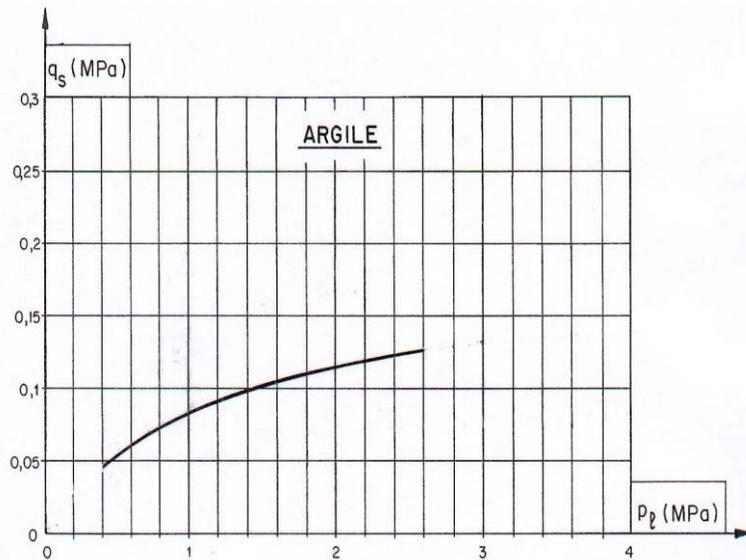
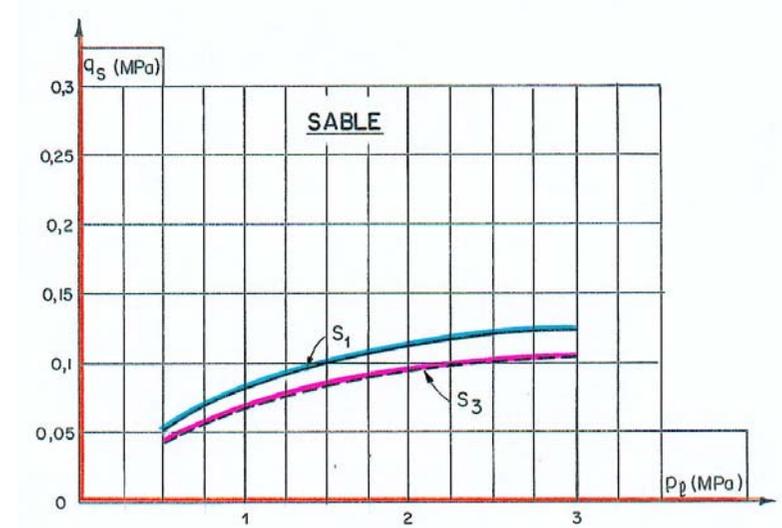
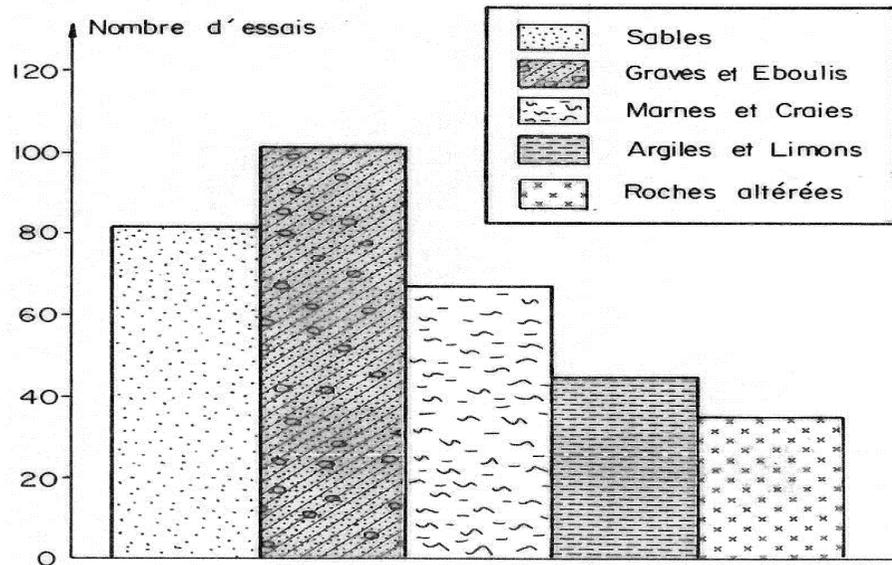
- Comparable à la Terre Armée :
 - dilatance par un faible déplacement relatif
 - effet de la teneur en fines
 - effet de la saturation
- Mais des différences :
 - sols plus variés
 - influence du mode de mise en place des clous
- **D'où choix de détermination du frottement latéral q_s de façon comparable aux pieux** :
 - constant avec la profondeur
 - dépendant du mode de réalisation

▶ **Abaques ou essais**



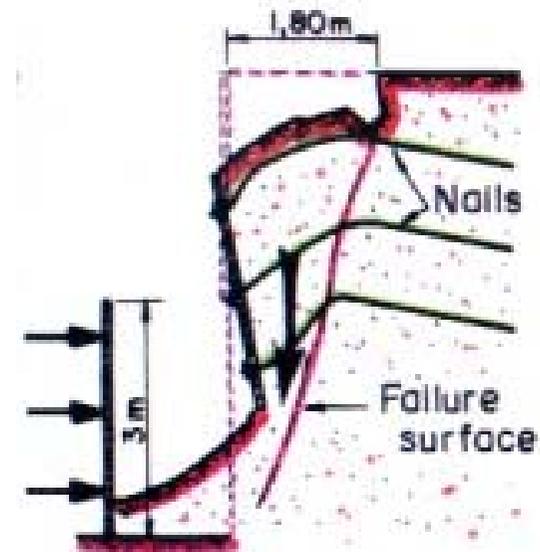
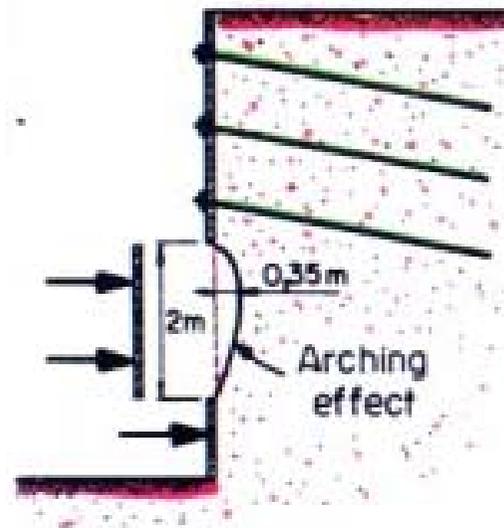
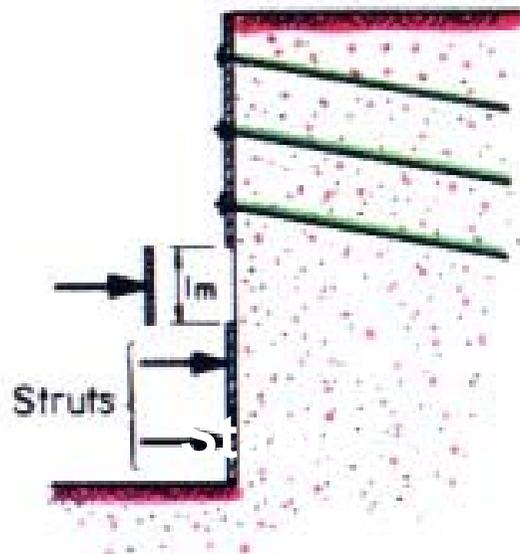
Frottement latéral sol – inclusion

Courbes expérimentales de frottement sur les clous (données 1980)



Autres différences avec la Terre Armée : phases provisoires d'excavation

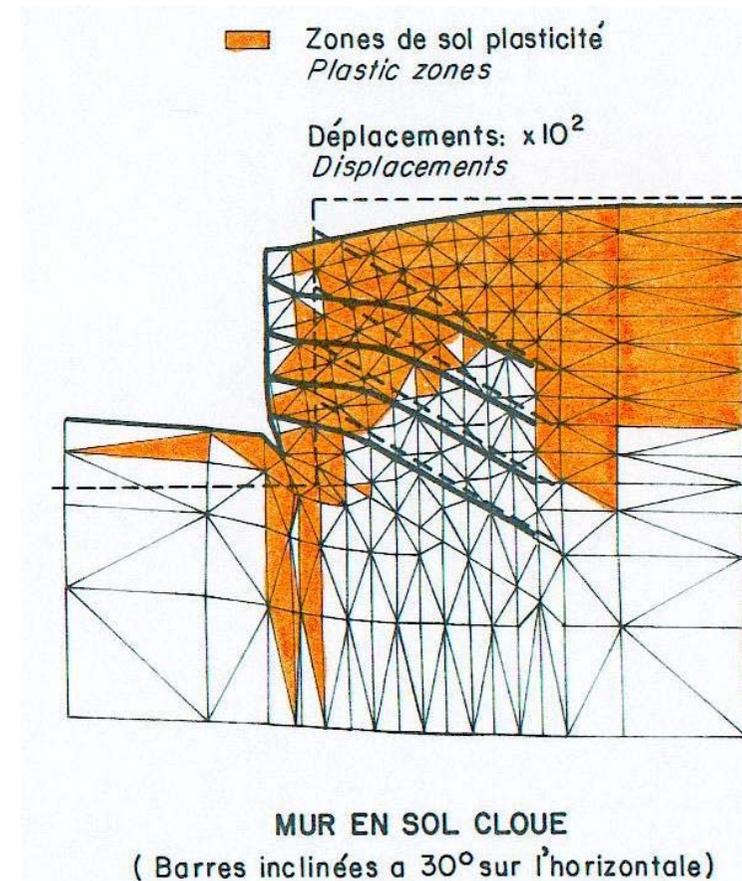
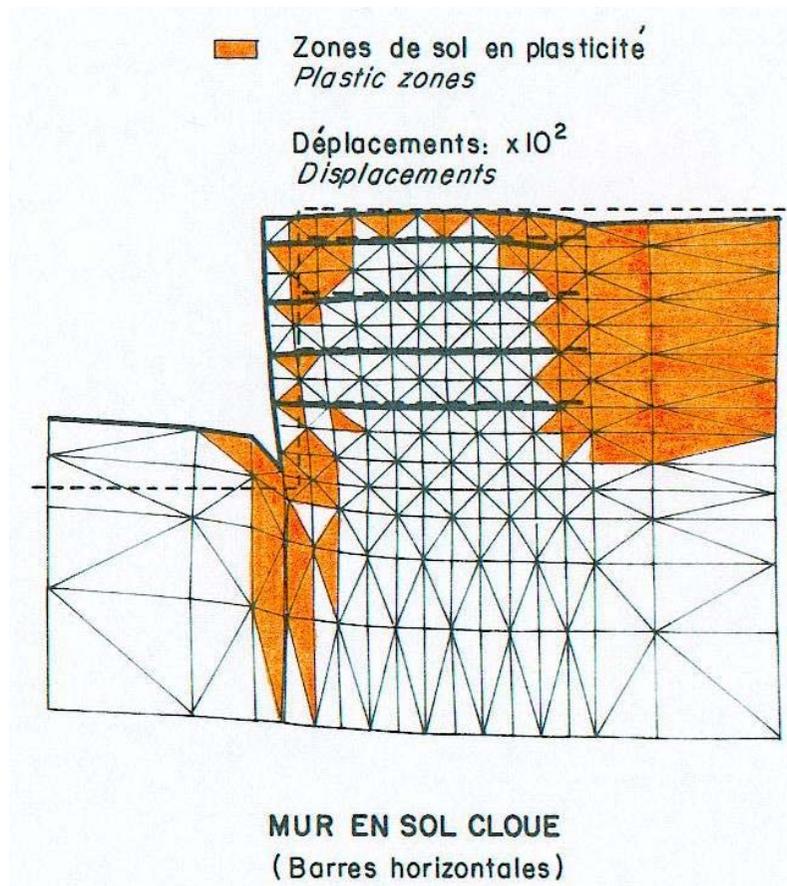
Essai en vraie grandeur Clouterre n° 2 : Rupture de l'ouvrage par augmentation de la hauteur excavée



Déformations des murs cloués

Autre différence par rapport à la Terre Armée :
excavation → effets sur l'environnement

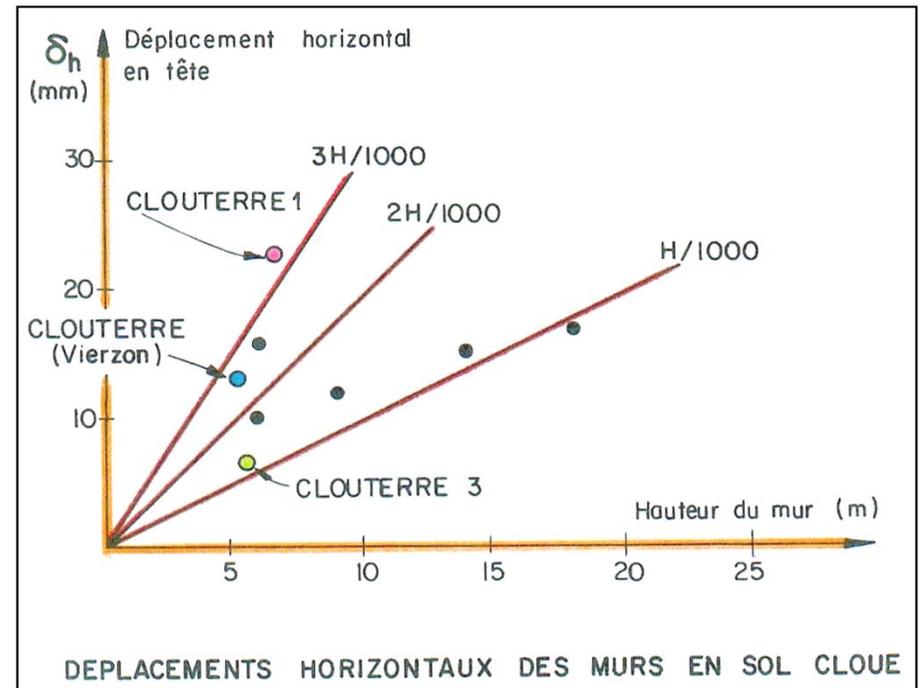
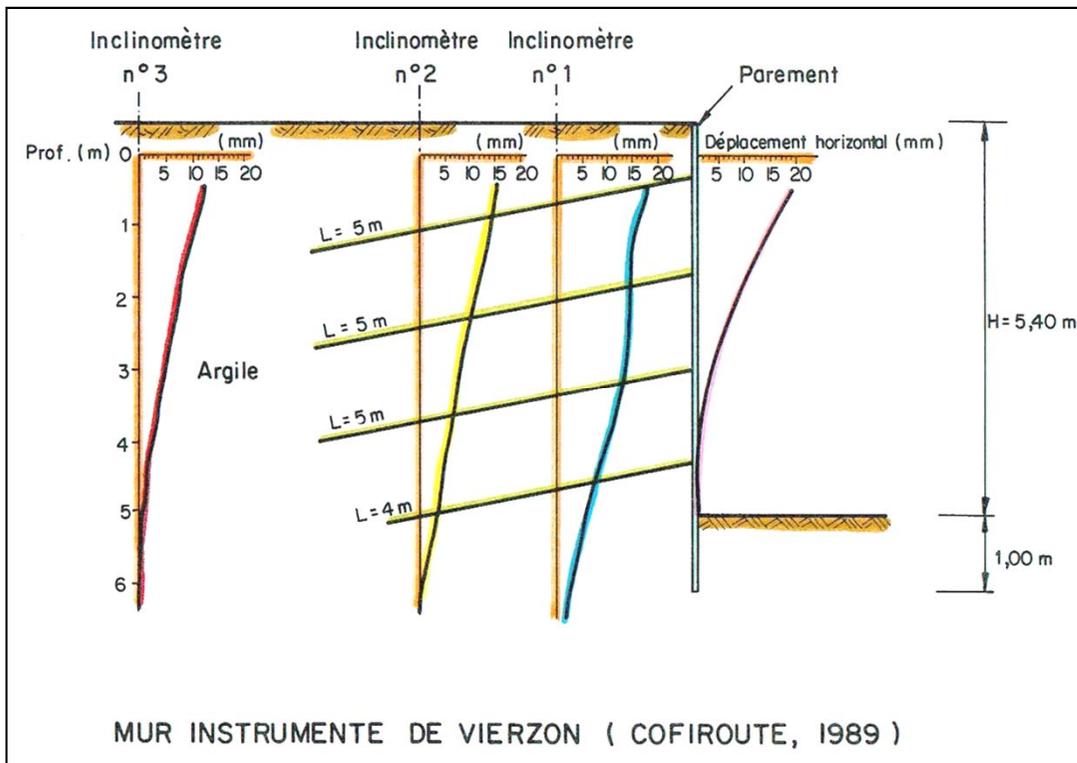
Influence de l'inclinaison des inclusions



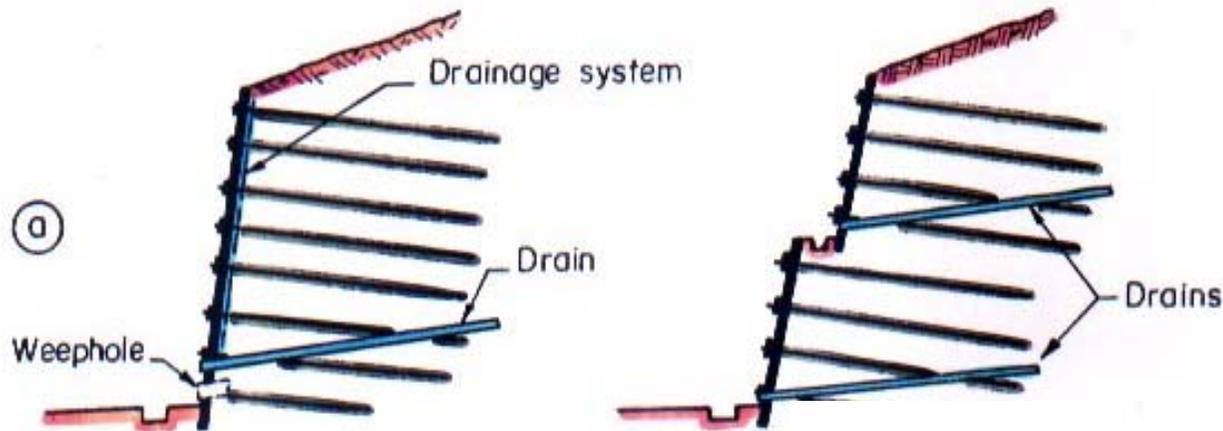
Déformations

Observations expérimentales

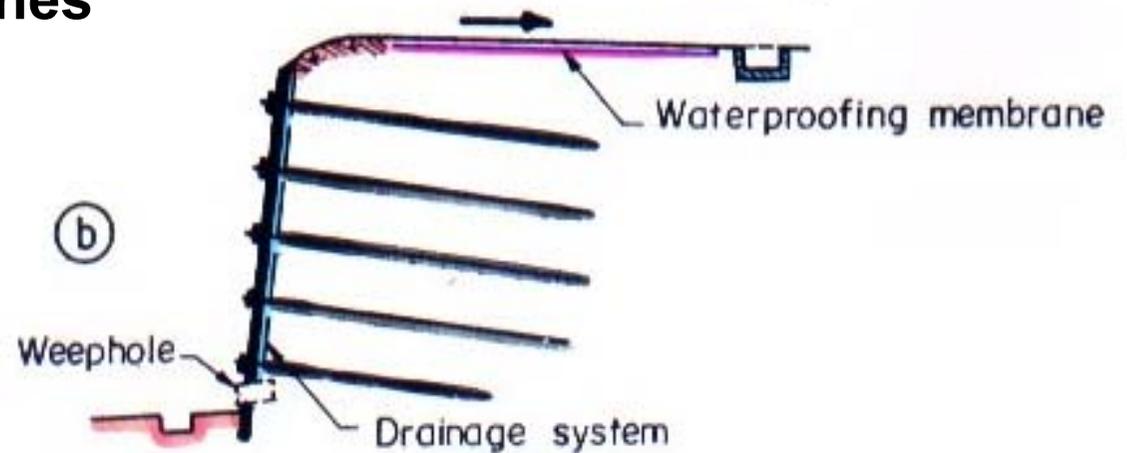
Évaluation des déformations



Dispositions constructives : Drainage



Drainage des eaux souterraines



Drainage des eaux de surface

Durabilité des ouvrages permanents (Corrosion)

Durée de vie des ouvrages et protection des inclusions

Critère	Caractéristiques	Poids du critère
NATURE	Texture	
	- lourde, plastique, collante, imperméable	2
	- argilo-sableuse	1
DE	- légère, perméable, sableuse, sols pulvérulents	0
	Tourbe et marécages	8
SOL	Déchets industriels	
	- mâchefer, cendres, charbon	8
	- déchets de construction (plâtres, briques)	4
RESISTIVITE	Pollution liquide	
	- eaux usées, industrielles stockage de sels de déneigement	6 8
RESISTIVITE	$p < 1\ 000\ \Omega\ cm$	5
	$1\ 000 < p < 2\ 000$	3
	$2\ 000 < p < 5\ 000$	2
	$5\ 000 < p$	0
HUMIDITE	Nappe d'eau saumâtre (variable ou permanente)	8
	Nappe d'eau douce variable ou permanente	4
	Hors nappe-sol humide (Teneur en eau $w > 20\ %$)	2
	Hors nappe-sol sec (Teneur en eau $w < 20\ %$)	0
PH	< 4	4
	4 à 5	3
	5 à 6	2
	> 6	0
	Indice	ΣA

INDICE GLOBAL DE CORROSION $I = \Sigma A + C$
 Avec C : Sécurité $>$ Ouvrage sensible $C \geq 2$
 $>$ Ouvrage courant $C = 0$

EPAISSEUR SACRIFIEE
(aciers ordinaires)

Indice global I	Ouvrages provisoires $T \leq 18\text{mois}$	Ouvrages temporaires $1,5\text{an} \leq T \leq 30\text{ans}$	Ouvrages permanents $30\text{ans} < T \leq 100\text{ans}$
≤ 4	0	2 mm	4 mm
5 à 8	0	4 mm	8 mm
9 à 12	2 mm	8 mm	Gaine plastique
≥ 13	Protection par gaine plastique obligatoire		

$$I = \Sigma (sol, \rho, p_H, S_r) + C \text{ (sécurité)}$$

Sommaire

- Développement du clouage dans les sols
- Principes de comportement
- **Principes de dimensionnement**
- Aspects réglementaires



Mécanismes de ruine

Etats limites ultimes

- ⇒ Instabilité générale (grand glissement)
 - ⇒ Instabilité externe (massif cloué = bloc monolithique)
 - ⇒ Instabilité mixte (glissement dans le massif cloué)
 - ⇒ Instabilité interne (défaillance des clous/parement)
- Justification géométrie massif cloué
- Justification éléments renforcement

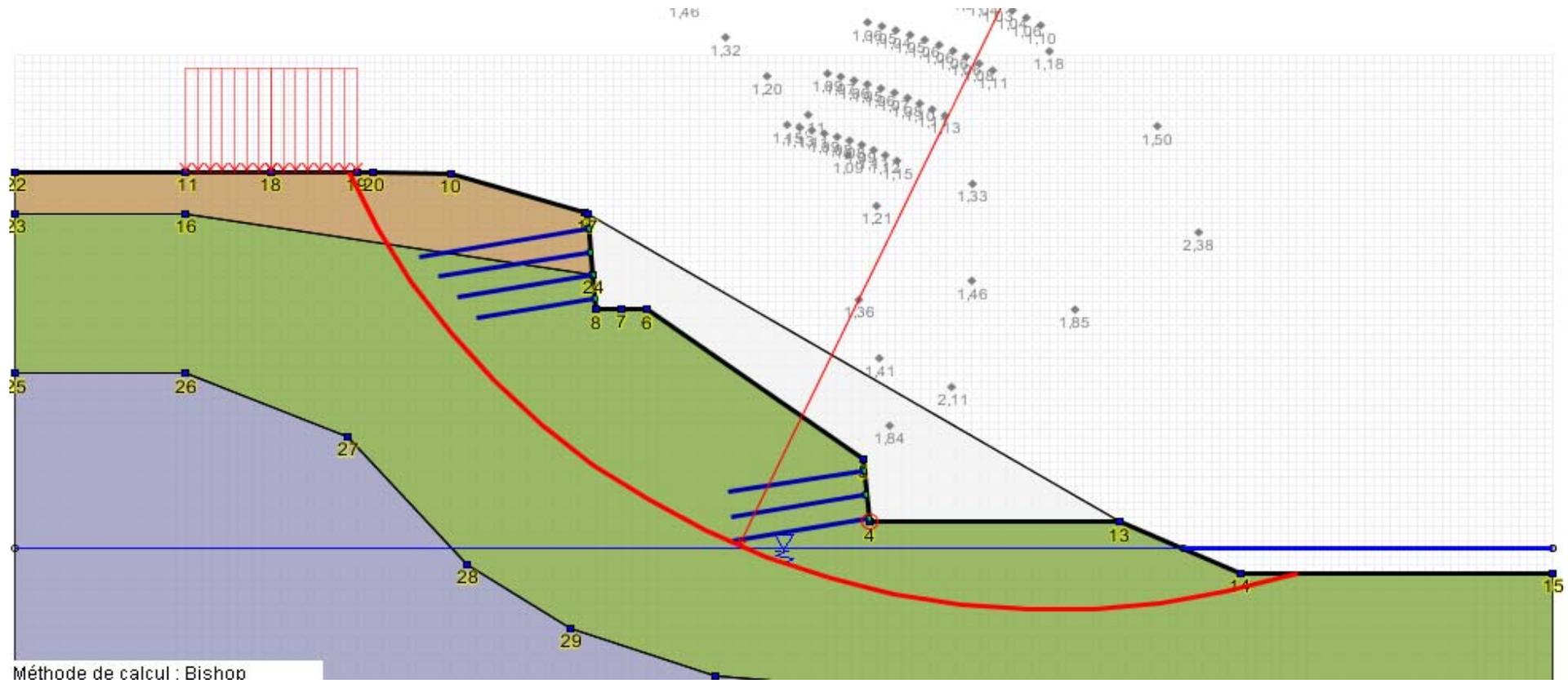
Etats limites de service

- ⇒ Déformations
- ⇒ Durabilité (corrosion)



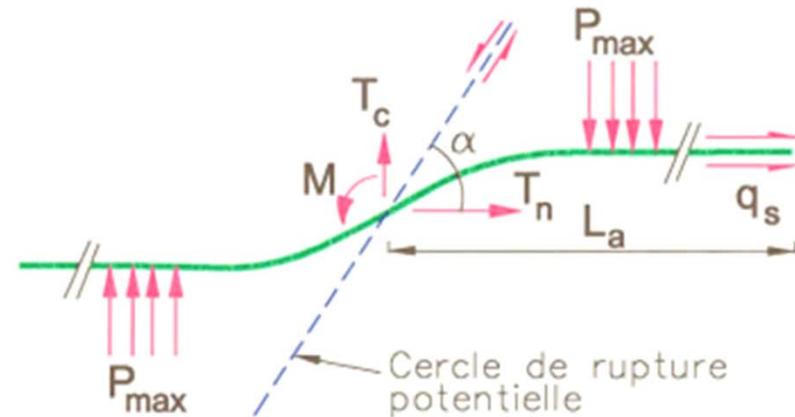
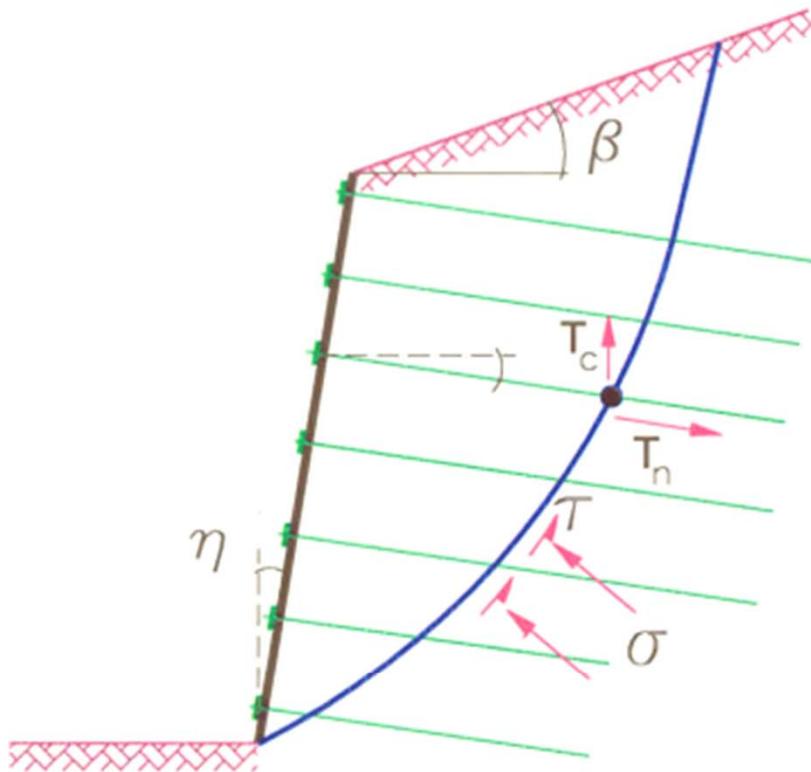
Instabilité générale (ou d'ensemble)

- Mécanismes de rupture : généralement circulaires (méthode des tranches) ou en arcs de spirale (méthode cinématique du calcul à la rupture)
- Toujours commencer par examiner la stabilité du site avant travaux => ajustement des paramètres ou du niveau de sécurité visé après travaux



Instabilité mixte

- Stabilité contrôlée par plusieurs critères de rupture



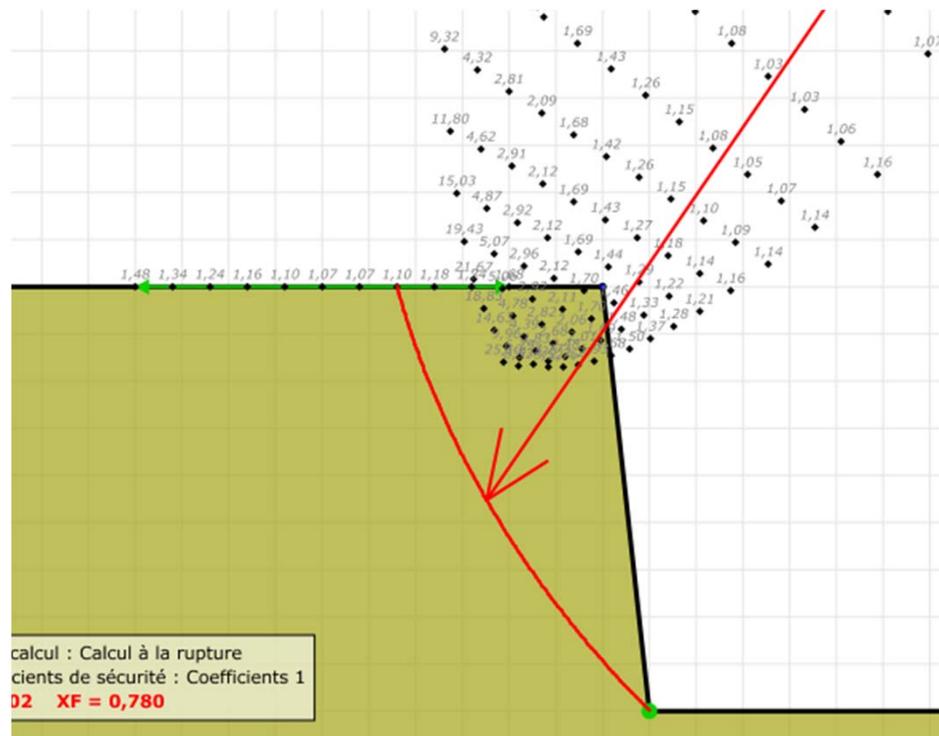
CRITERES DE RUPTURE

- 1 Barre : $\tau \leq k$
- 2 Frottement sol-barre
 $T_n < \pi \cdot B L_a \cdot q_s$
- 3 Réaction normale sol-barre
 $p < p_0$
- 4 Sol: $\tau \leq C + \sigma \text{tg}\phi$

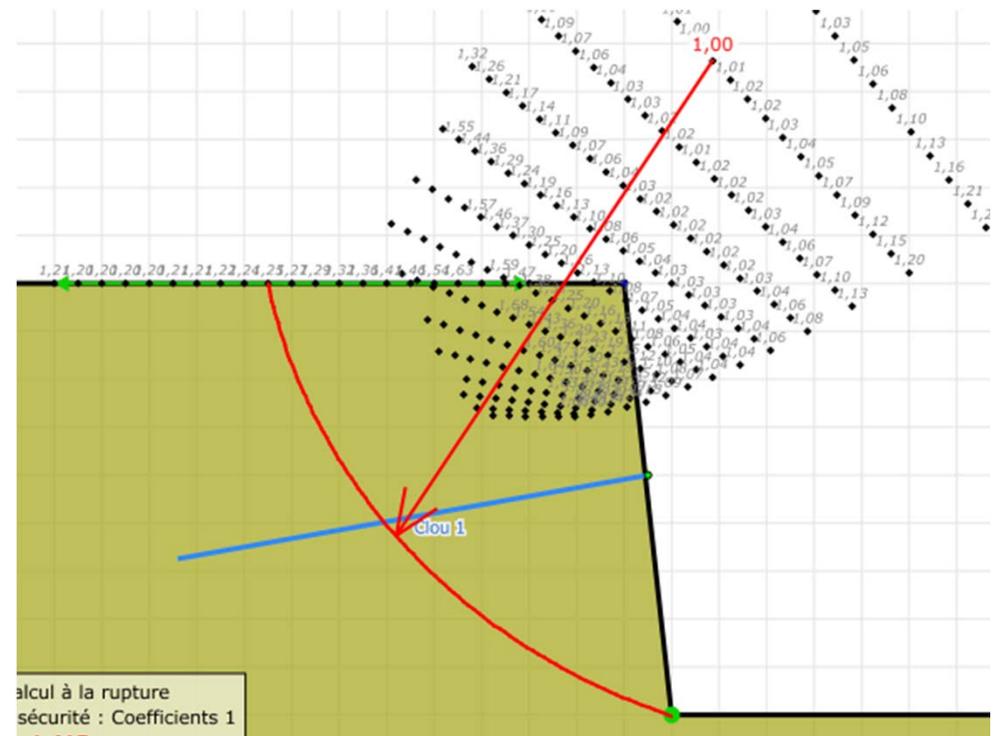
Instabilité mixte

- La présence des clous modifie le mécanisme critique

Mécanisme critique sans renforcement



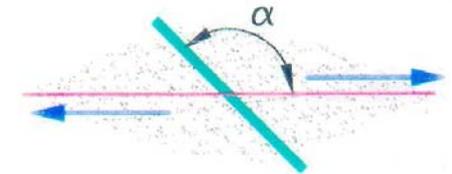
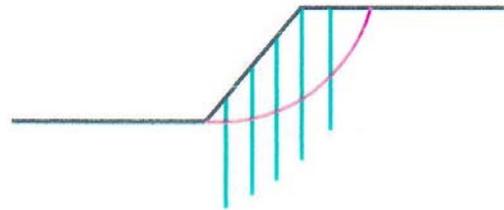
Mécanisme critique avec renforcement



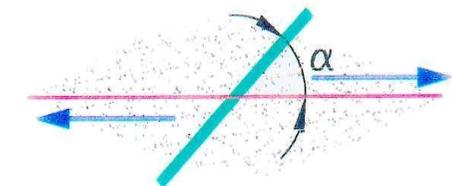
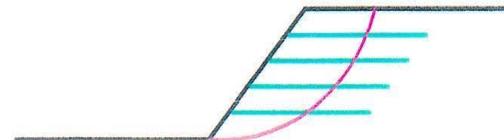
Instabilité mixte

- Mécanismes de mobilisation des efforts dans les clous

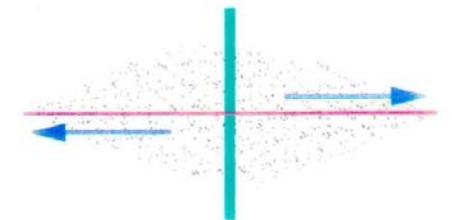
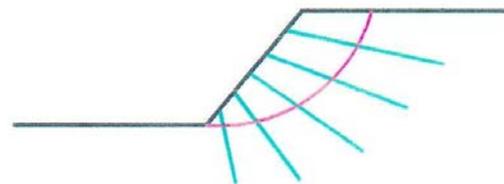
⇒ Compression – cisaillement



⇒ Traction – cisaillement



⇒ Cisaillement pur



Instabilité mixte

- Résistance intrinsèque des clous : contrôlée par trois paramètres

⇒ Effort normal maximal :

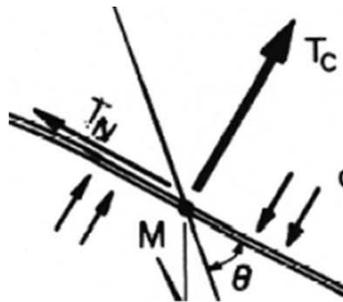
$$R_n = S_{\text{acier}} \times \sigma_{a,\text{max}}$$

⇒ Effort de cisaillement maximal

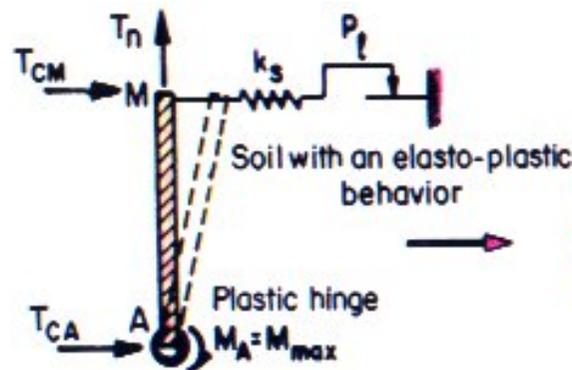
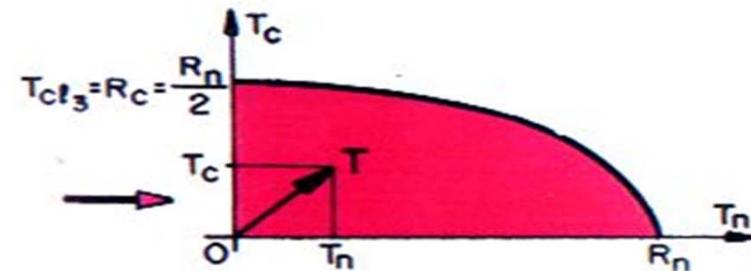
$$R_c = R_n/2$$

⇒ Moment de plastification

$$M_p = W_p \times \sigma_{a,\text{max}}$$



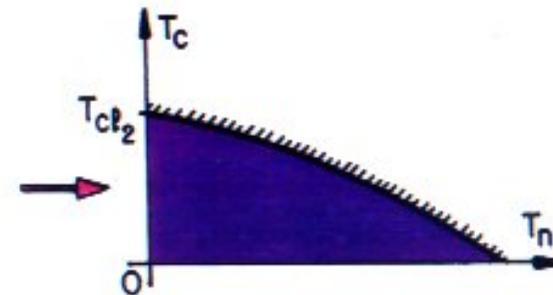
$$\left(\frac{T_n}{R_n}\right)^2 + \left(\frac{T_c}{R_c}\right)^2 \leq 1$$



$$T_c \leq T_{c11} = 0.24 p_l B L_o + 1.62 M_{\text{max}}/L_o$$

or

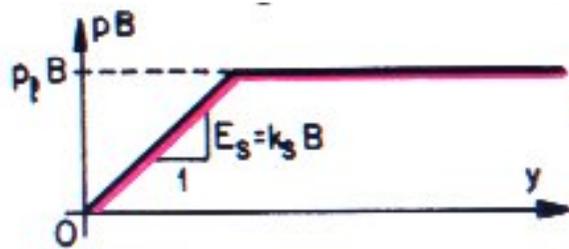
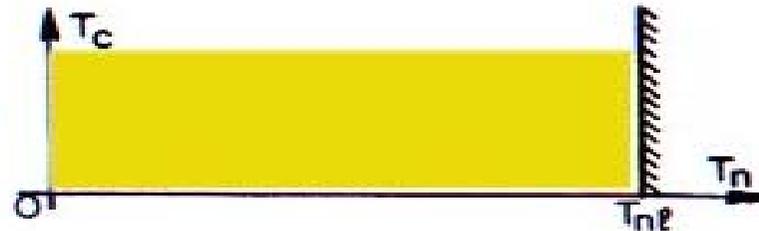
$$T_c \leq T_{c11} = 0.10 p_l B L' + 4.05 M_{\text{max}}/L'$$



Instabilité mixte

- Interaction sol-clou : contrôlée par deux paramètres
 - ⇒ Résistance à l'arrachement : $\tau_{\text{sol/pieu}} \leq q_{\text{sl}} = \text{abaques ou essais}$
 - ⇒ Résistance au poinçonnement : $r_{\text{sol/pieu}} \leq p_u = f(\text{CPT ou PMT})$

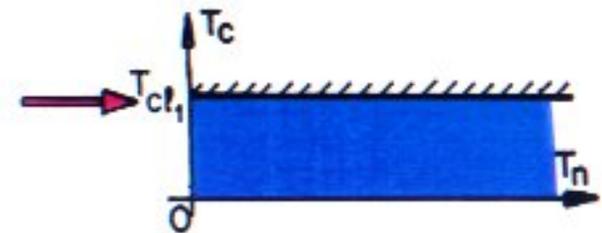
$$T_n \leq \pi B L_a \tau_l$$



$$T_c \leq T_{cl} = p_1 B L_d / 2$$

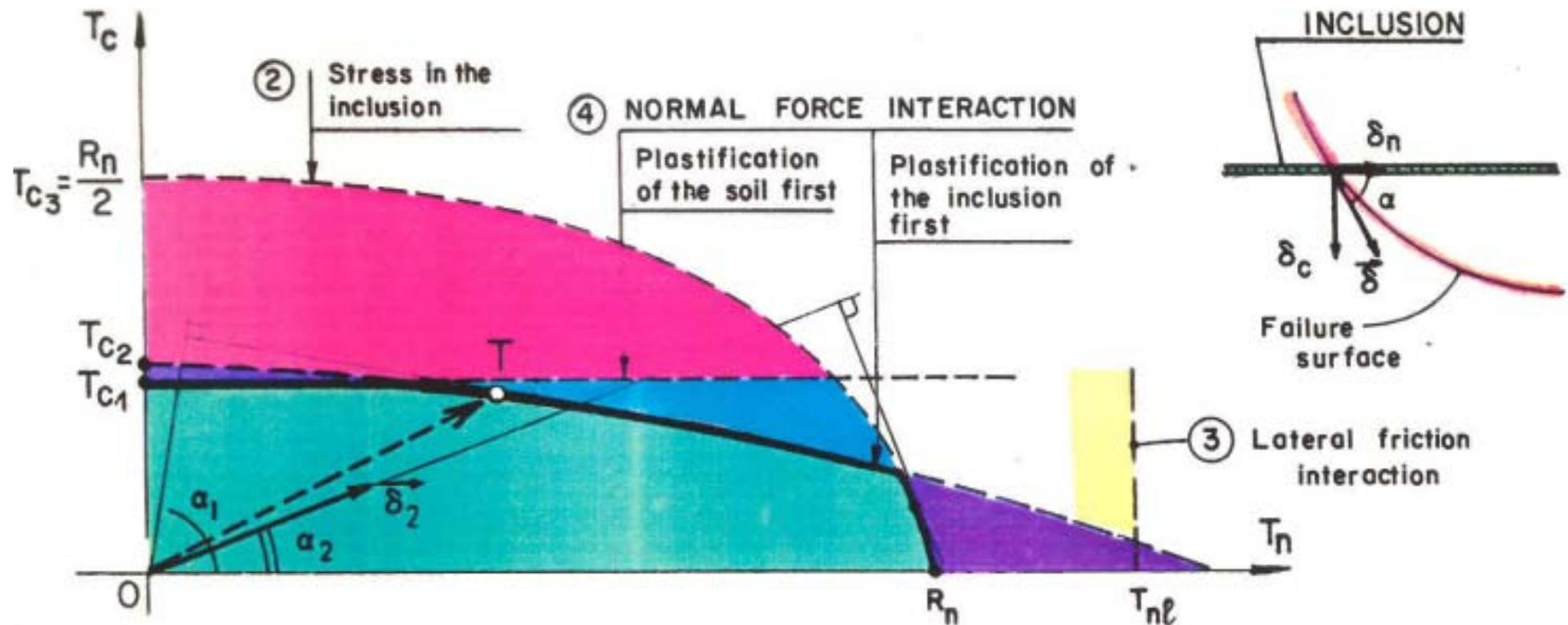
or

$$T_c \leq T_{cl} = p_1 B L' / d$$



Instabilité mixte

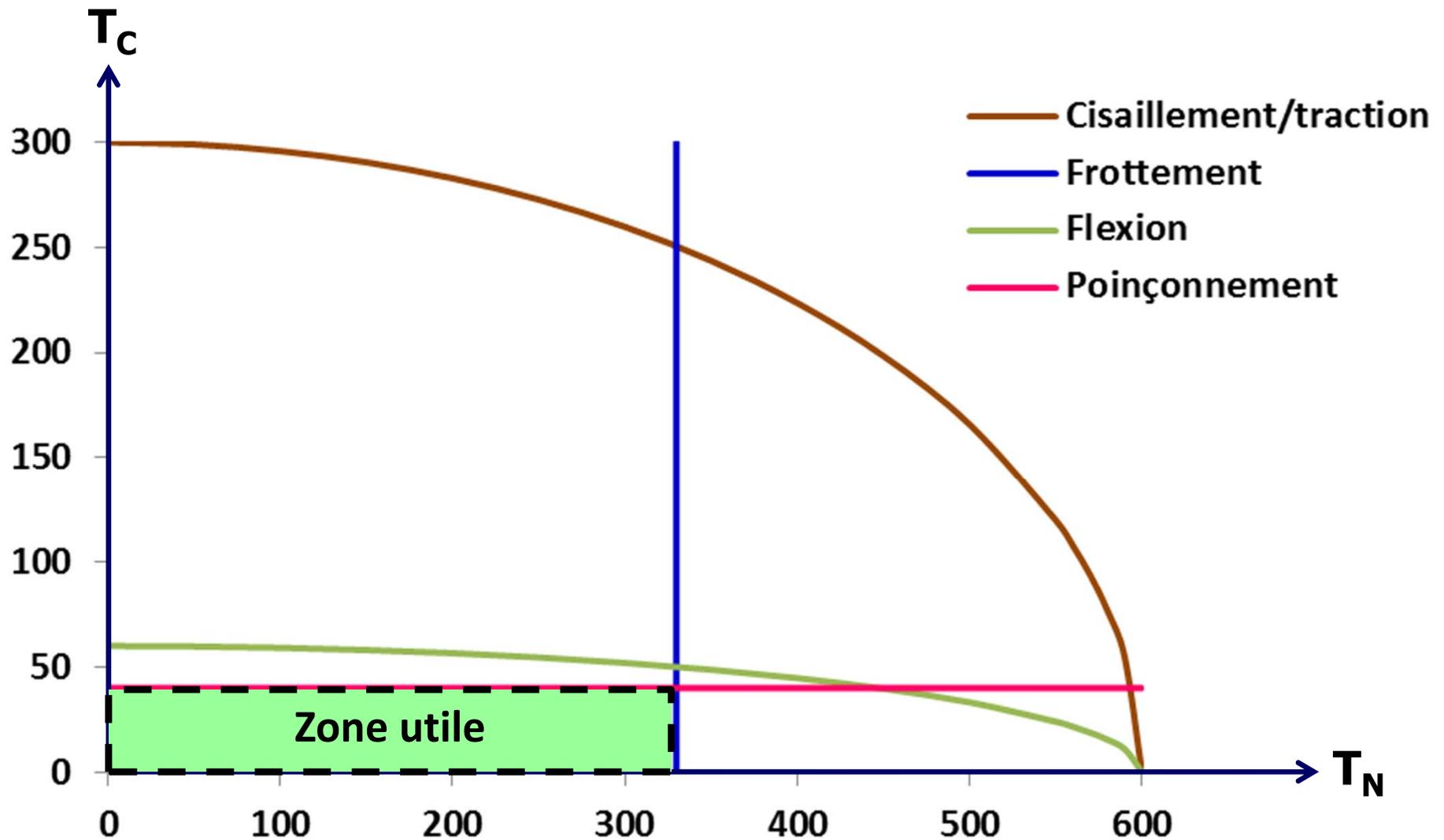
- Combinaison des différents critères : utilisation du « multi-critère »



⇒ La mise en œuvre pratique du multi-critère montre que l'effet bénéfique du cisaillement reste limité (gain de sécurité généralement inférieur à 15% par rapport au cas d'un travail en traction pure)

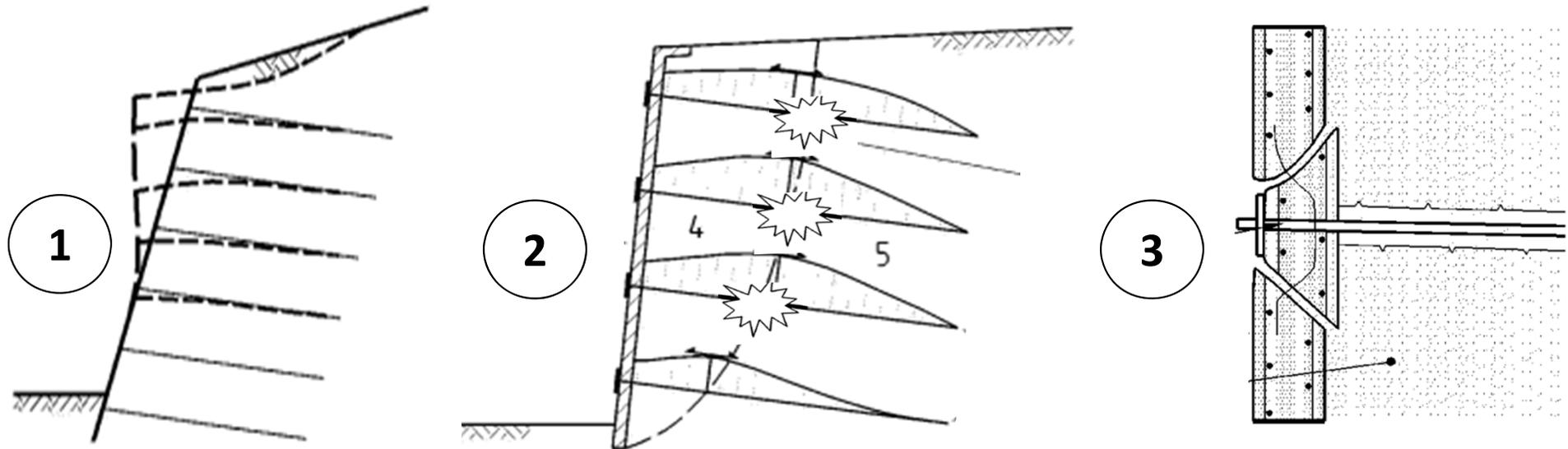
Instabilité mixte

- Exemple : clou GEWE $\phi 40\text{mm}$, $q_{sl} = 100 \text{ kPa}$, $p_{lim} = 1,5 \text{ MPa}$, $L_{utile} = 7\text{m}$



Instabilité interne

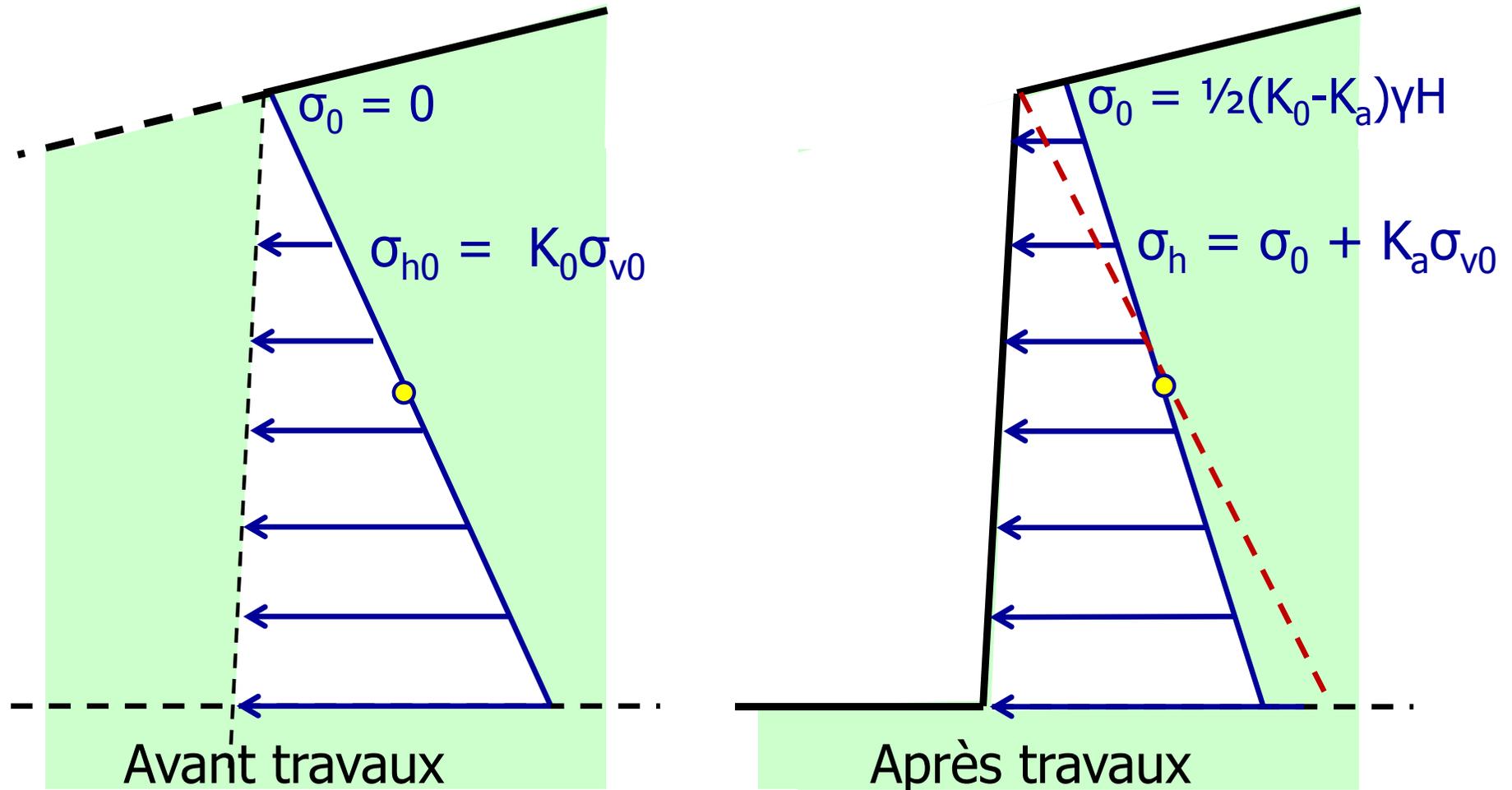
- 1) Instabilité par perte d'adhérence sol/clou(s)
- 2) Instabilité par insuffisance de la résistance structurelle des clous
- 3) Instabilité due à la ruine du parement ou des dispositifs de liaison



⇒ Nécessite d'estimer les efforts de service subis par les clous et le parement

Instabilité interne

- Méthode simplifiée (norme française) : enveloppe des efforts de service repris par les clous prise égale à la résultante de la poussée au repos



Instabilité interne

- Méthode simplifiée (norme française) : enveloppe des efforts de service repris par les clous prise égale à la résultante de la poussée au repos
 - ⇒ Effort de service maximal dans les clous (supposé atteint au tiers de la longueur du clou comptée depuis le parement) :

$$T_{\max}(z) = \frac{\sigma_h(z)}{\cos \theta} s_v s_h$$

- ⇒ Le parement ne reçoit qu'une fraction de la pression des terres :

$$\sigma_{par}(z) = \alpha \cdot \sigma_h(z) \quad \begin{cases} \alpha = 0,4 + 0,2 \max(s_h, s_v) \\ 0,6 \leq \alpha \leq 1,0 \end{cases}$$

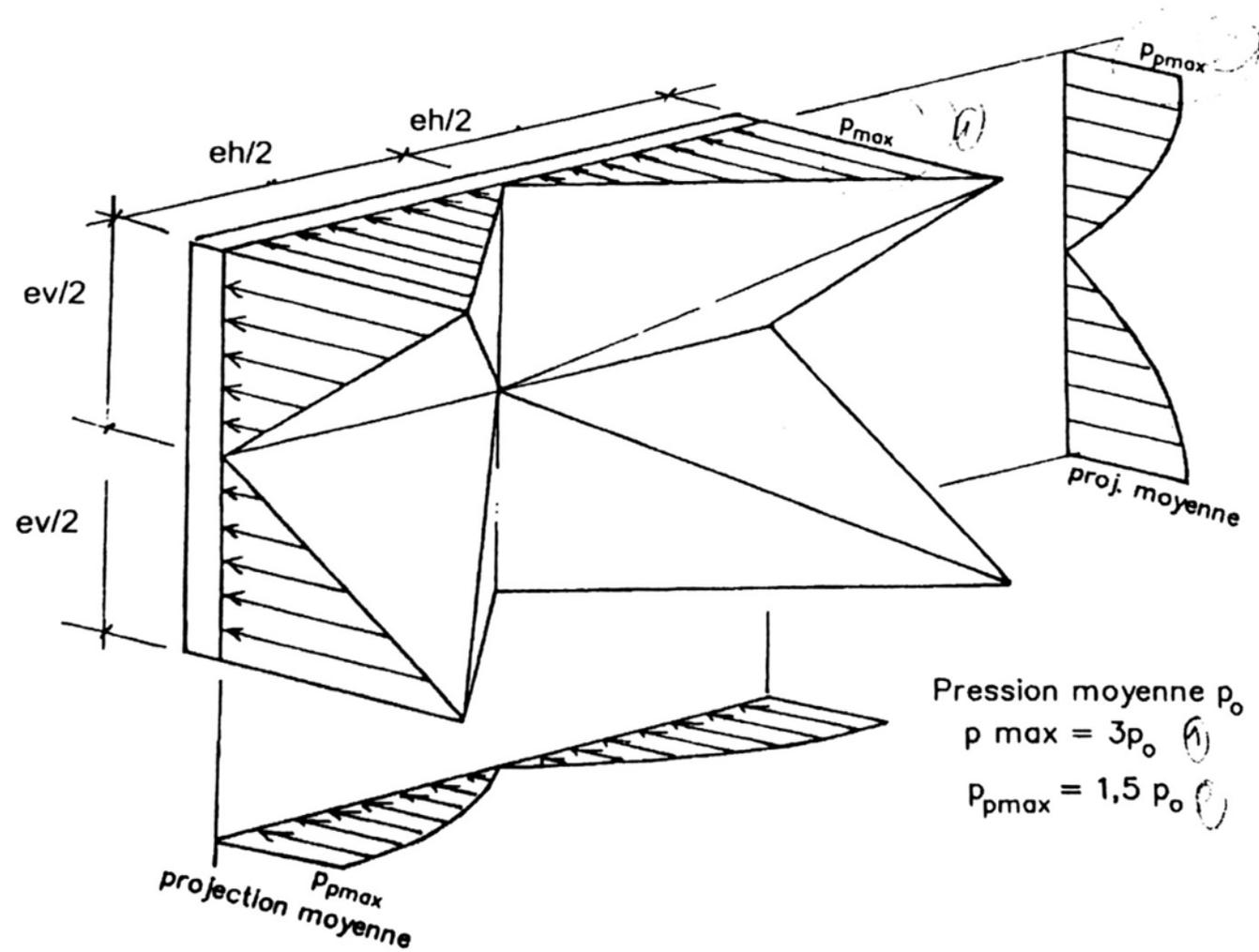
s_h, s_v : espacements horizontal et vertical des clous

θ : inclinaison des clous par rapport à l'horizontale



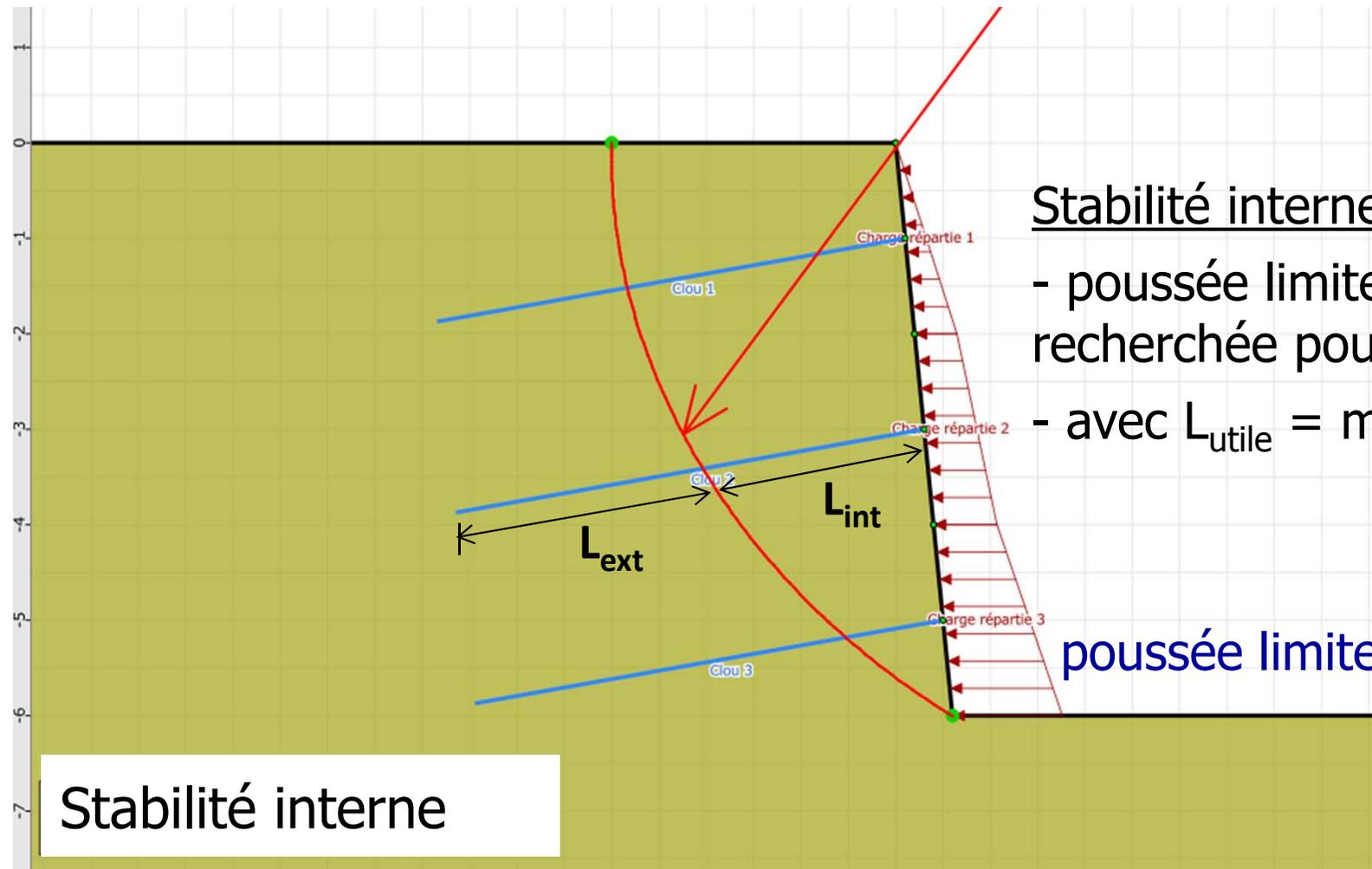
Instabilité interne

- Distribution pyramidale de la poussée sur l'écran (Clouterre 2002)



Instabilité interne

- Approche alternative : utilisation de la méthode cinématique du calcul à la rupture



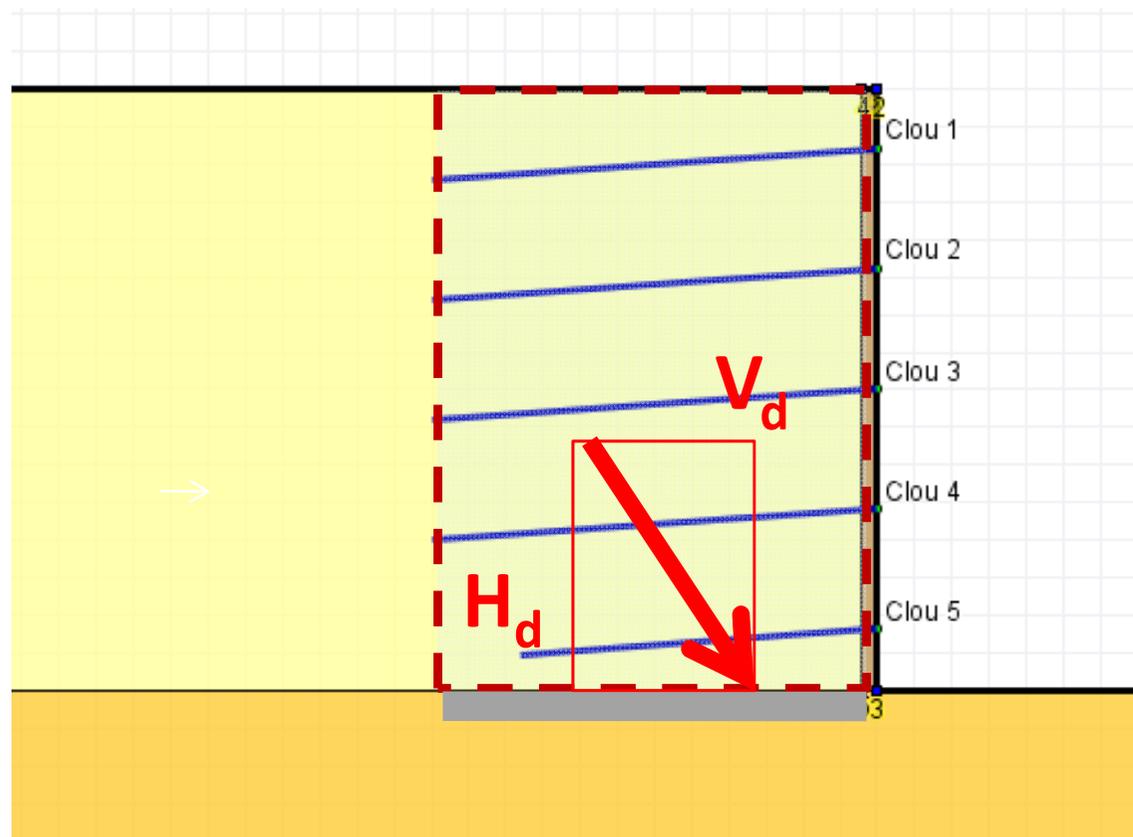
Stabilité interne

- poussée limite recherchée pour $F = 1$
- avec $L_{\text{utile}} = \min(L_{\text{ext}}, L_{\text{int}})$

poussée limite

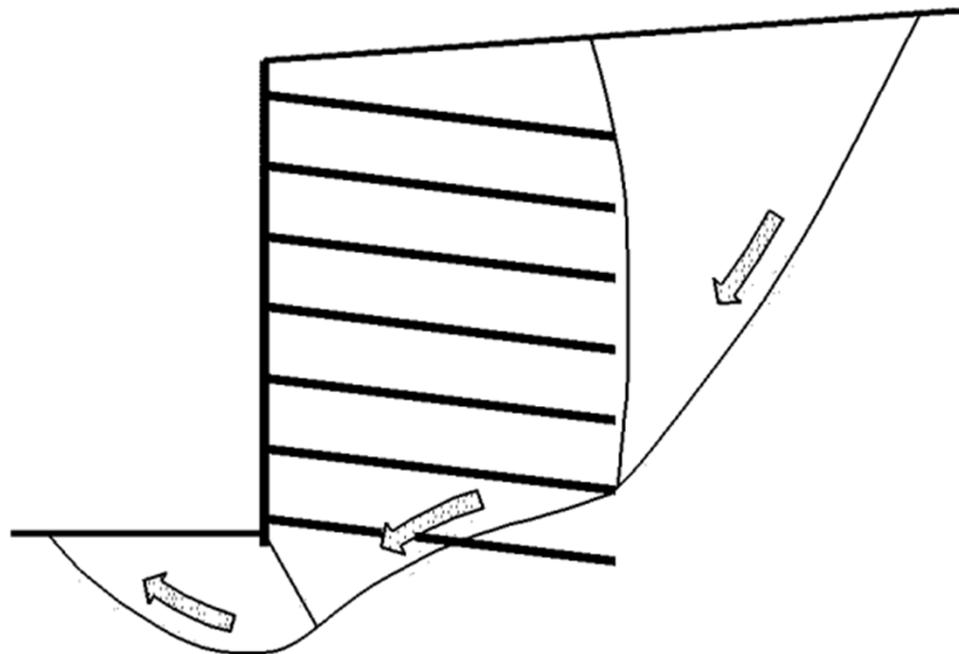
Instabilité externe

- Approche courante : massif cloué assimilé à un mur poids monolithique
 - ⇒ Stabilité au poinçonnement
 - ⇒ Stabilité au glissement
- Approche simplifiée, dérivée des calculs « sol renforcé »



Instabilité externe

- Approche plus élaborée : mécanisme de stabilité mixte de type multi-blocs (souvent ignoré dans le dimensionnement)



Mécanisme
à trois blocs

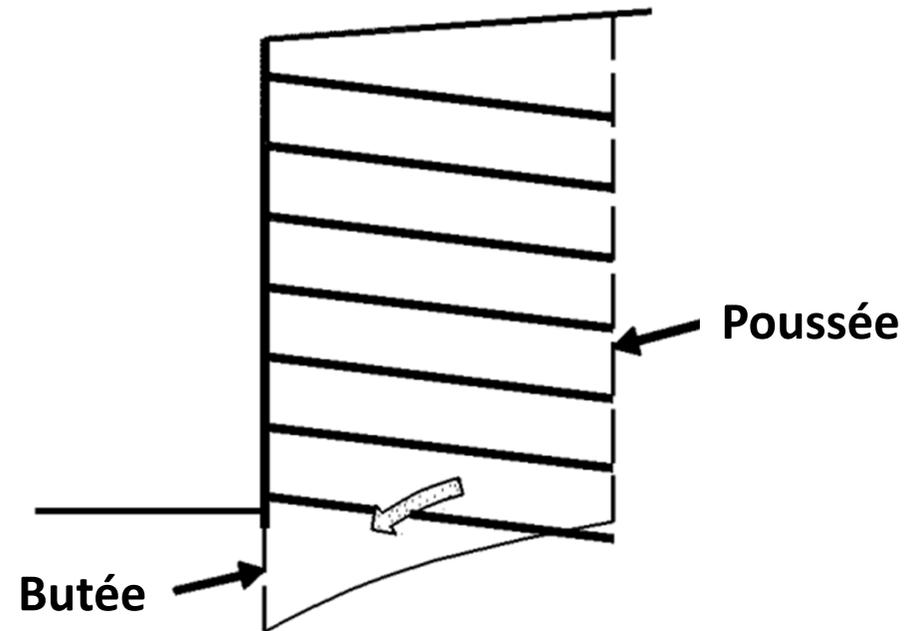
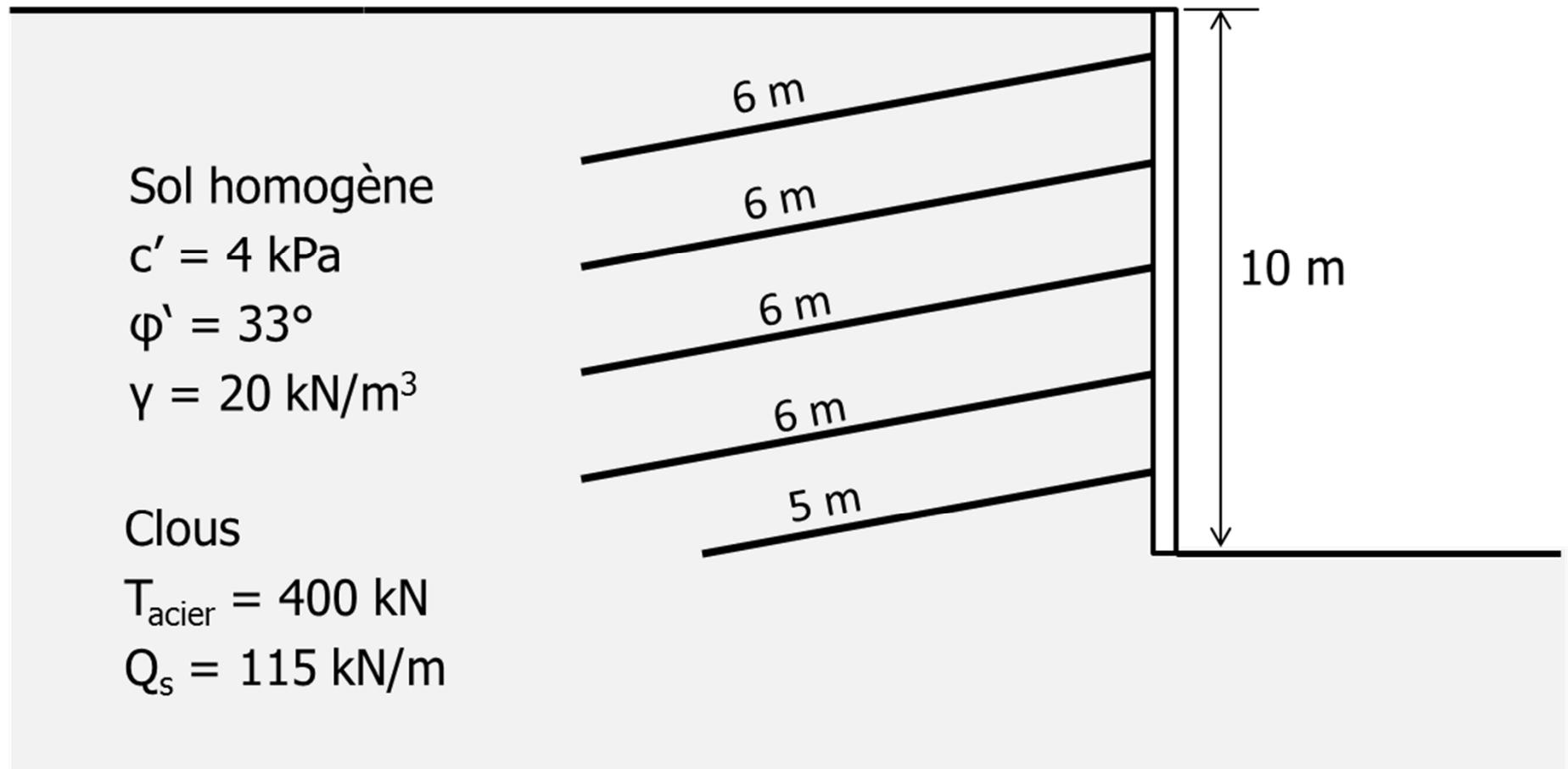


Schéma
simplifié

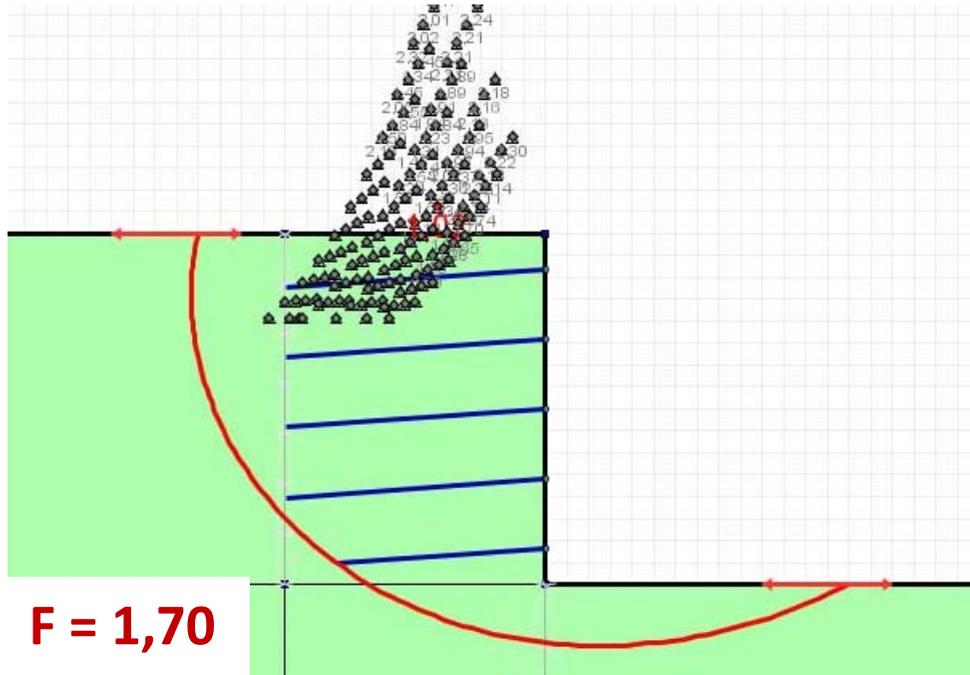
Instabilité externe

- Approche plus élaborée : mécanisme de stabilité mixte de type multi-blocs (souvent ignoré dans le dimensionnement)

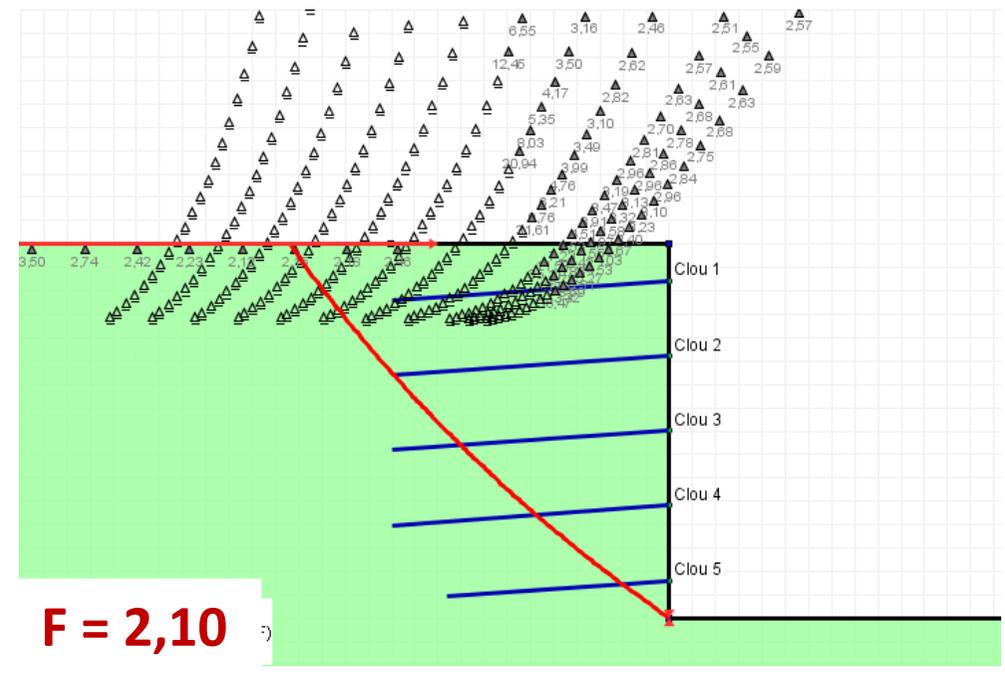


Instabilité externe

- Approche plus élaborée : mécanisme de stabilité mixte de type multi-blocs (souvent ignoré dans le dimensionnement)



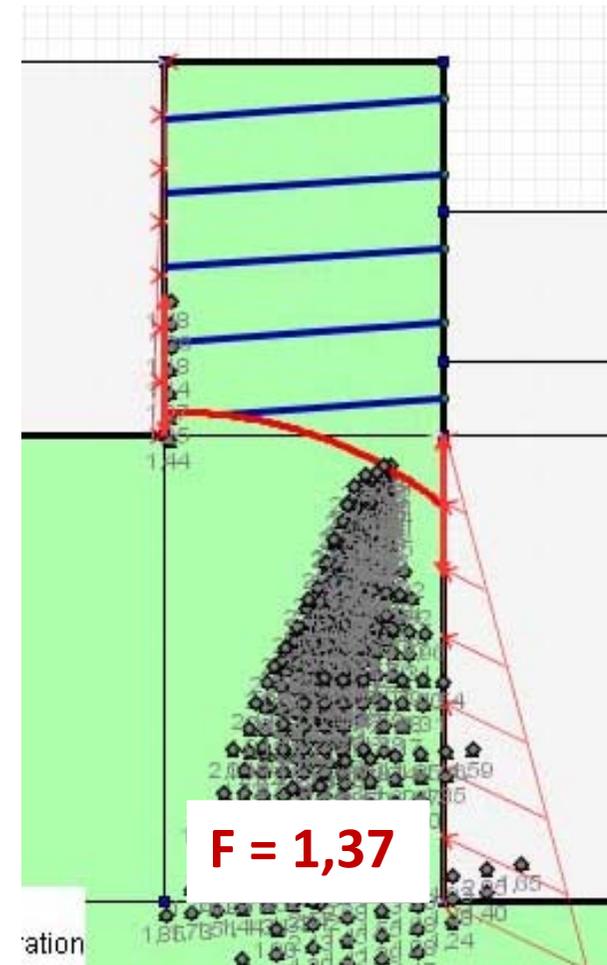
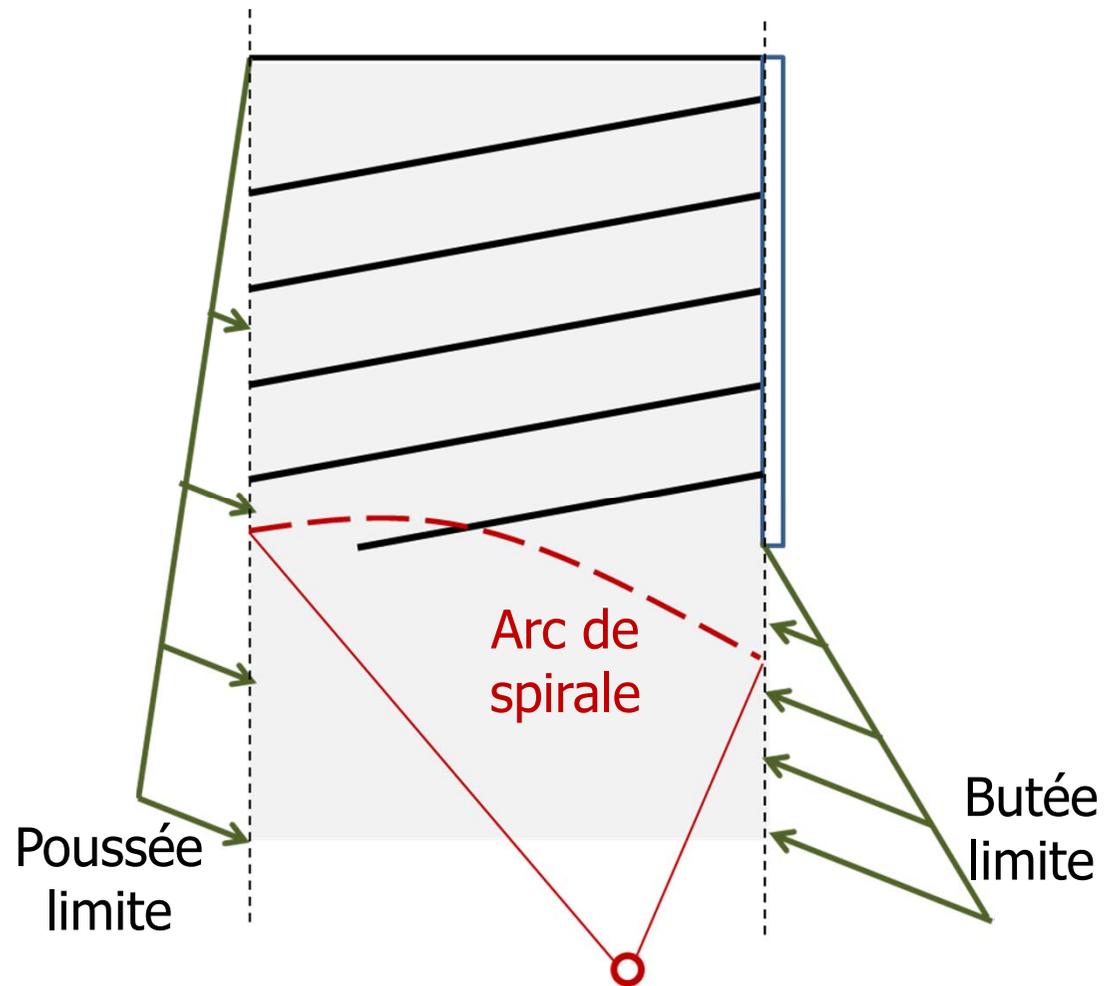
Stabilité générale



Stabilité mixte –
mécanisme classique
(1 seul bloc)

Instabilité externe

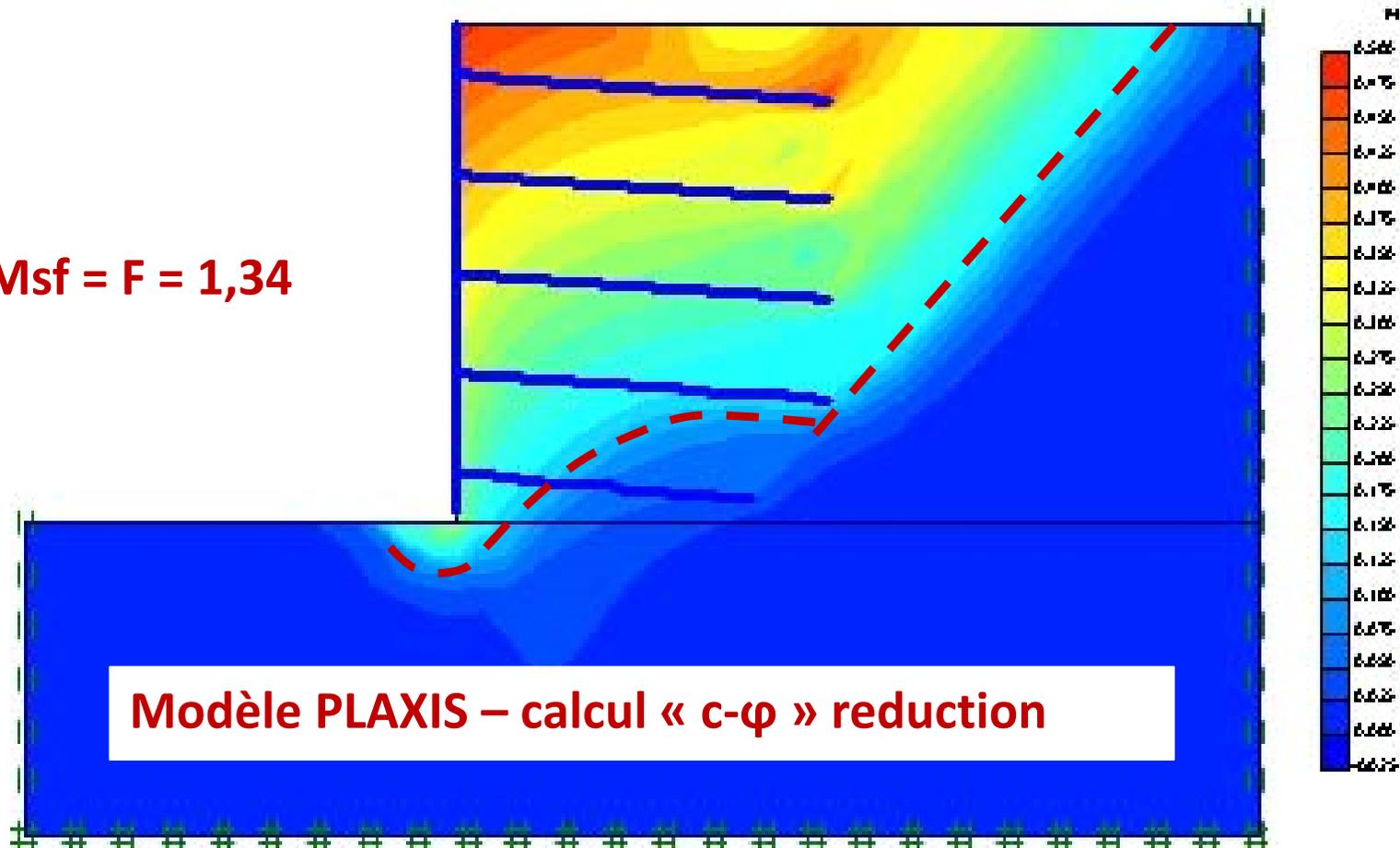
- Approche plus élaborée : mécanisme de stabilité mixte de type multi-blocs (souvent ignoré dans le dimensionnement)



Instabilité externe

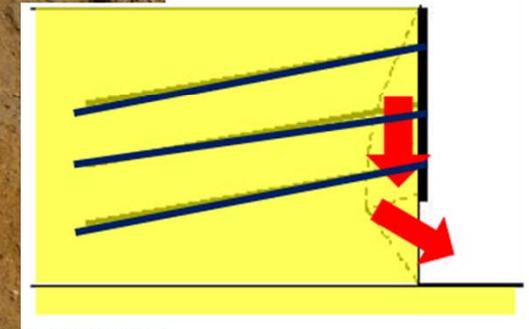
- Approche plus élaborée : mécanisme de stabilité mixte de type multi-blocs (souvent ignoré dans le dimensionnement)

$Msf = F = 1,34$



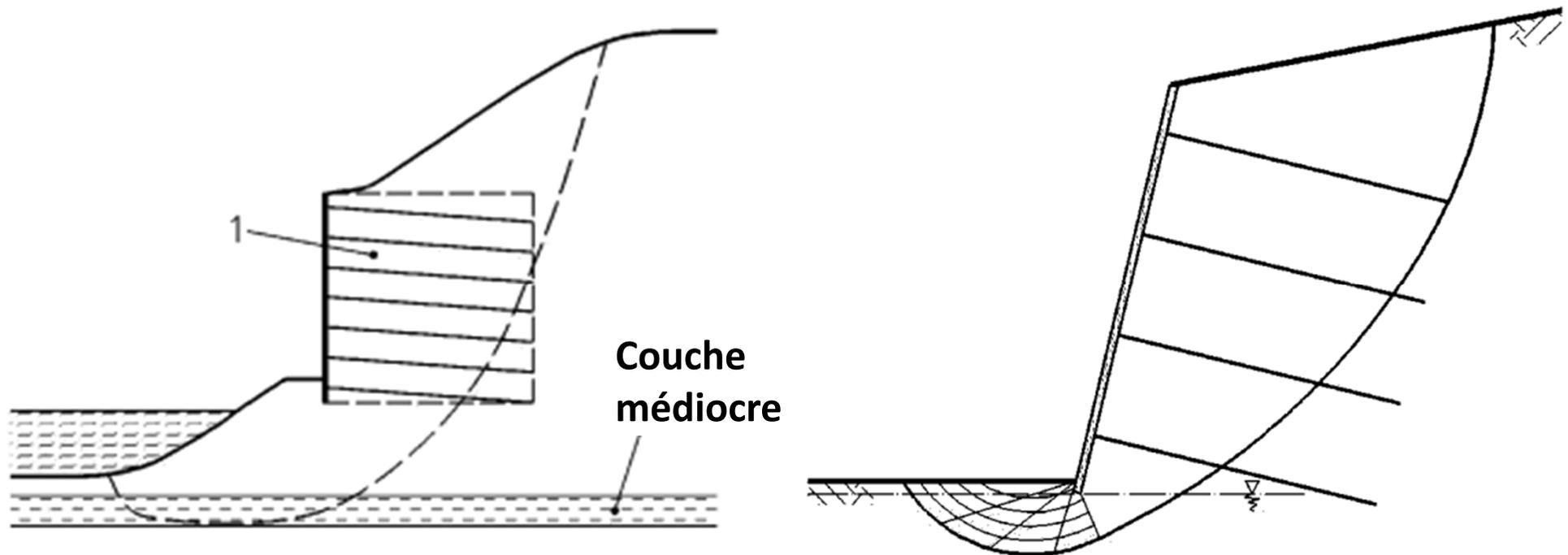
Autres mécanismes à ne pas négliger

- Phases provisoires de terrassement :



Autres mécanismes à ne pas négliger

- Situations nécessitant des mécanismes plus élaborés (non circulaires, multi-blocs etc...)



Mécanisme intéressant une couche intermédiaire de résistance médiocre

Mécanisme avec mobilisation de butée en pied (souvent lié à la présence d'une nappe)

⇒ Augmentation de l'inclinaison des clous inférieurs

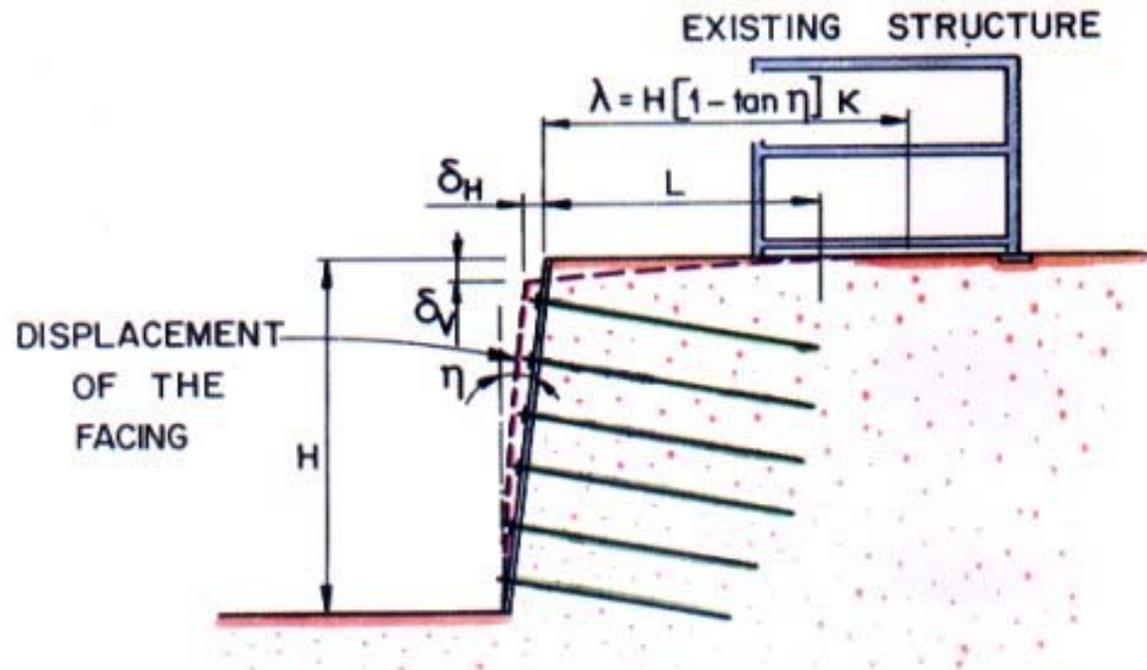
Etats limites de service

- La question des déplacements
 - ⇒ Subis par l'ouvrage et/ou induits sur ouvrages portés ou voisins
 - ⇒ Demeurent toujours des estimations : mieux vaut prévenir que calculer
 - ⇒ Le recours aux modèles numériques est surtout utile pour apprécier par comparaison l'incidence favorable ou défavorable d'une disposition particulière, ou pour identifier les phases de terrassement critiques.
 - ⇒ Nécessité d'un suivi si le déplacement est un critère de justification (méthode observationnelle)
 - ⇒ Une précision inférieure au centimètre est illusoire



Etats limites de service

- Méthode empirique pour estimation des déplacements



Largeur d'influence
 $\lambda = h(1 - \tan \eta_1) \kappa$

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

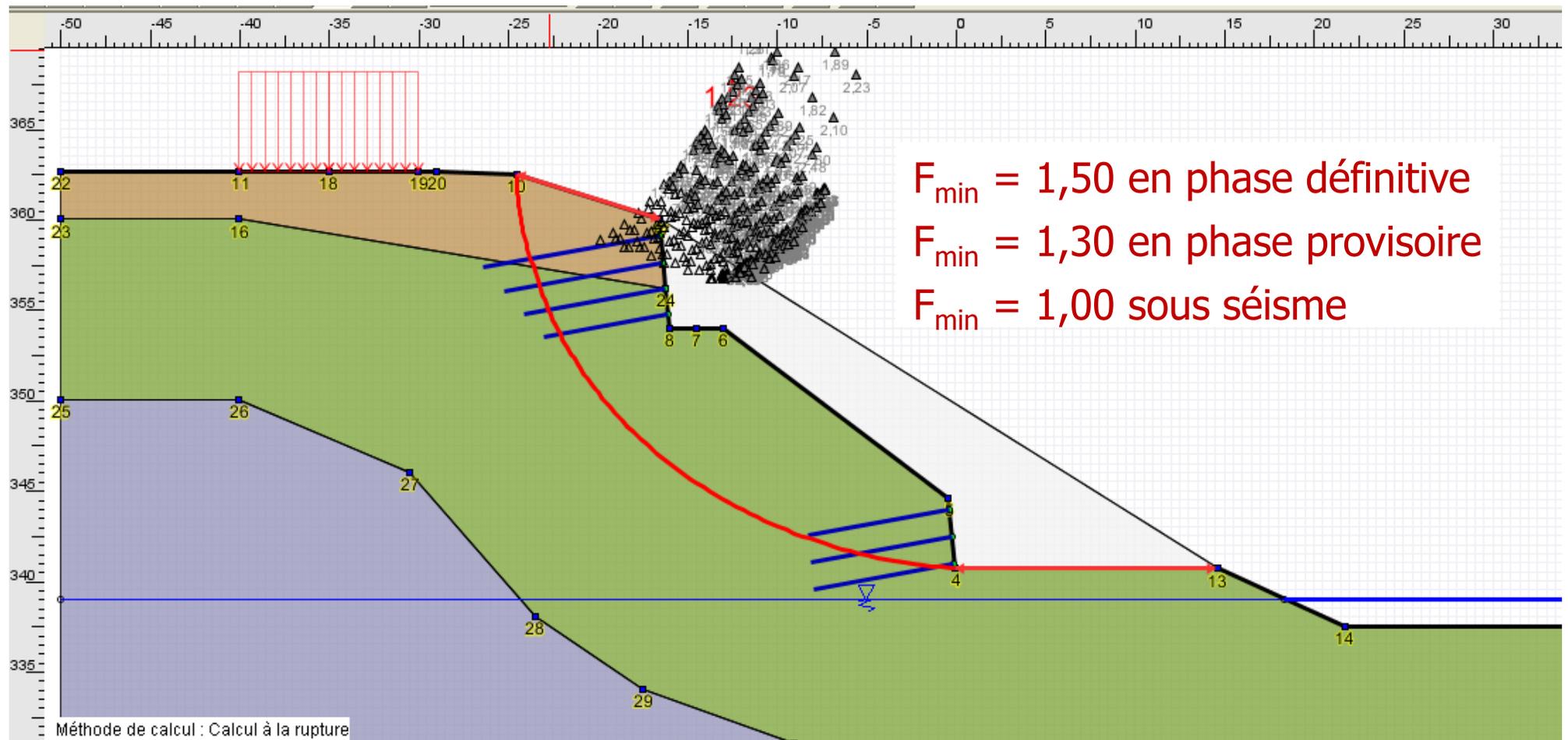
Sommaire

- Développement du clouage dans les sols
- Principes de comportement
- Principes de dimensionnement
- **Aspects réglementaires**



Approche traditionnelle

- Calcul sans pondérations : on vise une sécurité « globale »



Lien avec l'Eurocode 7

- Méthode semi-probabiliste : pondération des actions et résistances

	Actions	Matériaux	Résistances
Approche 1.1	A1	M1	R1
Approche 1.2	A2	M2	R1
Approche 2	A1	M1	R2
Approche 3	A1 ^{stru} ou A2 ^{GEO}	M2	R3

Choix norme Française :

- Approche 2 : pour les stabilités interne et externe
- Approche 3 : pour les stabilités générale et mixte



Lien avec l'Eurocode 7

- Principale différence entre les approches 2 (~1.1) et 3 (~1.2)

			A1	A2	
Actions	Actions Permanent	Défavorable	γ_G	1,35	1,00
		Favorable		1,00	1,00
	Actions variables	Défavorable	γ_Q	1,50	1,30
		Favorable		0	0

			M1	M2	
Paramètres de résistance	Angle de frottement interne		γ_ϕ	1,00	1,25
	Cohésion effective		$\gamma_{c'}$	1,00	1,25
	Cohésion non drainée		γ_{cu}	1,00	1,40
	Poids volumique		γ_γ	1,00	1,00

			R1 = R3	R2
Résistances	Mécanisme de ruine			
	Portance (stabilité externe)	γ_{Rv}	1,0	1,4
	Glissement externe	γ_{Rh}	1,0	1,1
	Grand glissement	$\gamma_{R,e}$	1,0	1,1

Approche
3 (~1.2)

Approche
2 (~1.1)



Lien avec l'Eurocode 7

- Evaluation des frottements limites à partir d'essais d'arrachement

$$q_{s,k} = \frac{q_{s,essai}}{\xi_a}$$

n	3	4	≥ 5
ξ_{a1} (moy)	1.20	1.10	1.00
ξ_{a2} (min)	1.05	1.00	1.00

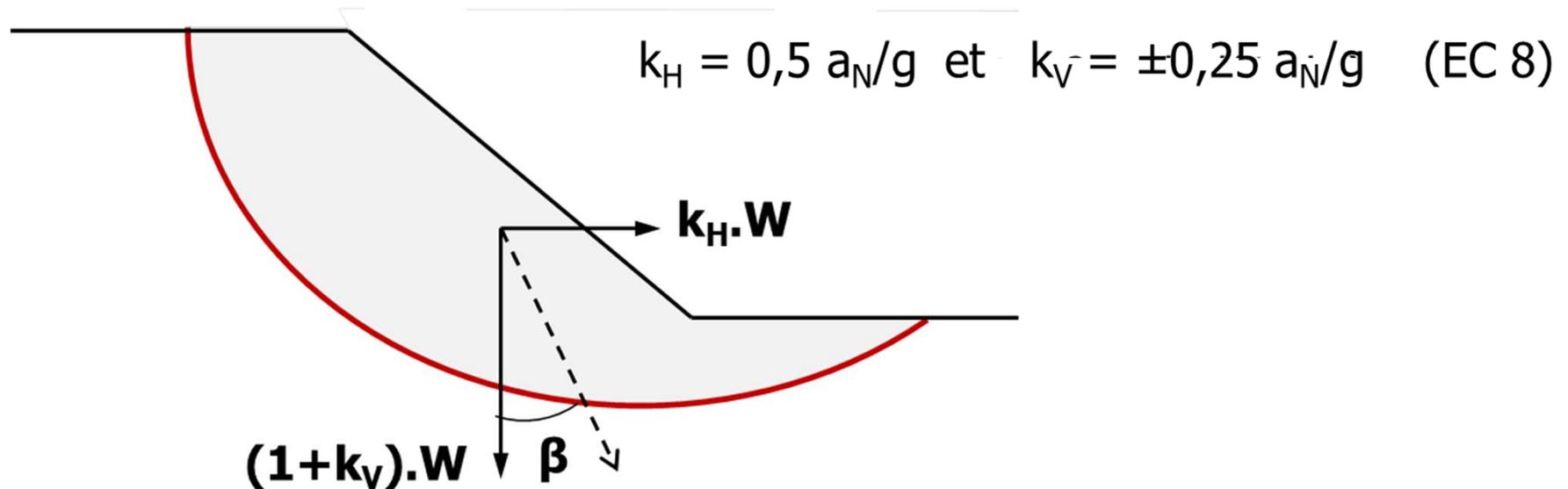
Facteurs de corrélation EC 7

Aire de parement m ²	Nombre d'essais d'arrachements (n)
< 400	3
400 à 800	5
800 à 2000	7
2000 à 4000	9
4000 à 8000	11
8000 à 16000	13
> 16000	15



Prise en compte du séisme

- Utilisation de la méthode pseudo-statique
 - ⇒ Simulation de l'action sismique par deux forces d'inertie équivalentes F_H et F_V proportionnelles (par définition) à la masse : $F_H = k_H \cdot W$ et $F_V = k_V \cdot W$
 - ⇒ Les coefficients sismiques « k_H » et « k_V » sont directement liés à l'action sismique représentée par l'accélération nominale a_N
 - ⇒ Equivaut à une rotation du champ gravitationnel

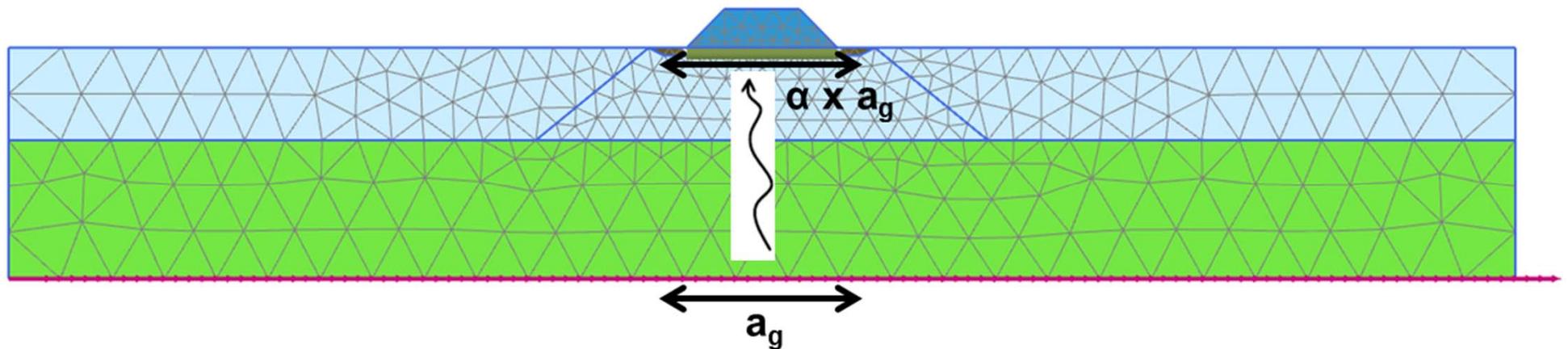


Prise en compte du séisme

- Accélération sismique (Eurocode 8)

$$a_N = \underbrace{\gamma_1}_{\text{classe ouvrage}} \times \underbrace{a_{gr}}_{\text{Zone sismique}} \times \underbrace{S}_{\text{classe sol}} \times \underbrace{S_T}_{\text{Topographie}}$$

- Facteur de site S (lié au contraste de rigidité sol/rocher)

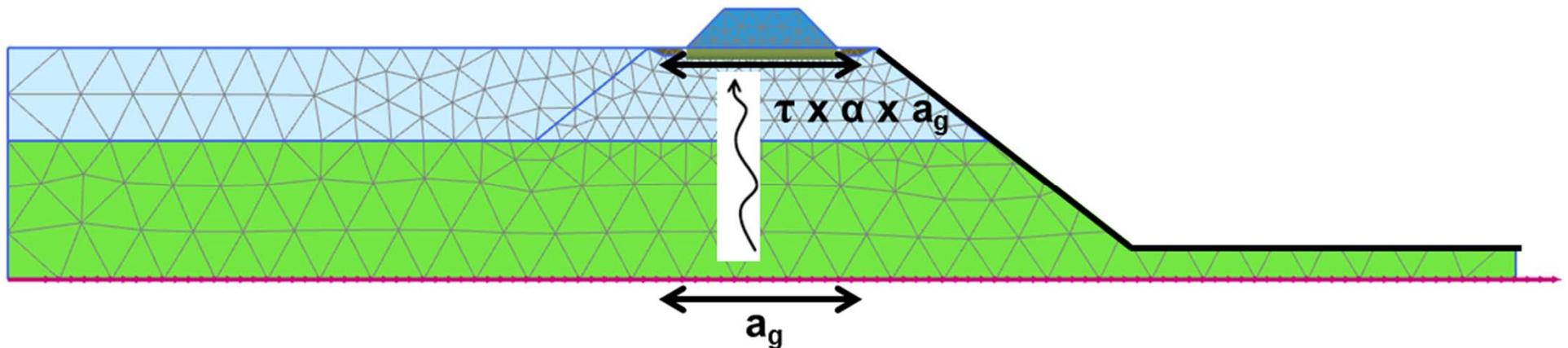


Prise en compte du séisme

- Accélération sismique (Eurocode 8)

$$a_N = \underbrace{\gamma_1}_{\text{classe ouvrage}} \times \underbrace{a_{gr}}_{\text{Zone sismique}} \times \underbrace{S}_{\text{classe sol}} \times \underbrace{S_T}_{\text{Topographie}}$$

- Facteur d'amplification topographique S_T



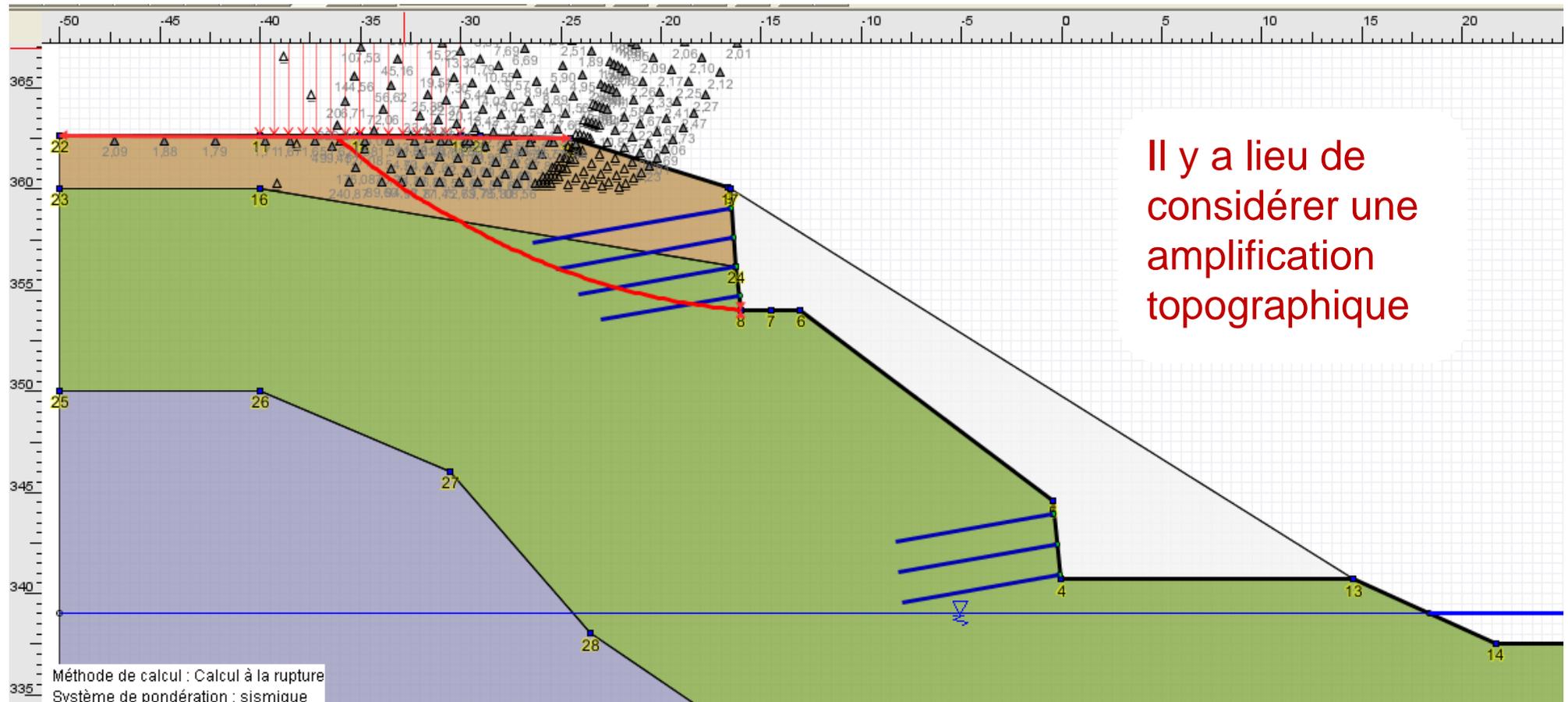
Prise en compte du séisme

- Réponse du sol sous séisme
 - ⇒ Sollicitations sismiques = action de très courte durée = comportement en conditions non drainées
 - ⇒ Pour un sol cohérent : la résistance (au cisaillement) sous séisme est contrôlée par la cohésion non drainée c_u (tenant compte des niveaux de contraintes après travaux !)
 - ⇒ Un sol sans cohésion hors nappe est caractérisé par son angle de frottement effectif (φ')
 - ⇒ Pour un sol sans cohésion sous nappe, le paramètre approprié est la résistance au cisaillement cyclique non drainée $\tau_{cy,u}$ qui tient compte de l'accumulation possible des pressions interstitielles
 - ⇒ En toute rigueur, si utilisation des paramètres de résistance effective pour un sol sans cohésion sous nappe, il convient de considérer la bonne valeur de la pression interstitielle durant le chargement sismique.



Prise en compte du séisme

- Mécanismes de ruine : instabilité générale et mixte



Prise en compte du séisme

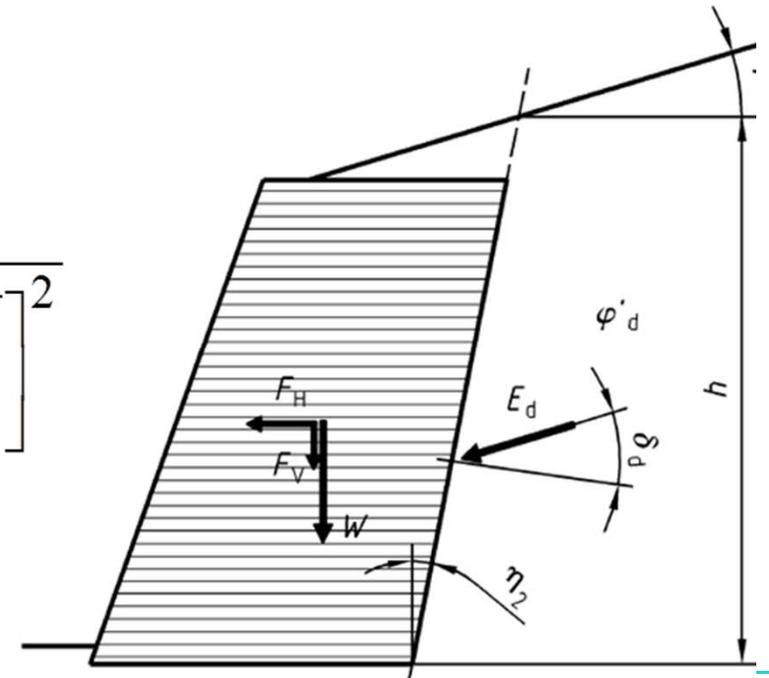
- Mécanismes de ruine : instabilité externe locale
⇒ Nécessite l'évaluation de la poussée des terres dynamique

$$E_d = 0,5 \times (1 \pm k_v) \times \gamma' \times K \times h^2$$

- ⇒ K coefficient de Mononobe et Okabe
- ⇒ Part dynamique appliquée généralement à mi hauteur
- ⇒ + Eau (statique et hydrodynamique)

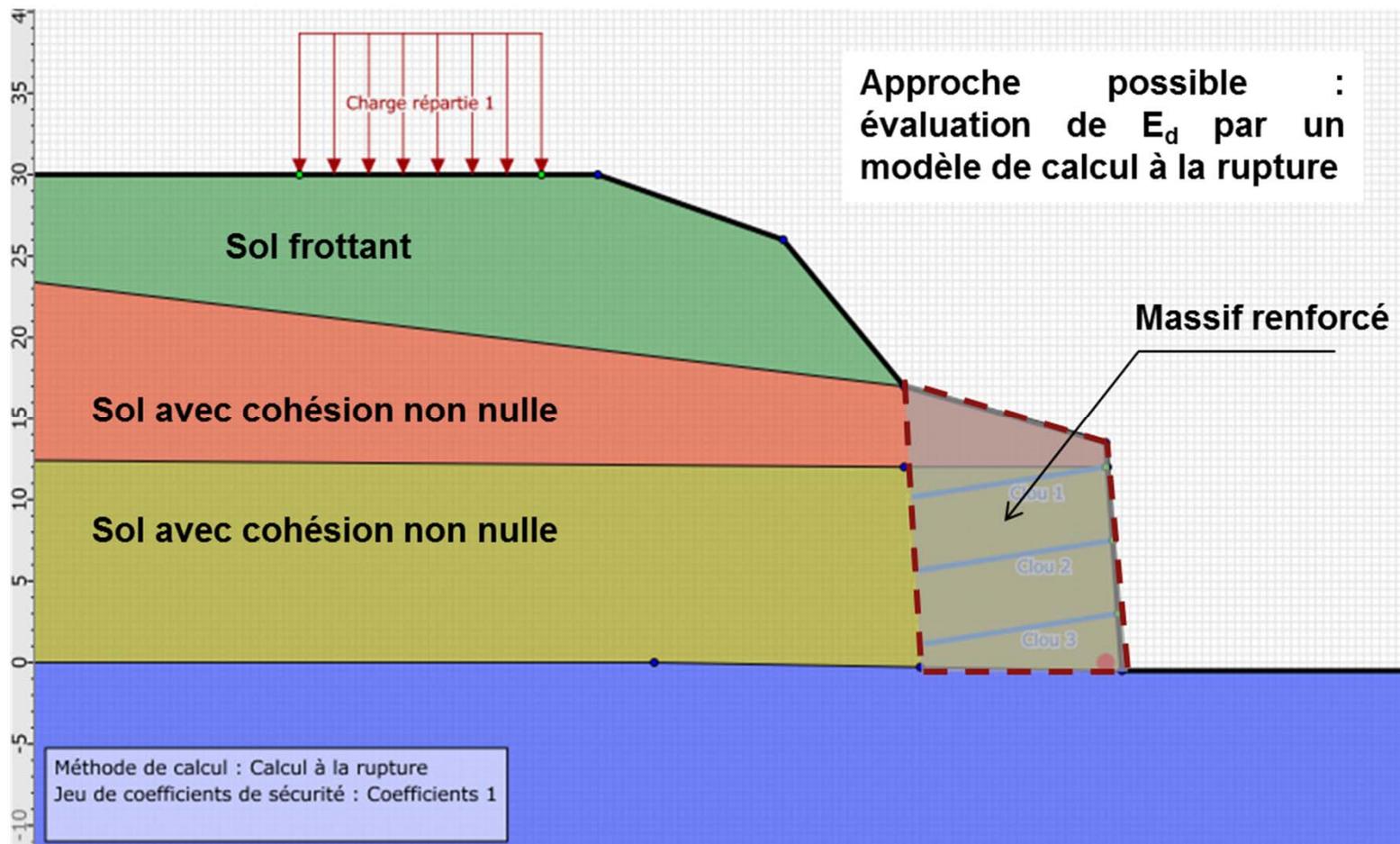
$$K^{\eta_2=0} = \frac{\cos^2(\varphi - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi - \delta) \sin(\varphi - \theta)}{\cos(\theta + \delta)}} \right]^2}$$

$$\tan \theta = \frac{k_H}{1 \pm k_V}$$



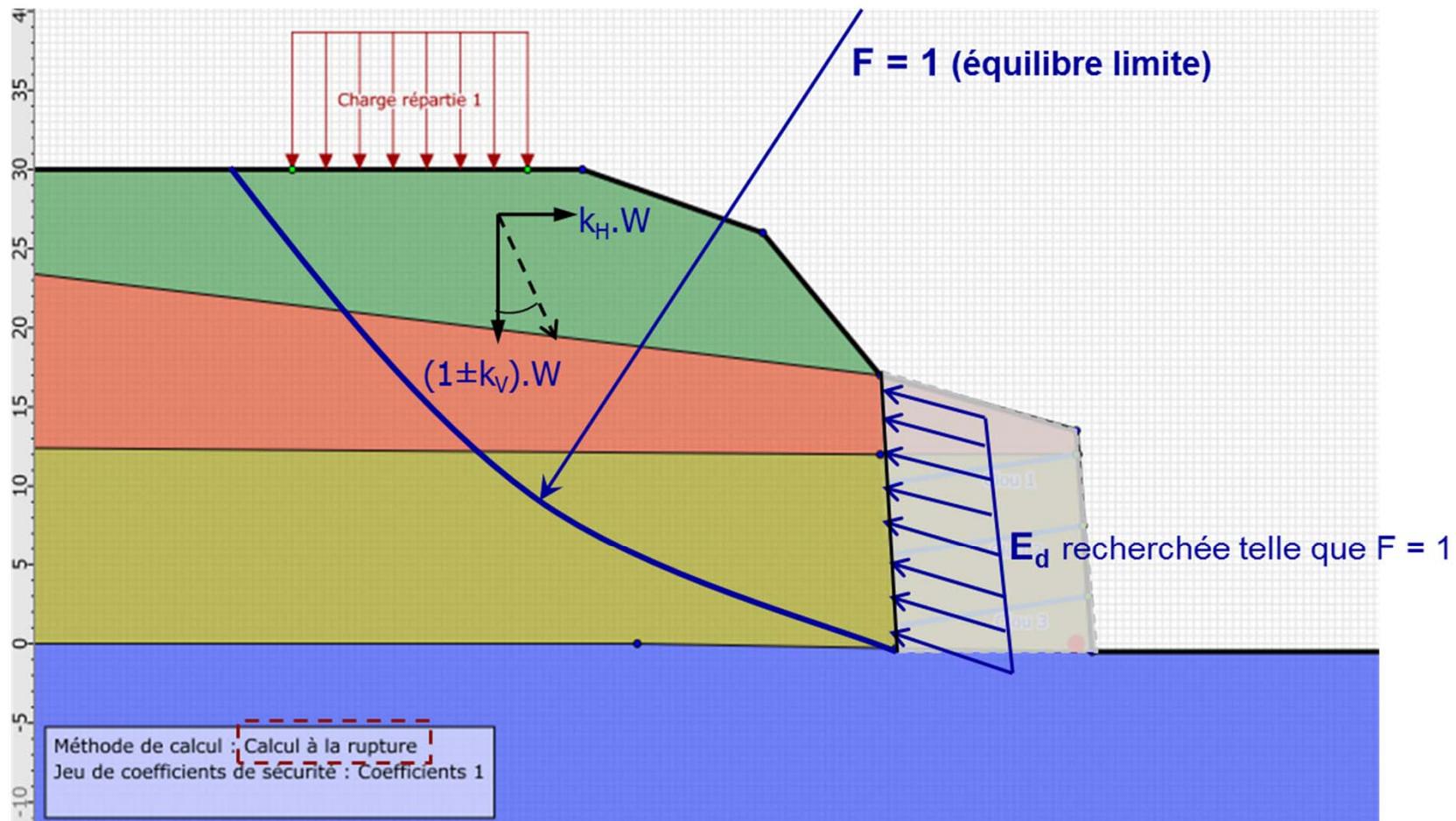
Prise en compte du séisme

- Mécanismes de ruine : instabilité externe locale
 - ⇒ Nécessite l'évaluation de la poussée des terres dynamique



Prise en compte du séisme

- Mécanismes de ruine : instabilité externe locale
 - ⇒ Nécessite l'évaluation de la poussée des terres dynamique



Ce qu'il faut retenir

- ⇒ Technique ayant bénéficié de plusieurs REX en France et en Europe
- ⇒ Principes de dimensionnement différents de ceux de la « Terre armée »
- ⇒ Pratique du dimensionnement :
 - ⇒ toujours commencer par examiner la stabilité du site
 - ⇒ examen de plusieurs mécanismes potentiels : instabilité mixte, interne et externe
 - ⇒ ne pas négliger les phases provisoires de terrassement
 - ⇒ effets sismiques traités par la méthode pseudo-statique
 - ⇒ approche de calcul (ou système de pondération) différent selon pays

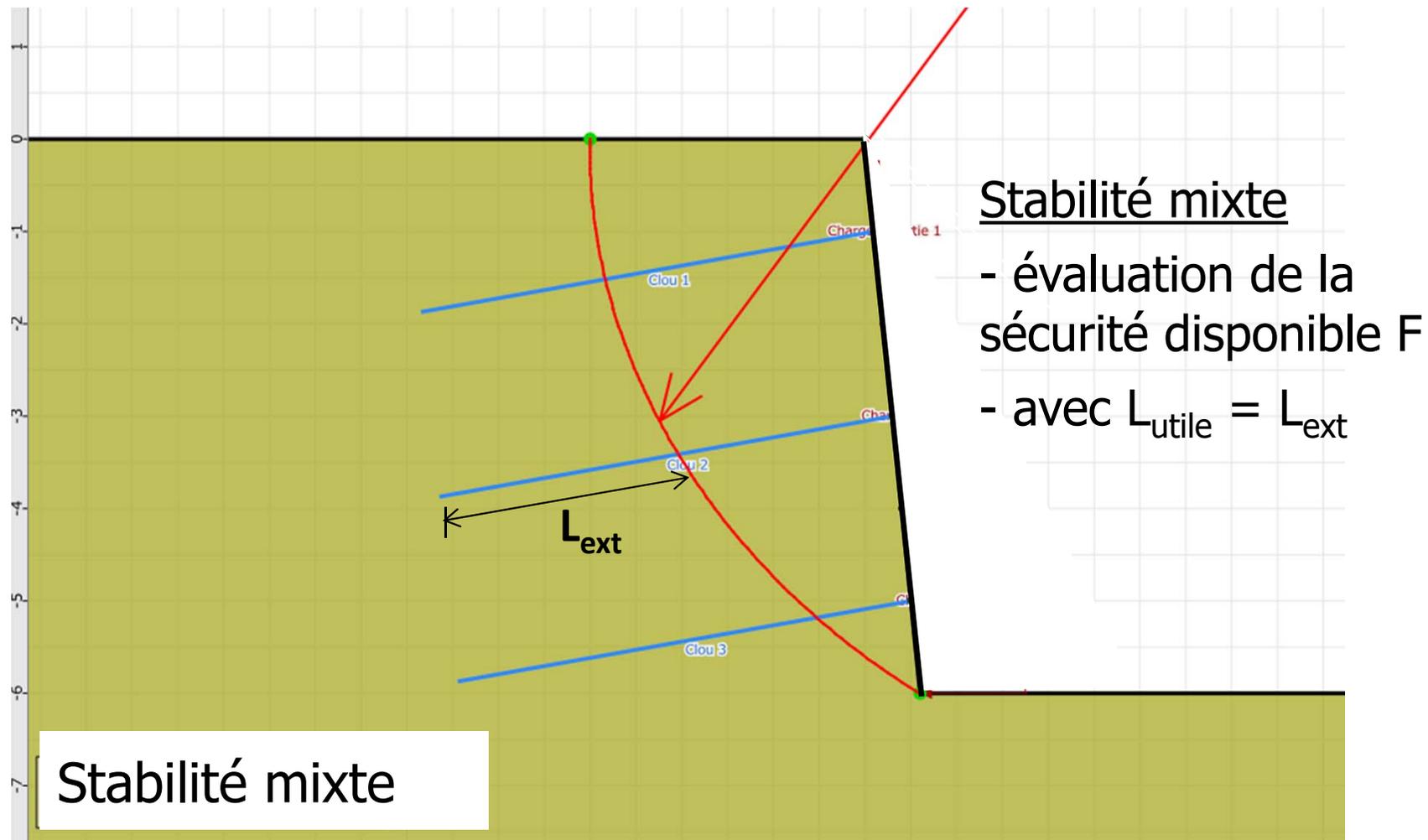


Merci de votre attention



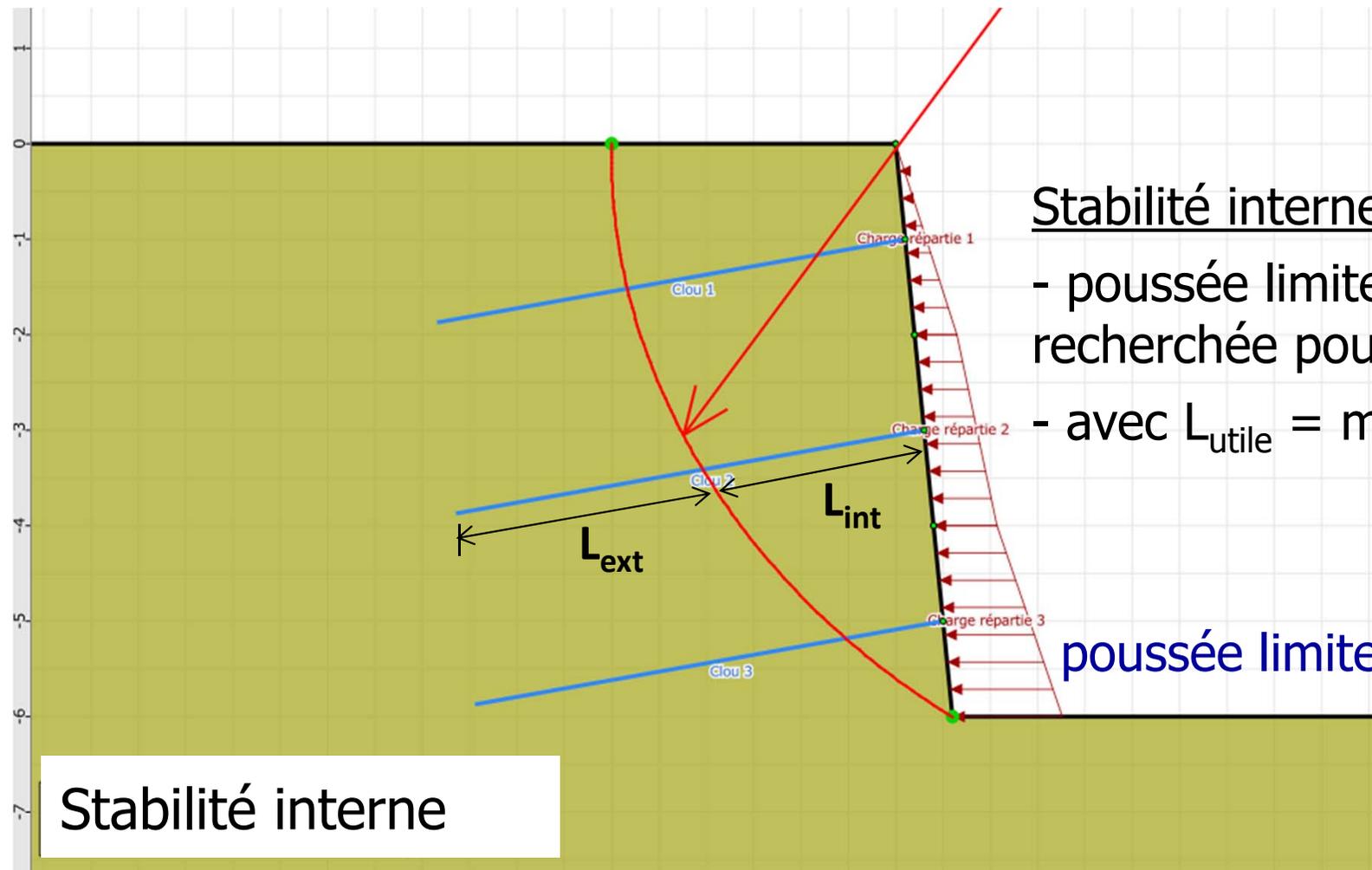
Instabilité interne

- Approche alternative : utilisation de la méthode cinématique du calcul à la rupture



Instabilité interne

- Approche alternative : utilisation de la méthode cinématique du calcul à la rupture



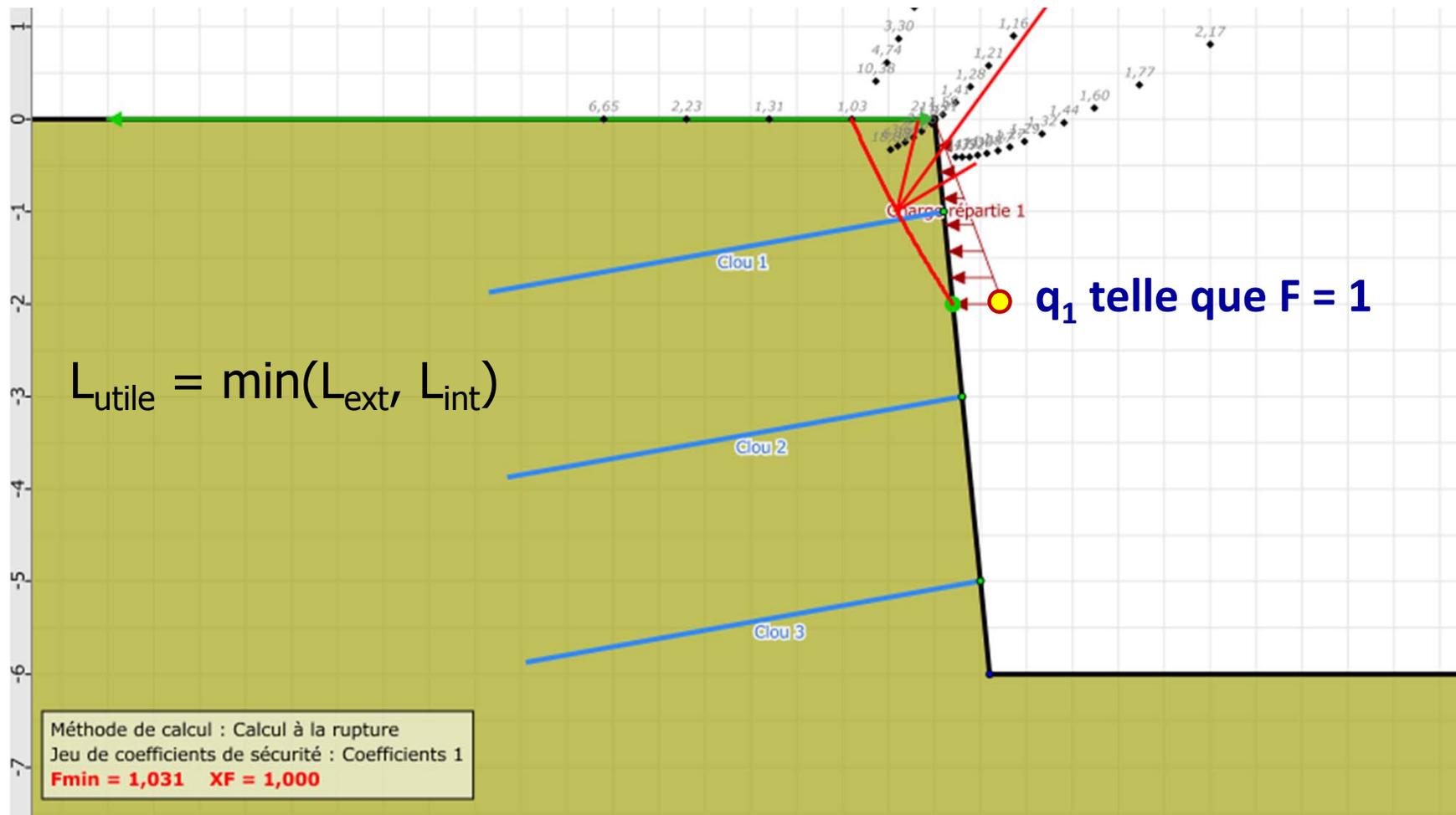
Stabilité interne

- poussée limite recherchée pour $F = 1$
- avec $L_{\text{utile}} = \min(L_{\text{ext}}, L_{\text{int}})$

poussée limite

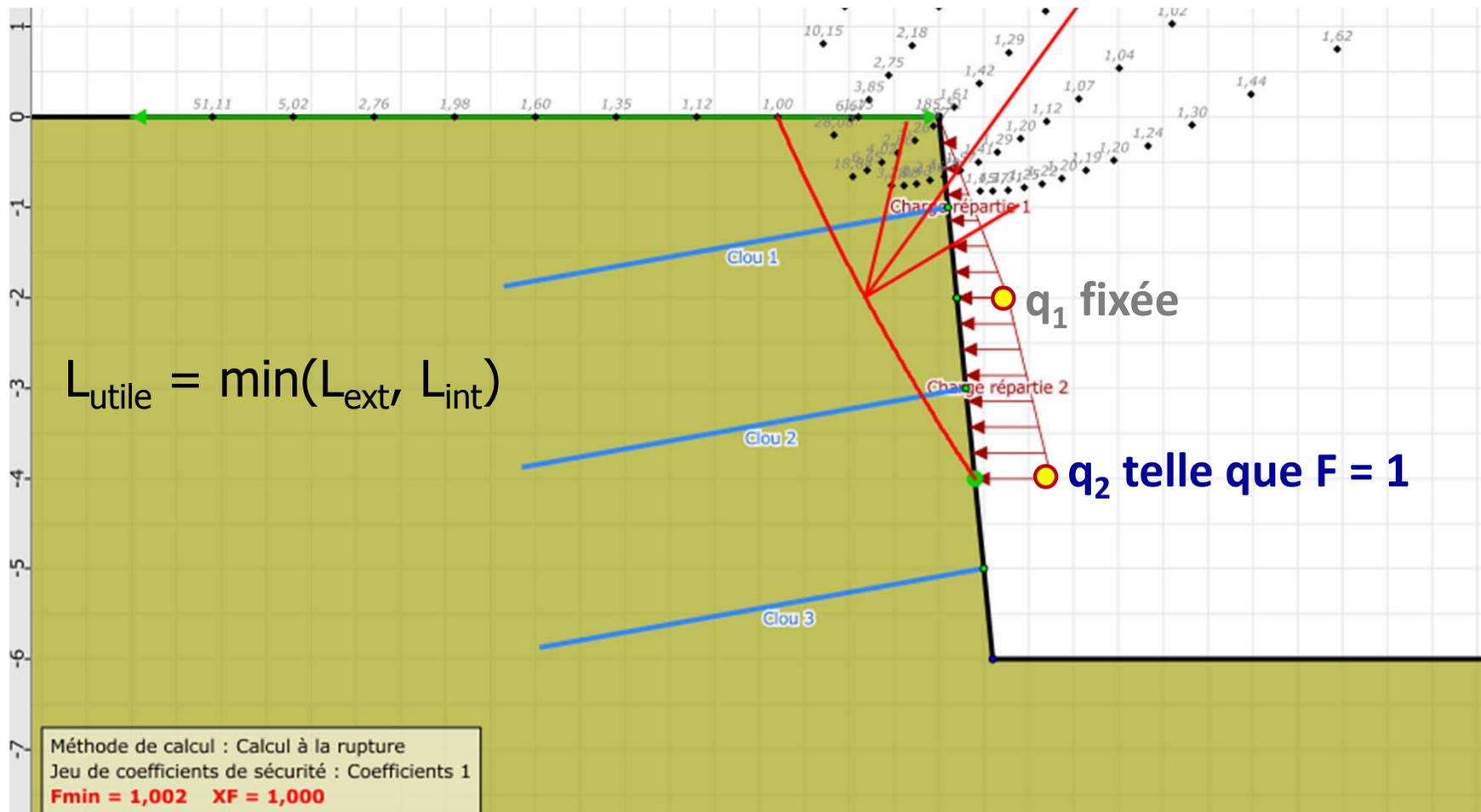
Instabilité interne

- Approche alternative : utilisation de la méthode cinématique du calcul à la rupture



Instabilité interne

- Approche alternative : utilisation de la méthode cinématique du calcul à la rupture



Instabilité interne

- Approche alternative : utilisation de la méthode cinématique du calcul à la rupture

