

ENTPE cours Mécanique des sols 2

Méthodes de calcul en stabilité des pentes

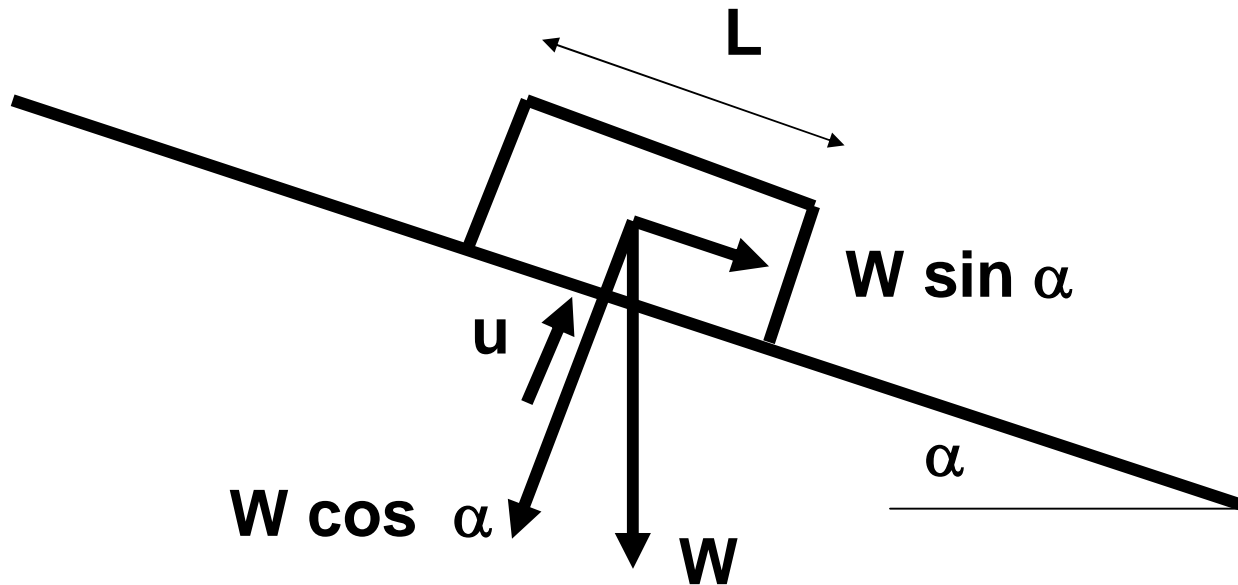
R.M. Faure

Principes de base

- Une partie mobile du sol glisse sur une partie fixe
- Le frottement est défini par la loi de Coulomb
- Les forces motrices sont celles de la pesanteur
- La surface de rupture est la clé pour l'interprétation et la compréhension du phénomène
- Les équations sont basées sur l'équilibre d'un bloc posé sur un plan incliné

Equation du plan incliné

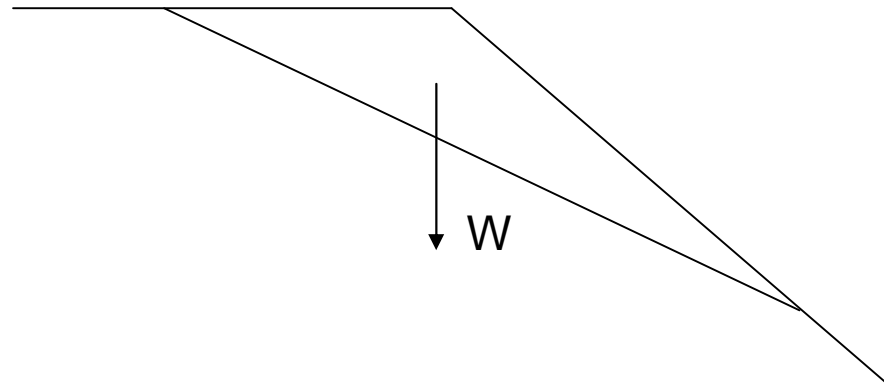
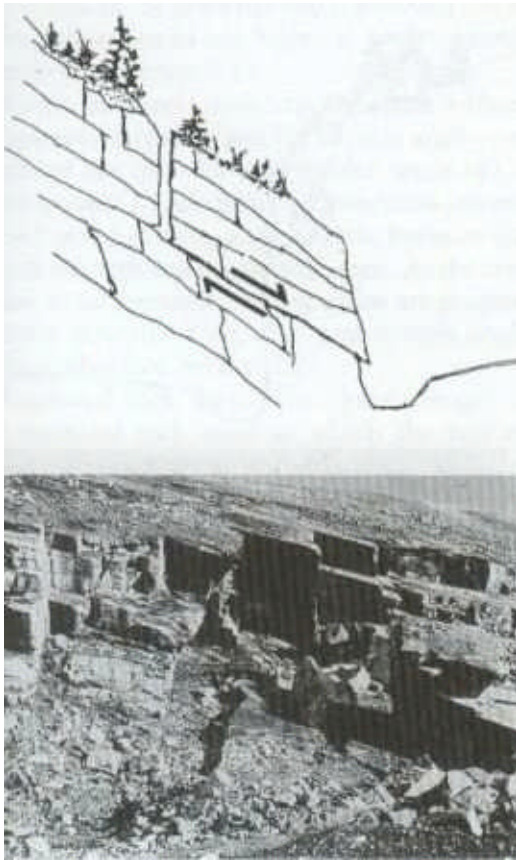
- Force résistante : $c'L + (W \cos \alpha - u L) \tan \phi'$



Coefficients de sécurité

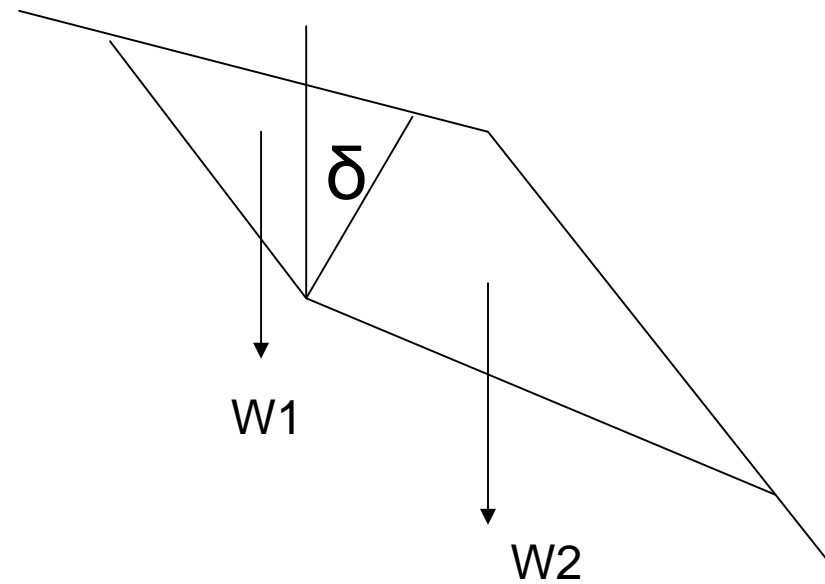
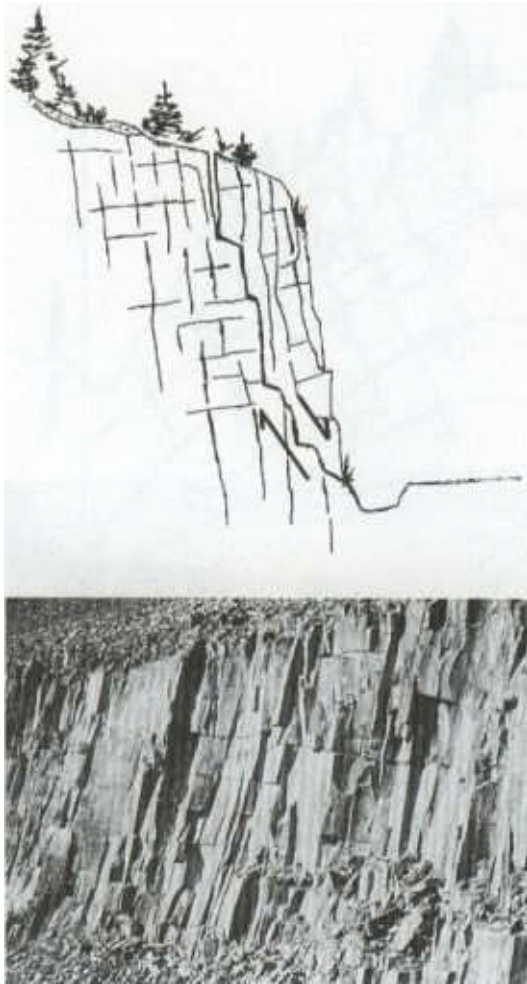
	Définition	Formule	Commentaires
1	Rapport de contraintes	$F = \tau_{\max} / \tau$	Méthodes à la rupture
2	Rapport de forces	$F = E_{\text{résist}} / E_{\text{moteur}}$	Direction de déplacement
3	Rapport de moment	$F = M^t_{\text{résist}} / M^t_{\text{moteur}}$	Rotation
4	Paramètres réduits	$p = p / F$	cf Eurocodes
5	Probabilité à x%	Distribution de F	cf Monte Carlo
6	Marge de sécurité	par ex : H / H_{\max}	sur une grandeur
7		Utilisation logique floue	en développement

Un plan de rupture

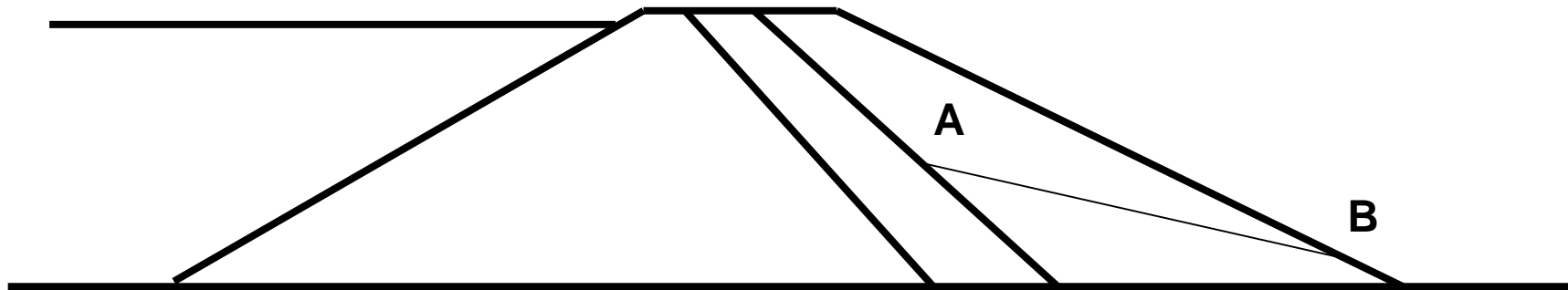


$$F(\alpha) = (c'L + W \cos \alpha \tan \varphi') / W \sin \alpha$$


Deux plans de rupture



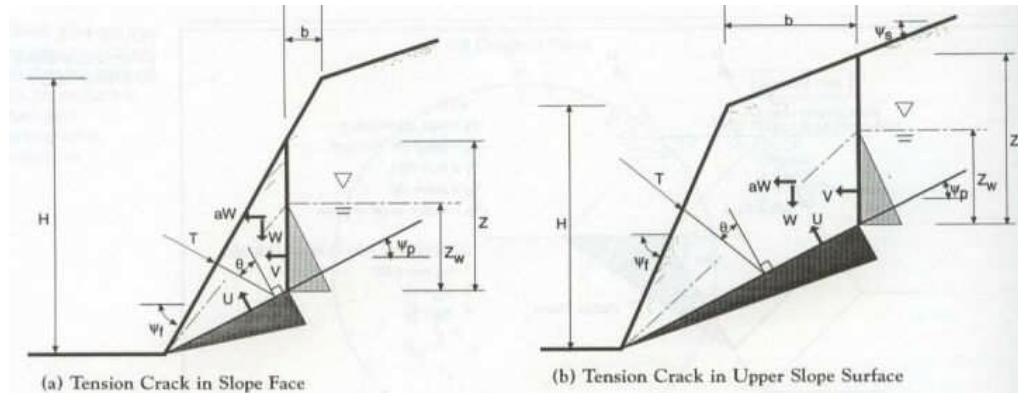
Cas des barrages à noyau



On se fixe A, B varie et on cherche F mini  pente AB

On fait varier A  F de la recharge

Bloc à face verticale



The stability equations are as follows:

For Case a:

Depth of tension crack:

$$Z = (H \cot \Psi_f - b) (\tan \Psi_f - \tan \Psi_p)$$

Weight of block:

$$W = (\frac{1}{2}) \gamma_r H^2 [(1 - Z/H)^2 \cot \Psi_p (\cot \Psi_p \tan \Psi_f - 1)]$$

Area of sliding plane:

$$A = (H \cot \Psi_f - b) \sec \Psi_p$$

For Case b:

Depth of tension crack:

$$Z = H + b \tan \Psi_f - (b + H \cot \Psi_f) \tan \Psi_p$$

Weight of block:

$$W = (\frac{1}{2}) \gamma_r (H^2 \cot \Psi_f X + bHX + bZ)$$

$$X = (1 - \tan \Psi_p \cot \Psi_f)$$

Area of sliding plane:

$$A = (H \cot \Psi_f + b) \sec \Psi_p$$

For either Case a or b:

Uplift water force:

$$U = (\frac{1}{2}) \gamma_w Z_w A$$

Driving water force:

$$V = (\frac{1}{2}) \gamma_w Z_w^2$$

Factor of safety:

$$FS = \frac{[cA + [W(\cos \Psi_p - a \sin \Psi_p) - U - V \sin \Psi_p + T \cos \theta] \tan \phi]}{[W(\sin \Psi_p + a \cos \Psi_p) + V \cos \Psi_p - T \sin \theta]}$$

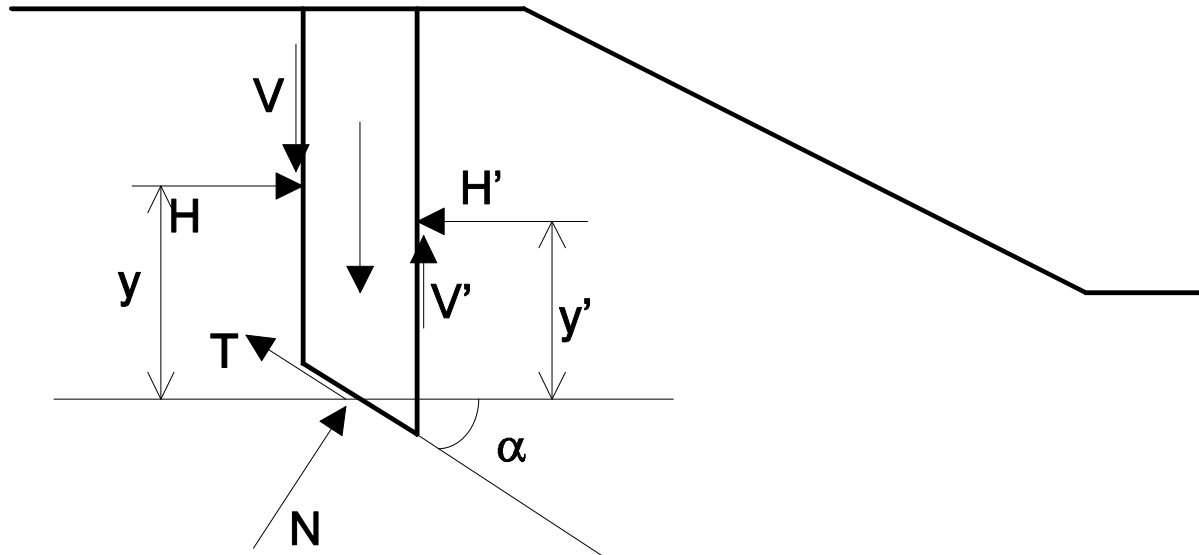
where

- H = height of slope face;
- Ψ_f = inclination of slope face;
- Ψ_s = inclination of upper slope face;
- Ψ_p = inclination of failure plane;
- b = distance of tension crack from slope crest;
- a = horizontal acceleration, blast or earthquake loading;
- T = tension in bolts or cables;
- θ = inclination of bolt or cable to normal to failure plane;
- c = cohesive strength of failure surface;
- ϕ = friction angle of failure surface;
- γ_r = density of rock;
- γ_w = density of water;
- Z_w = height of water in tension crack;
- Z = depth of tension crack;
- U = uplift water force;
- V = driving water force;
- W = weight of sliding block; and
- A = area of failure surface.

Méthodes des tranches

- Le sol en mouvement est découpé en tranches verticales (au moins 25)
- On écrit l'équilibre de chaque tranches et on constate un déficit de $n-2$ équations pour résoudre.
- Le choix de ces $n-2$ équations différencie les méthodes

Méthodes des tranches



$T_i, N_i, V_i, V'_i, H_i, H'_i$	pour chaque tranche	6n inconnues
$y(H_i)$ et $y'(H'_i)$	pour chaque tranche	2n inconnues
F	coefficient de sécurité	1 inconnue
		soit 8n+1 inconnues

Equations : $3n$ (équilibre) + $3(n-1)$ (interaction) + n (Coulomb) + 6 (CL)
 $\Rightarrow n-2$ équations à rajouter

Cas particuliers de la méthode des tranches

- Fellenius
 - Circulaire, pas d'effort entre tranches
 - méthode conservative
- Bishop
 - Circulaire, efforts horizontaux pris en compte, résolution itérative sur l'équation de moment
 - méthode très employée, génération facile de cercles de rupture

Cas particulier de la méthode de Bishop

- Rôle de l'eau
 - Lorsqu'il y a de fortes valeurs de u , les contraintes peuvent devenir négatives. Plusieurs tests numériques corrigent ce problème et LA méthode de Bishop peut être écrite de six façons différentes qui entraînent des résultats variant jusqu'à 30% !
 - Il faut bien connaître la méthode que l'on utilise

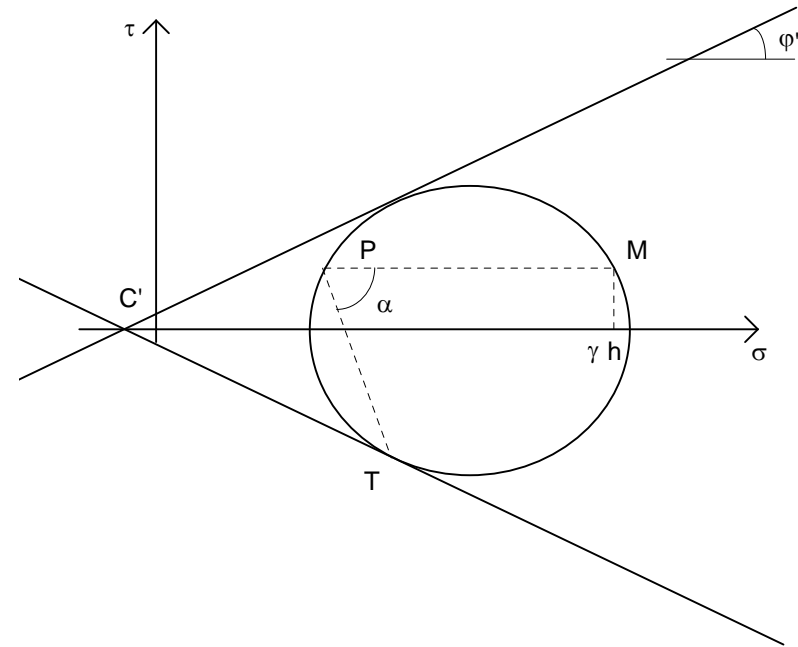
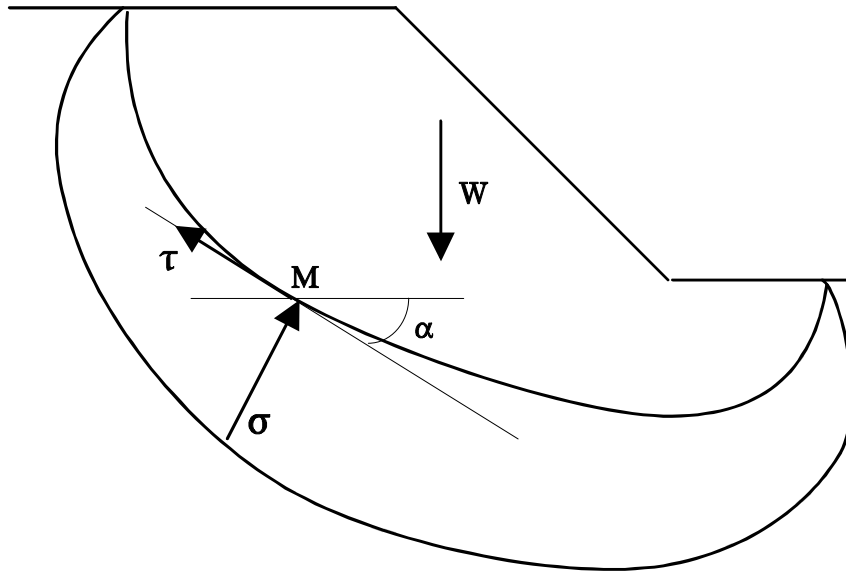
Méthodes globales

- Le lobe des contraintes normales est paramétré avec deux variables, qui 'perturbent' une valeur approchée de la contrainte normale. Avec F , les trois équations de la statiques permettent de résoudre complètement l'équilibre.

La méthode des perturbations

- Courbes circulaires et non circulaires
- Lobe de contrainte représentatif
- Facilité pour introduire des efforts externes

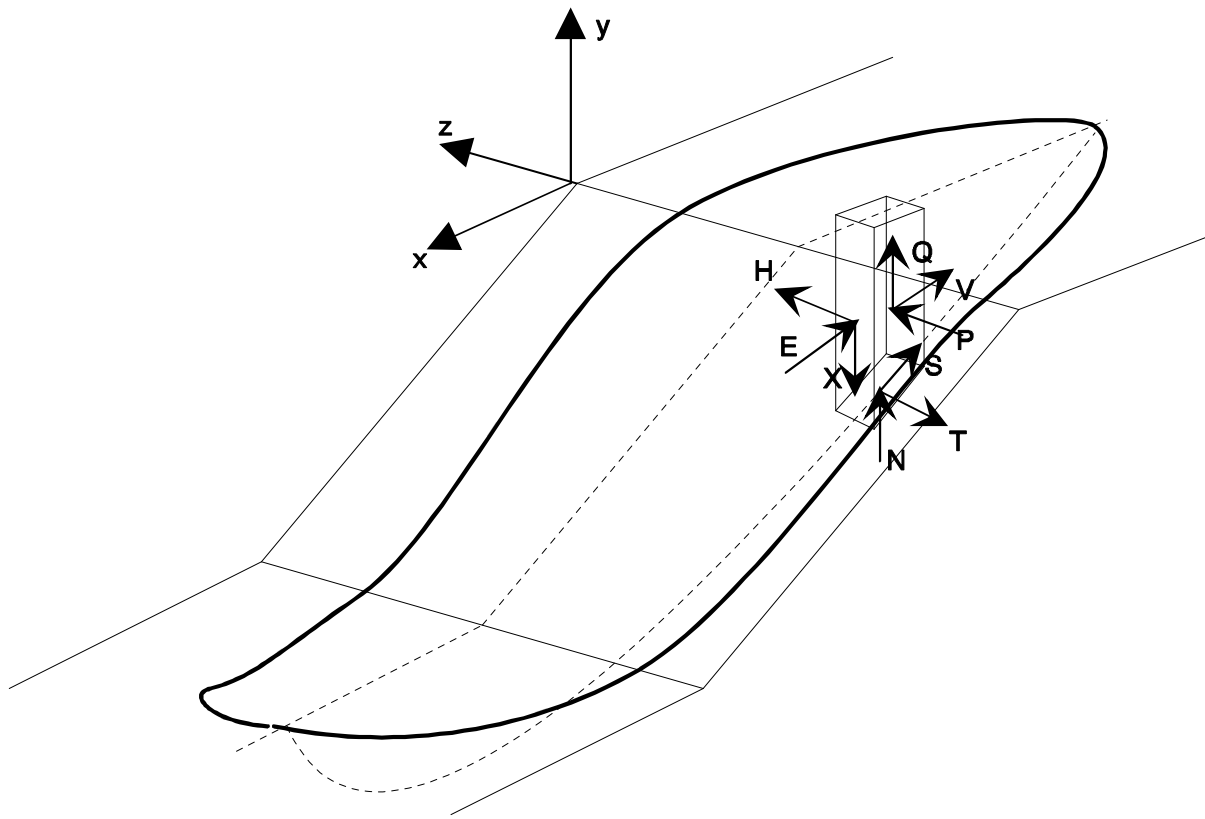
La méthode des perturbations



$$\sigma_n = \sigma_o (\lambda + \mu v)$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma'_v \tan \varphi' + c'}{\cos \theta + \frac{1}{\sin \varphi'}} \cos \varphi' - \frac{c'}{\tan \varphi'} + u$$

Méthode des perturbations en 3D



Séismes

- Définition d'un séisme
 - Nombre de cycles équivalents
 - Accélération maximale
 - Effet de site
- Règlement parasismique

Prise en compte d'un séisme

- Méthodes pseudo statiques
 - L'effet du séisme est simulé par une force non verticale appliquée sur chaque tranche
- Prise en compte de Δu
 - L'effet du séisme est simulé par une augmentation de u en fonction du nombre de cycles équivalent, de l'amplitude de cisaillement et de paramètres du sol obtenus expérimentalement
- Ramollissement du sol
 - La valeur de C_u est minorée en fonction des paramètres du séisme

Clouage (1)

- Les inclusions induisent des efforts stabilisateurs estimés par une approche multi-critère dans le cas des clous 'souples' et par l'effort correspondant à une déformation imposée à un pieu dans le cas d'inclusions 'rigides'
- Les quatre critères
 - arrachement du clou
 - le clou cisaille le sol
 - rupture du clou par cassure
 - rupture du clou par rotule plastique

Multi-critère

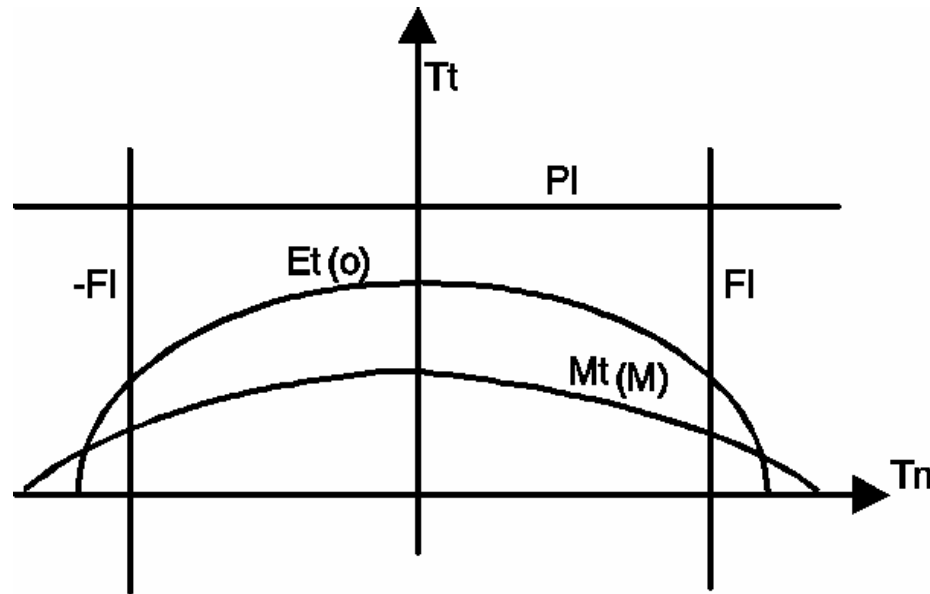
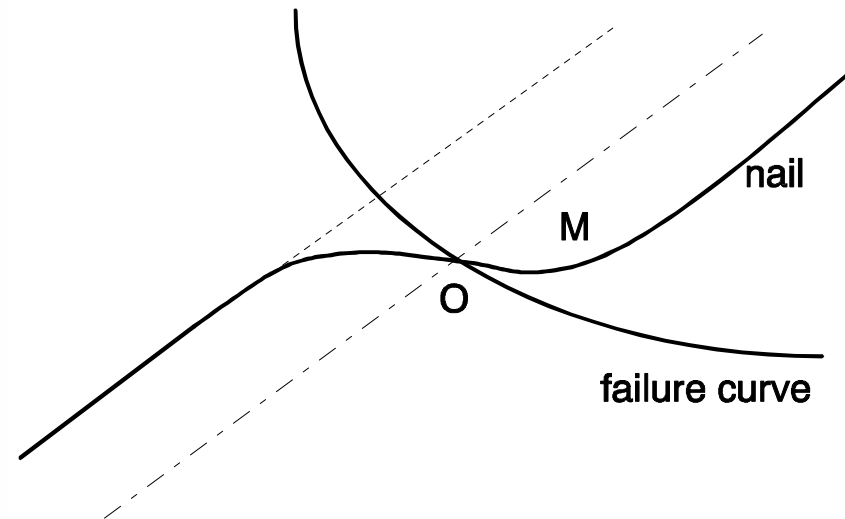


Diagramme T_n , T_t , avec les quatre critères

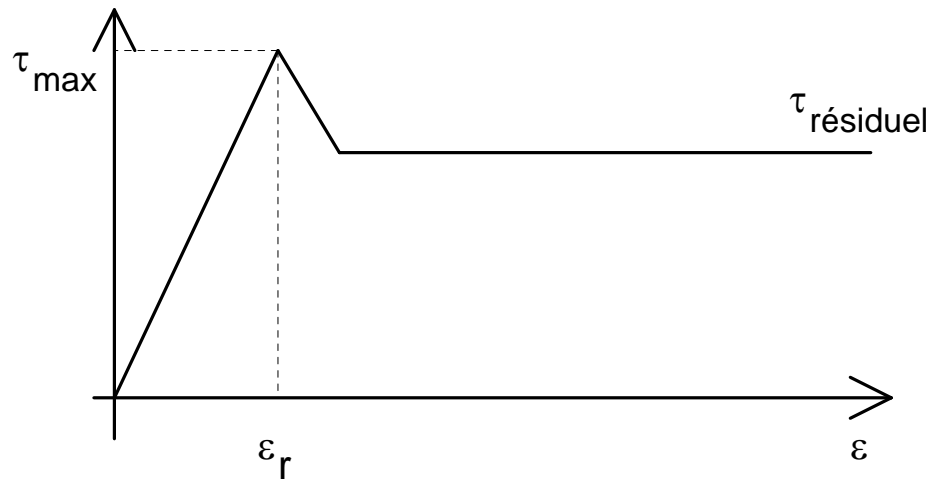


Déformation du clou

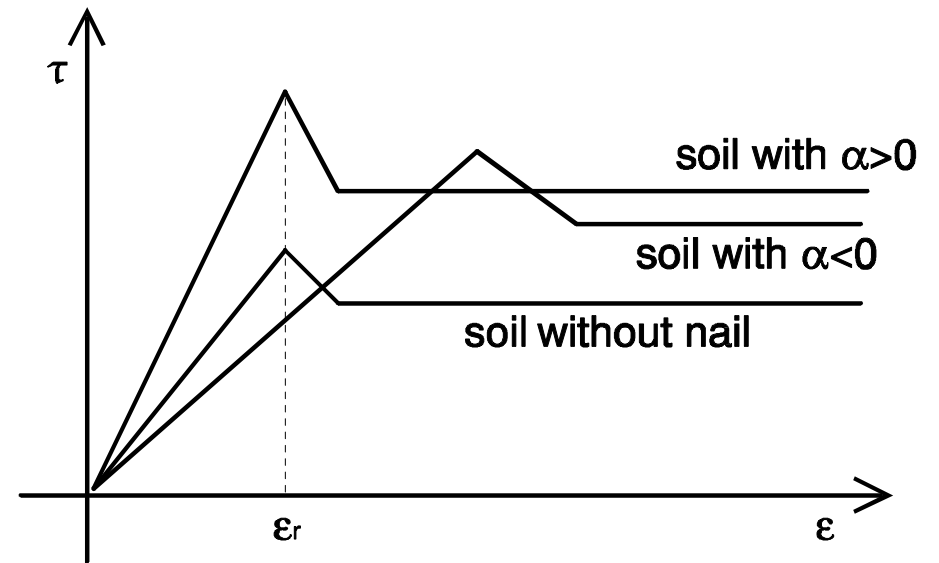
Prise en compte des déplacements

- Si on connaît le déplacement en tout point de la pente et une loi effort-déformation, on peut évaluer un coefficient de sécurité en fonction du déplacement.
- Ce qui permet de définir un seuil d'alerte.

Exemple de lois pour la prise en compte des déplacements

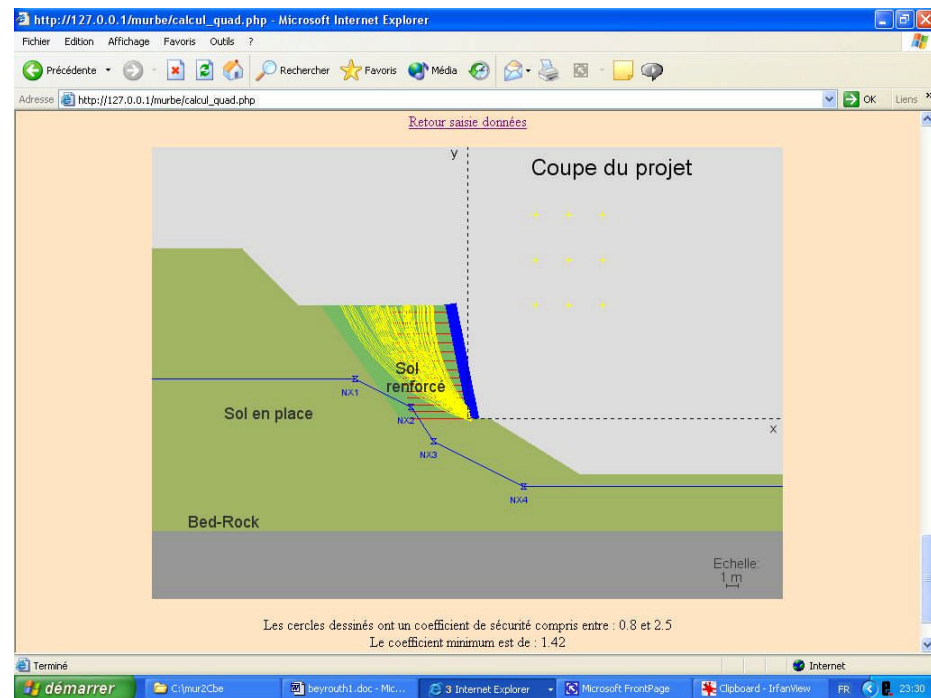


Sol seul



avec clous

Cas des murs faits de blocs

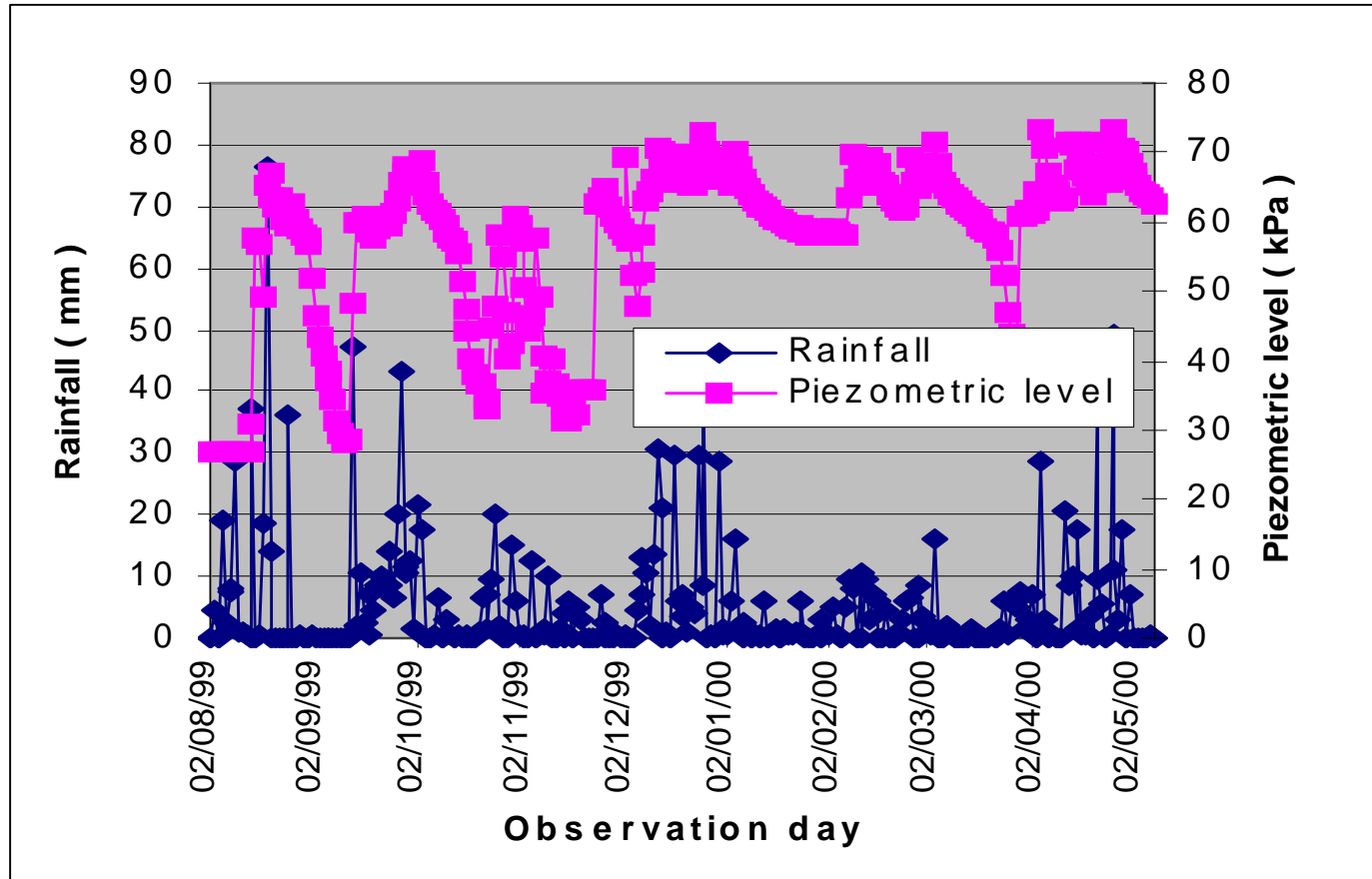


nouvelles techniques, importants développements

Comportement à long terme

- Pluviométrie
 - Il faut passer de la pluie à u (p.i)
- Fluage
 - la vitesse de déformation est fonction du rapport τ_{\max} / τ et τ_{\max} dépend de u

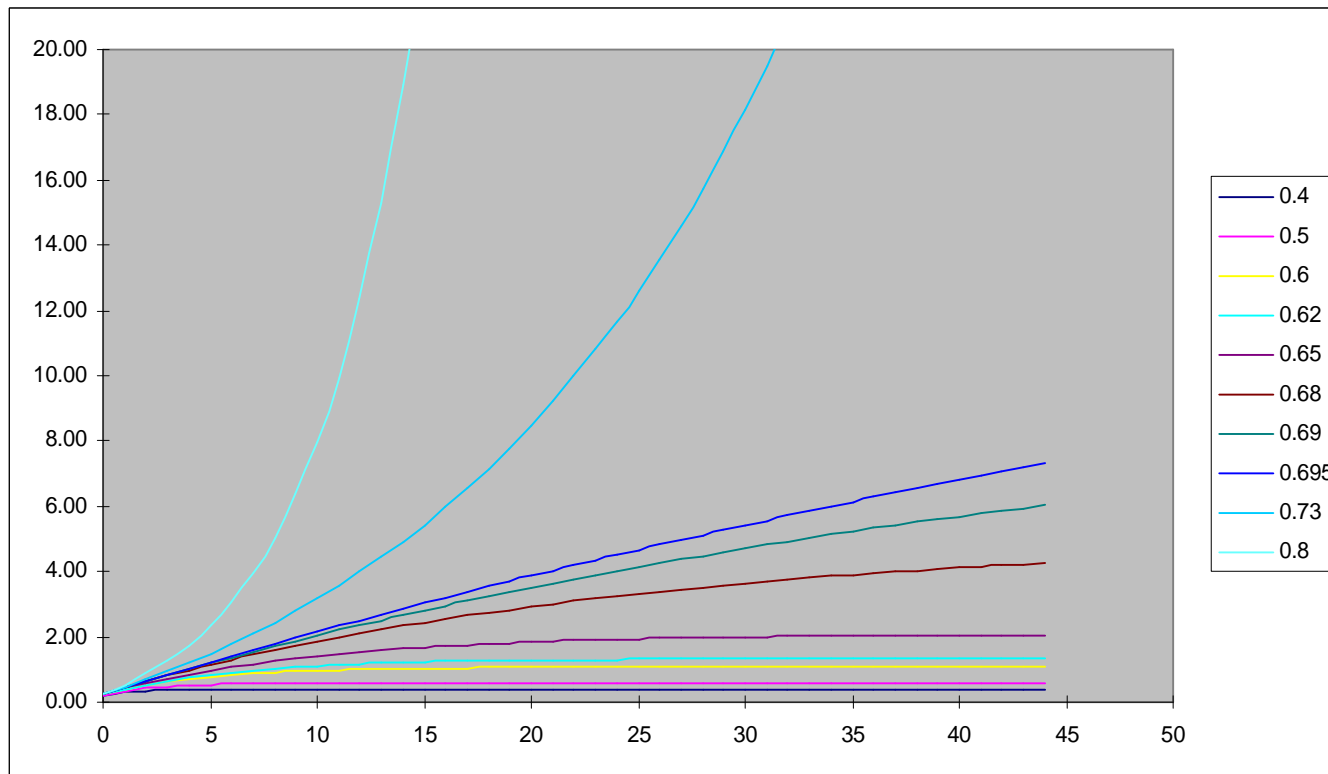
Pluviométrie



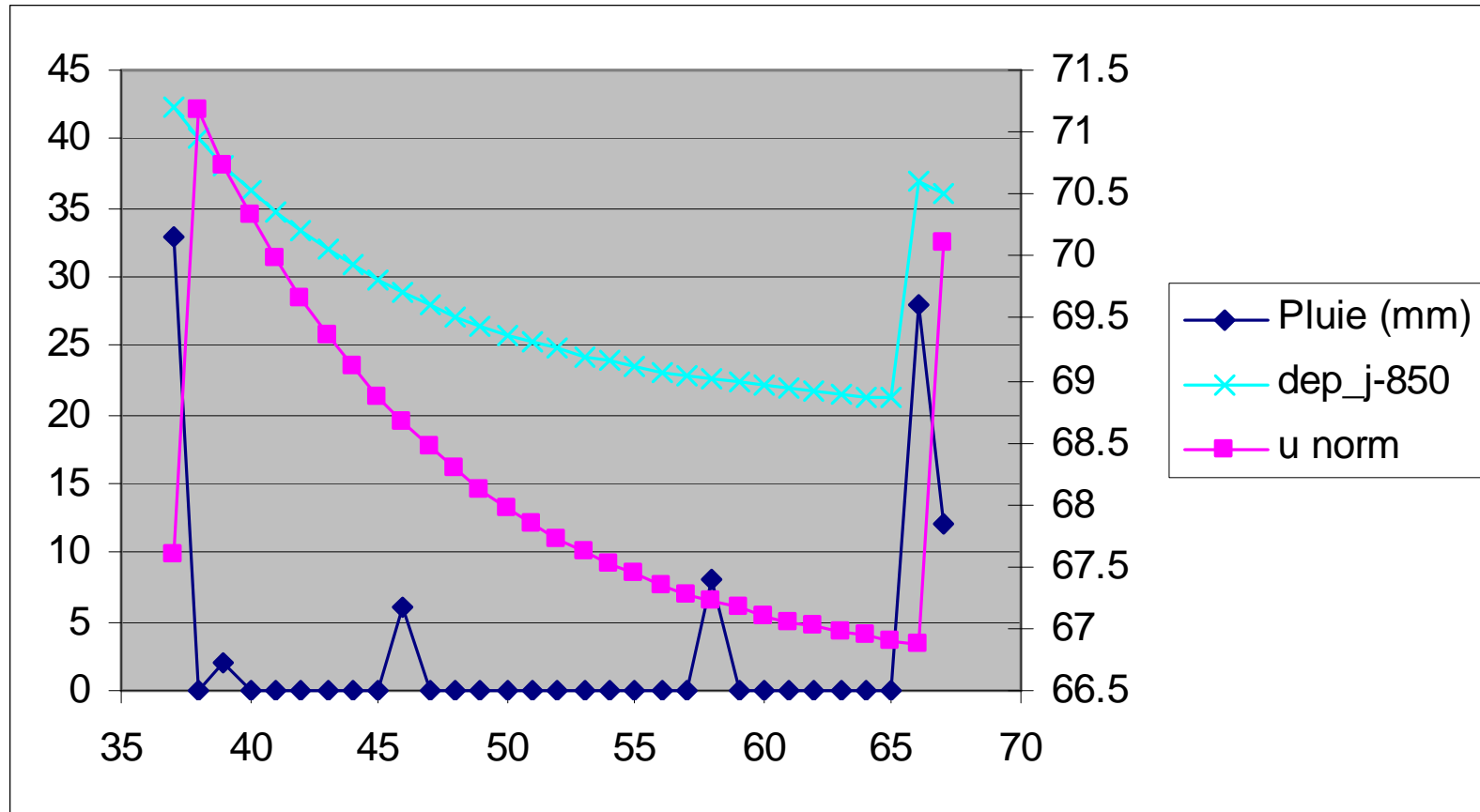
La pluie reste le facteur déclanchant le plus important

Déplacements de fluage $s = \tau / \tau_{\max}$

$$\varepsilon(s, t) = \lambda(s) + v_0(s) (\sinh((s-s_1)(t+T)) (\cosh((t+T)))^{s-s_1})$$



Pluie, pression interstitielle et déplacement



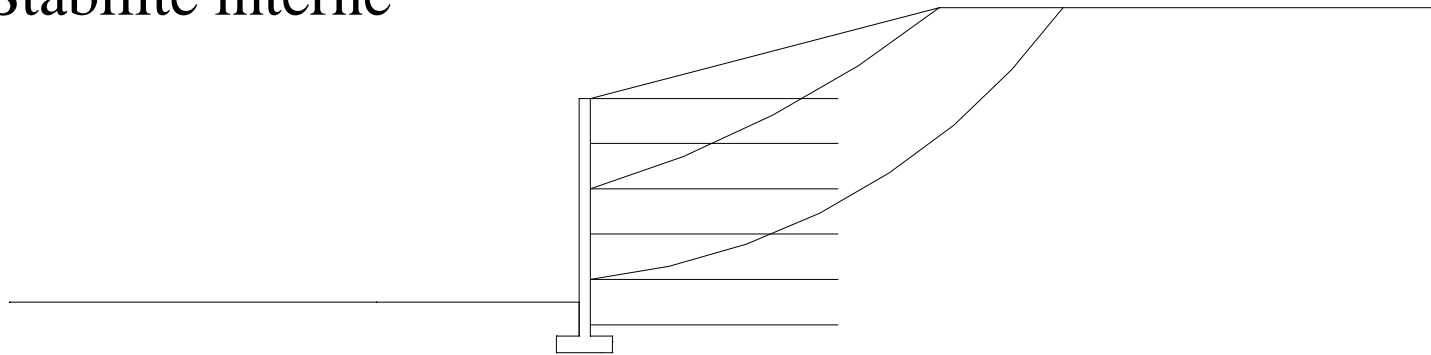
Pour les géotextiles

Norme XP G38064

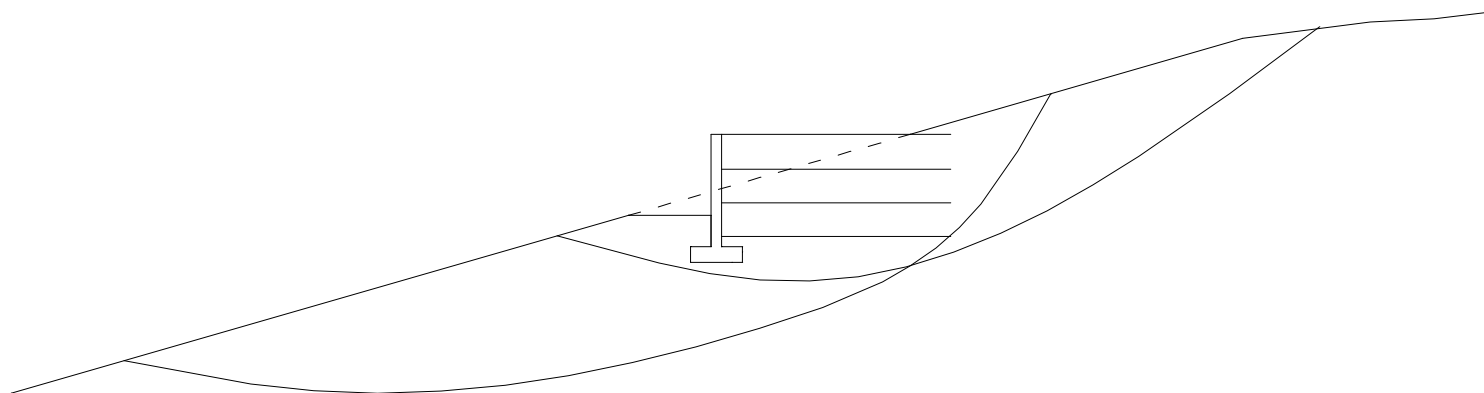
- Ruptures imposées
- Coefficients partiels (cf Eurocodes)

Formes de rupture à étudier (1)

Stabilité interne

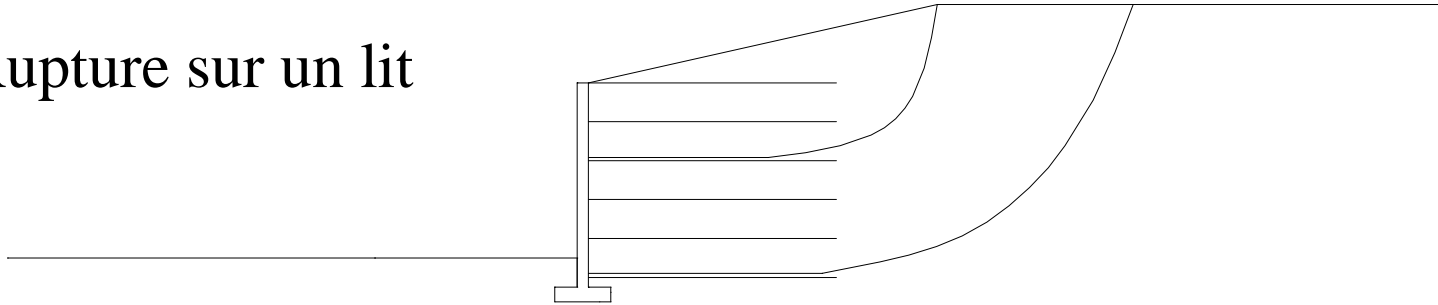


Stabilité externe

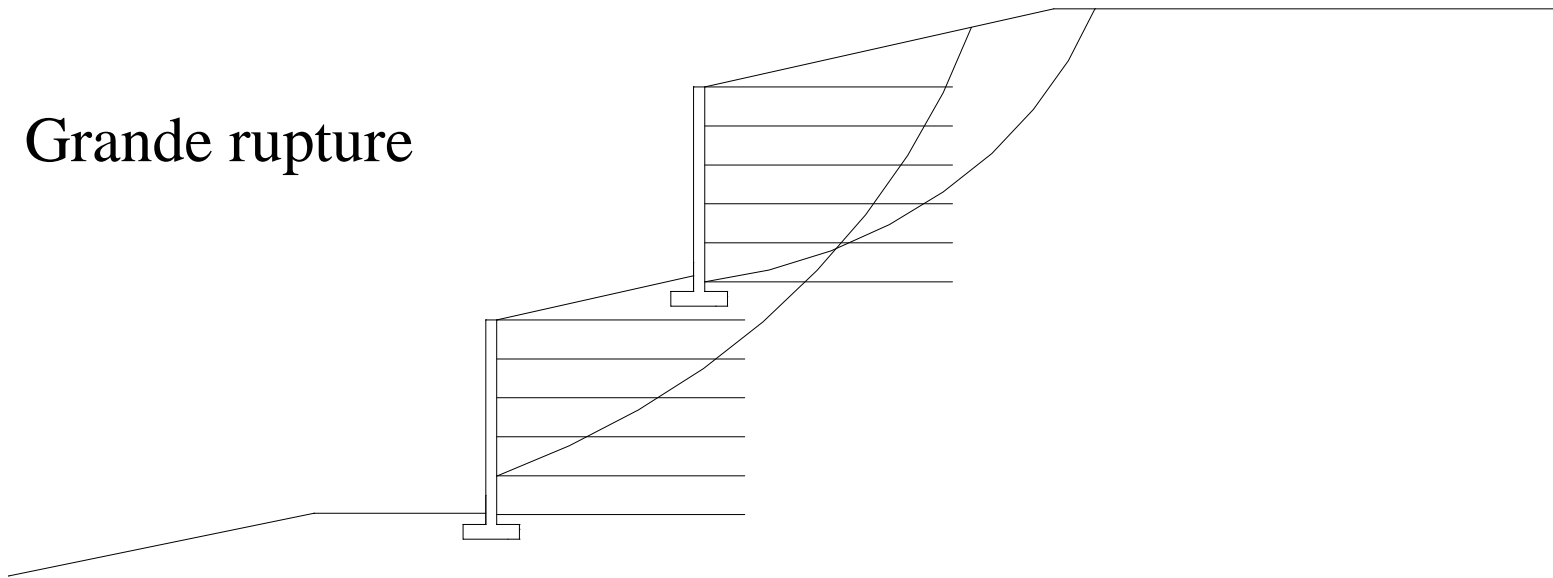


Formes de rupture à étudier (2)

Rupture sur un lit



Grande rupture



Coefficients états limites

Table 2. Limit states approach: different combinations.

Limit state approach	Parameter			
	$\Gamma_T \gamma$	$\Gamma_Q q$	$\tan \phi'_s / F_s$	$\tan \phi'_{sg} / F_{sg}$
Conventional (Conv)	$\Gamma_T = 1$	$\Gamma_Q = 1$	$F_s = 1.5$	$F_{sg} = 1.5$
NFG 38064 Proposal 1, Extensible 1 (Ext 1)	$\Gamma_T = 1$	$\Gamma_Q = 1.3$	$F_s = 1.25$	$F_{sg} = 1.25$
NFG 38064 Proposal 2, Extensible 2 (Ext 2 ^(a))	$\Gamma_T = 1.20$	$\Gamma_Q = 1.33$	$F_s = 1.35$	$F_{sg} = 1.35$
Extensible 2 (Ext 2 ^(b))	$\Gamma_T = 1$	$\Gamma_Q = 0$	$F_s = 1.35$	$F_{sg} = 1.35$
NFP 94220 Inextensible (Inext)	$\Gamma_T = 1.35$	$\Gamma_Q = 1.5$	$F_s = 1$	$F_{sg} = 1.25$
BS 8006 (Br)	$\Gamma_T = 1.50$	$\Gamma_Q = 1.50$	$F_s = 1$	$F_{sg} = 1.30$
(Ba)	$\Gamma_T = 1$	$\Gamma_Q = 0$	$F_s = 1$	$F_{sg} = 1.30$
Serviceability limit state (Neut)	$\Gamma_T = 1$	$\Gamma_Q = 1$	$F_s = 1$	$F_{sg} = 1$

Note: (a) maximum overall tensile force; (b) minimum pull-out strength.

Programme Bétonorme

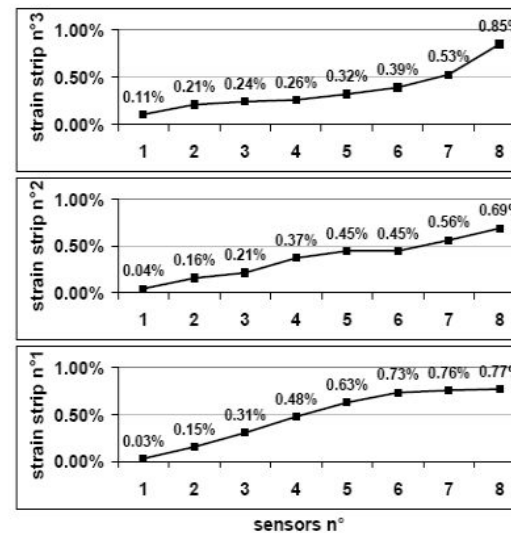
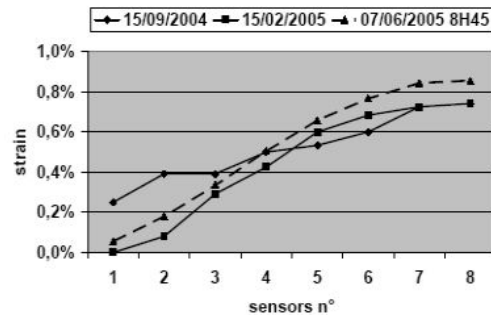
- Interface très conviviale
 - Dialogue et essais faciles
 - Rendus à insérer dans un rapport
 - Schémas automatiques
- Prise en compte des préceptes énoncés

Pour aller plus loin

- On maîtrise les équilibres de rupture
- Mais peut-on répondre en terme de déplacements ?

Champ de déplacement

- Topographie
- Inclinométrie
- Fibres optiques

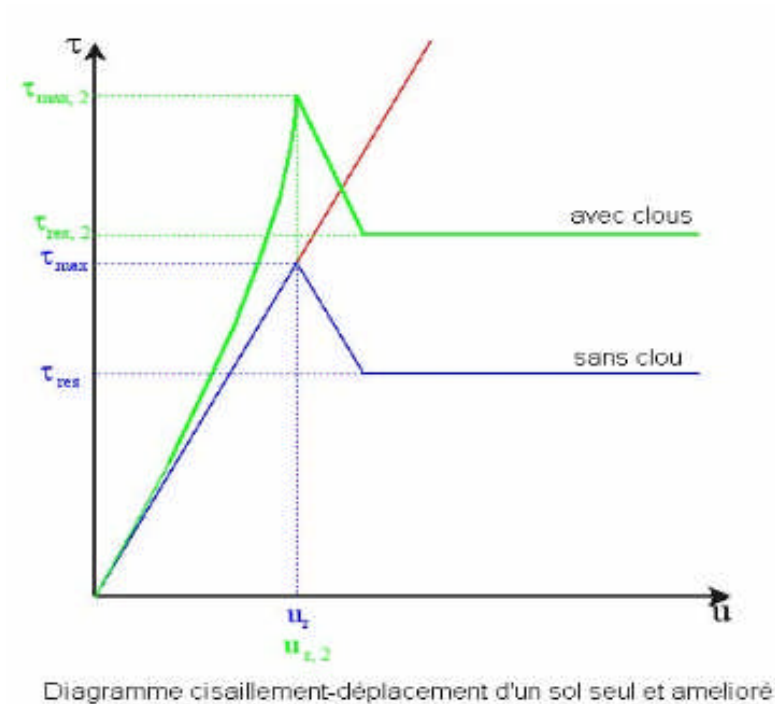


- Forme et grandeur du champ (valeur max)
- Dix itérations

Lois de comportement effort-déformation

- Sol seul (écrouissage négatif)

- Sol renforcé
 - Clous
 - Géotextiles



Marges de sécurité

- Par rapport à la rupture

Marge globale de sécurité
par rapport à la rupture

$$\frac{\sum_{\text{facettes}} (\tau_{\max} - \tau) \cdot dS}{\sum_{\text{facettes}} \tau_{\text{eq}} \cdot dS}$$

- Par rapport à l'équilibre

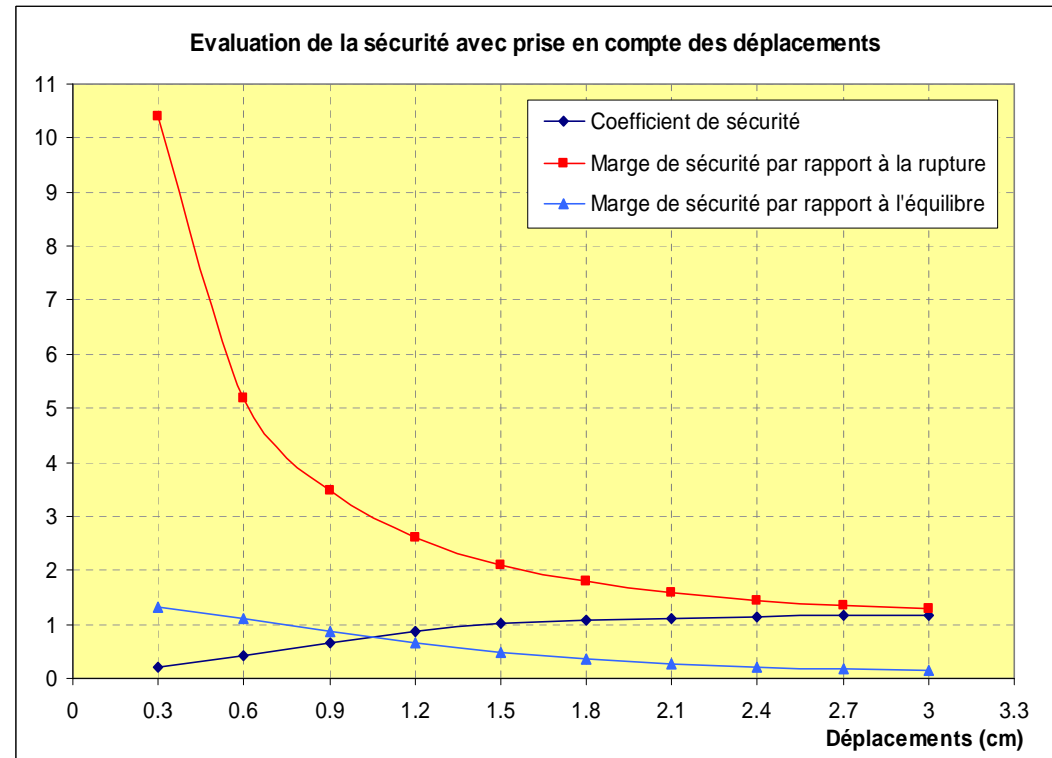
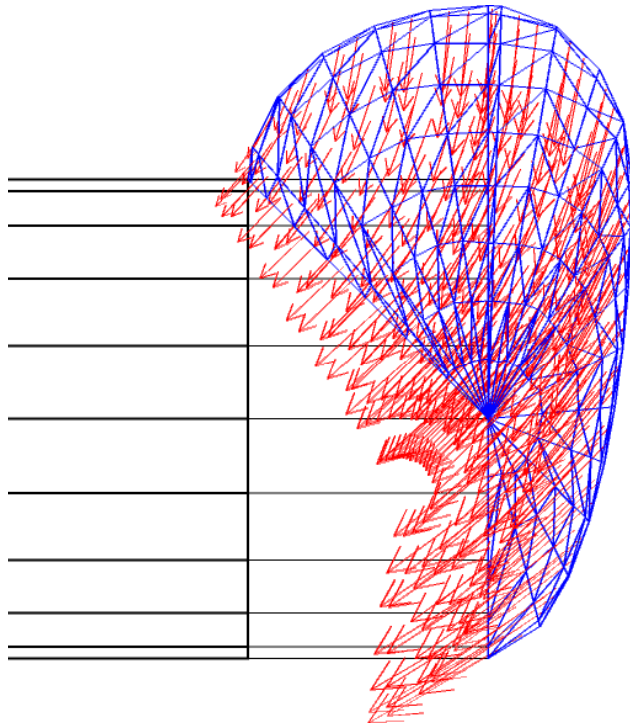
Marge globale de sécurité
par rapport à l'équilibre

$$\frac{\sum_{\text{facettes}} \frac{\tau_{\max}}{\tau} \cdot dS}{\sum_{\text{facettes}} \cdot dS}$$

Front de taille des tunnels

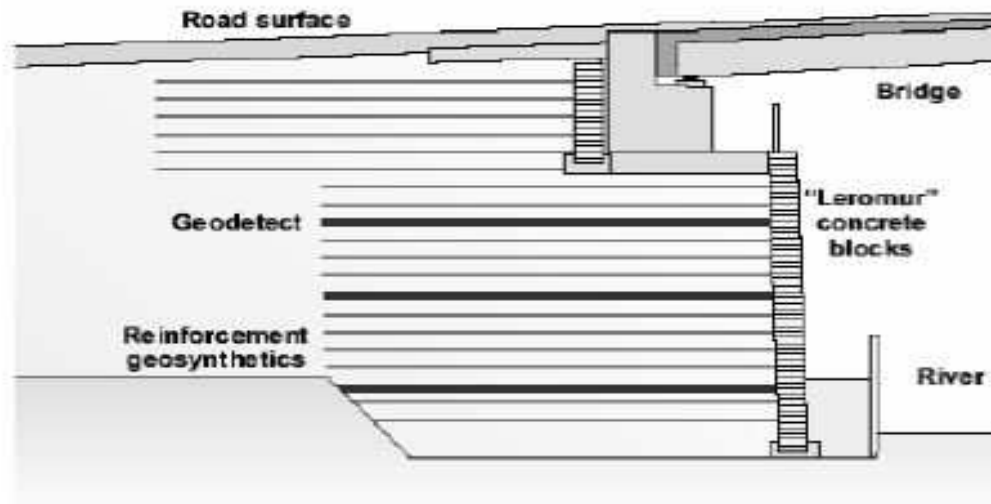
- Forme de la CR 3D
- Pression de boue
- Clouage au front
- Clouage en voûte

Exemple : le front de taille



Mur renforcé par géotextile

- Culée Saint Saturnin



- Label Ivor

Programme de calcul (1)

Calcul de la Stabilité interne d'un mur renforcé de géotextiles avec un parement fait de blocs

[aide en ligne](#)

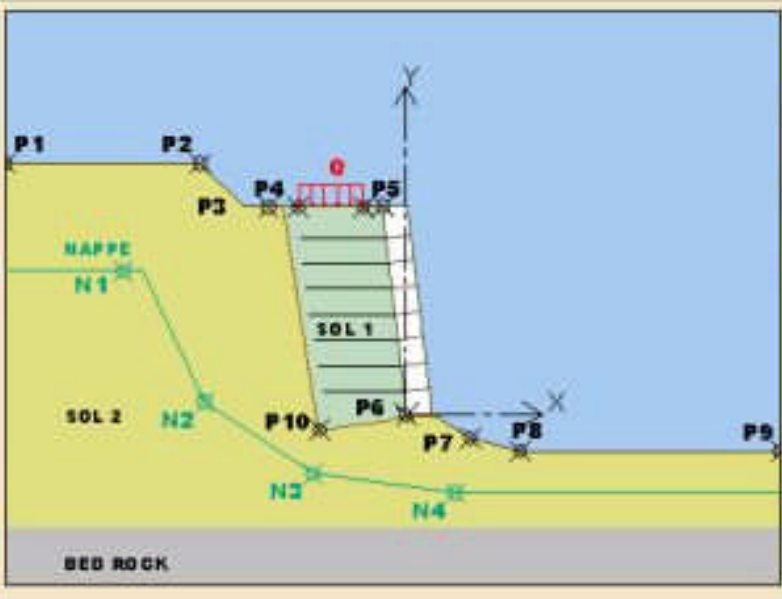
<p>Nom du projet :</p> <input type="text" value="exemple1"/>		<p>Commentaires :</p> <input type="text"/>
<p>Coordonnées des 5 premiers points définissant le talus : en mètres aide</p>		<p>Coordonnées des 5 points suivants définissant le talus : en mètres aide</p>
<p>P1 : x = <input type="text" value="-30"/> et y = <input type="text" value="15"/></p>		<p>P6 : x = 0 et y = 0 (repère)</p>
<p>P2 : x = <input type="text" value="-20"/> et y = <input type="text" value="15"/></p>		<p>P7 : x = <input type="text" value="2"/> et y = <input type="text" value="0"/></p>
<p>P3 : x = <input type="text" value="-15"/> et y = <input type="text" value="10"/></p>		<p>P8 : x = <input type="text" value="10"/> et y = <input type="text" value="-5"/></p>

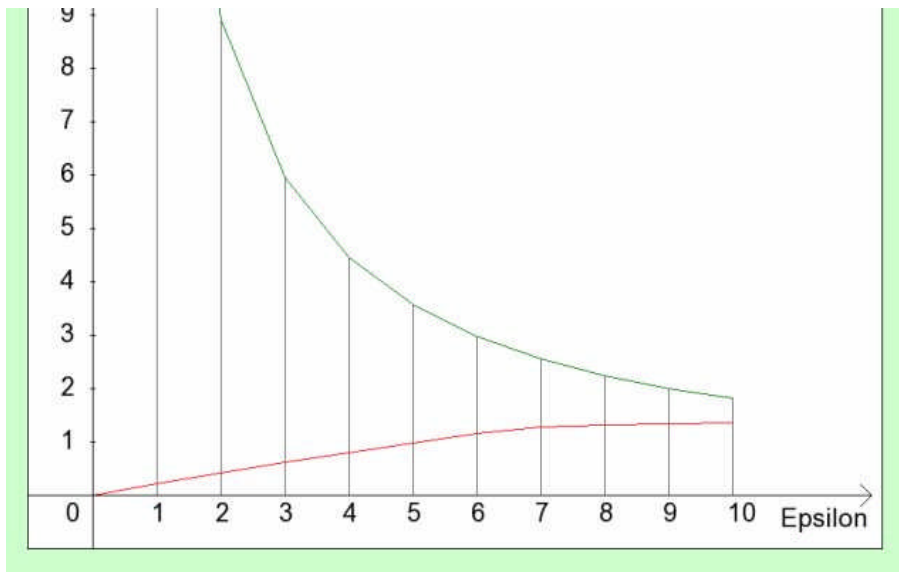
Schéma du talus

[\(retour à l'accueil\)](#)

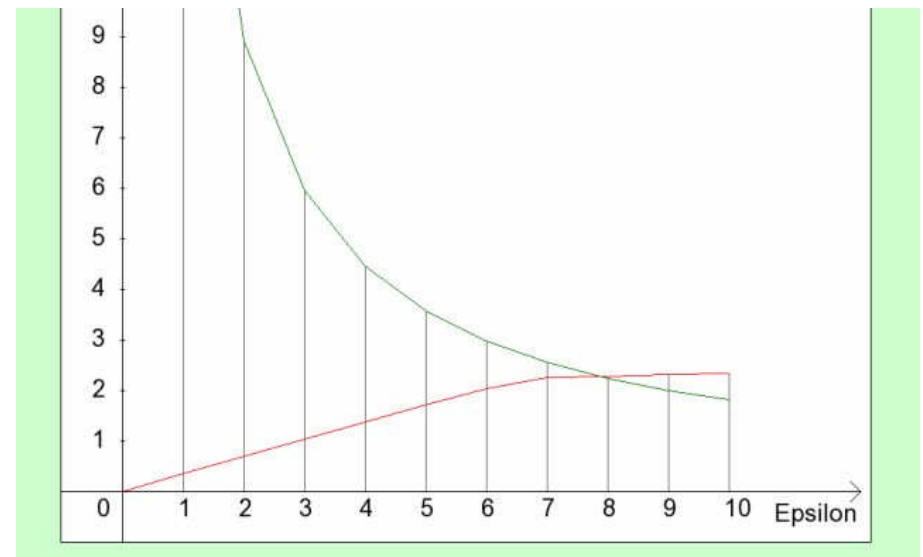
Programme de calcul (2)

P2 : x = <input type="text" value="-20"/> et y = <input type="text" value="15"/>	Schema du talus	P7 : x = <input type="text" value="2"/> et y = <input type="text" value="0"/>
P3 : x = <input type="text" value="-15"/> et y = <input type="text" value="10"/>	(retour à l'accueil)	P8 : x = <input type="text" value="10"/> et y = <input type="text" value="-5"/>
P4 : x = <input type="text" value="-9"/> et y = <input type="text" value="10"/>	EXEMPLES ▾	P9 : x = <input type="text" value="30"/> et y = <input type="text" value="-5"/>
P5 : x = <input type="text" value="-1"/> et y = <input type="text" value="10"/>	Soumettre	P10 : x = <input type="text" value="-6"/> et y = <input type="text" value="0"/>
Coordonnées des 4 points définissant la nappe : en mètres	N1 : x = <input type="text" value="-10"/> et y = <input type="text" value="3.5"/> N2 : x = <input type="text" value="-5"/> et y = <input type="text" value="1"/>	N3 : x = <input type="text" value="-3"/> et y = <input type="text" value="-2"/> N4 : x = <input type="text" value="5"/> et y = <input type="text" value="-6"/>
<u>type de géotextiles</u> BV30 ▾	Type de calcul mode0-pas de coeff ▾ kh séisme = <input type="text" value="0"/> g	<u>type de blocs</u> laromur50 ▾
<u>Longueur des nappes</u> <input type="text" value="5"/> m	<u>Nombre de blocs entre nappes</u> <input type="text" value="3"/>	<u>Retrait bloc</u> : <input type="text" value="0"/> m
<u>Surcharge</u>	Xg = <input type="text" value="0"/> Xd = <input type="text" value="0"/> Y = <input type="text" value="0"/> Q = <input type="text" value="0"/> kN/ml	$\alpha_1 = $ <input type="text" value="0"/> $^\circ$. $\alpha_2 = $ <input type="text" value="0"/> $^\circ$
<u>Paramètres géotechniques du sol en place</u>	γ_h : <input type="text" value="21"/> kN/m ³ Cohésion : <input type="text" value="0"/> kPa	frottement interne φ : <input type="text" value="30"/> $^\circ$
<u>Paramètres géotechniques du remblai</u>	γ_h : <input type="text" value="20"/> kN/m ³ Cohésion : <input type="text" value="0"/> kPa	frottement interne φ : <input type="text" value="30"/> $^\circ$

Interprétation



Avec 12 nappes



Avec 23 nappes