

Éléments sur la stabilité des pentes

Olivier Cuisinier

ENSG



Quelques exemples



Plan du cours

- Généralités
- Rupture plane
- Rupture rotationnelle
- Abaques
- Confortement / surveillance

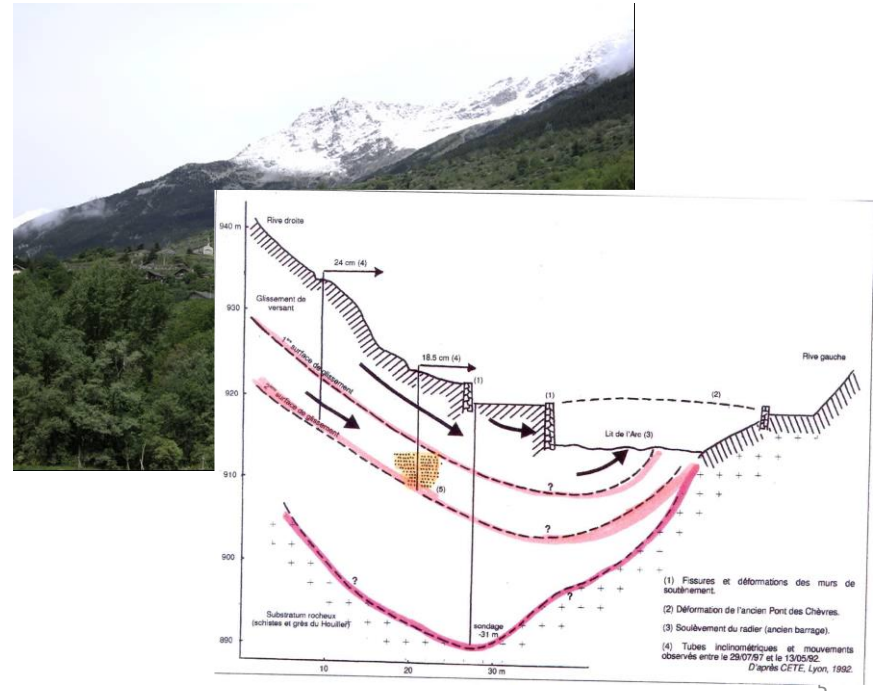
Quelques généralités

- **Définition :**

*Mouvement **gravitaire** de translation et/ou de rotation d'une partie du matériel d'un versant (terrains meubles ou rocheux), suite à une déstabilisation provoquée par des sollicitations extérieures, mobilisant sa résistance au **cisaillement** le long d'une **surface** de glissement et caractérisé par de **grands déplacements***

Quelques généralités

- Échelles des mouvements de terrain
 - De quelques m³ à quelques centaines de millions de m³ de matériau mobilisé
 - Vitesse lente (échelle géologique) à très rapide



Quelques généralités

- L'eau = facteur aggravant (poids + pression interstitielle + écoulement)

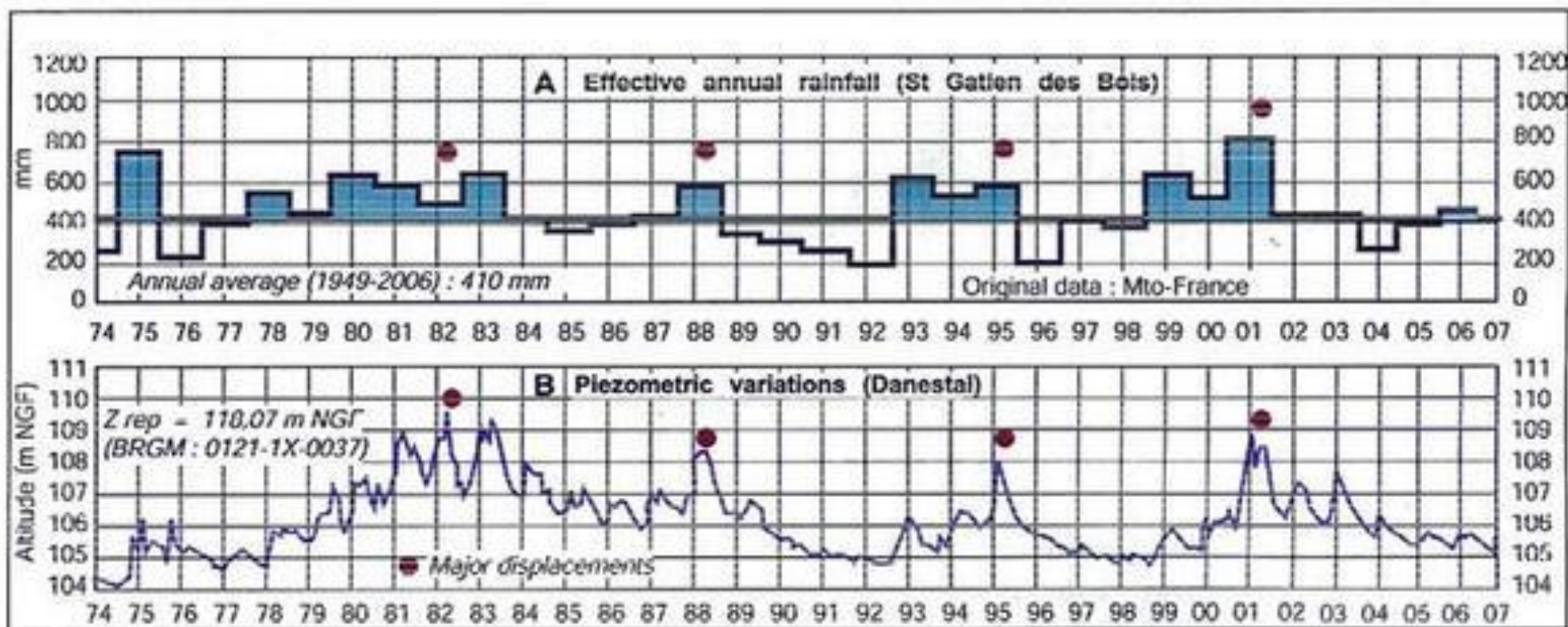


Figure 5 : Pluie efficace à St Gaten des Bois et variations piézométriques à Danestal entre janvier 1974 et septembre 2005 (d'après Maquaire, 2005).

Quelques généralités

- Échelles des mouvements de terrain
 - De quelques m³ à quelques centaines de millions de m³ de matériau mobilisé
 - Vitesse lente (échelle géologique) à très rapide
- Moteurs
 - Principaux = la pesanteur + relief
 - Séisme
 - Climat
 - L'érosion
- L'eau = facteur aggravant (poids + pression interstitielle + écoulement)
- Pentes naturelles ou artificielles

Différents types de mouvements de terrain

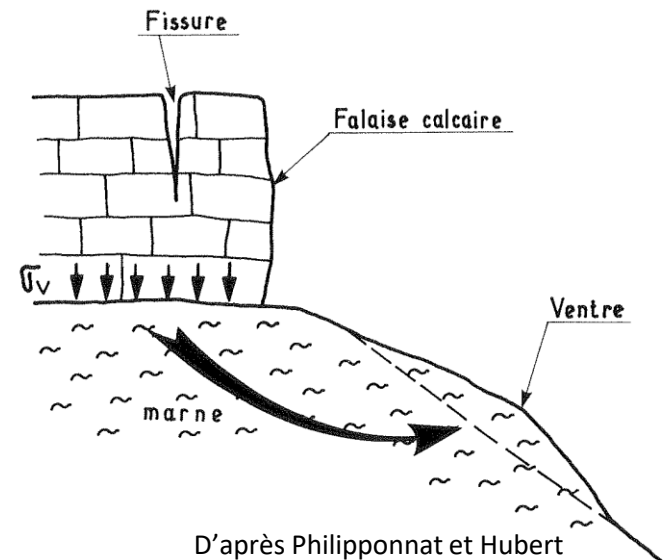
- Les écroulements

- Concerne les massifs rocheux
- Plus ou moins fracturés
- Rôle primordial de la géologie (pendage, fracturation, stratigraphie, etc.)



- Fluage

- Mouvements lents dans un massif de sol proche de la rupture



Différents types de mouvements de terrain

- Glissement

- L
- C
- C

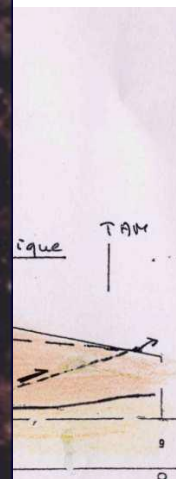


Limon argileux

Marr

Argi

glaucconneux

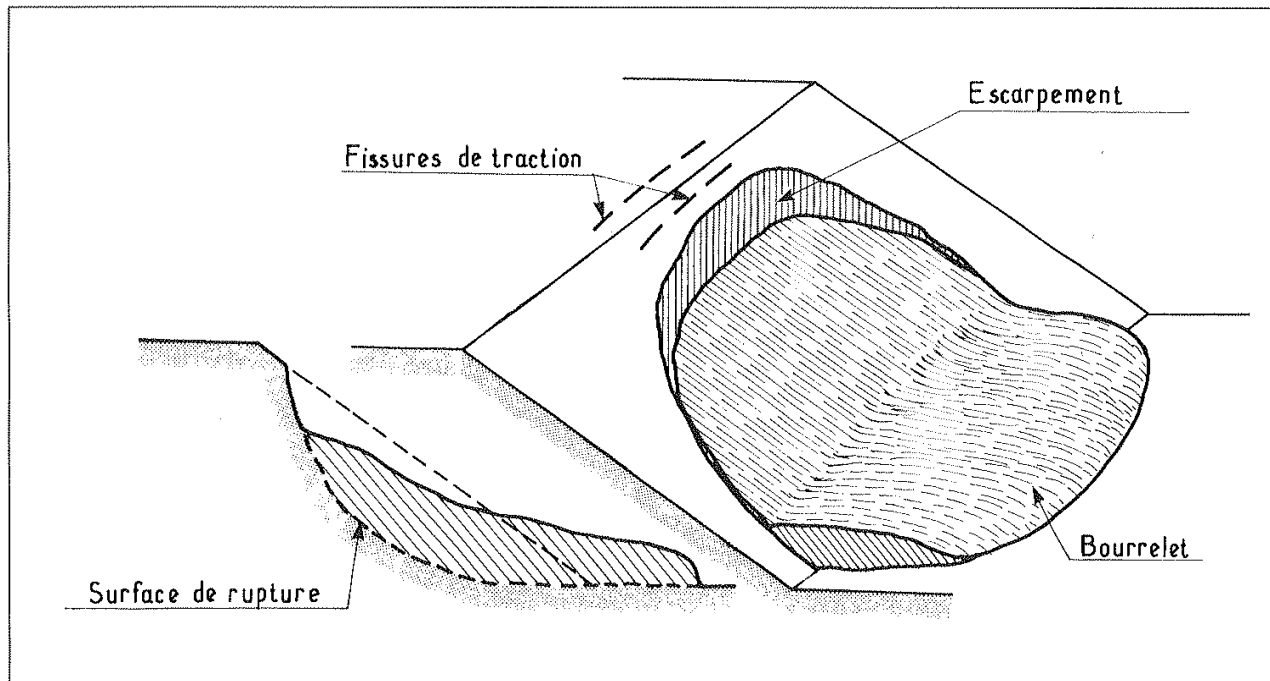


ubois, Cerema

Murazzano novembre 1994 - Italie

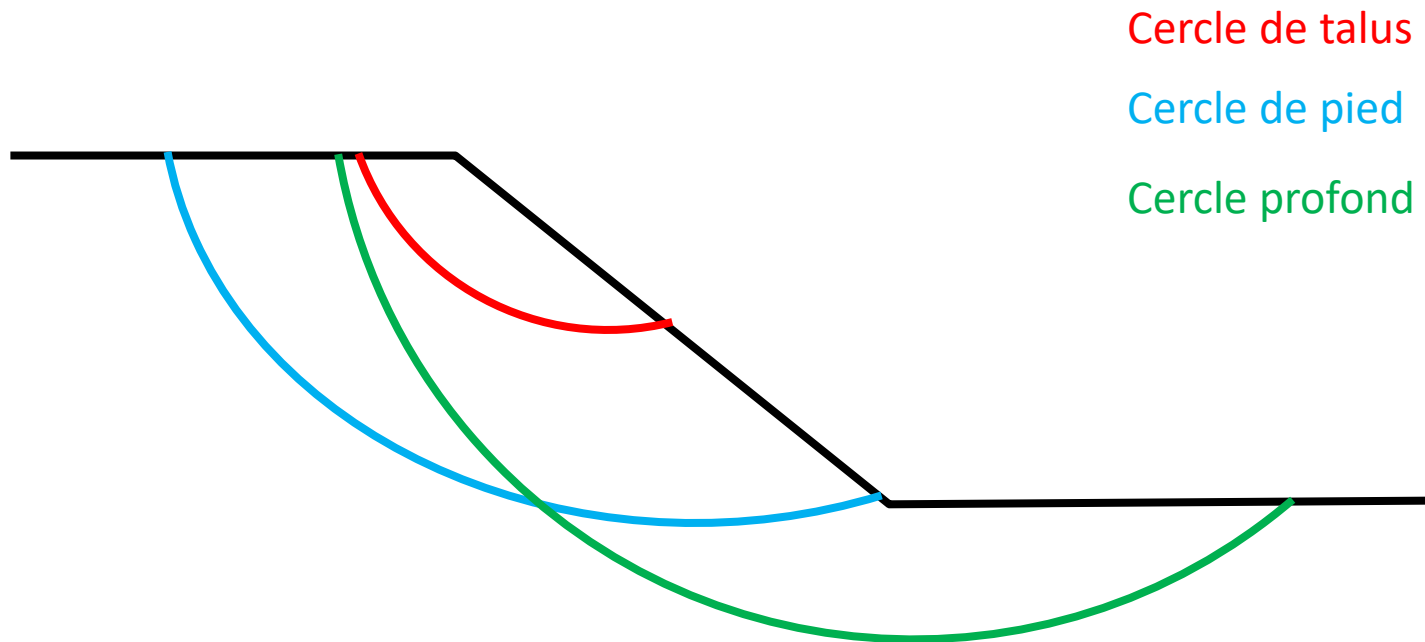
Différents types de mouvements de terrain

- Glissement rotationnel simple (1/2)
 - La surface de glissement peut être assimilée à un arc de cercle en coupe
 - Concerne les massifs de sol relativement homogène



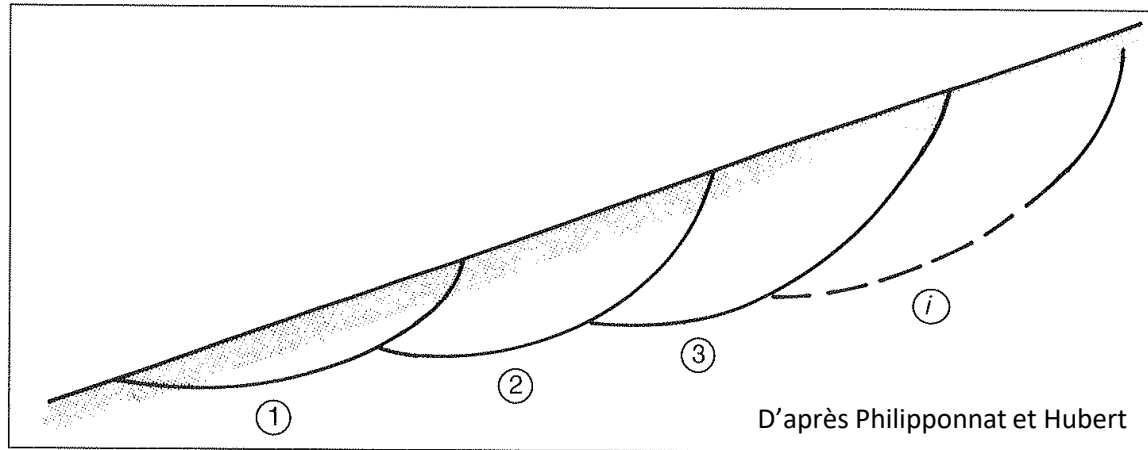
Différents types de mouvements de terrain

- Glissement rotationnel simple (2/2)
 - Talus en déblai ou remblai



Différents types de mouvements de terrain

- Glissement complexe
 - Combinaison des précédents



Exemple : plusieurs glissements rotationnels successifs



Comment aborder l'étude de stabilité ?

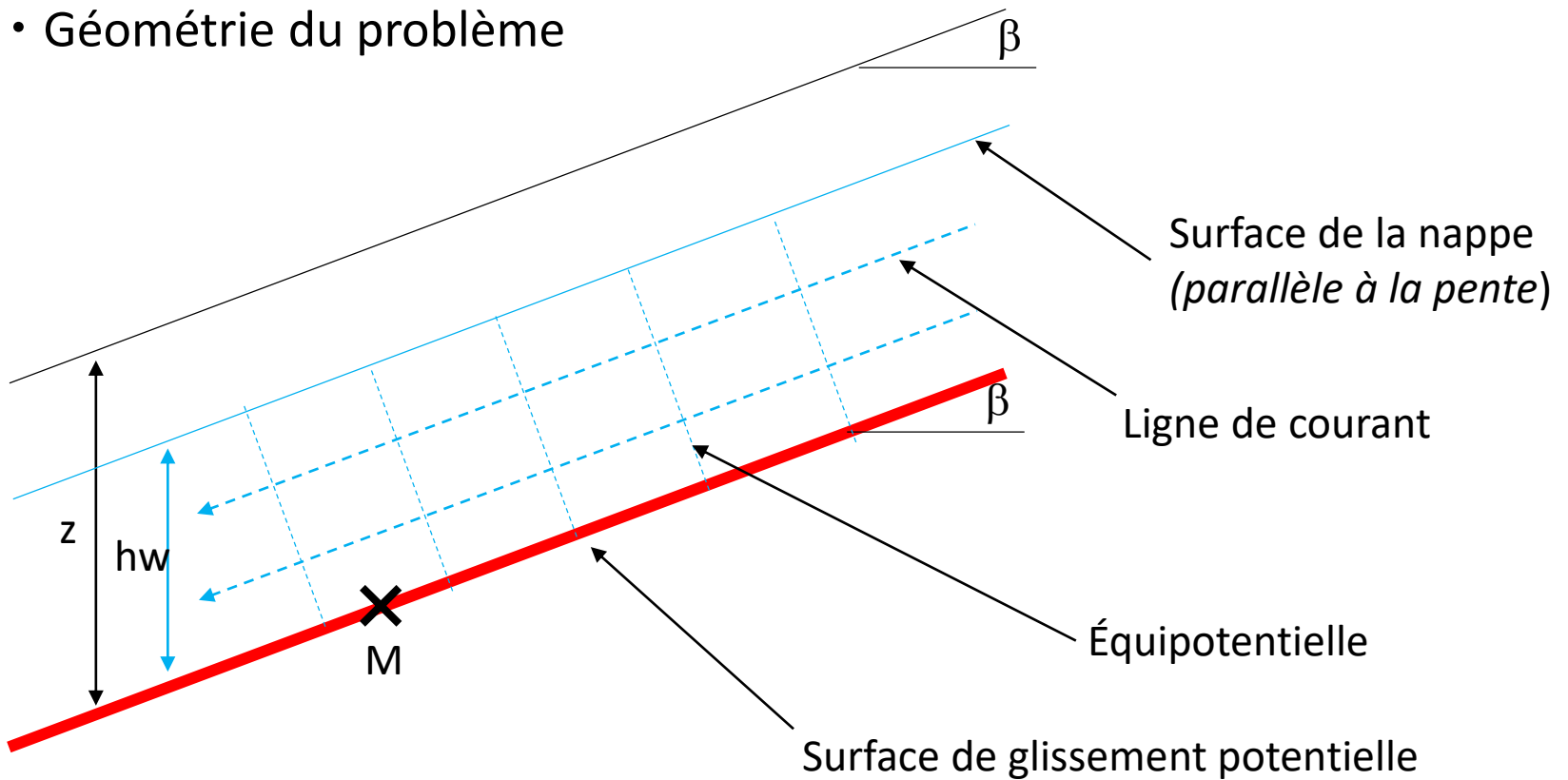
- 1. Rechercher le(s) mécanisme(s) de glissement
 - Plan
 - Circulaire
 - « Quelconque »
- 2. La connaissance de la géologie dans le cas de pentes naturelles est indispensable
- 3. L'hydrogéologie est fondamentale
- 4. Comment évolue le glissement dans le temps ?

Notion de facteur de sécurité

- Plusieurs approches
 - Rapport des forces résistantes sur les forces motrices
 - Rapport des moments moteurs sur les moments résistants
 - Par comparaison à une dimension donnée
 - Rapport à la résistance mobilisable à la résistance utile

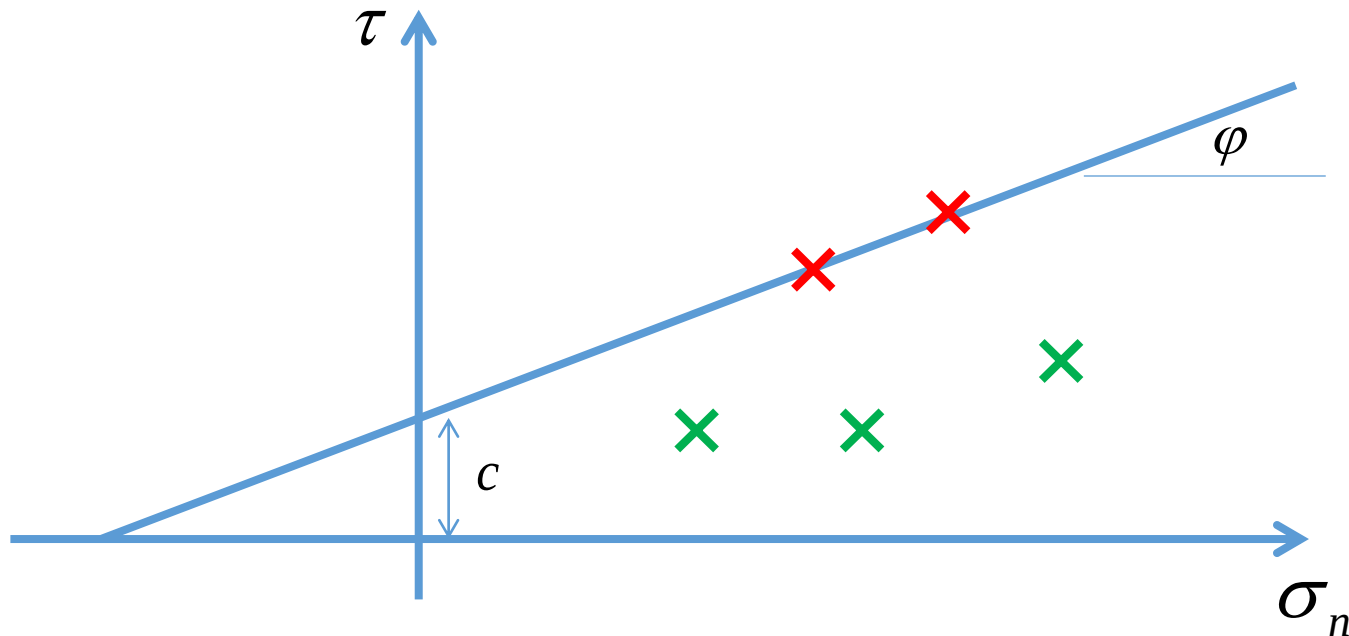
Stabilité en rupture plane

- Géométrie du problème



Stabilité en rupture plane

- Comment évaluer si une pente est stable ?
 - ➔ Une solution : utilisation du critère de rupture du matériau
 - ➔ Si l'état de contrainte en M est en dessous du critère de rupture (cas 1), la pente est stable,
 - ➔ Si l'état de contrainte en M satisfait au critère de rupture (cas 2), il y a rupture, situation instable



Il faut donc être capable de calculer l'état de contrainte en M !

Stabilité en rupture plane

- Calcul de l'état de contrainte en M

- Contrainte verticale en M

- $\sigma_v = ((z - h_w)\gamma + h_w\gamma_{sat})\cos\beta$

- Pression interstitielle en M (cf. TD)

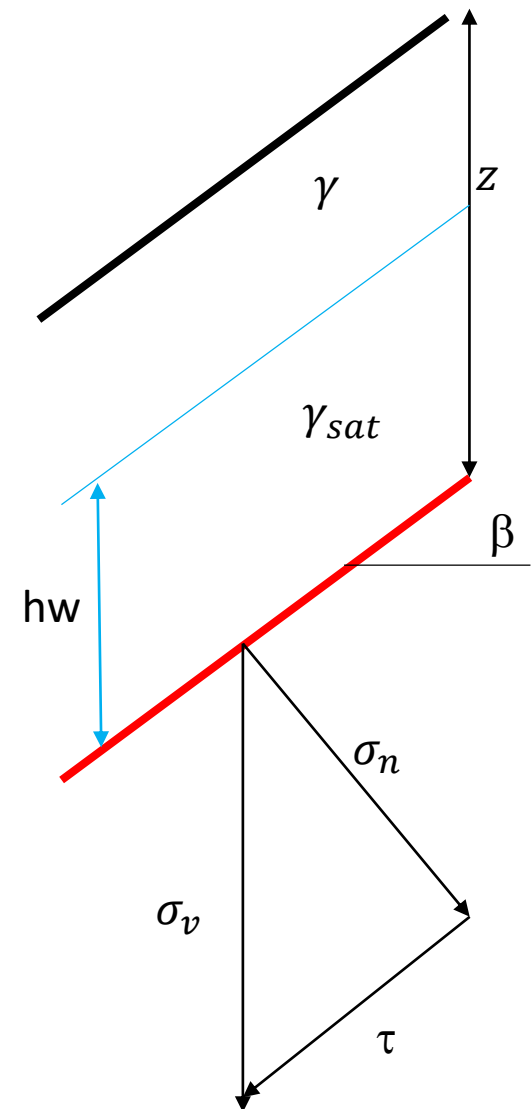
- $u_m = h_w \times \cos^2\beta \times \gamma_w$

- Contrainte normale totale en M

- $\sigma_n = ((z - h_w)\gamma + h_w\gamma_{sat})\cos^2\beta$

- Contrainte tangentielle en M

- $\tau = ((z - h_w)\gamma + h_w\gamma_{sat})\cos\beta \times \sin\beta$



Stabilité en rupture plane

- Coefficient de sécurité global

$$F = \frac{\text{Contrainte de cisaillement "s'opposant au mouvement"}}{\text{Contrainte de cisaillement motrice}}$$

← Critère de rupture
← Due au poids des terrains

$$F = \frac{c' + \sigma'_n \tan \varphi'}{\tau} = \frac{c' + \overbrace{[(z - h_w)\gamma + h_w \gamma_{sat}] \cos^2 \beta}^{\sigma_n \text{ en } M} - \overbrace{h_w \times \cos^2 \beta \times \gamma_w}^{u \text{ en } M}}{((z - h_w)\gamma + h_w \gamma_{sat}) \cos \beta \times \sin \beta} \tan \varphi'$$

Stabilité en rupture plane

- Cas particulier 1 : sol purement frottant, sans nappe

$$F = \frac{\tan\varphi'}{\tan\beta}$$

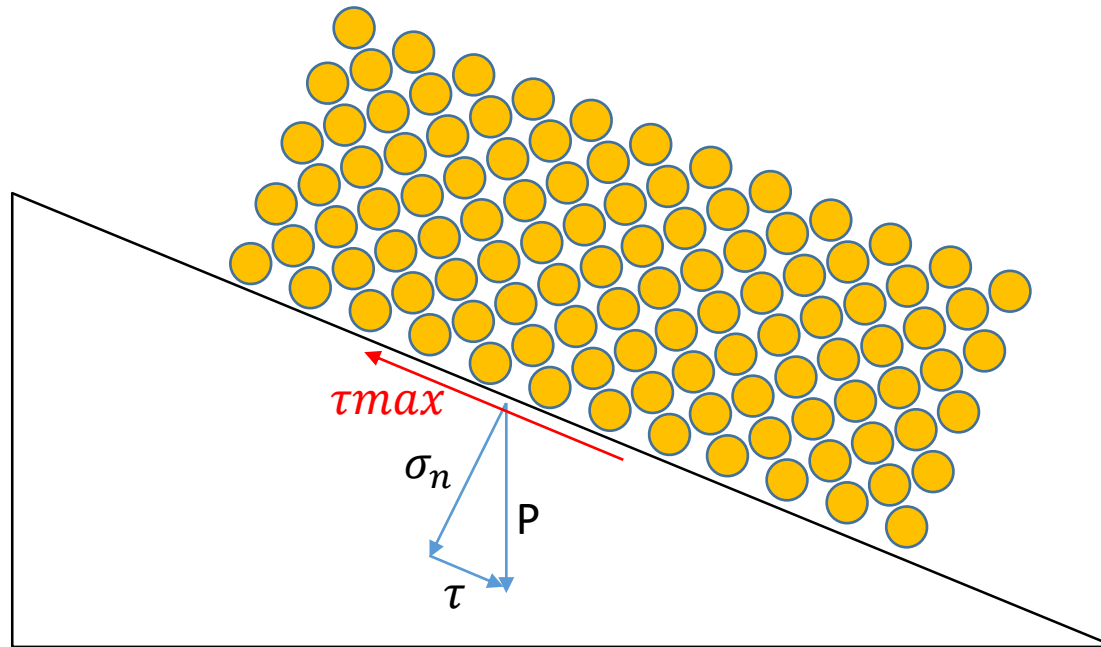
Pour $F = 1$, on a $\beta = \phi \rightarrow$ angle de talus naturel

- Cas particulier 2 : sol purement frottant, nappe affleurante

$$F = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_{sat}} \frac{\tan\varphi'}{\tan\beta}$$

Si $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3 \rightarrow F$ est divisé par 2 par rapport au cas sans nappe (rôle de l'écoulement)

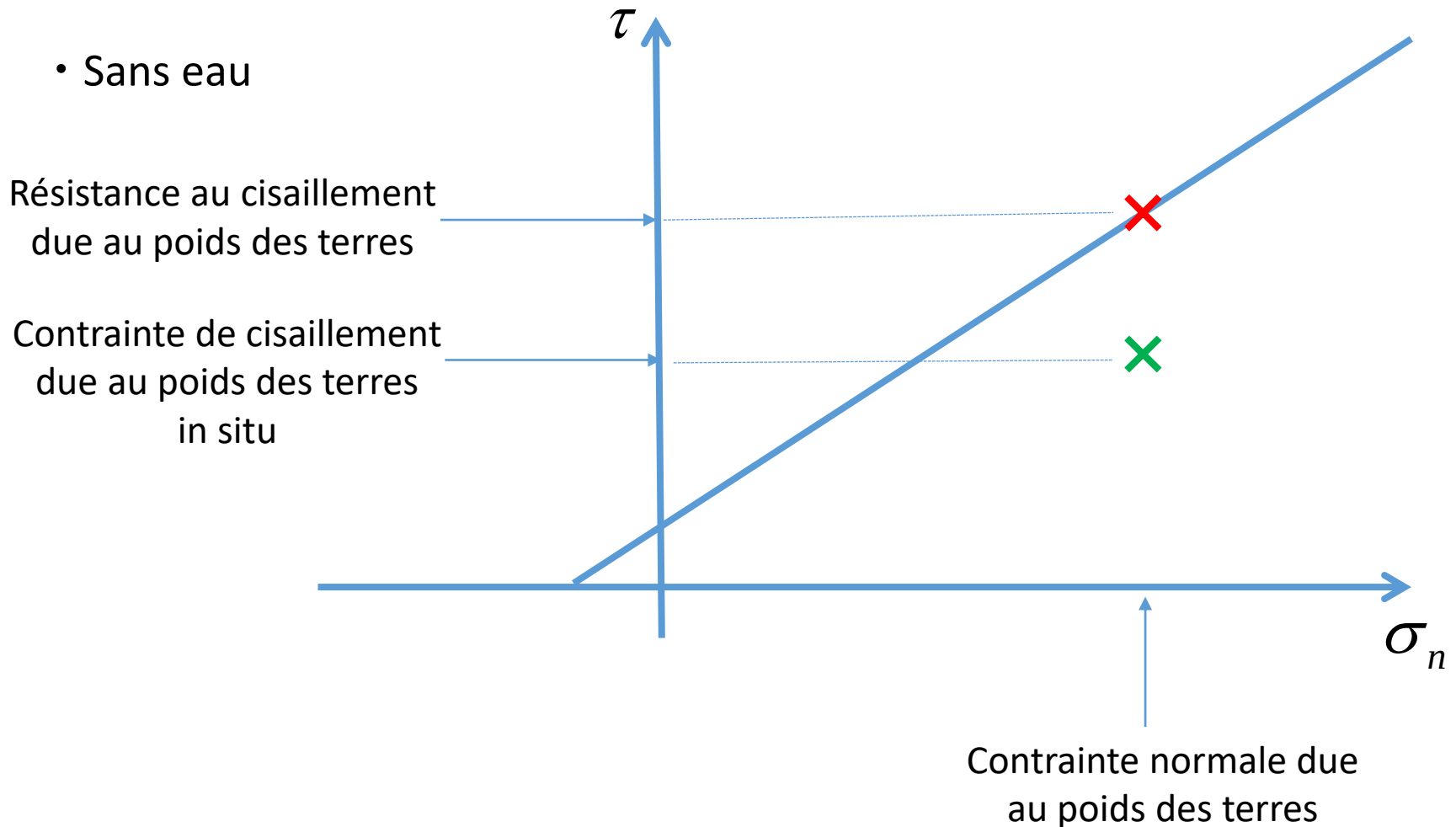
Rôle de l'eau : cas d'un glissement plan



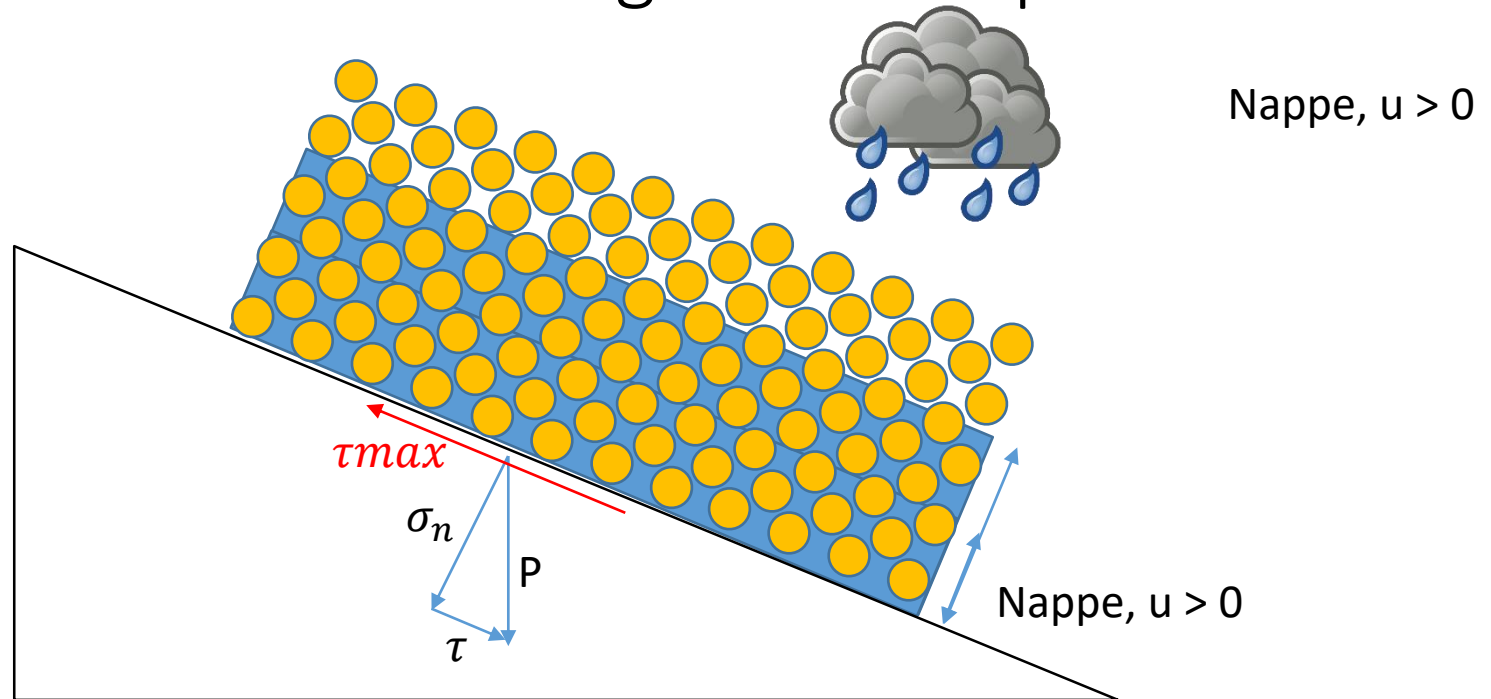
$$\text{Rappel : } F = \frac{\text{résistance au cisaillement du sol}}{\text{résistance au cisaillement motrice}} = \frac{\tau_{max}}{\tau_m} = \frac{c' + \sigma'_n \tan \varphi'}{\tau}$$

Rôle de l'eau : cas d'un glissement plan

- Sans eau



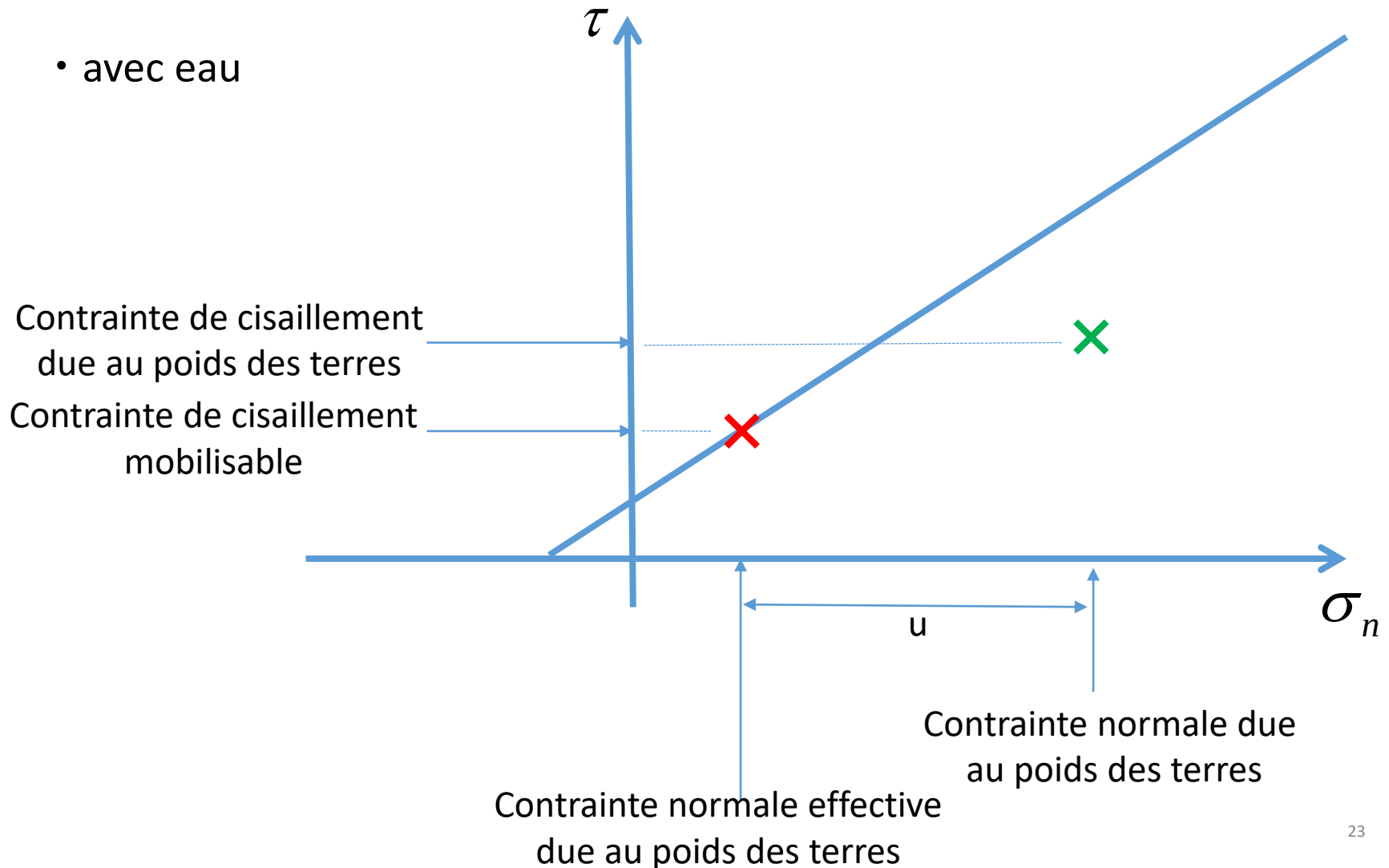
Rôle de l'eau : cas d'un glissement plan



$$\text{Rappel : } F = \frac{\text{résistance au cisaillement du sol}}{\text{résistance au cisaillement motrice}} = \frac{\tau_{max}}{\tau_m} = \frac{c' + \sigma'_n \tan \varphi'}{\tau}$$

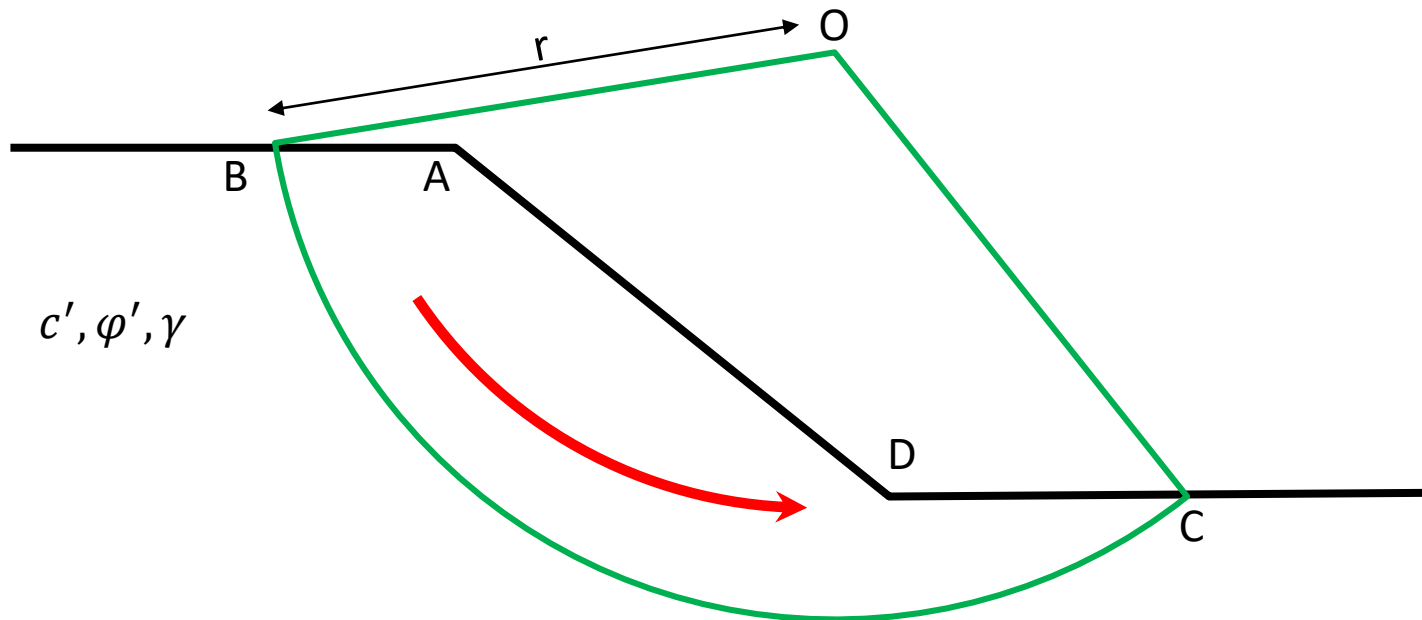
Rôle de l'eau : cas d'un glissement plan

- avec eau



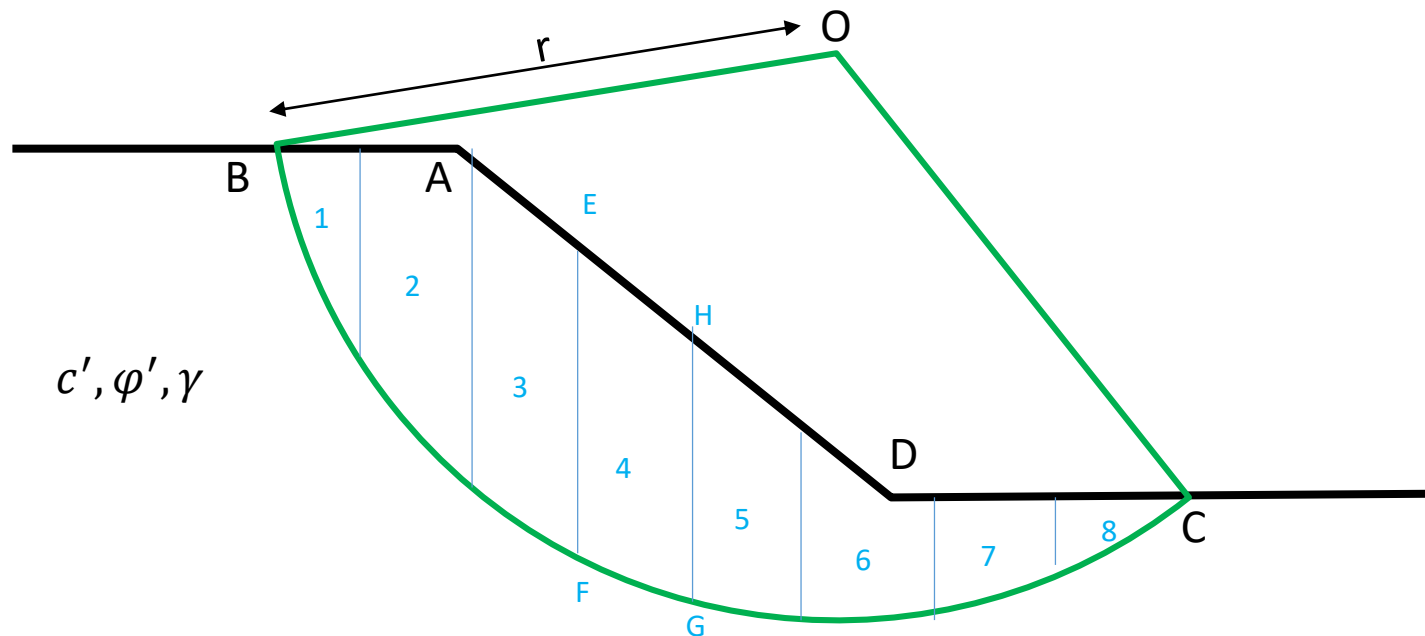
Rupture rotationnelle

- Stabilité selon un cercle donné de centre O et de rayon r
- L'arc BC représente la surface de rupture supposée
- La masse de sol ABCD est donc en mouvement
- Objectif = vérifier la stabilité pour cette surface potentielle de glissement



Rupture rotationnelle : méthode des tranches

- Principe = découpage en tranches verticales de la masse de sol
- Déformation planes



Rupture rotationnelle

- Base de l'étude : définition d'un facteur de sécurité global du massif basé sur les moments
- $$F = \frac{\text{Somme des moments résistants } (\Rightarrow \text{résistance mobilisable à la base d'une tranche})}{\text{Somme des moments moteurs } (\Rightarrow \text{poids des tranches})}$$
- Hypothèse : le facteur de sécurité est identique dans tout le massif, donc le même pour chaque tranche

Rupture rotationnelle : méthode des tranches

- Inventaires des forces en jeu:

- Le poids de la tranche P

$$P \approx \gamma \times h \times b$$

- La réaction du sol R sous l'arc FG (longueur l)

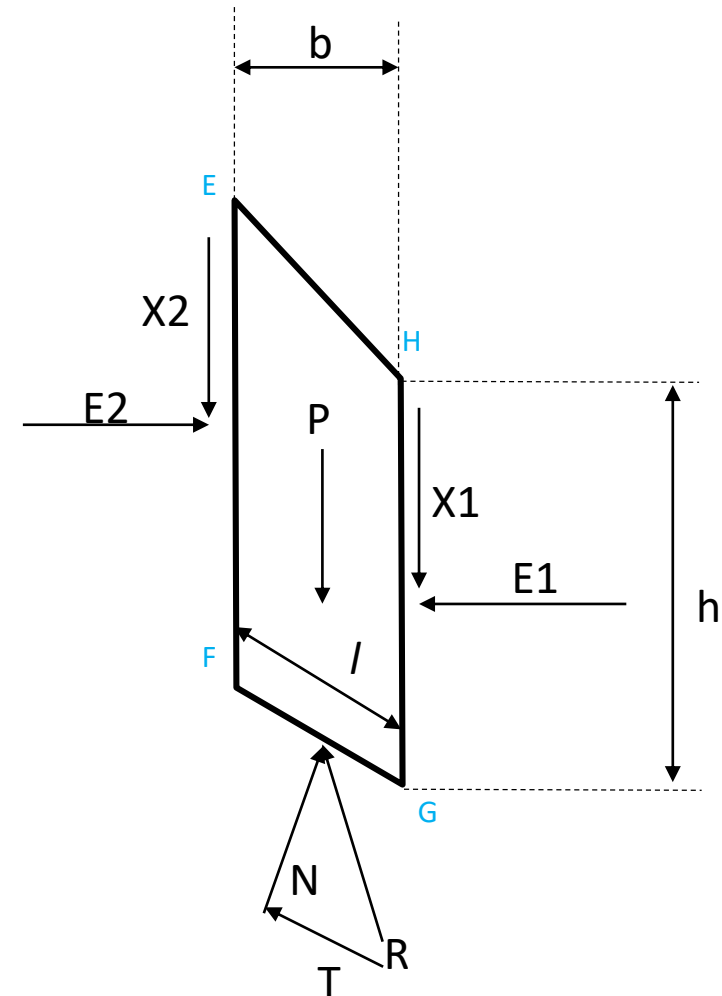
- Normale : $N = \sigma_N \times l$
- Tangentielle : $T = \tau \times l$

- Les réactions du sol en amont et en aval de la tranche

- Horizontales = E1 et E2
- Verticales = X1 et X2

- Possibilités de forces supplémentaires

- Surcharge (non représentée)



Rupture rotationnelle : méthode des tranches

- Inventaires des forces en jeu en présence d'eau :

- Le poids de la tranche P

$$P = \gamma_{sat} \times h \times b$$

- La réaction du sol R sous l'arc FG

- Normale effective : $N' = \sigma'_N \times l$

- Eau : $U = u \times FG$

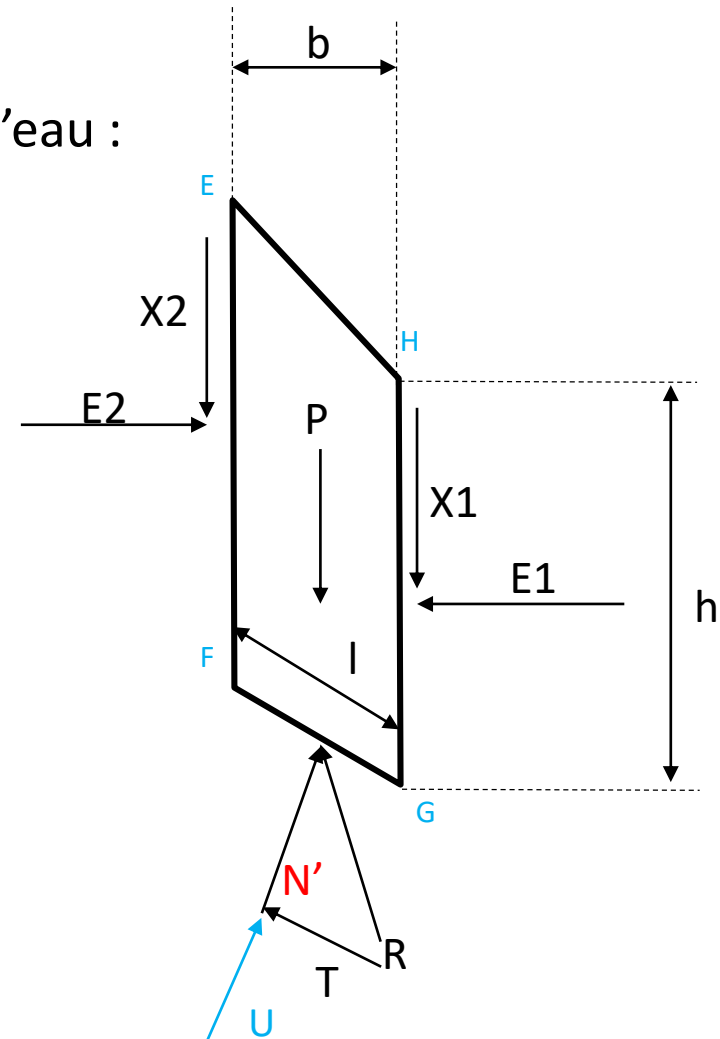
- Tangentielle : $T = \tau_{max} \times l$

- Les réactions du sol en amont et en aval de la tranche

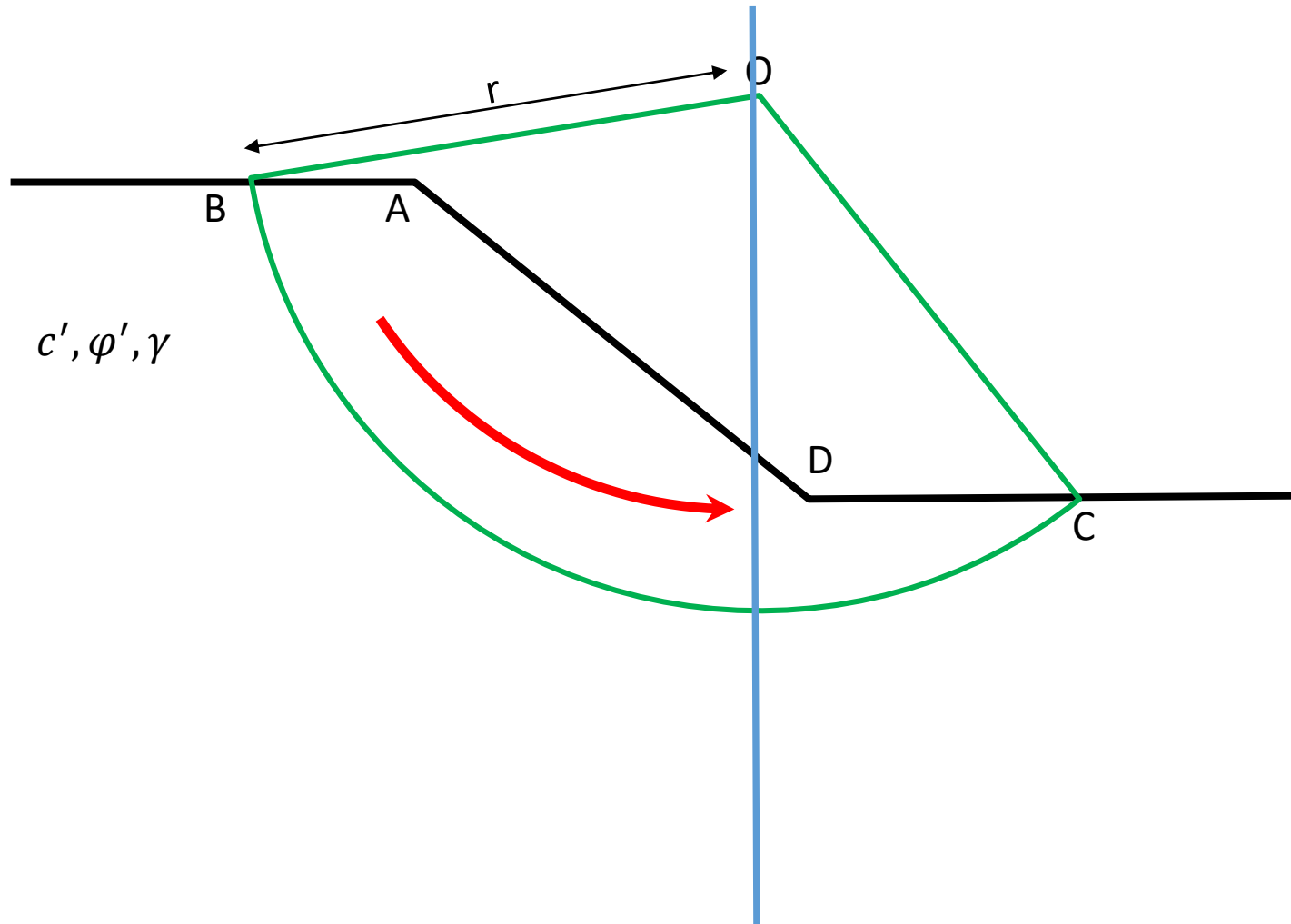
- Horizontales = E1 et E2
- Verticales = X1 et X2

- Possibilités de forces supplémentaires

- surcharge

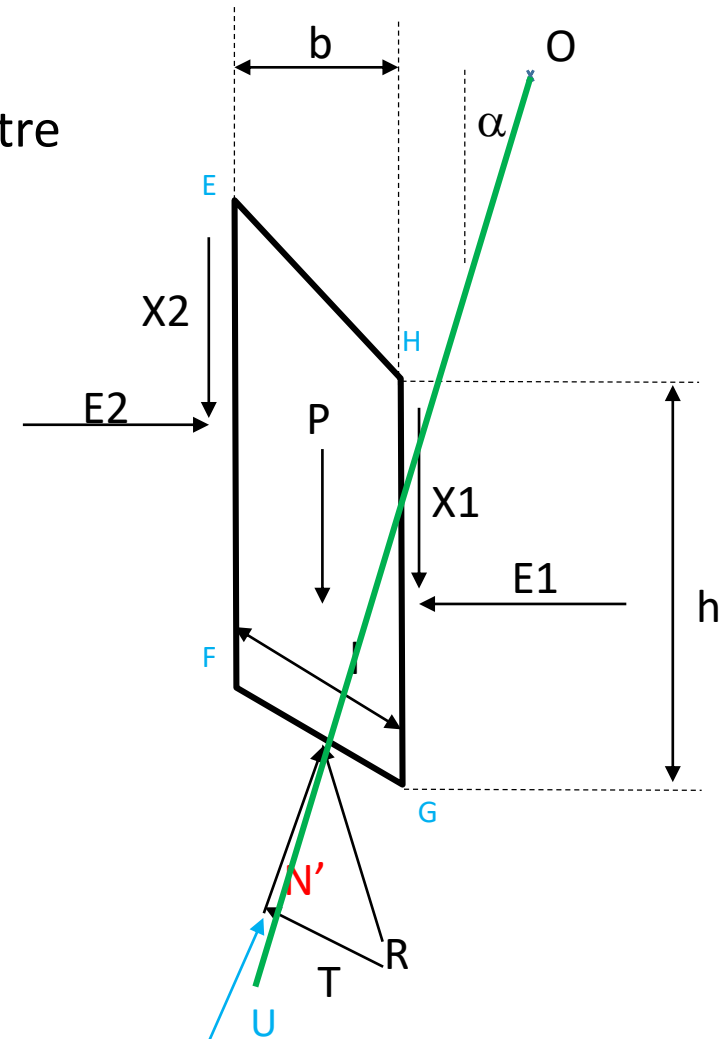


Rupture rotationnelle



Rupture rotationnelle : méthode des tranches

- Pour étudier l'équilibre, par rapport au centre O , on peut identifier:
 - Moment moteur :
 - poids des terres qui tend à provoquer le glissement
 - Moments résistants
 - Réaction du sol sous-jacent
 - Réaction des tranches $n-1$ et $n+1$



Rupture rotationnelle : méthode des tranches

- Pour chaque tranche, **à l'équilibre**, la somme des moments des forces de cisaillement à la base doit être égale au moment induit par la masse totale de sol :

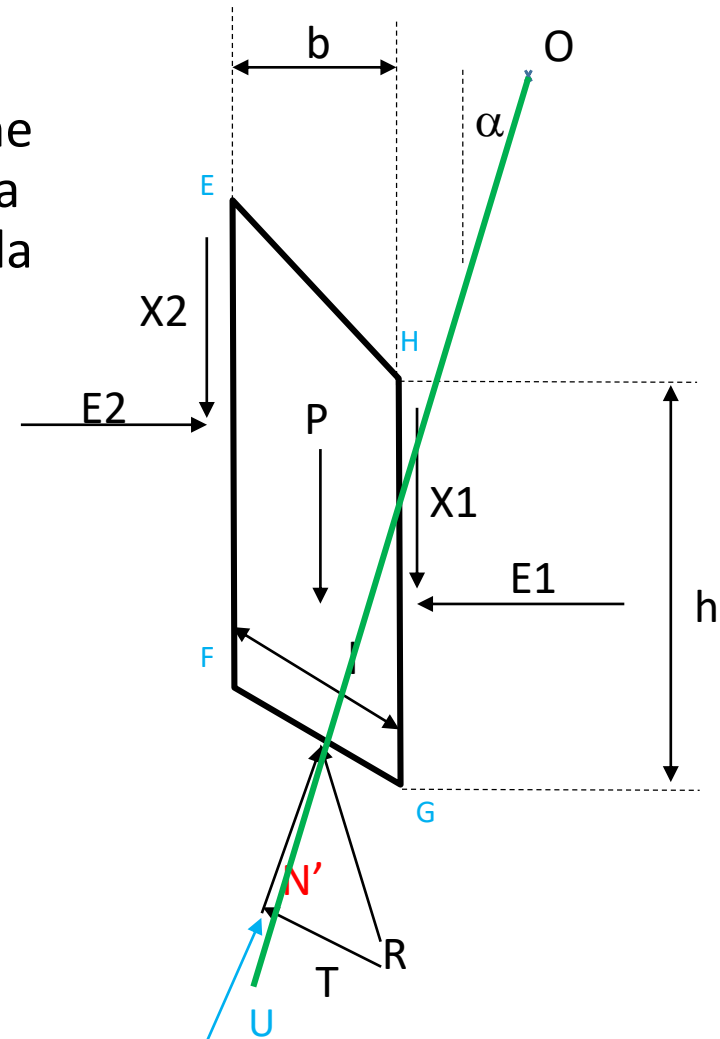
- $\sum Tr = \sum P \times r \times \sin\alpha$

- On sait que

- $T = \tau_{max} \times l = \frac{\tau_f}{F} \times l$

- donc

- $\sum \frac{\tau_f}{F} \times l = \sum P \times \sin\alpha$



Rupture rotationnelle : méthode des tranches

- Pour chaque tranche, à l'équilibre, la somme des moments des forces de cisaillement à la base doit être égale au moment induit par la masse totale de sol :

- $\sum Tr = \sum P \times r \times \sin\alpha$

- On sait que

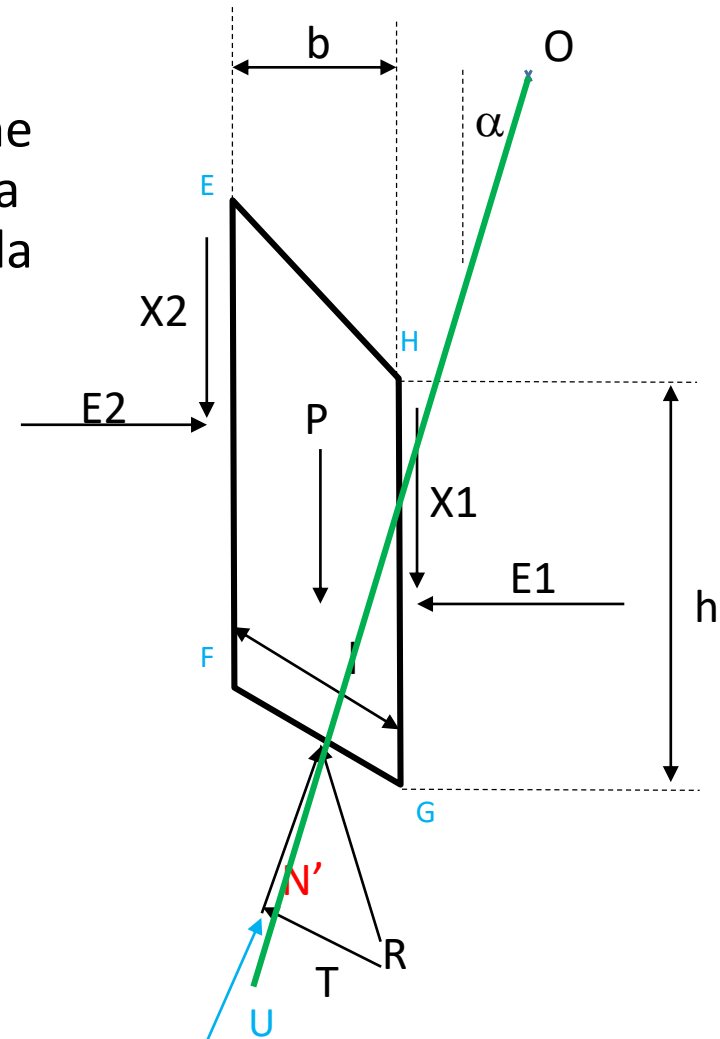
- $T = \tau_m \times l = \frac{\tau_{max}}{F} \times l$

- donc

- $\sum \frac{\tau_{max}}{F} \times l = \sum P \times \sin\alpha$

- D'où

- $F = \frac{\sum \tau_{max} \times l}{\sum P \times \sin\alpha}$



Rupture rotationnelle : méthode des tranches

- Si l'on utilise le critère de rupture de Mohr Coulomb, il vient :

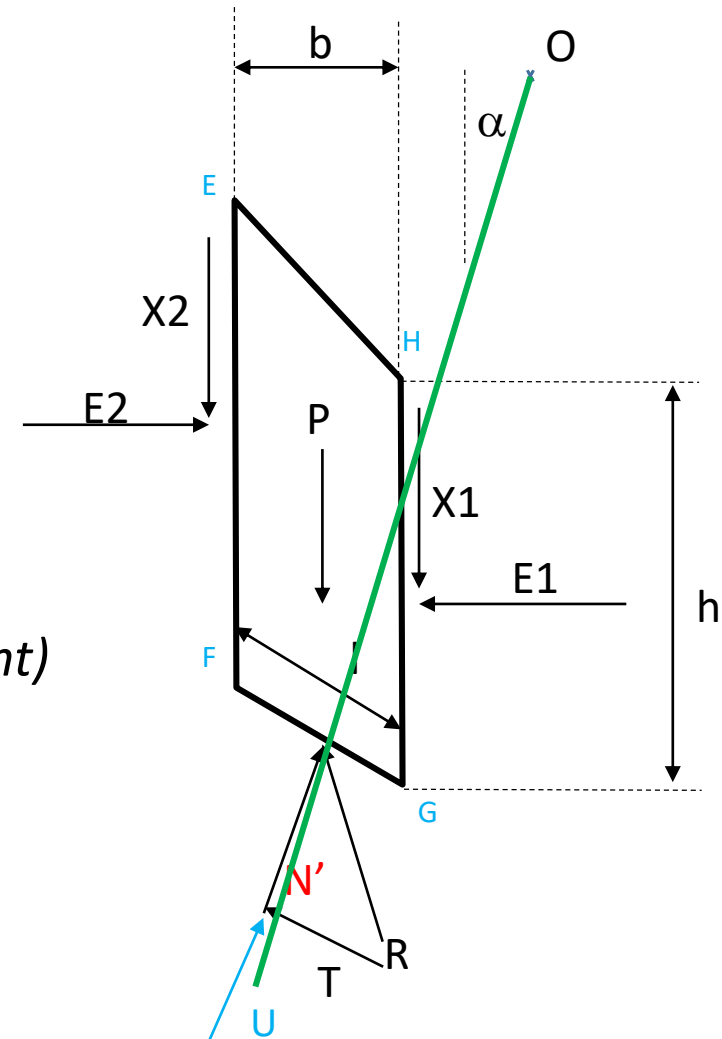
$$F = \frac{\sum (c' + \sigma' \tan \varphi') l}{\sum P \sin \alpha}$$

ou

$$F = \frac{c' L + \tan \varphi' \sum N'}{\sum P \sin \alpha}$$

L = longueur de l'arc BC (surface de glissement)

- ➔ Le système est indéterminé
- ➔ Des hypothèses sur X et E sont indispensables pour résoudre le système
 - ➔ Fellenius
 - ➔ Bishop



Rupture rotationnelle : Fellenius

- Hypothèse de Fellenius: la résultante des forces agissants entre les tranches est nulle

- La réaction du sol ne dépend donc que du poids

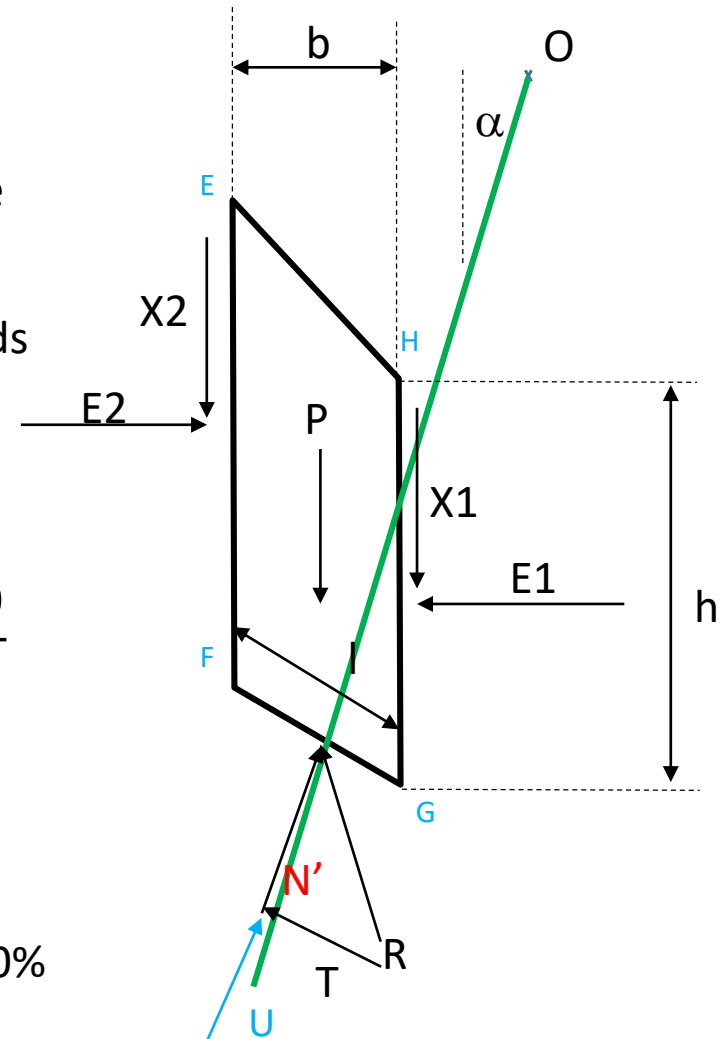
$$\rightarrow N' = W \cos \alpha - u \times l$$

- Le facteur de sécurité devient donc

$$F = \frac{c' \times L + \tan \varphi' \times \sum (P \cos \alpha - u \times l)}{\sum P \sin \alpha}$$

- Remarque

- Donne un facteur de sécurité minimal
- Sous estime le facteur de sécurité entre 5 et 20%
- Pas utilisée en pratique courante

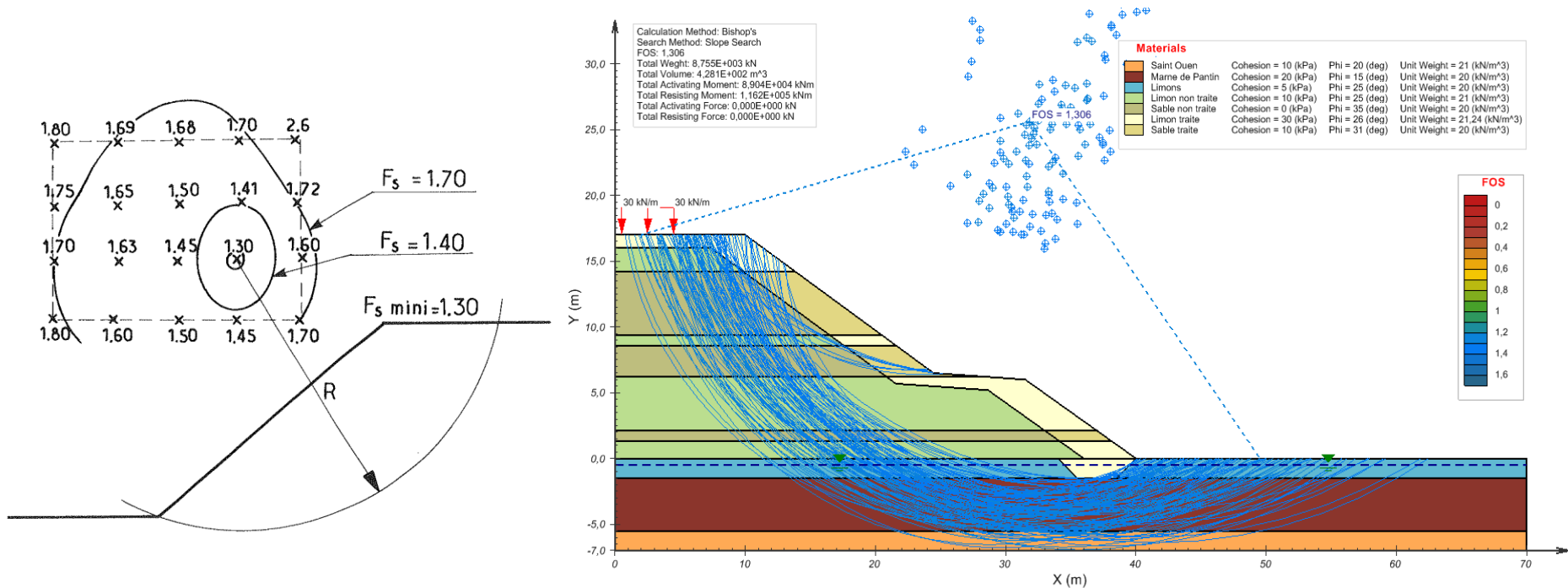


Rupture rotationnelle

- Il existe de nombreuses autres méthodes de tranches qui permettent d'estimer le facteur de sécurité
- Spencer = les forces d'interaction entre les tranches sont prises en compte
- Janbu = idem avec une hypothèse sur le point d'application de ces forces
- Morgenstern & Price = idem Spencer, l'orientation des forces entre blocs varie le long du glissement

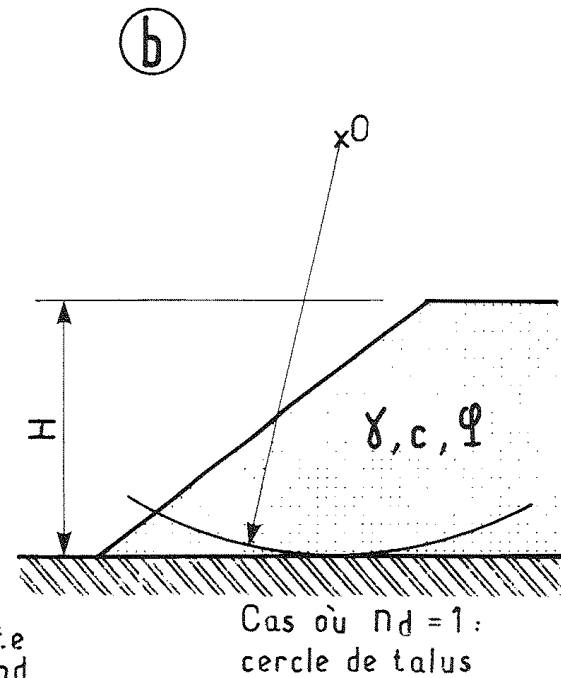
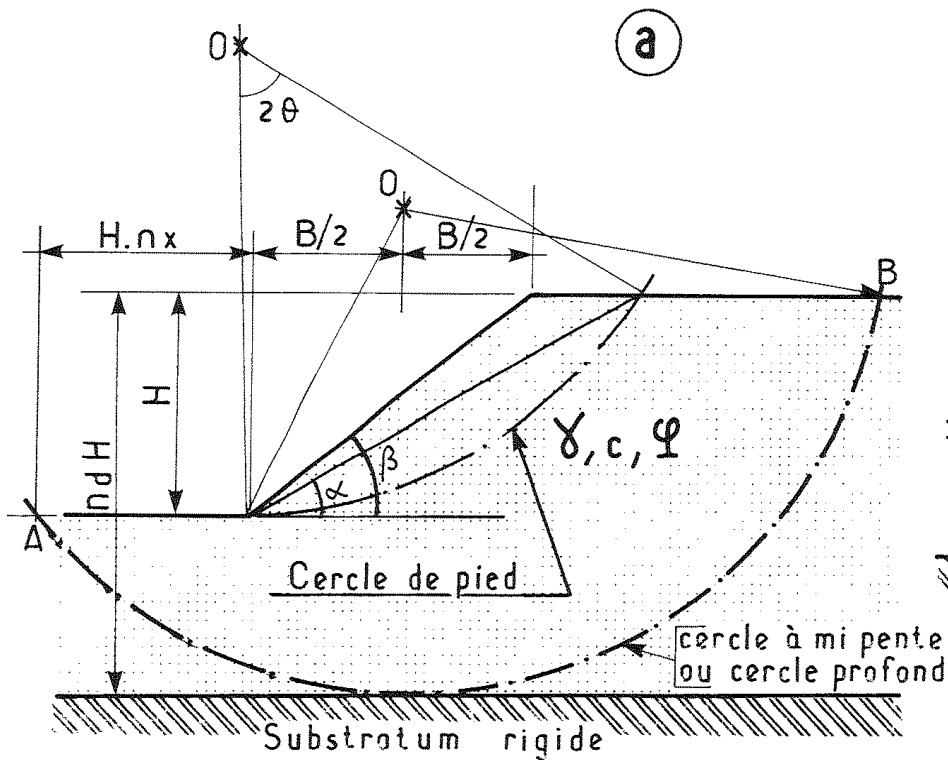
Recherche du facteur de sécurité minimal

- Différents cercles sont testés.



Résolution par abaque

- Abaque de Taylor



D'après Philipponnat et Hubert

Résolution par abaque : abaque de Taylor

- Hypothèses
 - Sol homogène purement cohérent
 - Poids volumique γ
 - Angle de frottement nul

- Définition du coefficient de sécurité

$$F = \frac{cL}{\sum T}$$

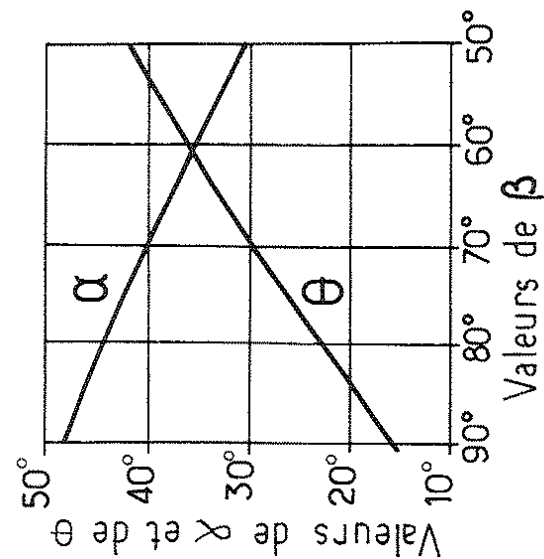
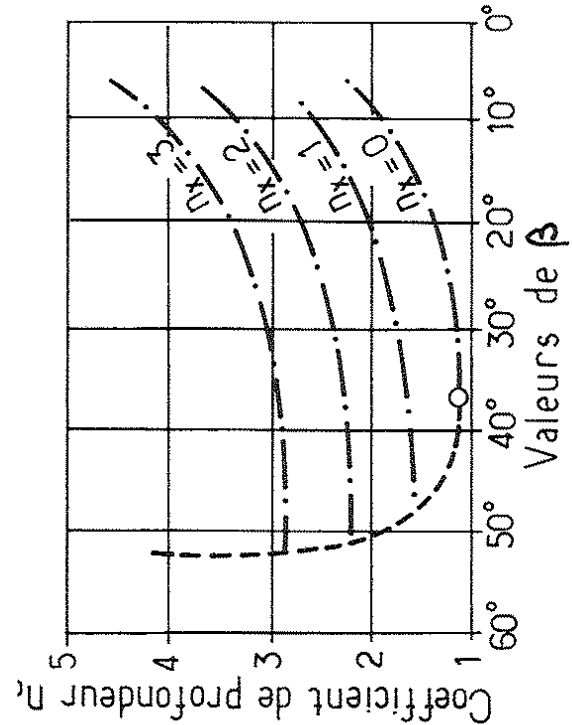
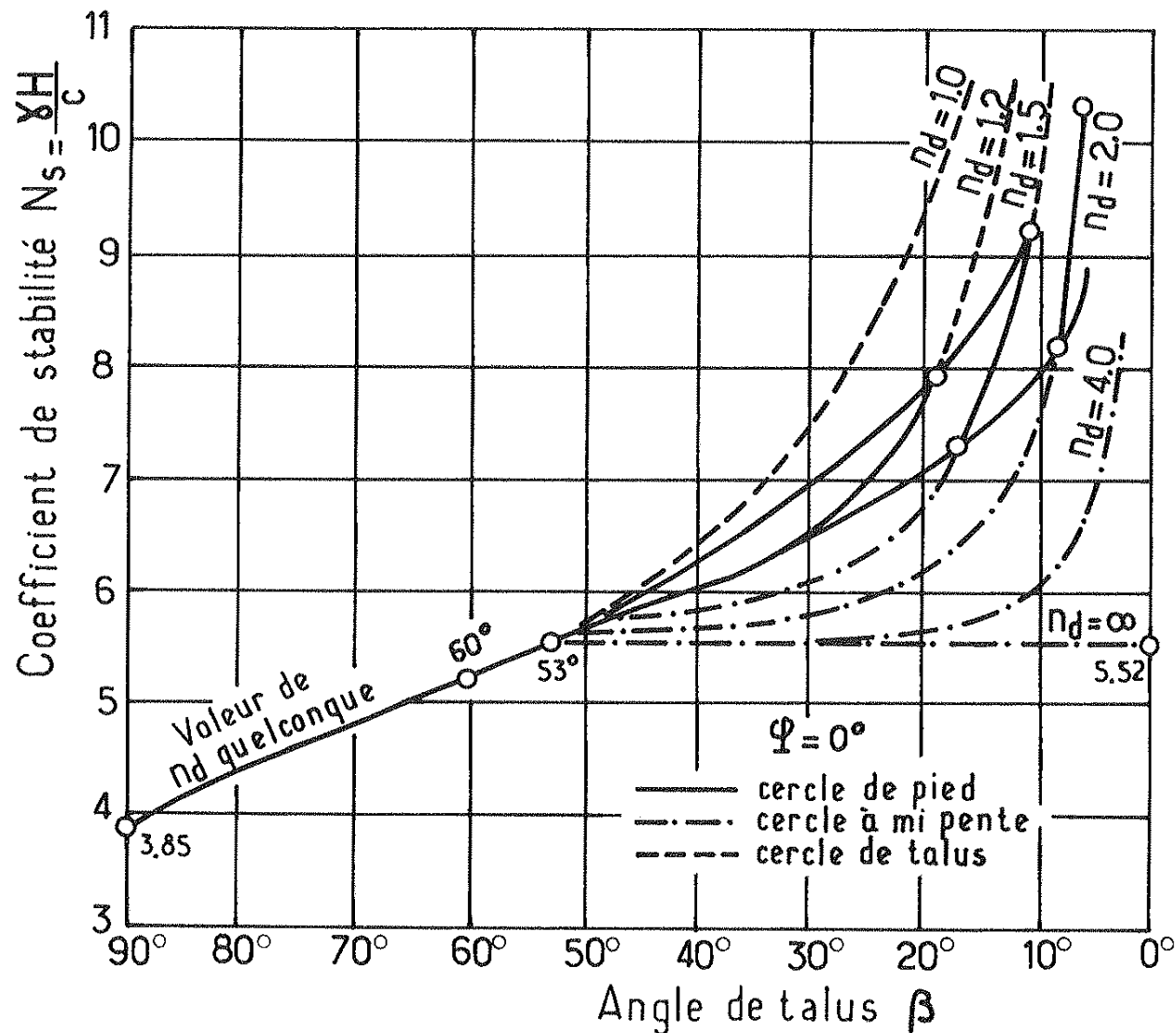
- Or L est proportionnel à H et T au poids

$$F = f\left(\frac{\gamma H}{c}\right)$$

- Introduction du coefficient de stabilité, adimensionnel

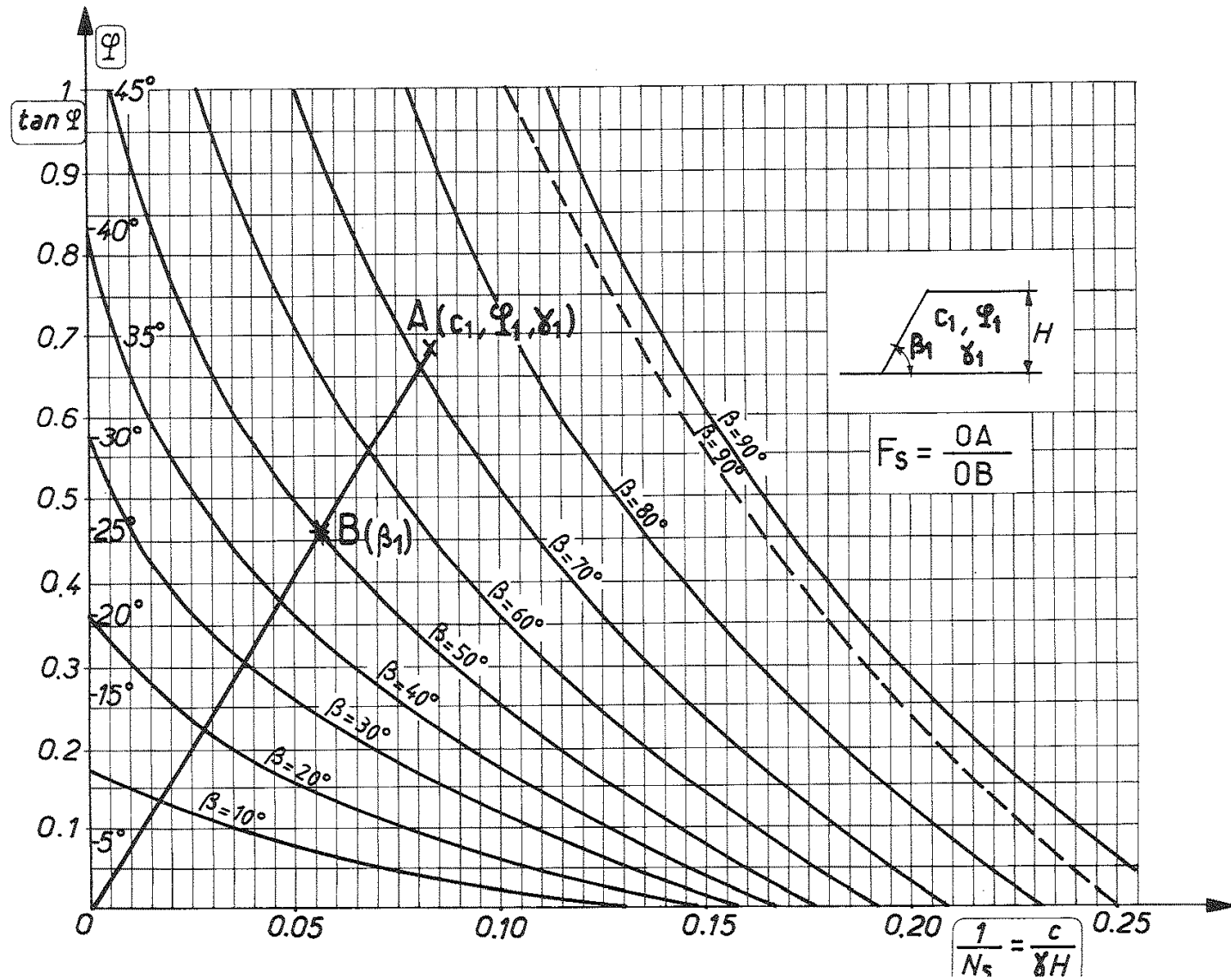
$$N_s = \frac{\gamma H}{c}$$

Abaque de Taylor



Abaque de Taylor - Biarez

- Sol frottant et cohérent

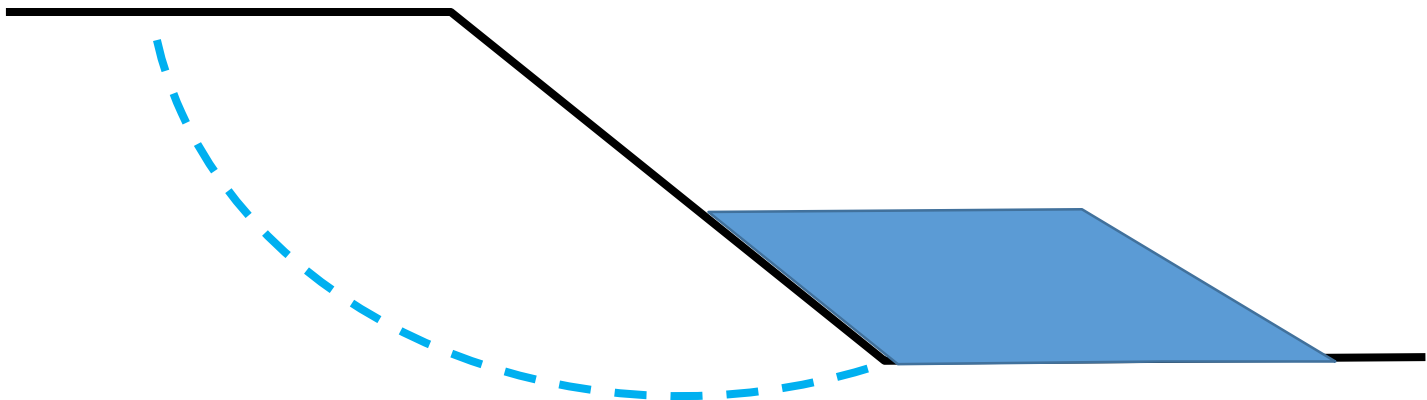


Quelles propriétés mécaniques utiliser ?

Type d'argile	Talus artificiels Stabilité :		Pentes naturelles Durée de vie de :	
	à court terme	à long terme	≈ 100 ans	≈ 1 000 ans
<i>Premier glissement</i>				
Molle, normalement consolidée (1)	$c_{uu} ; \varphi_{uu}$	$c' ; \varphi'$	$c' ; \varphi'$	$c'_e ; \varphi'_e$
Légèrement surconsolidée massive (1)	$c_{ue} ; \varphi_{uu}$	$c' ; \varphi'$	$c' ; \varphi'$	$c'_e ; \varphi'_e$
Raide massive	$c_{ue} ; \varphi_u$	$c' ; \varphi'$	$c'_e ; \varphi'$	$c'_e ; \varphi'_e$
Raide fissurée	$c_{ue} ; \varphi_{ue}$	$c'_e ; \varphi'_e$	$c'_e ; \varphi'$	$c' \# 0 ; \varphi'_e$
Argile litée (2)	$c' \# 0 ; \varphi'$	$c' \# 0 ; \varphi'$	$c' \# 0 ; \varphi'$	$c' \# 0 ; \varphi'_e$
<i>Glissement sur une surface de rupture préexistante</i>	$c_r ; \varphi_r$	$c_r ; \varphi_r$	$c_r ; \varphi_r$	$c_r ; \varphi_r$
Définitions (cf. chap. 5) : $c_{uu} ; \varphi_{uu}$: caractéristiques non drainées de pic $c_{ue} ; \varphi_{ue}$: caractéristiques non drainées à l'état critique Rappel : lorsque les argiles sont saturées, $\varphi_{uu} = \varphi_{ue} = 0$ et c_{uu} devient c_u $c' ; \varphi'$: caractéristiques drainées de pic $c'_e ; \varphi'_e$: caractéristiques drainées à l'état critique $c_r ; \varphi_r$: caractéristiques résiduelles				
(1) Une valeur de c et φ figure dans chaque case. Pour les argiles molles ou peu consolidées, il n'y a pas de pic ; donc $\varphi'_e = \varphi'$ et $c'_e = c'$. (2) Le drainage peut se faire très rapidement. Il est conseillé de faire également le calcul avec c_{uu} et φ_{uu} et de considérer le résultat le plus défavorable.				

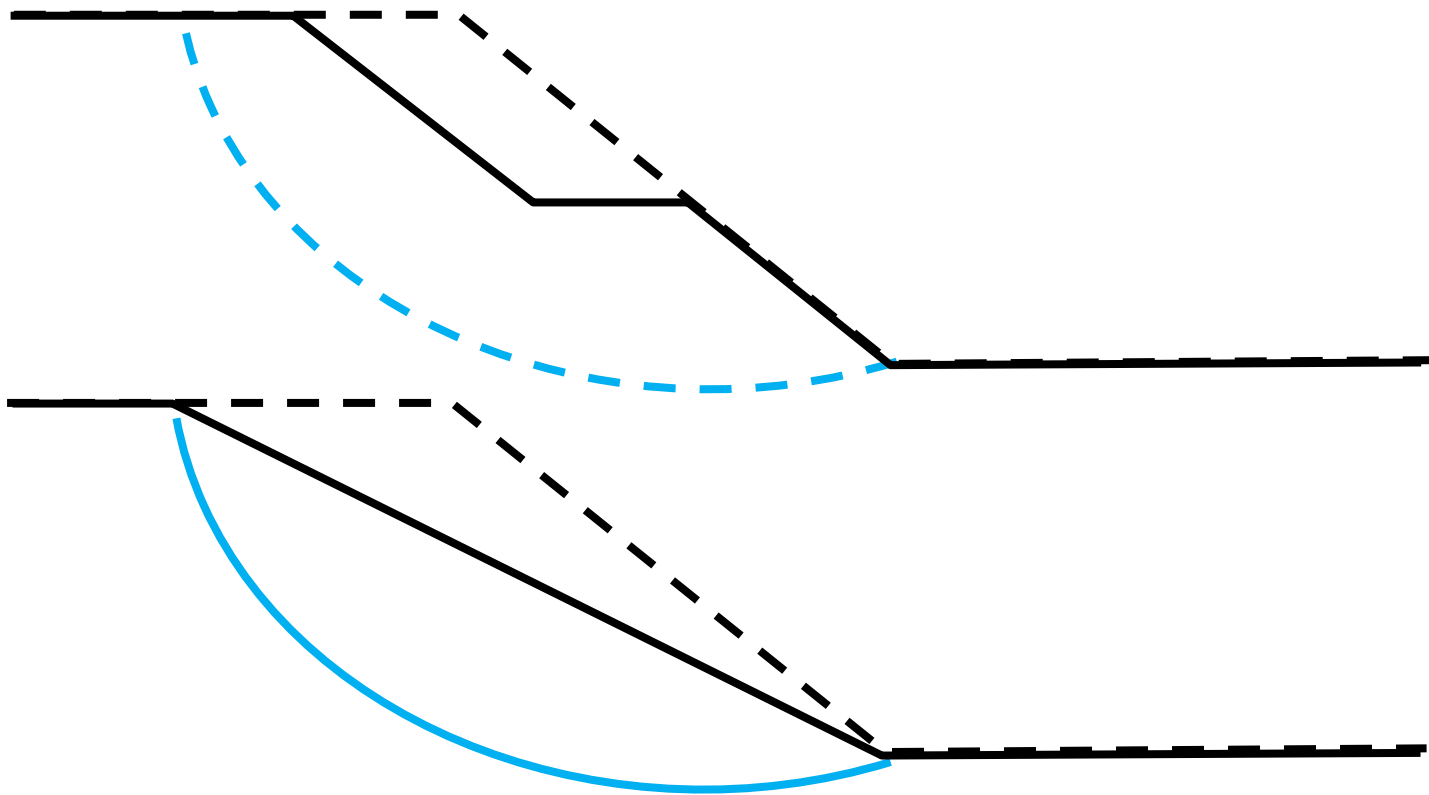
Méthodes de confortement : terrassements

- Objectif général : avoir une action sur la géométrie du glissement, et donc sur la répartition des masses
- Ne peut intervenir qu'après analyse du glissement
- Remblai de pied : ajout de butée en pied de glissement



Méthodes de confortement : terrassements

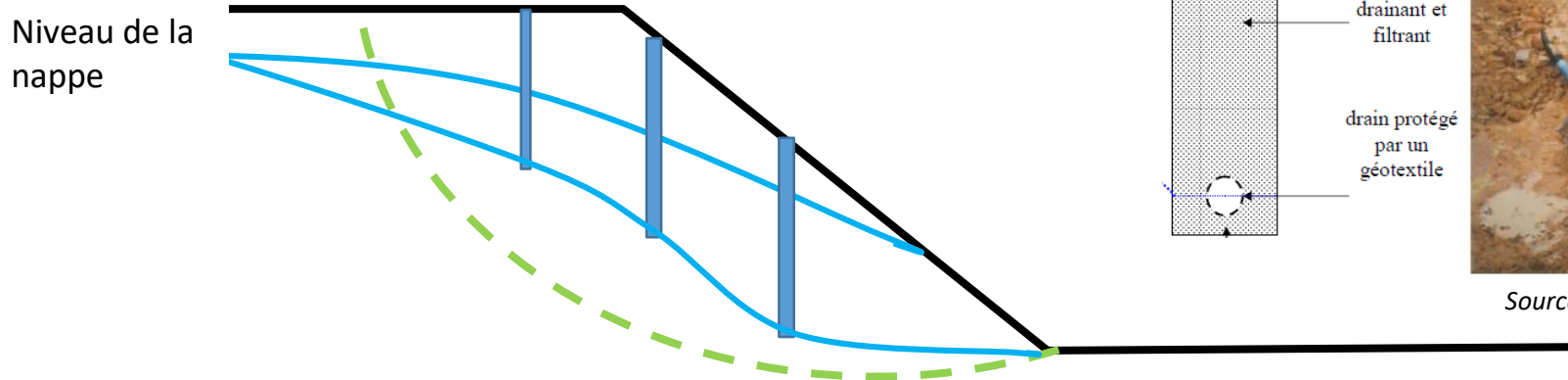
- Reprofilage



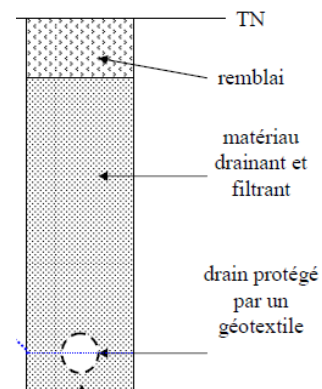
- Substitution, totale ou partielle, etc.

Méthodes de confortement : drainage

- L'apparition de pressions interstitielles est très pénalisante
- Toute action permettant de limiter les pressions interstitielles aura une action positive sur la facteur de sécurité
 - Eaux de surface
 - Eaux souterraines
- Action de drainage (collecte des eaux)



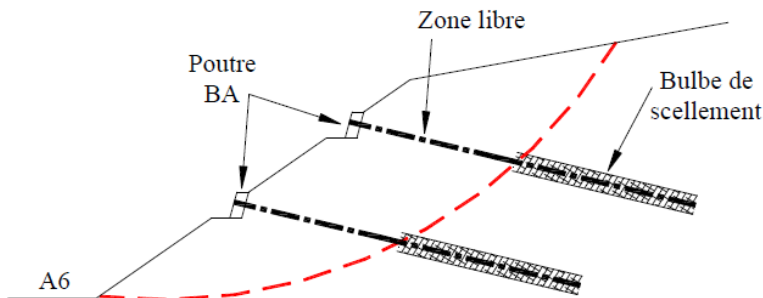
*Coupe type
tranchée drainante*



Source = L. Dubois, Cerema

Méthodes de confortement : introduction d'éléments résistants

- Murs de soutènements, tirants d'ancrage, clouage, pieux, barrettes, profilés métalliques, etc.



Source = JL Gress



Source = JPG company

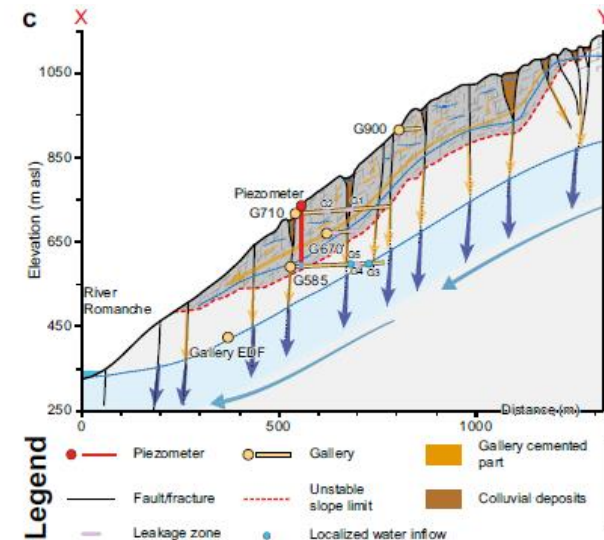
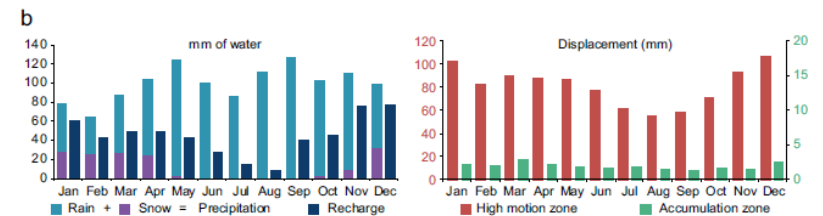
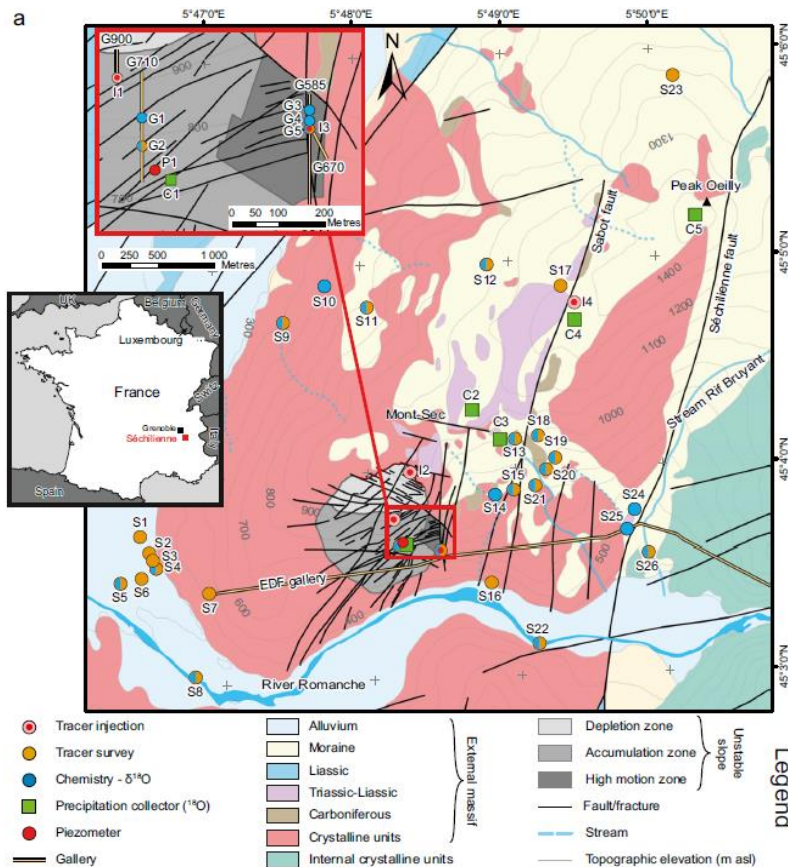


Surveillance des pentes instables

- La stabilisation n'est pas toujours possible : volume en jeu, localisation, enjeux, limitations financières ou techniques, etc...
- Une surveillance peut être mise en place pour détecter la mise en mouvement, des accélérations, etc. et ainsi mettre en place les mesures de prévention prévues
- Quels paramètres surveiller ?
 - La cinématique du glissement
 - La piézométrie
 - La météorologie
 - Etc.
- Les paramètres à surveiller sont très variables. La surveillance ne peut être définie a priori. Elle implique une recherche préalable pour comprendre les mécanismes en jeu.

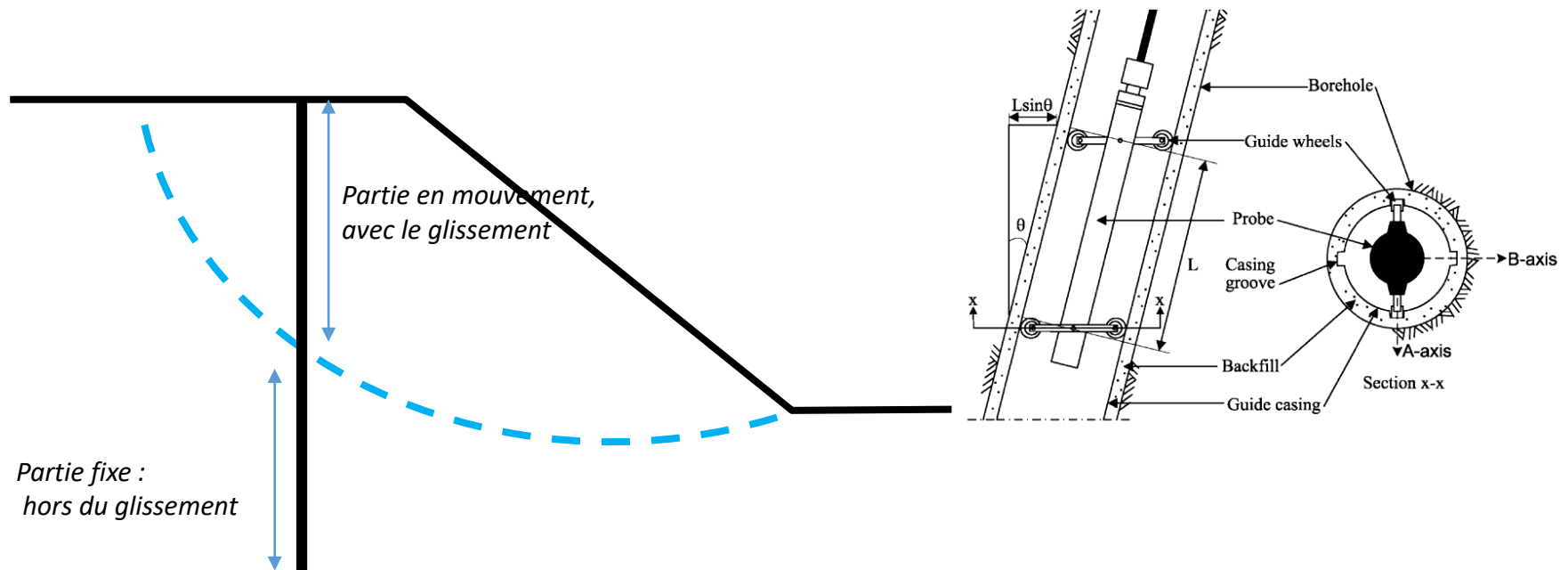
Surveillance des pentes instables

- Un exemple : le glissement de la Séchilienne.

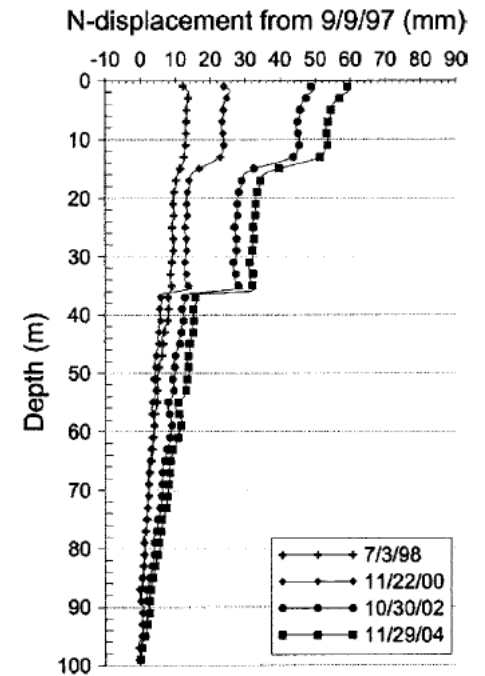
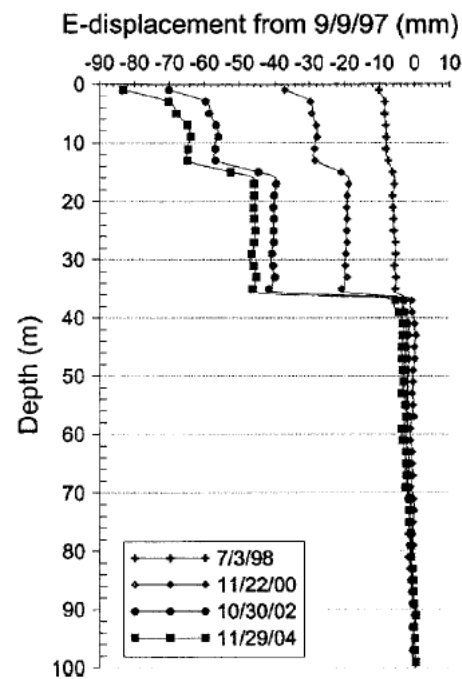
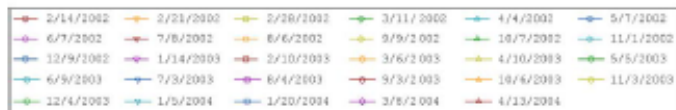
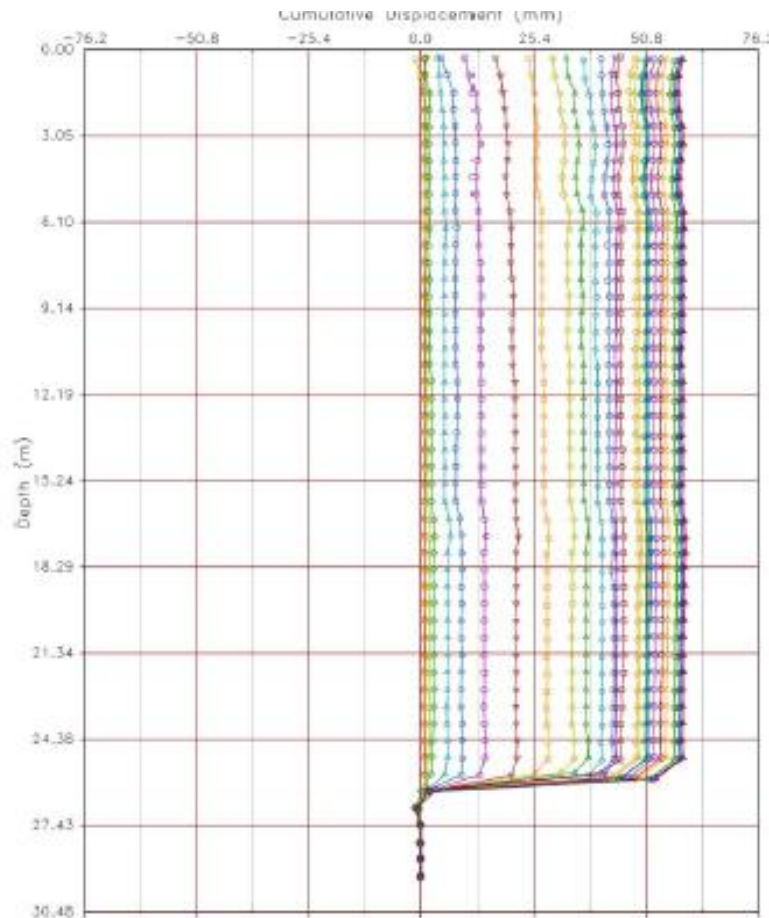


Mesures inclinométriques

- Principe : mesure de la déformation d'un tube placé dans le sol dans lequel on glisse une sonde régulièrement.



Mesures inclinométriques



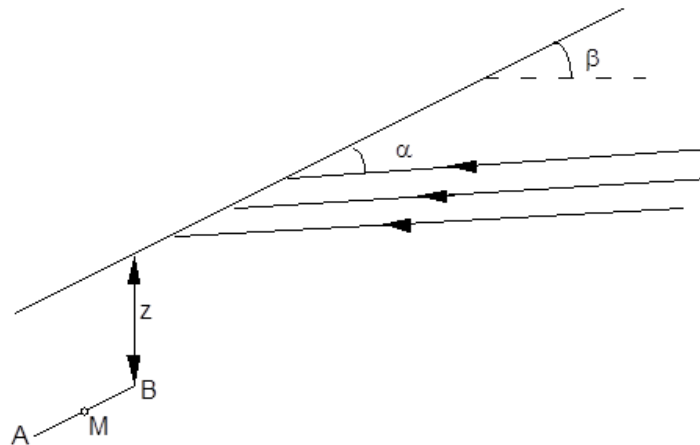
TD MÉCANIQUE DES SOLS - STABILITÉ DES PENTES

Exercice 1 - On considère un talus infini rectiligne d'inclinaison β sur l'horizontale, formé d'un sol homogène dont les caractéristiques sont ϕ' angle de frottement, c' cohésion, γ poids volumique.

Ce massif est parcouru par un écoulement indéfini plan linéaire parallèle dont les lignes de courant font un angle α avec la pente de talus.

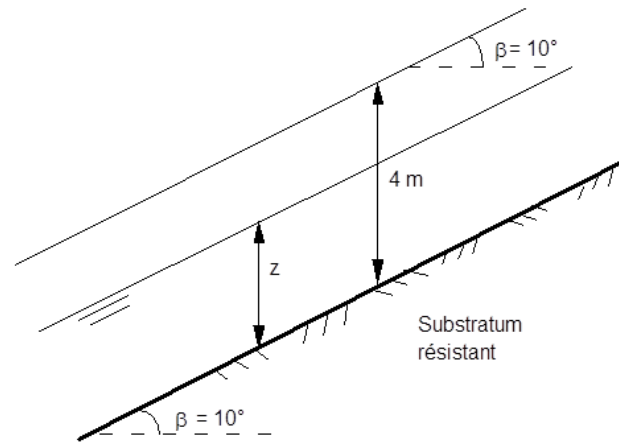
Pour cela :

- 1) On considère un élément plan de longueur AB à la profondeur z ; on calcule dans l'hypothèse de Rankine les composantes normale et tangentielle de la contrainte totale s'exerçant sur AB.
- 2) On calcule la pression interstitielle (excès de pression par rapport à la pression atmosphérique) u au point M (milieu de AB).
- 3) On écrit la relation d'équilibre limite sur l'élément de plan AB.
- 4) Que devient cette relation lorsque les lignes de courant sont parallèles à la pente du talus, c' cohésion drainée devient nulle (ce que d'après Skempton pour les talus naturels est souvent le cas) et si $\gamma \approx 20 \text{ kN/m}^3$ valeur courante pour de nombreux sols.



Exercice 2 - Une pente naturelle formée d'éboulis argileux fait un angle $\beta = 10^\circ$ avec l'horizontale. Les caractéristiques de résistance au cisaillement résiduel de cette couche sont $c' = 0$; $\phi' = 15^\circ$. Son poids volumique $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ kN/m}^3$ reste constant même au dessus de la nappe (par capillarité).

- 1) Pour quelle hauteur z d'un écoulement hydraulique uniforme, parallèle à la pente, se produira la rupture ?
- 2) Peut-on par un drainage approprié, élever le coefficient de sécurité jusqu'à 1,5 ?

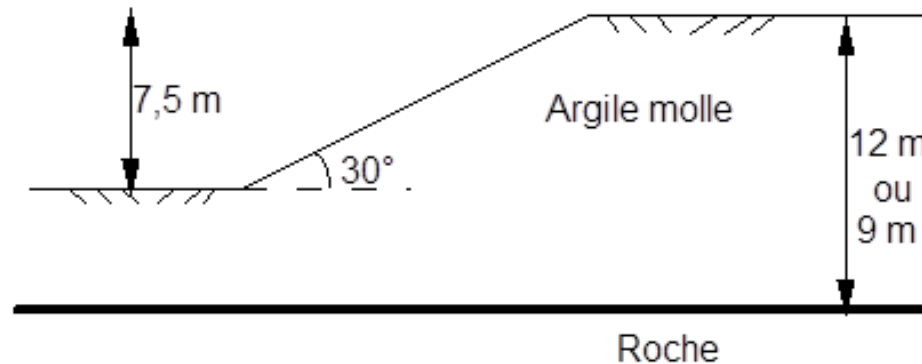


Exercice 3 - Évaluer au moyen de l'abaque de Taylor Biarez les coefficients de sécurité vis à vis de la rupture pour un talus de 15 m de hauteur établi dans un sol homogène. β l'angle de talus vaut 20° .

Les essais de laboratoire ont donné les résultats suivants :

0	$< c'$	$< 10 \text{ kPa}$
20°	$< \phi'$	$< 22^\circ$
18	$< \gamma$	$< 20 \text{ kN/m}^3$

Exercice 4 - On a creusé une tranchée de grande largeur dans une argile molle dont la surface était horizontale. $\beta = 30^\circ$. Le substratum rocheux est à 12 m de profondeur par rapport au niveau initial. Lorsque la tranchée atteint 7,5 m il y a glissement. $\gamma = 19,2 \text{ kN/m}^3$; et le sol est uniquement cohérent. Déterminer la cohésion moyenne (abaque de Taylor) ? Quelle est la nature de la surface de glissement ? À quelle distance du pied du talus la surface de glissement couperait le fond de fouille ?
Mêmes questions si le substratum est à 9 m ?



Exercice 5 - On veut creuser dans une argile molle : $\gamma = 19,2 \text{ kN/m}^3$ et $c = 12,5 \text{ kPa}$, une tranchée dont les parois font un angle β avec l'horizontale. Jusqu'à quelle profondeur peut-on exécuter la fouille sans que les parois s'affaissent (abaque de Taylor) ?

On prendra successivement $\beta = 90^\circ - 75^\circ - 60^\circ - 45^\circ$ et 30° . On se fixera ensuite à la hauteur critique correspondant au cas $\beta = 90^\circ$, et on calculera le coefficient de sécurité pour cette hauteur avec les différents angles β . Dans ce cas le coefficient de sécurité est défini par rapport à une grandeur géométrique.

On peut se rendre compte de la dépense supplémentaire due aux terrassements pour augmenter le coefficient de sécurité en construisant un graphique.

Exercice 6 - Déterminer si le talus dessiné ci-dessous est stable vis à vis de la rupture en utilisant la méthode de calcul proposée. Donner une évaluation du coefficient de sécurité.

Surfaces de glissement complexes

Si le sous-sol renferme une ou plusieurs couches fines d'une résistance exceptionnellement faible, la surface de glissement sera probablement constituée de deux ou trois portions qui se raccorderont en des points singuliers. Il est impossible de remplacer une telle surface par une surface continue, dans les calculs de stabilité, sans introduire une erreur correspondant à une réduction de la marge de sécurité. La figure 1 représente un talus situé au-dessus d'une couche d'argile mince et très molle, de cohésion C . Si le talus s'affaisse, le glissement se produit suivant une certaine surface complexe $abcd$. Dans la portion de droite de la masse intéressée par le glissement, et qui est représentée par l'aire abf , on doit s'attendre à une rupture d'équilibre du type actif, car le sol s'étale horizontalement sous l'influence de son propre poids. La portion du milieu, $bcef$, se déplace vers la gauche sous l'influence de la poussée qui s'exerce sur bf . La portion de gauche, cde , de la masse est le siège d'une rupture d'équilibre du type passif, en raison de la poussée engendrée par le mouvement en avant de la portion centrale $bcef$.

La première étape, dans l'étude des conditions de stabilité du talus, consiste à calculer la butée P_p du sol situé à gauche d'une section verticale ec , choisie à titre d'essai et située près du pied du talus. Il est raisonnable d'admettre que P_p agit suivant une direction horizontale. L'étape suivante consiste à évaluer la position de l'extrémité droite, b , de la portion horizontale cb de la surface potentielle de glissement, et à calculer la poussée P_1 sur une section verticale fb passant par b . la tendance de la masse $bcef$ à se déplacer vers la gauche est contrecarrée par la butée P_p et la cohésion totale, C , le long de bc . Si le talus est stable, la somme des forces qui résistent au déplacement doit être supérieure à la poussée P_A , qui est supposée agir suivant une direction horizontale. Le coefficient de sécurité vis-à-vis du glissement est égal au rapport entre la somme des forces résistantes et la force P_A . Cette étude doit être répétée pour diverses positions des points c et b , jusqu'à ce qu'on trouve une surface de moindre résistance au glissement correspondant au coefficient de sécurité minimum.

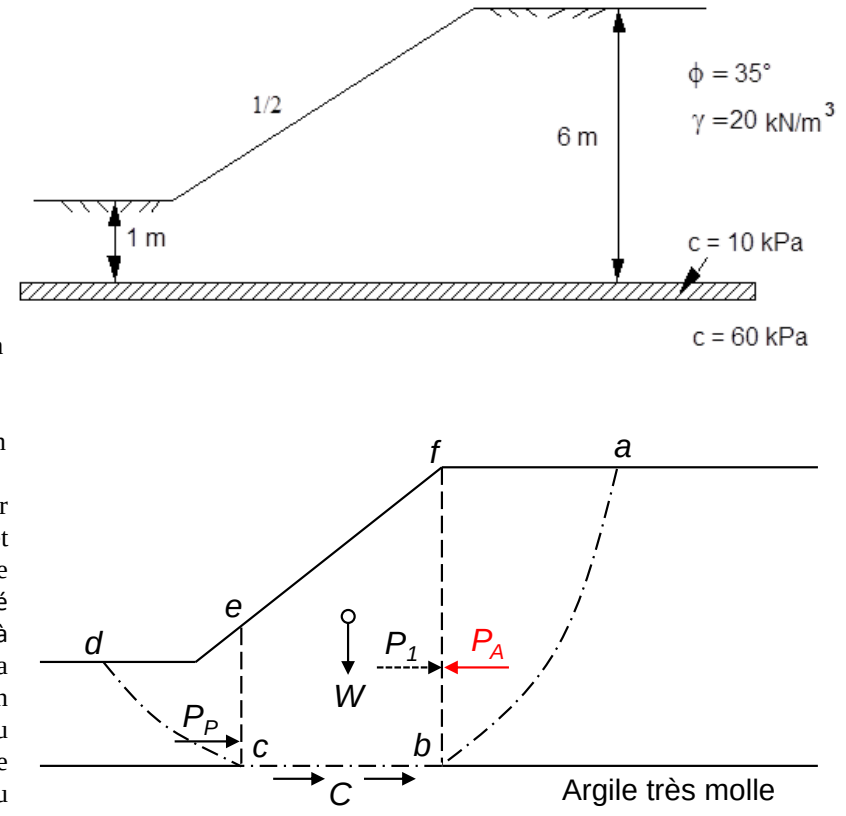


Figure 1.

Glissement d'un talus situé au-dessus d'une couche d'argile très molle.