

Fouilles en rocher

MÉCANIQUE DES
ROCHES ET
OUVRAGES
SOUTERRAINS

Prof. M. VIOLAY

1. Introduction
2. Analyse de stabilité
3. Considérations pratiques

1. Introduction

1.1. Applications

1.2. Mécanismes de rupture

1.3. Conditions cinématiques

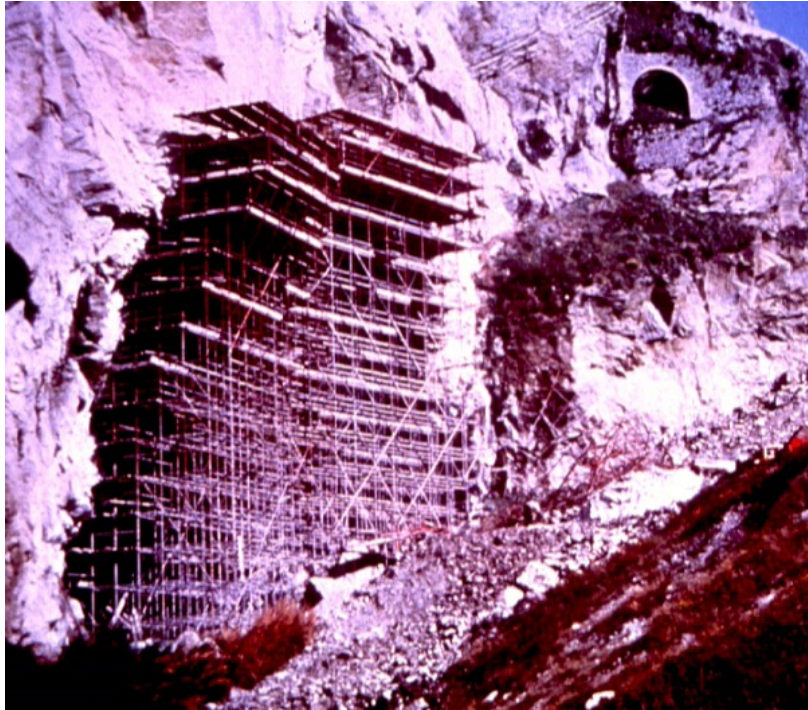
2. Analyse de stabilité

3. Considérations pratiques

1.1 Applications



Le dimensionnement d'une pente rocheuse comprend l'excavation, le soutènement et la réalisation.



1.1 Applications



Les pentes peuvent être naturelles ou excavées.



1. Introduction

1.1. Applications

1.2. Mécanismes de rupture

1.2.1. *Glissement plan*

1.2.2. *Glissement dièdre (ou coin)*

1.2.3. *Basculement - fauchage*

1.2.4. *Glissement rotationnel*

1.3. Conditions cinématiques

2. Analyse de stabilité

3. Considérations pratiques

1.2 Mécanismes de rupture

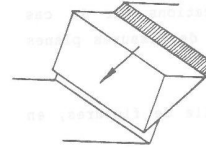
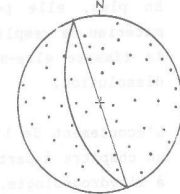


Mouvement possible

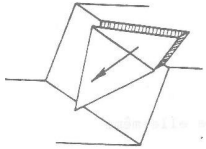
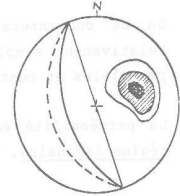
Projection stéréographique des discontinuités



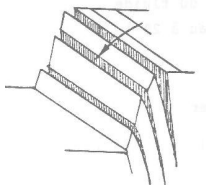
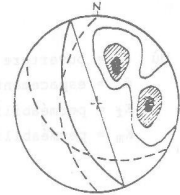
Glissement circulaire en roche broyée (ou des sols). Pas de structure identifiable



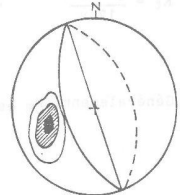
Glissement plan en roche stratifiée ou fissurée selon un système prédominant



Glissement en coin selon deux discontinuités se recoupant



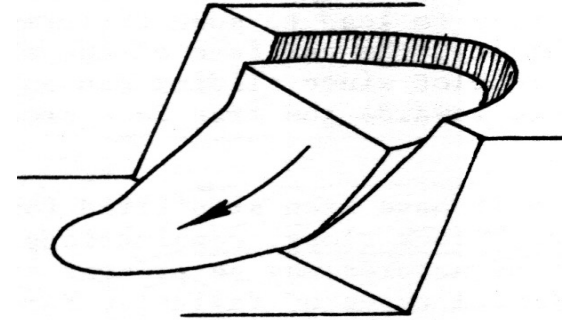
Basculement en roche stratifiée ou fissurée selon un système plongeant dans le versant



Rupture de fouilles en rocher

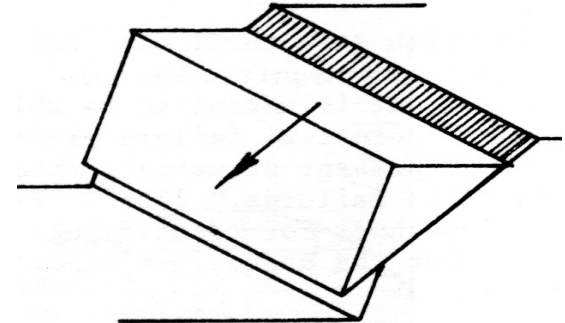
a) Rupture Circulaire

Elle se produit la plupart du temps dans des débris rocheux, dans des massifs rocheux hautement fracturés ou fortement altérés avec un réseau de discontinuités diffus (pas de famille prépondérante).



b) Rupture en Plan

Elle se produit dans des massifs rocheux avec des discontinuités planes (p. ex. selon la stratigraphie)



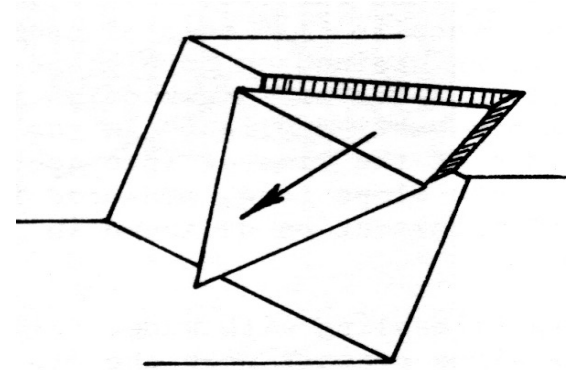
1.2 Mécanismes de rupture



Rupture de fouilles en rocher

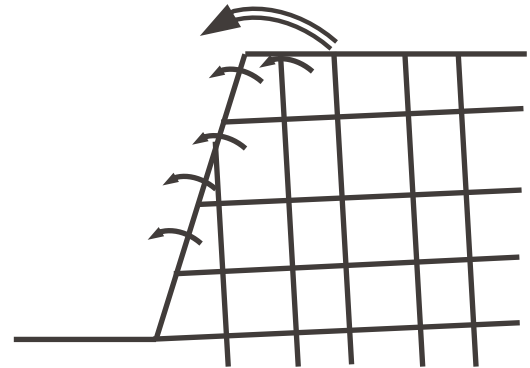
c) Rupture en Coin

Elle se produit dans des massifs rocheux avec des familles de discontinuités qui s'interceptent en formant des coins.



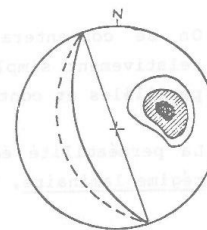
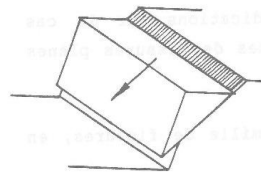
b) Basculement – fauchage

Il se produit dans des massifs rocheux avec une structure en blocs et une forte inclinaison des discontinuités.



1.2.1 Mécanismes de rupture

Glissement plan sur la D526 entre Mens et Clelles (Isère – France)

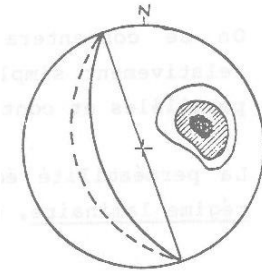
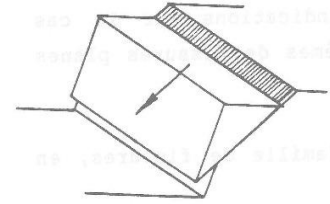


<http://www.irma-grenoble.com/>

1.2.1 Mécanismes de rupture

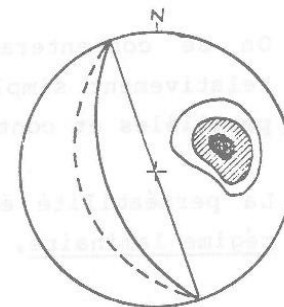
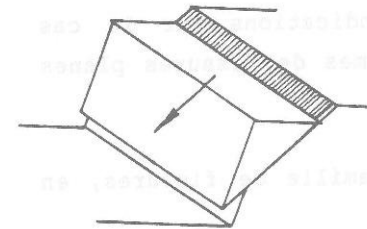


Glissement plan en roche stratifiée à Sylans (France)



1.2.1 Mécanismes de rupture

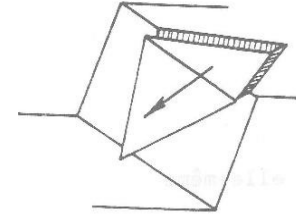
Glissement **couche sur couche** à Gersau (Lac des 4 cantons - Suisse)



1.2.2 Mécanismes de rupture

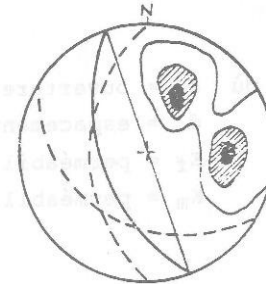


<http://www.crealp.ch/>



Glissement en dièdre
au-dessus de la route
de Cogne (Italie)

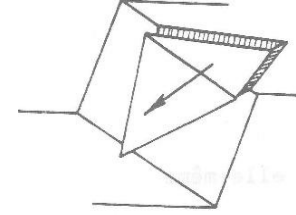
Glissement en
coin selon deux
discontinuités
se recoupant



1.2.2 Mécanismes de rupture

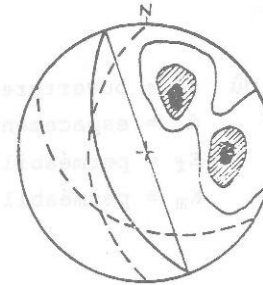


Mike Bovis, University of British Columbia, 2002

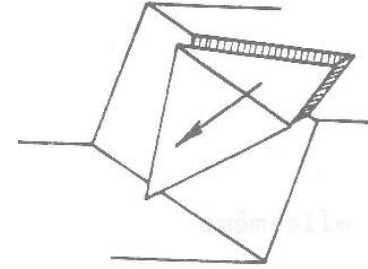


Glissement en dièdre
à Apax Ranch
(Colombie Britannique)

Glissement en
coin selon deux
discontinuités
se recoupant

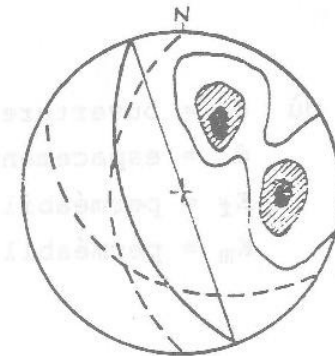


1.2.2 Mécanismes de rupture



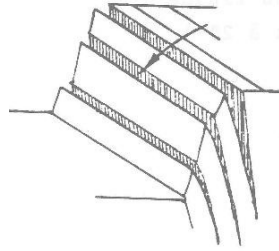
Glissement en dièdre

Glissement en
coin selon deux
discontinuités
se recoupant

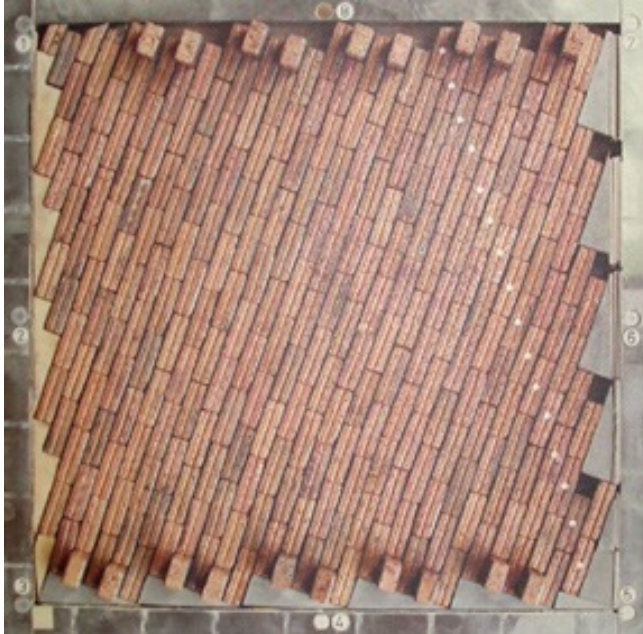
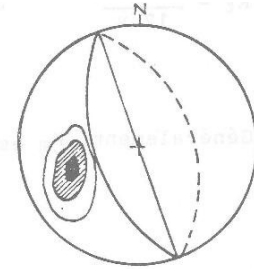


1.2.3 Mécanismes de rupture

Phénomène de fauchage

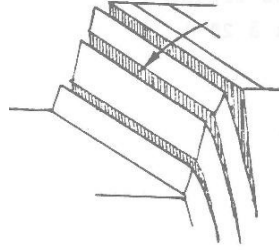


Basculement en
roche stratifiée
ou fissurée selon
un système plon-
geant dans le
versant

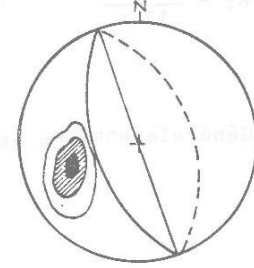


1.2.3 Mécanismes de rupture

Phénomène de fauchage



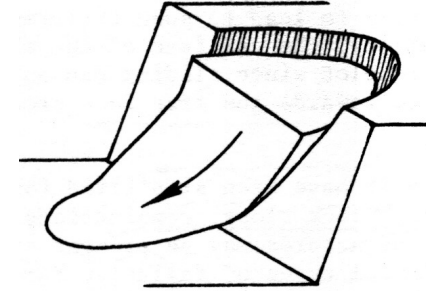
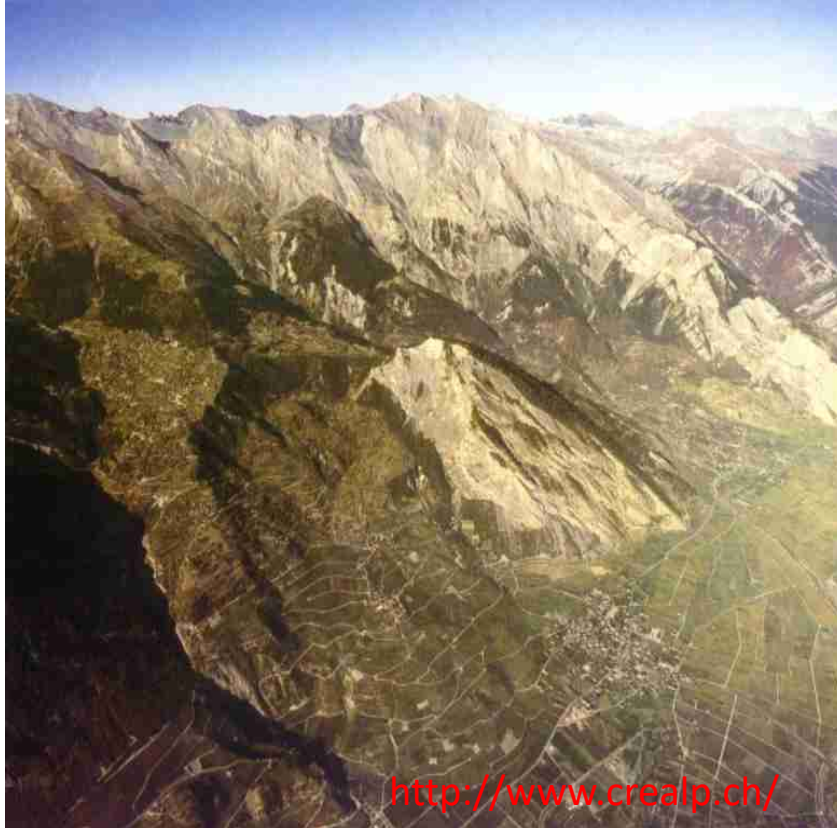
Basculement en
roche stratifiée
ou fissurée selon
un système plon-
geant dans le
versant



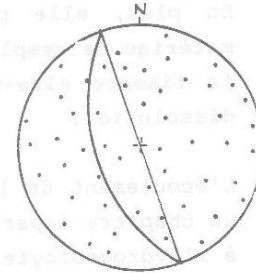
<http://roches-ornementales.com/>

1.2.4 Mécanismes de rupture

Glissement de Montagnon (Leytron Valais)

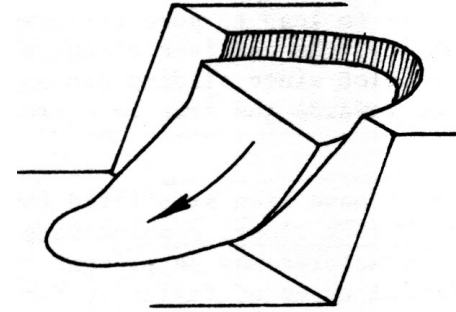


Glissement circulaire en roche broyée (ou des sols). Pas de structure identifiable

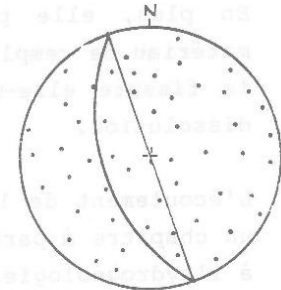


1.2.4 Mécanismes de rupture

Glissement de La Clapière (Alpes maritimes)



Glissement circulaire en roche broyée (ou des sols). Pas de structure identifiable



1. Introduction

1.1. Applications

1.2. Mécanismes de rupture

1.3. Conditions cinématiques

1.3.1. *Glissement plan*

1.3.2. *Glissement dièdre (ou coin)*

1.3.3. *Basculement - fauchage*

1.3.4. *Glissement rotationnel*

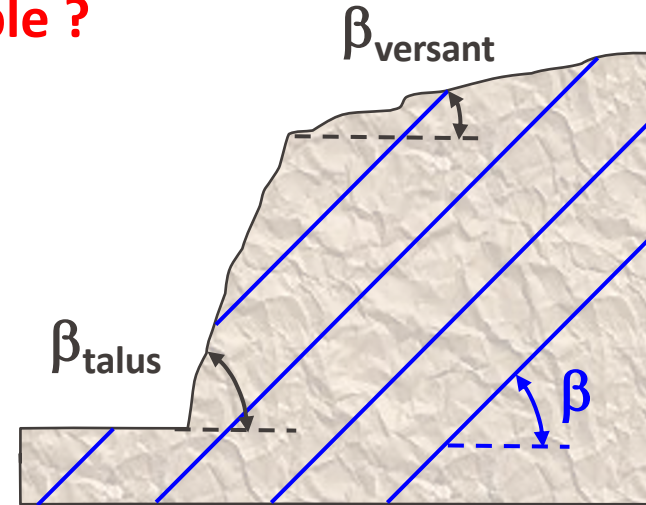
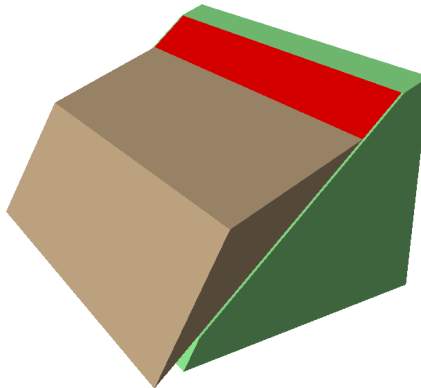
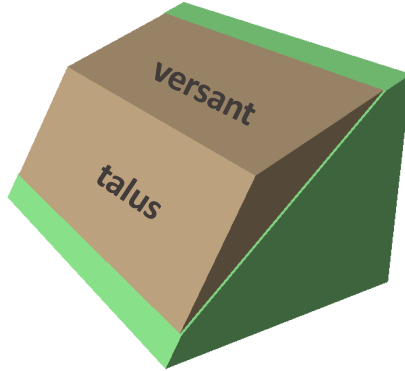
2. Analyse de stabilité

3. Considérations pratiques

1.3.1 Conditions cinématiques



Mécanisme de glissement plan possible ?



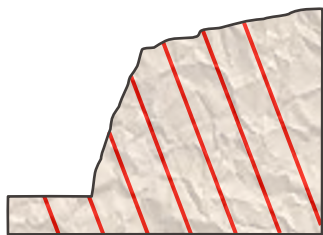
Le rocher possède une famille de discontinuités subparallèle à la surface du talus.

Subparallèle : La différence d'azimut de pendage entre la famille de discontinuités et le talus est de maximum 20° .

De plus, la condition cinématique de glissement dépend des valeurs relatives de β , β_{talus} et β_{versant} .

1.3.1 Conditions cinématiques

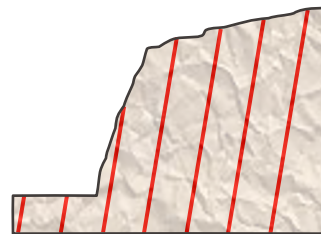
Mécanisme de glissement plan possible ?



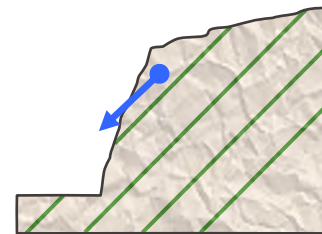
Non stable
pendage amont



Non stable
 $\beta < \beta_{\text{versant}}$

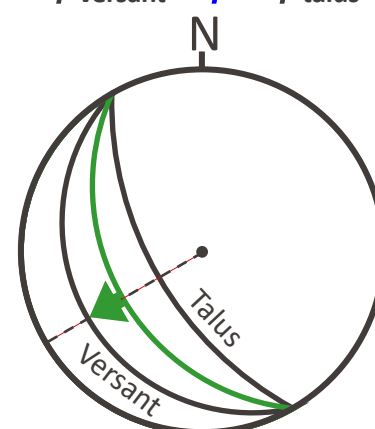
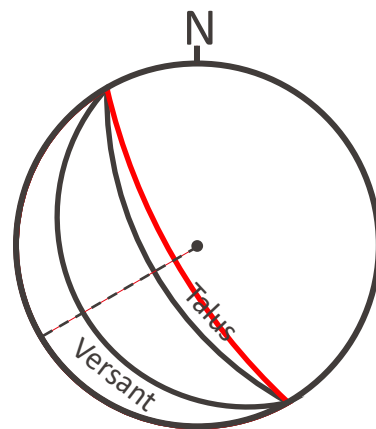
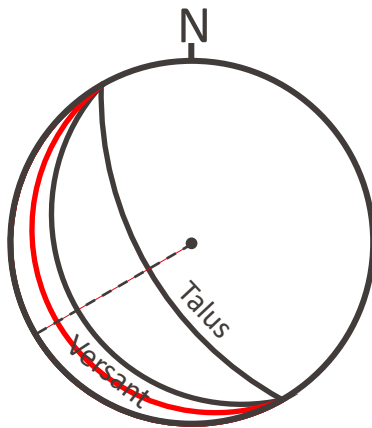
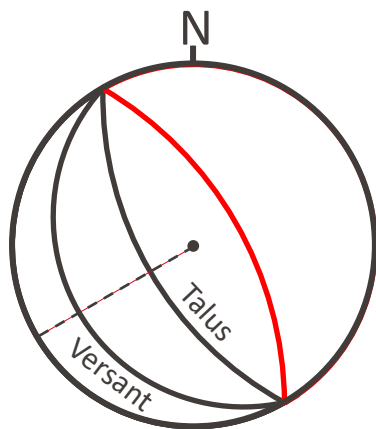


Non stable
 $\beta > \beta_{\text{talus}}$



Oui
Potentiellement instable

$$\beta_{\text{versant}} \leq \beta \leq \beta_{\text{talus}}$$

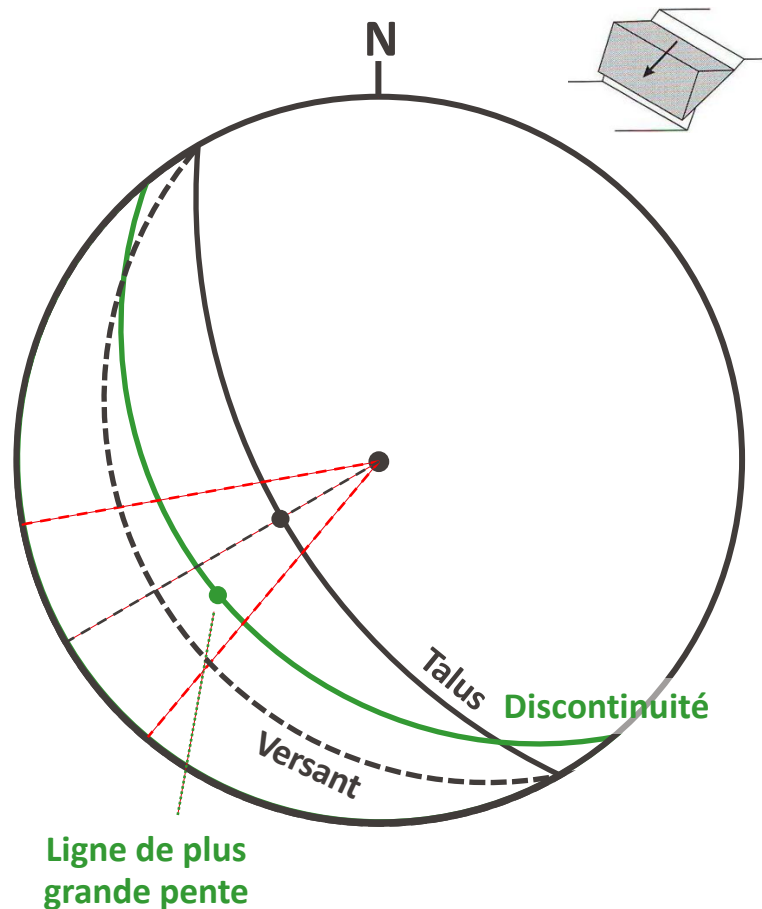


1.3.1 Conditions cinématiques

Mécanisme de glissement plan possible si :

- La différence d'azimut de pendage entre la famille de discontinuités et le talus est de maximum 20° .
- Si il y a une seule famille de discontinuités, le pendage de cette famille de discontinuités doit être comprise entre les pendages du versant et du talus:

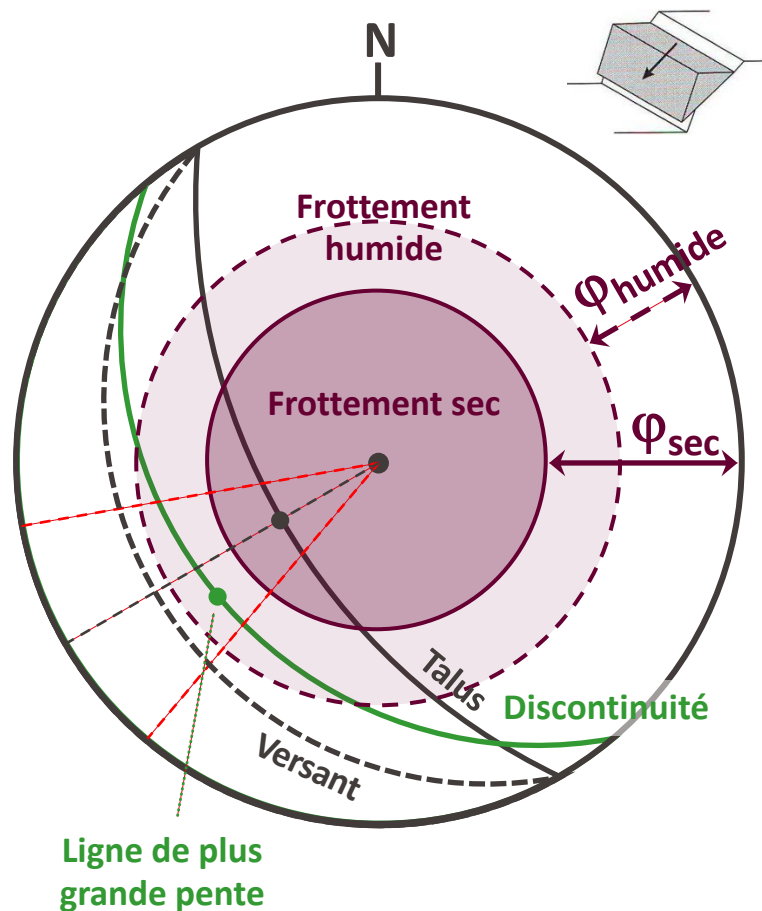
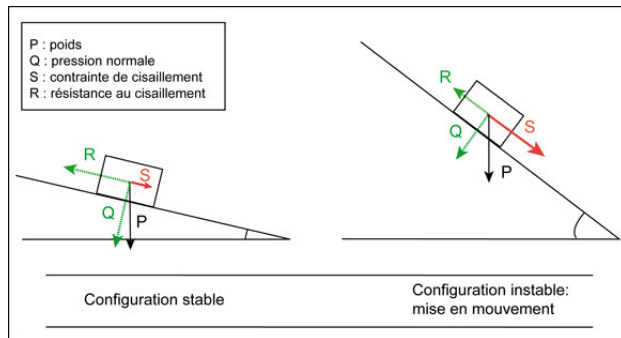
$$\beta_{\text{versant}} \leq \beta \leq \beta_{\text{talus}}$$
- Si une autre famille recoupe le versant, il suffit que le pendage du plan de glissement soit plus faible que celui du talus (daylighting condition): $\beta \leq \beta_{\text{talus}}$



1.3.1 Conditions cinématiques

En plus de ces conditions cinématiques, si le plan de glissement est lisse et qu'il n'y a pas de pressions d'eau, on peut déterminer aisément si la résistance mécanique au glissement est suffisante.

A cet effet, on trace depuis le centre du canevas de Wülf un cercle dont le rayon correspond à $(90^\circ - \varphi)$. Si la ligne de plus grande pente se situe dans ce cercle, le glissement peut se produire mécaniquement.



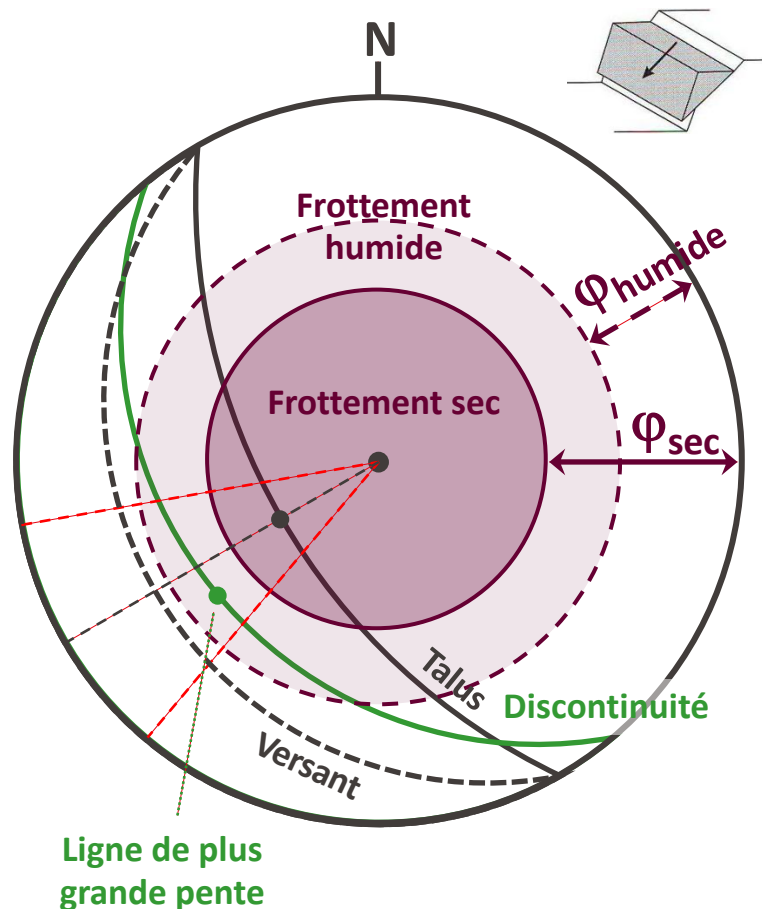
1.3.1 Conditions cinématiques

En plus de ces conditions cinématiques, si le plan de glissement est lisse et qu'il n'y a pas de pressions d'eau, on peut déterminer aisément si la résistance mécanique au glissement est suffisante.

A cet effet, on trace depuis le centre du canevas de Wülf un cercle dont le rayon correspond à $(90^\circ - \varphi)$. Si la ligne de plus grande pente se situe dans ce cercle, le glissement peut se produire mécaniquement.

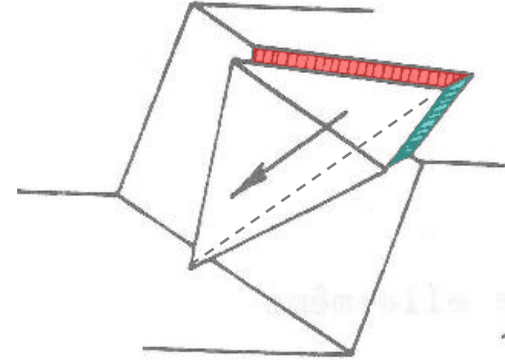
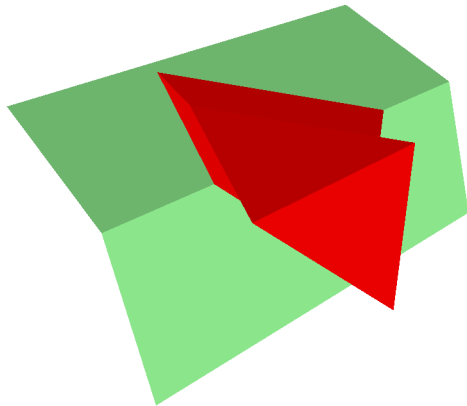
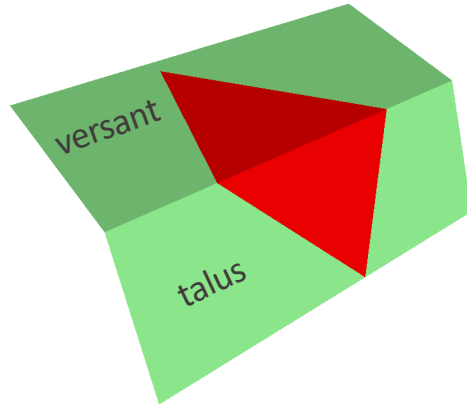
Par exemple, ci-contre:

- Pour des conditions sèches, le frottement est élevé et aucun glissement ne se produit.
- Pour le cas humide, le frottement est plus faible. La droite de plus grande pente est à l'intérieur du cercle et un glissement risque de se produire.



1.3.2 Conditions cinématiques

Mécanisme de glissement dièdre possible ?



Le rocher possède deux familles de discontinuités qui s'intersectent à l'arrière du talus et forment des blocs.

Si la ligne d'intersection plonge en direction de la vallée, le mécanisme de glissement est possible.

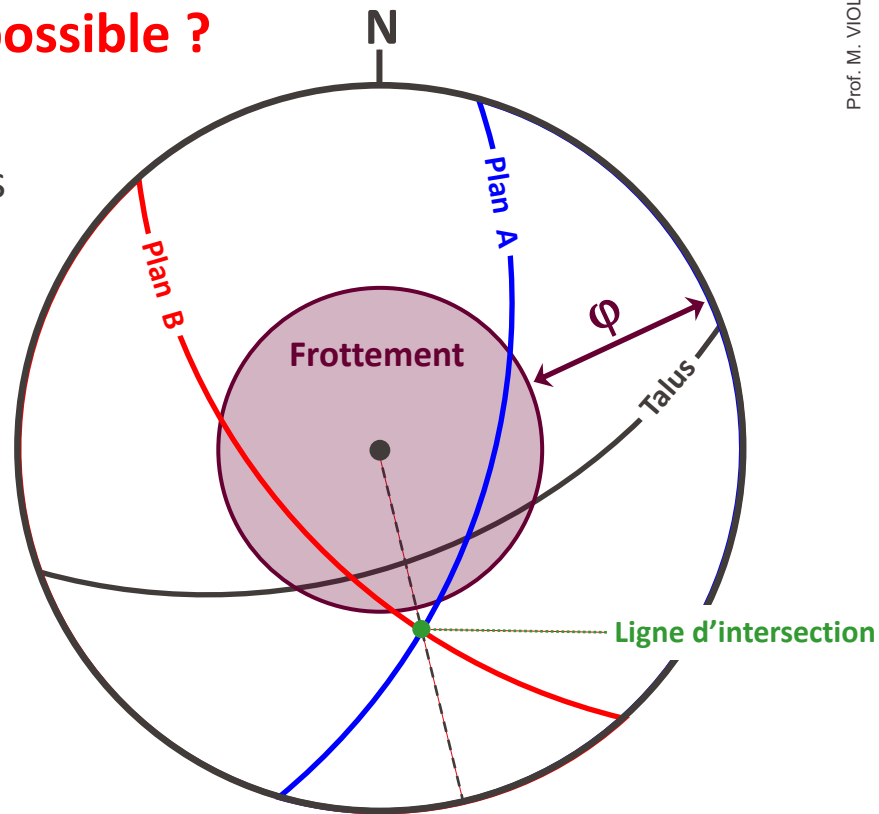
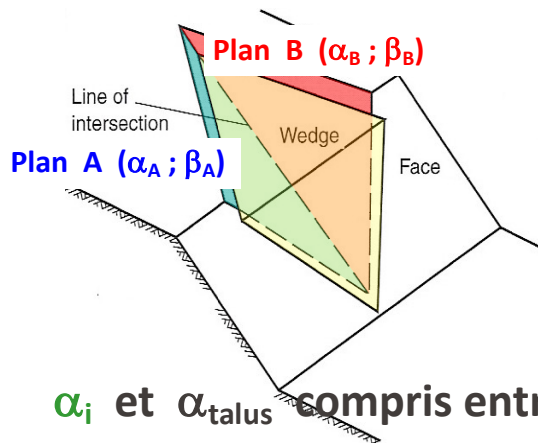
Dans le cas de plans lisses caractérisés par un même angle de frottement φ et s'il n'y a pas de pressions d'eau, le glissement est de surcroît possible d'un point de vue mécanique si le pendage de la ligne d'intersection est plus grand que l'angle de frottement. Un calcul est nécessaire pour vérifier si la stabilité est assurée.

1.3.2 Conditions cinématiques

Mécanisme de glissement dièdre possible ?

La ligne d'intersection (α_i ; β_i) plonge en direction de la vallée avec un pendage plus petit que celui du talus $\rightarrow$ mécanisme de glissement possible.

Si plans lisses et sans eau, comme $\beta_i < \varphi$, il n'y a pas de glissement d'un point de vue mécanique.



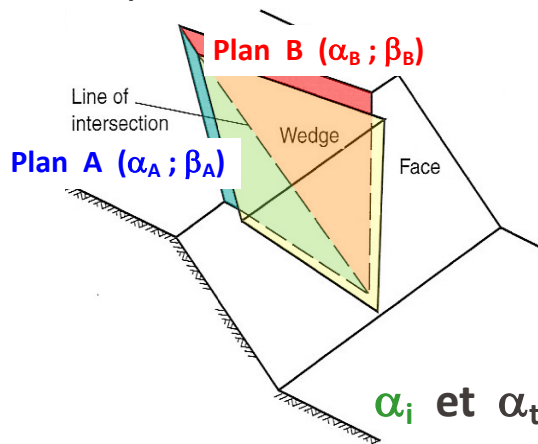
α_i et α_{talus} compris entre α_A et $\alpha_B \rightarrow$ Frottement sur les plans A et B

1.3.2 Conditions cinématiques

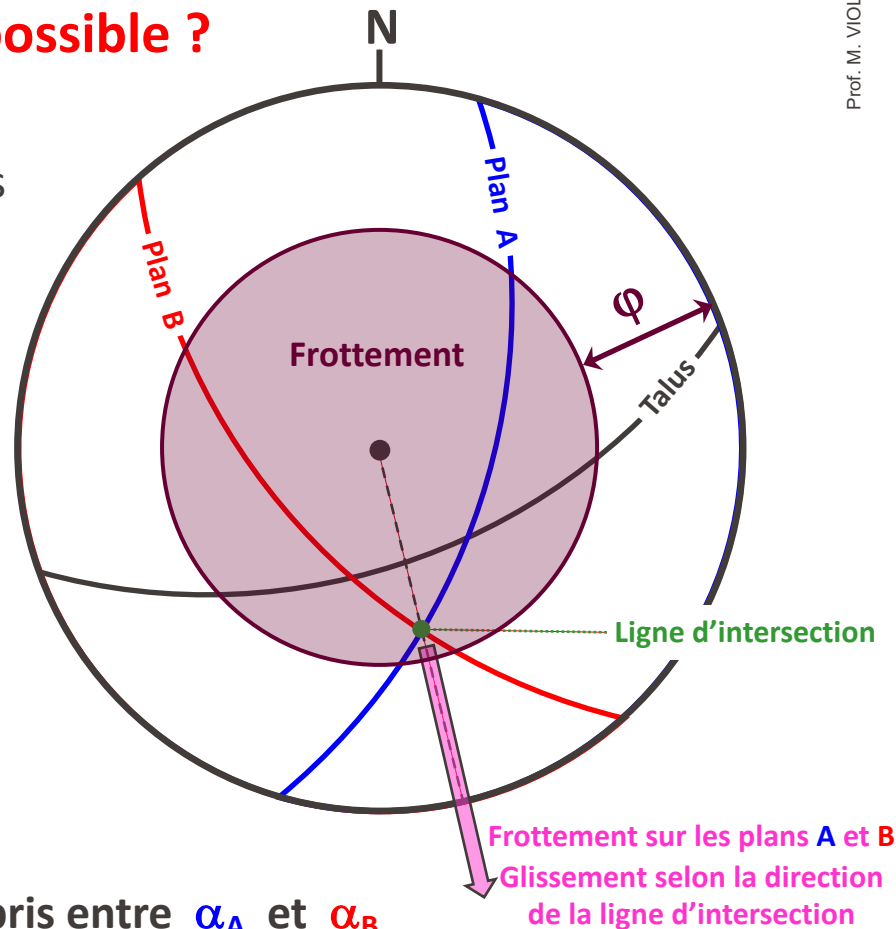
Mécanisme de glissement dièdre possible ?

La ligne d'intersection (α_i ; β_i) plonge en direction de la vallée avec un pendage plus petit que celui du talus $\rightarrow$ mécanisme de glissement possible.

Si plans lisses et sans eau, comme $\beta_i > \varphi$, un glissement est possible d'un point de vue mécanique $\rightarrow$ calcul



α_i et α_{talus} compris entre α_A et α_B



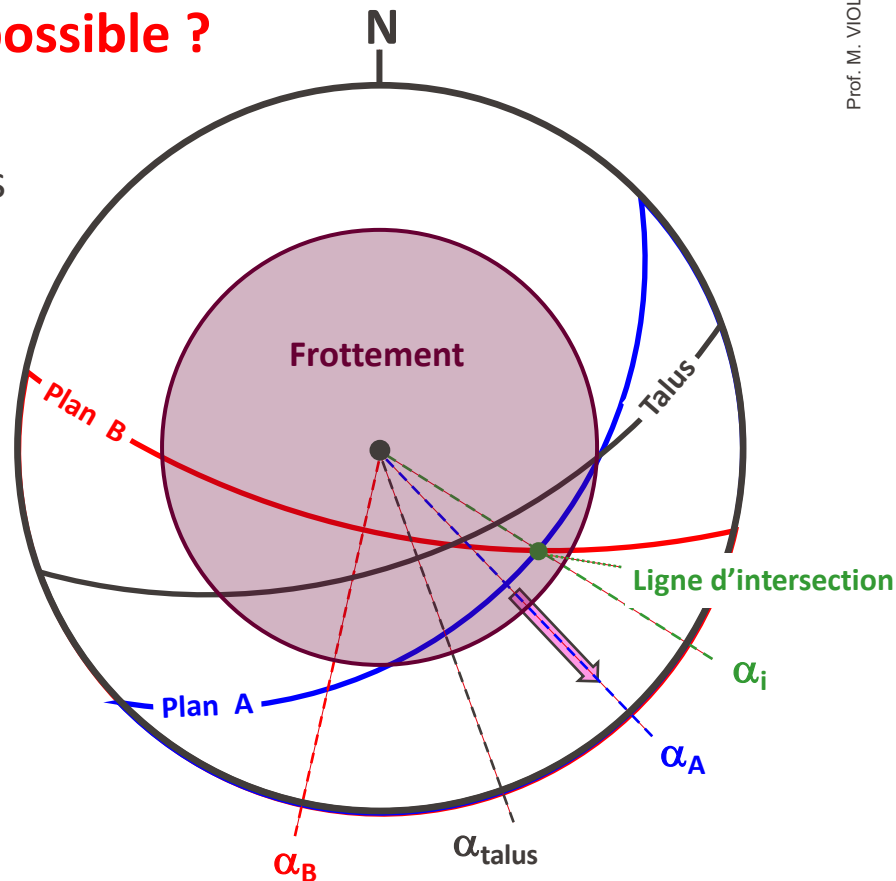
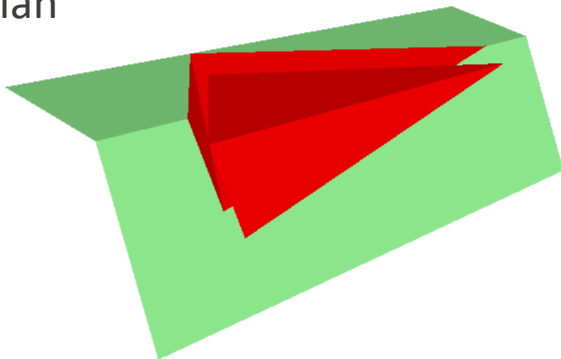
1.3.2 Conditions cinématiques

Mécanisme de glissement dièdre possible ?

La ligne d'intersection (α_i ; β_i) plonge en direction de la vallée avec un pendage plus petit que celui du talus $\rightarrow$ mécanisme de glissement possible.

$\rightarrow$ Glissement et frottement sur le plan A uniquement, décollement du plan B !

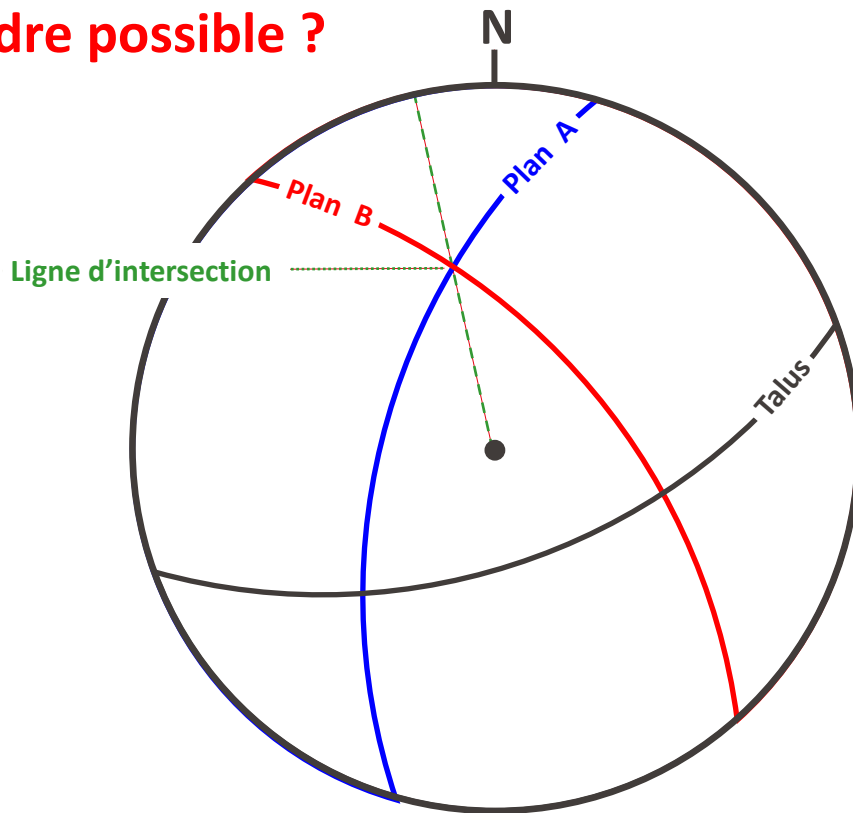
$\rightarrow$ à traiter comme un glissement sur un seul plan



1.3.2 Conditions cinématiques

Mécanisme de glissement dièdre possible ?

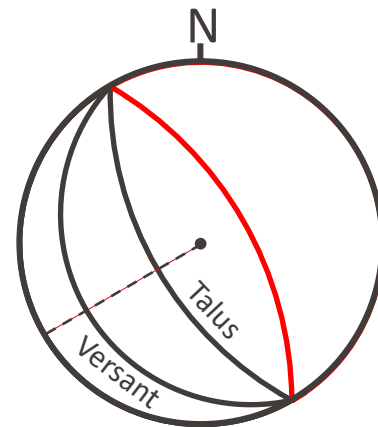
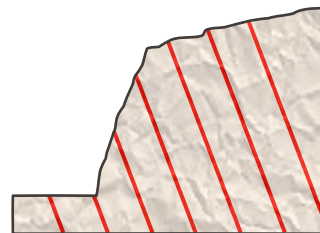
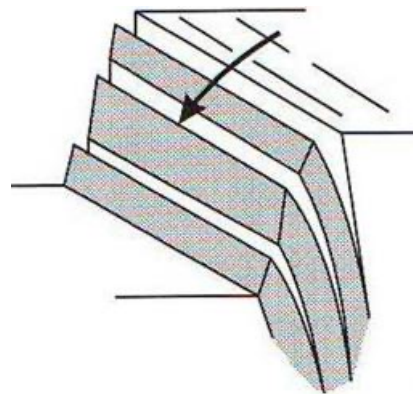
Si la ligne d'intersection ($\alpha_i ; \beta_i$) plonge dans la direction opposée à la vallée, le mécanisme de glissement est impossible cinématiquement.



1.3.3 Conditions cinématiques

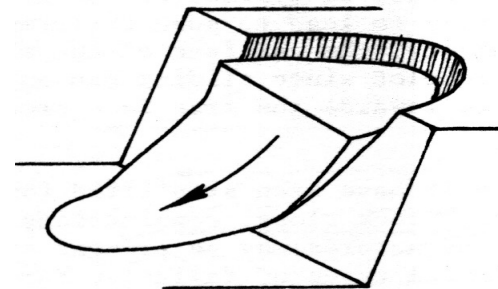
Mécanisme de basculement – fauchage possible ?

- a. Rocher fracturé.
- b. Une famille de discontinuités avec un fort pendage, mais de direction opposée au talus.
- c. Une deuxième famille de discontinuités perpendiculaire à la première facilite le mécanisme.
- d. Le renversement peut se produire, soit par déséquilibre de blocs, soit par rupture flexionnelle d'une colonne.

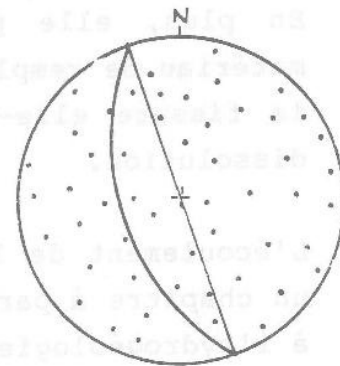


Glissement rotationnel

Le massif rocheux est tellement fracturé qu'aucune famille de discontinuités ne prédomine. La rupture se développe aisément dans un tel milieu qui s'apparente pratiquement à un sol. La surface de rupture est souvent circulaire.



Glissement circulaire en roche broyée (ou des sols). Pas de structure identifiable



Fouilles en rocher

1. Introduction

2. Analyse de stabilité

2.1. Glissement plan

2.1.1 *Glissement sur un seul plan*

2.1.2 *Glissement sur un plan, avec fissure de traction*

2.1.3 *Méthodes de contrôle de l'eau*

2.1.4 *Confortements*

2.2. Glissement dièdre

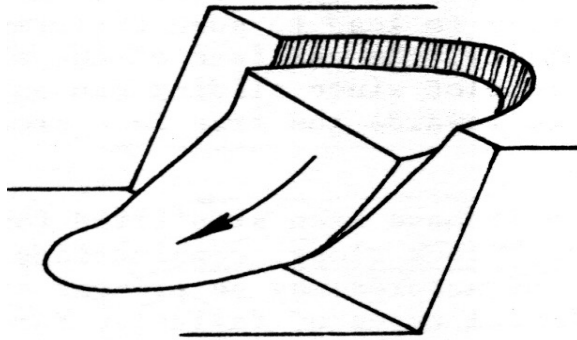
2.3. Basculement – Fauchage

2.4. Glissement rotationnel

3. Considérations pratiques

2.1.1 Glissement sur un seul plan

- Cas complexe

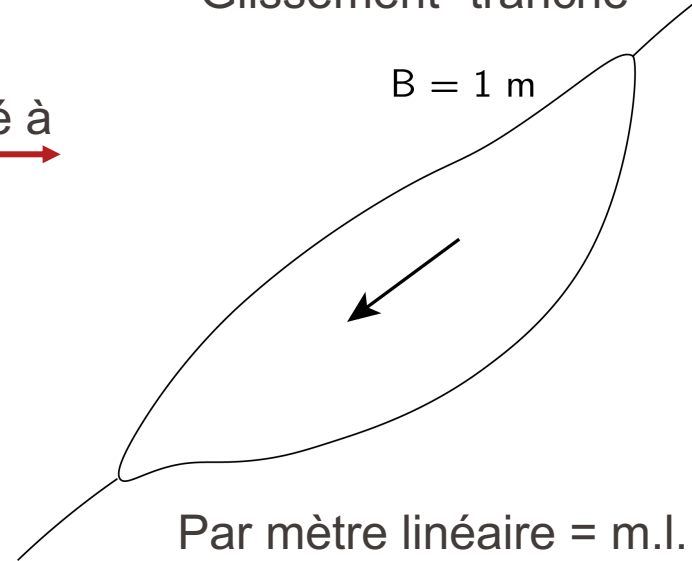


Simplifié à



Glissement “tranche”

$B = 1 \text{ m}$



Par mètre linéaire = m.l.

=> Résolution analytique possible pour vérifications préliminaires

2.1.1 Glissement sur un seul plan

Pas d'eau

Facteur de sécurité:

$$F_s = \frac{\text{Résistance au cisaillement}}{\text{Contrainte de cisaillement}}$$

avec:

- Résistance au cisaillement :

$$\begin{aligned} F_{\text{rés}} &= N \cdot \tan \varphi + c^* \cdot A \\ &= W \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi + c^* \cdot L \cdot 1 \end{aligned}$$

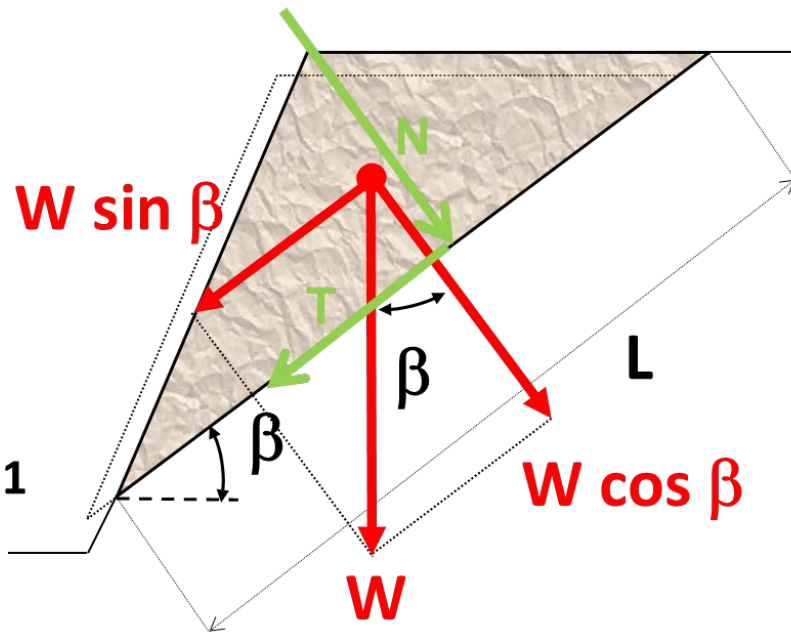
avec: $A = L \cdot 1m$

- Contrainte de cisaillement :

$$F_{\text{sol}} = T = W \cdot \sin \beta$$

$$F_s = \frac{W \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi + c^* \cdot A}{W \cdot \sin \beta} = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} + \frac{c^* \cdot L \cdot 1}{W \cdot \sin \beta}$$

$$F_s = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \quad \text{si } c^* = 0$$



2.1.1 Glissement sur un seul plan

Présence d'eau

U = résultante des pressions d'eau dans la fissure, fonction des conditions d'écoulement

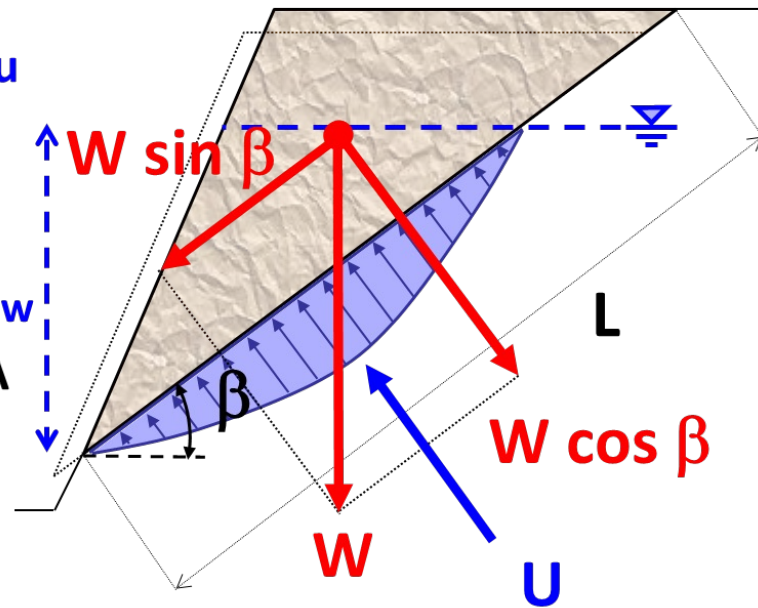
- Résistance au cisaillement :

$$F_{\text{rés}} = (W \cdot \cos \beta - U) \cdot \tan \varphi + c^* \cdot A$$

avec: $A = L \cdot 1\text{m}$

- Contrainte de cisaillement :

$$F_{\text{sol}} = W \cdot \sin \beta$$



$$F_s = \frac{(W \cdot \cos \beta - U) \cdot \tan \phi + c^* \cdot L \cdot 1}{W \cdot \sin \beta}$$

→ La résistance au glissement est réduite

2.1.1 Glissement sur un seul plan

Rappel pression d'eau

- La force résultante de pression est :

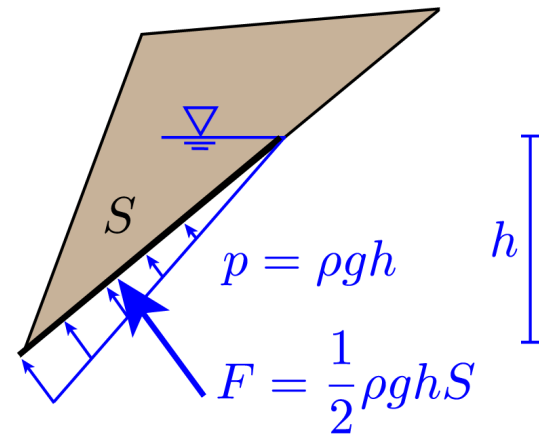
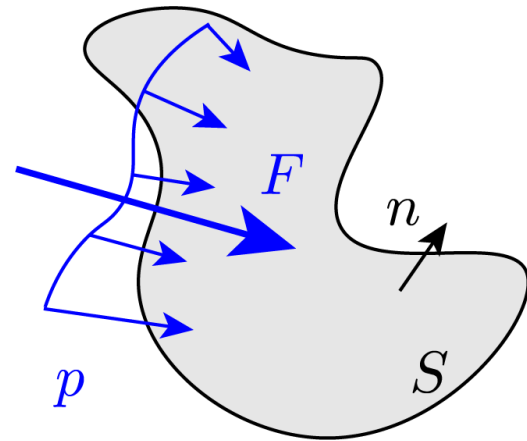
$$\bar{F} = \int_S -p \bar{n} dS$$

- Dans un cas hydrostatique :

$$dp = \rho_w g dh$$

- Pour une pression appliquée sur un plan :

$$\begin{aligned} \Rightarrow F &= \text{aire diagramme pression} \\ &= \frac{1}{2} * \text{pression max} * \text{Surface} \end{aligned}$$

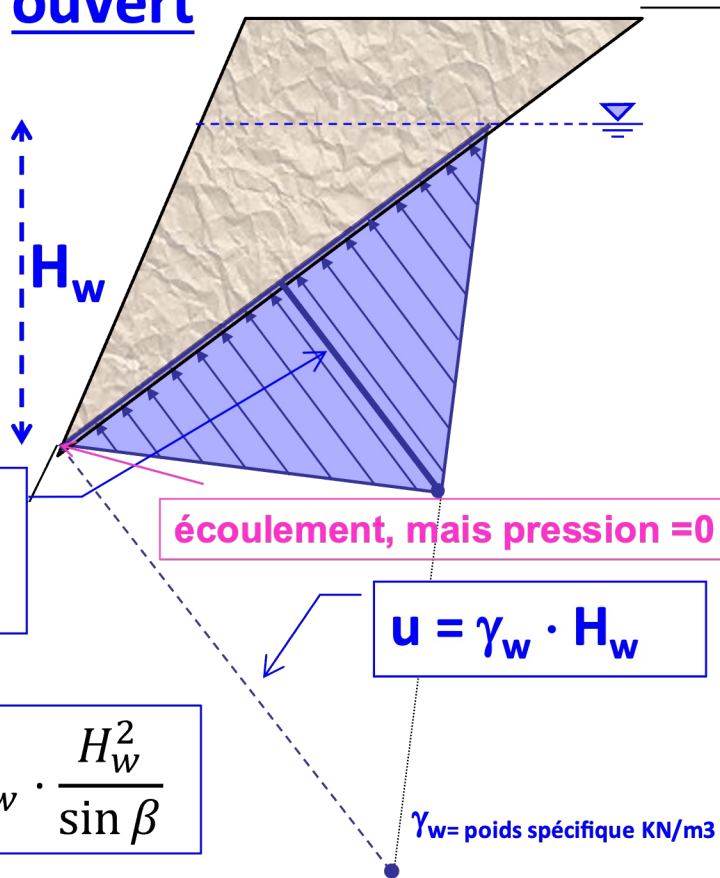


2.1.1 Glissement sur un seul plan

Présence d'eau + exutoire ouvert

Hypothèses:

- Répartition hydrostatique jusqu'à mi-parcours;
- écoulement avec gradient constant dans la partie restante (jusqu'à l'exutoire).



Pression d'eau max [kPa]

$$u = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot H_w$$

écoulement, mais pression = 0

$$u = \gamma_w \cdot H_w$$

Force d'eau [kN/m]

$$U = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot \frac{H_w}{2} \cdot \frac{H_w}{\sin \beta} = \frac{1}{4} \cdot \gamma_w \cdot \frac{H_w^2}{\sin \beta}$$

γ_w = poids spécifique KN/m³

2.1.1 Glissement sur un seul plan

Présence d'eau + exutoire bouché

Hypothèse:

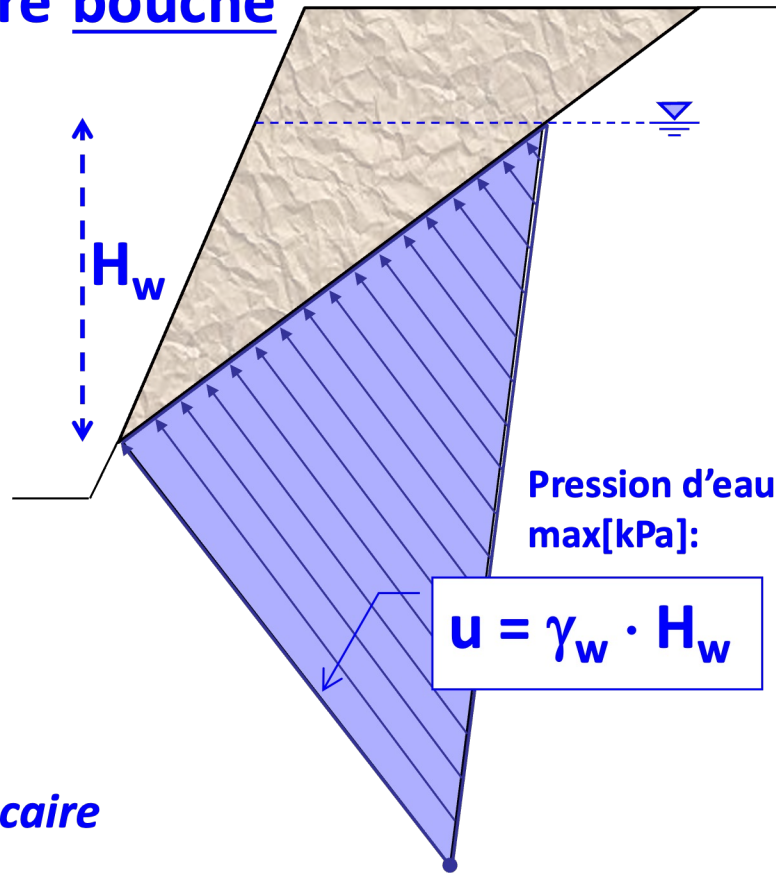
- Répartition hydrostatique jusqu'à l'exutoire.

La valeur de **U** est donc doublée par rapport au cas précédent.

Force d'eau [kN/m]:

$$U = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot \frac{H_w^2}{\sin \beta}$$

→ *Stabilité beaucoup plus précaire*



2.1.1 Glissement sur un seul plan

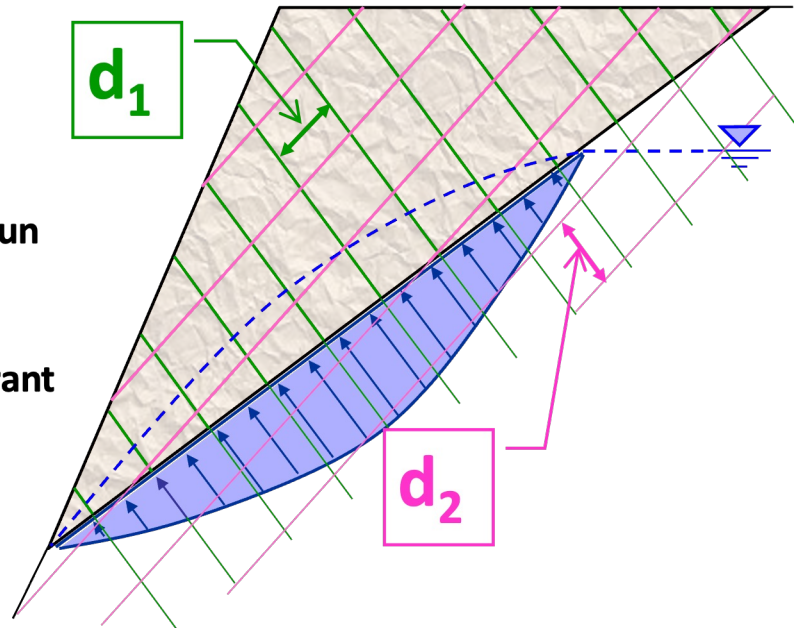
Ecoulement dans un réseau de fissures

Hypothèses:

- massif rocheux modélisé comme un milieu continu avec des perméabilités anisotropes;
- calcul du réseau de lignes de courant et d'équipotentiels

$$k_1 = (e_1/d_1) \cdot k_{f1} + k_m$$

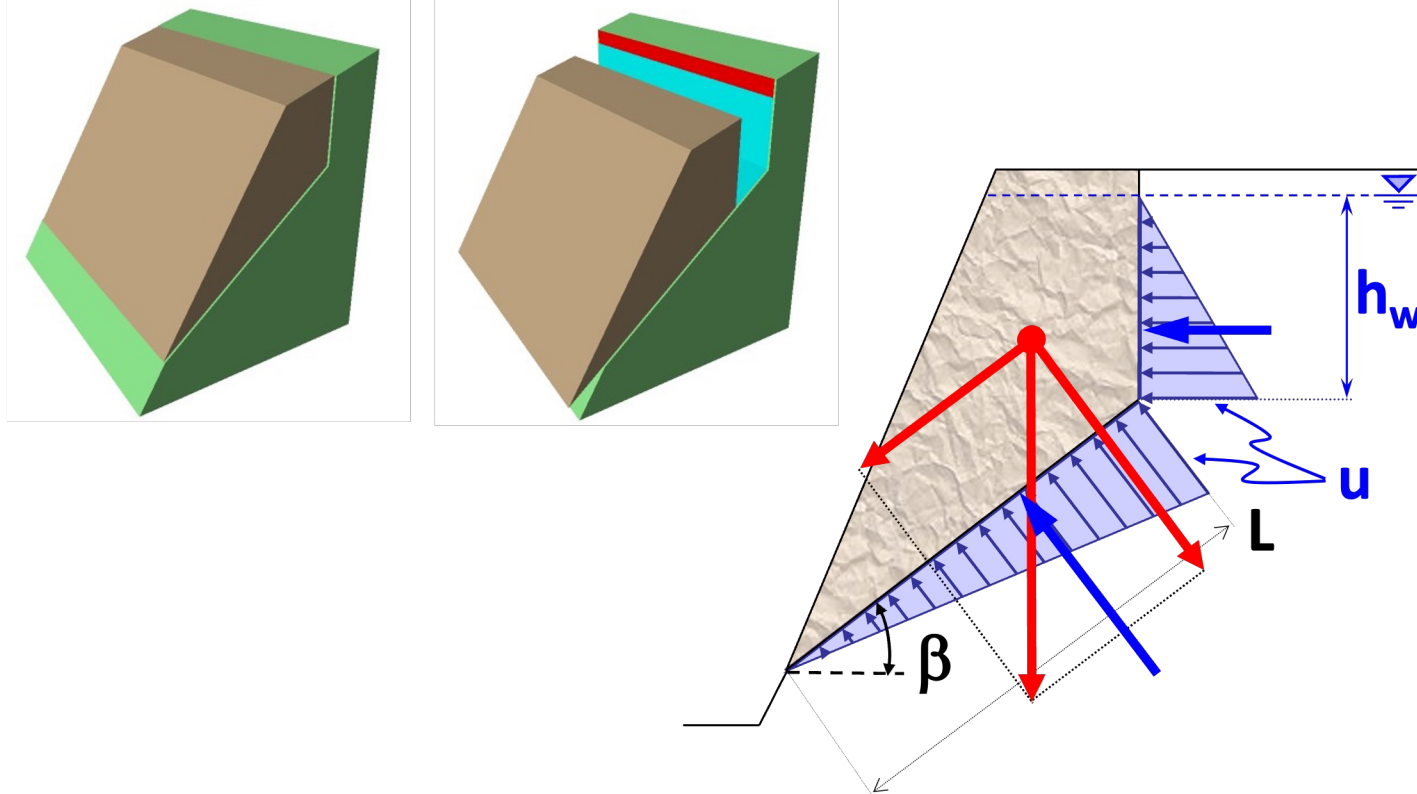
$$k_2 = (e_2/d_2) \cdot k_{f2} + k_m$$



e_i = ouverture des discontinuités - i
 d_i = espacement des discontinuités - i
 k_{fi} = perméabilité des discontinuités - i
 k_m = perméabilité de la matrice rocheuse

2.1.2 Glissement sur un plan, avec fissure de traction

Fissure de traction - Présence d'eau



Présence d'eau + exutoire ouvert

Hypothèses:

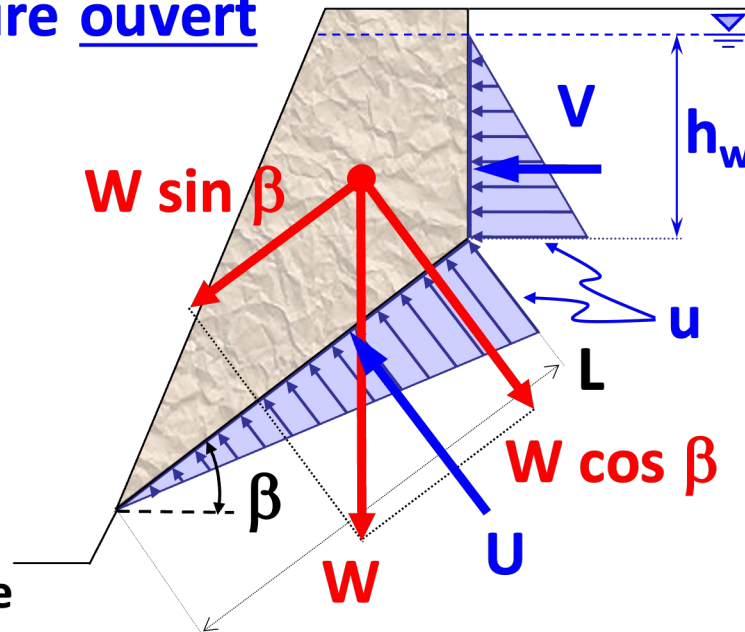
- Mise en charge de la fissure de traction → Répartition hydrostatique.
- Ecoulement avec gradient constant dans le plan de glissement.

→ Pression au pied de la fissure de traction: $u = \gamma_w \cdot h_w$ [kPa]

Force d'eau [kN/m]:

$$V = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot h_w^2$$

$$U = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot h_w \cdot L$$

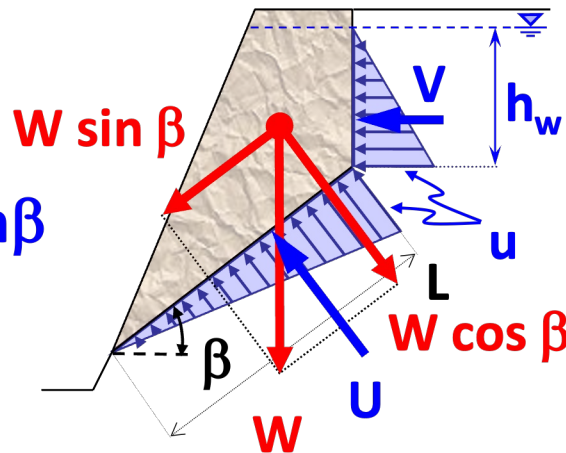


2.1.2 Glissement sur un plan, avec fissure de traction

Stabilité au glissement

$$\uparrow : N = W \cdot \cos \beta - U - V \cdot \sin \beta$$

$$\leftarrow : T = W \cdot \sin \beta + V \cdot \cos \beta$$



$$F_S = \frac{(W \cdot \cos \beta - U - V \cdot \sin \beta) \cdot \tan \varphi + c \cdot A}{W \cdot \sin \beta + V \cdot \cos \beta}$$

*Diminution de la résistance et augmentation de la sollicitation:
→ stabilité beaucoup plus précaire !*

Présence d'eau + exutoire bouché

Hypothèses:

- Mise en charge de la fissure de traction → Répartition hydrostatique.
- Mise en charge de la fissure de traction → Répartition hydrostatique.

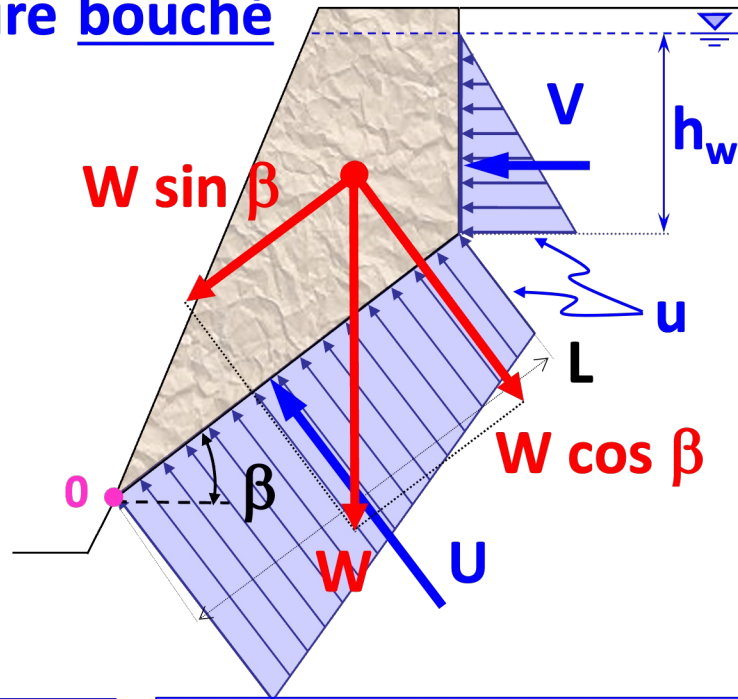
→ Pression à l'exutoire 0:

$$u = \gamma_w \cdot (h_w + L \cdot \sin \beta) \text{ [kPa]}$$

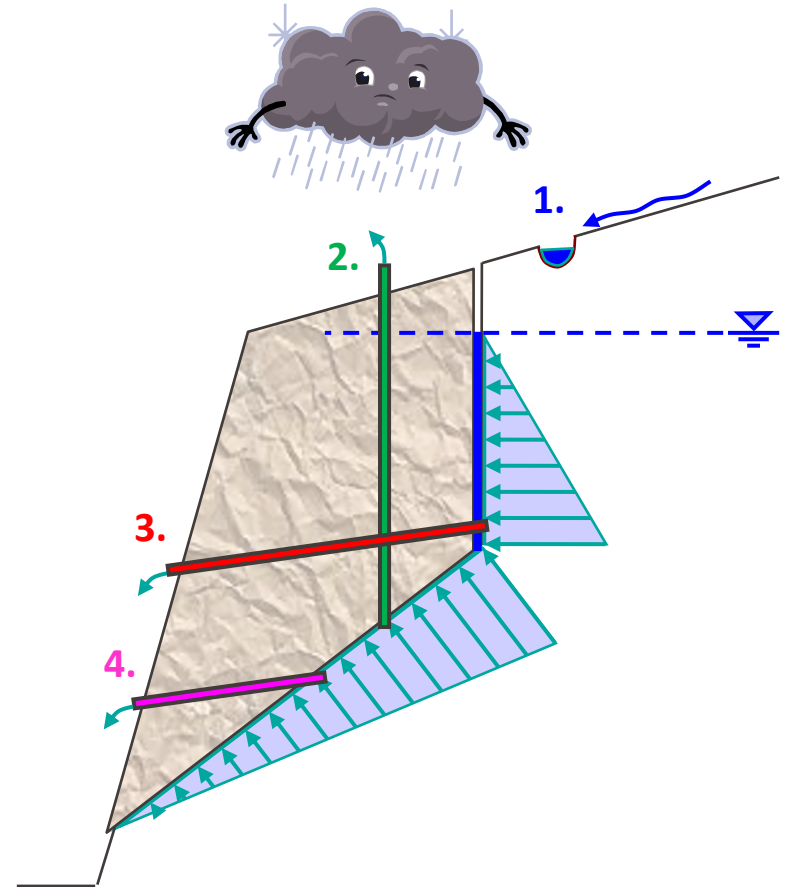
Force d'eau [kN/m]:

$$V = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot h_w^2$$

$$U = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot L \cdot (2 \cdot h_w + L \cdot \sin \beta)$$

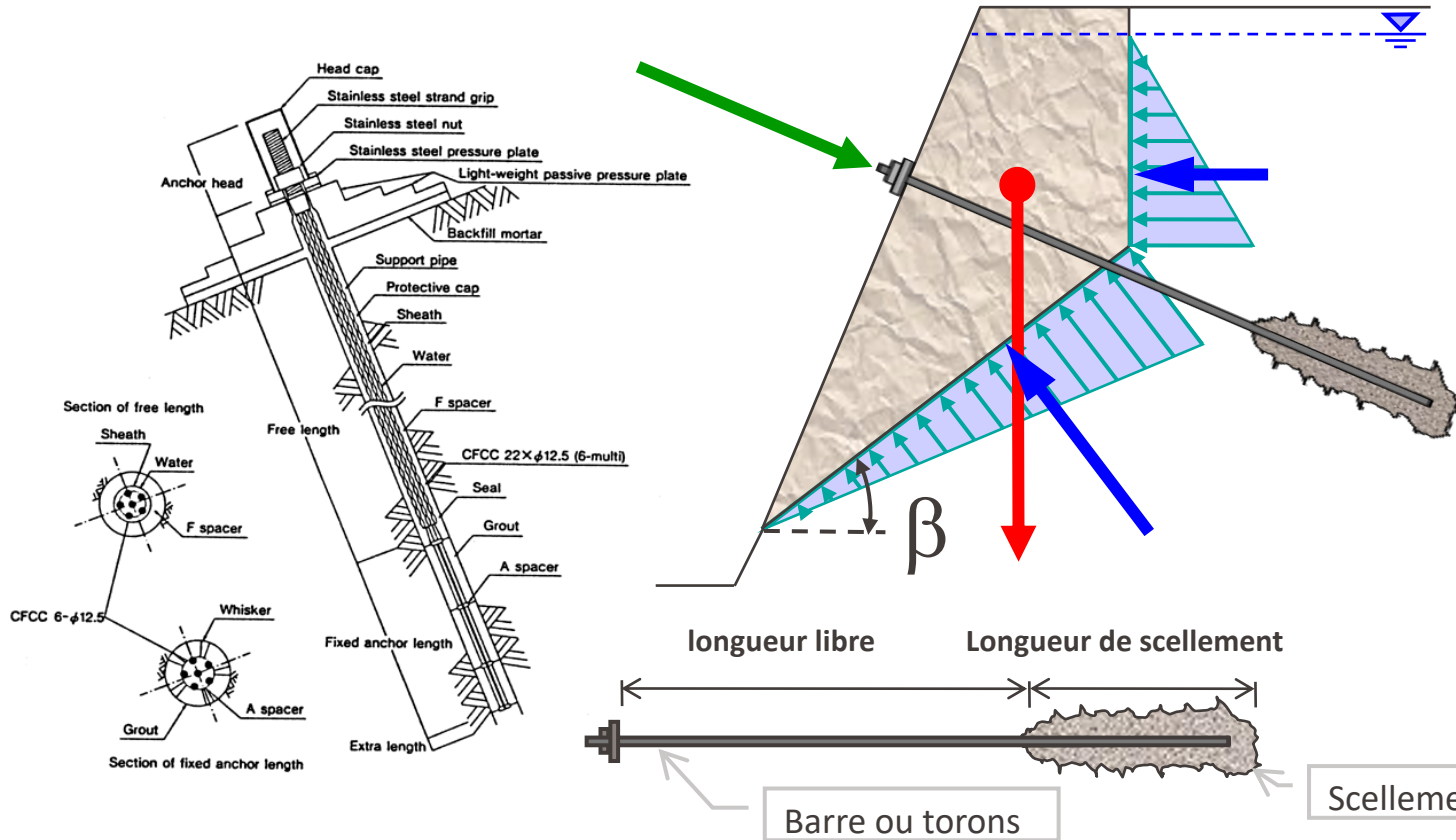


1. Drainage de surface
(canalisation pour les eaux de ruissellement)
2. Pompage dans des puits
3. Drainage gravitaire de la fissure de traction
4. Drainage gravitaire du plan de glissement
5. Galerie de drainage sous le plan de glissement avec drains rayonnants

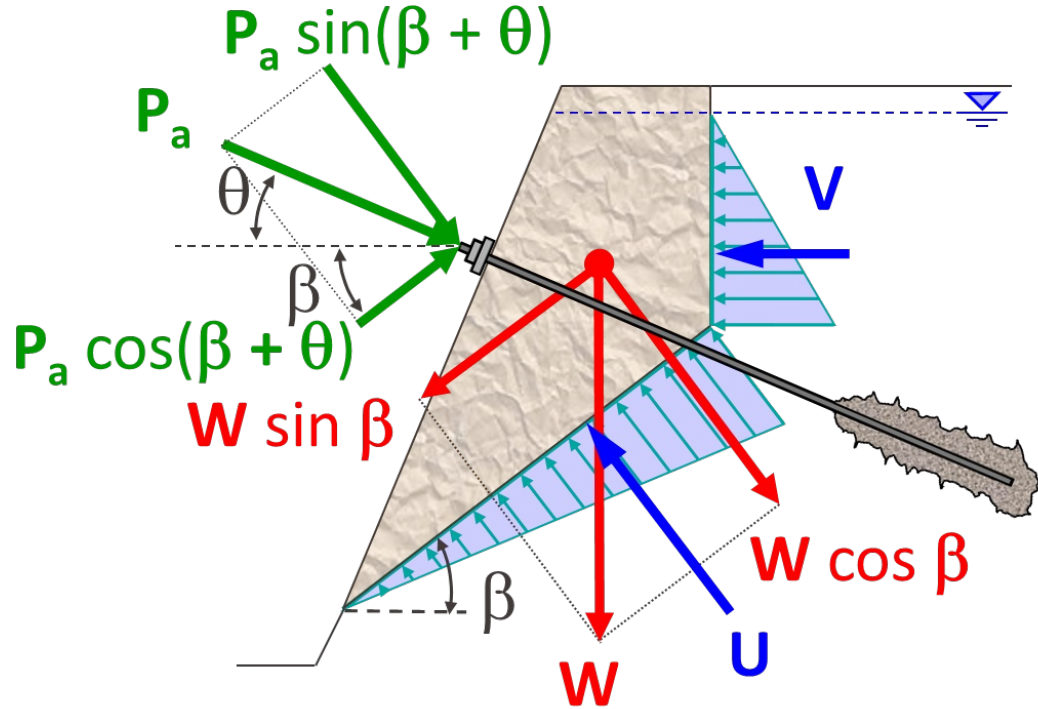


2.1.4 Confortements – Mesures actives

Tirants d'ancrage précontraints

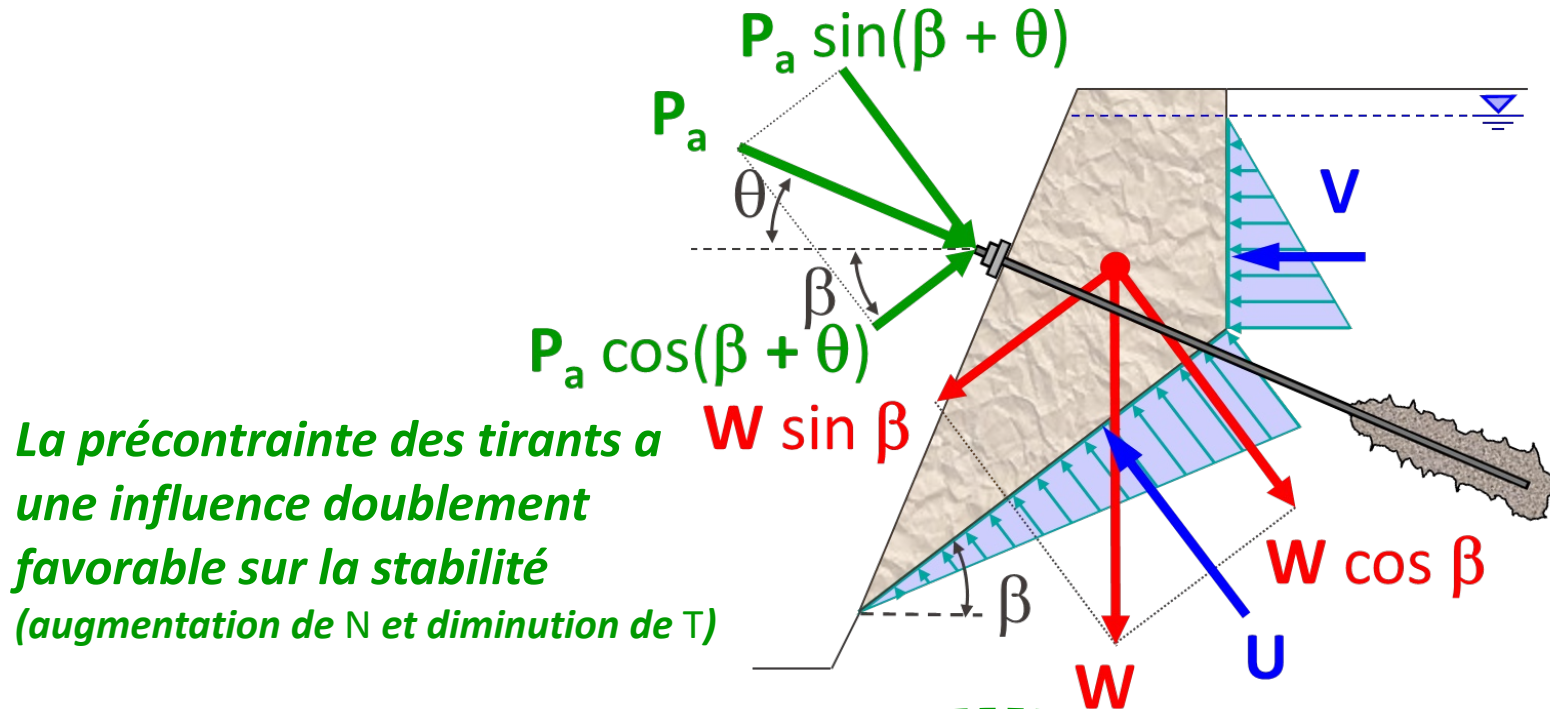


2.1.4 Confortements – Mesures actives



$$\uparrow : N = W \cdot \cos \beta - U - V \cdot \sin \beta + P_a \cdot \sin (\beta + \theta)$$

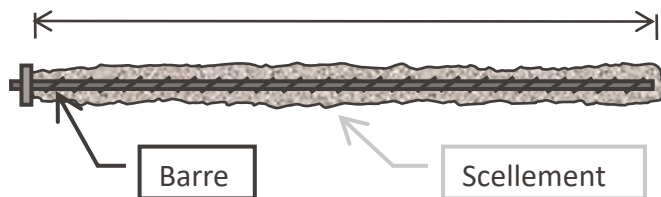
$$\leftarrow : T = W \cdot \sin \beta + V \cdot \cos \beta - P_a \cdot \cos (\beta + \theta)$$



$$F_s = \frac{(W \cdot \cos \beta - U - V \cdot \sin \beta + P_a \cdot \sin(\beta + \theta)) \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \beta + V \cdot \cos \beta - P_a \cdot \cos(\beta + \theta)}$$

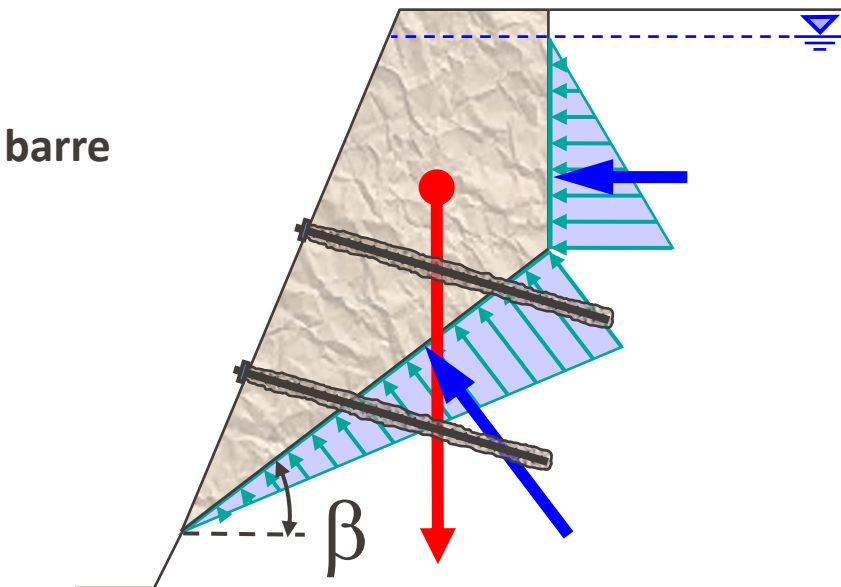
Boulons d'ancrage ou clous

Scellement sur toute la longueur de la barre



Les ancrages passifs augmentent la cohésion du massif rocheux (Bjurström, 1974):

$$c_a = \frac{S_a}{S} \cdot \tau_a \cdot \sqrt{\frac{\sigma_c}{\sigma_f}}$$



S_a = section de la barre (acier)

S = section de roche renforcée

τ_a = résistance au cisaillement de l'acier ($\tau_a \approx 0.6 \sigma_f$)

σ_c = résistance à la compression simple de la roche

σ_f = limite d'élasticité de la barre (acier)

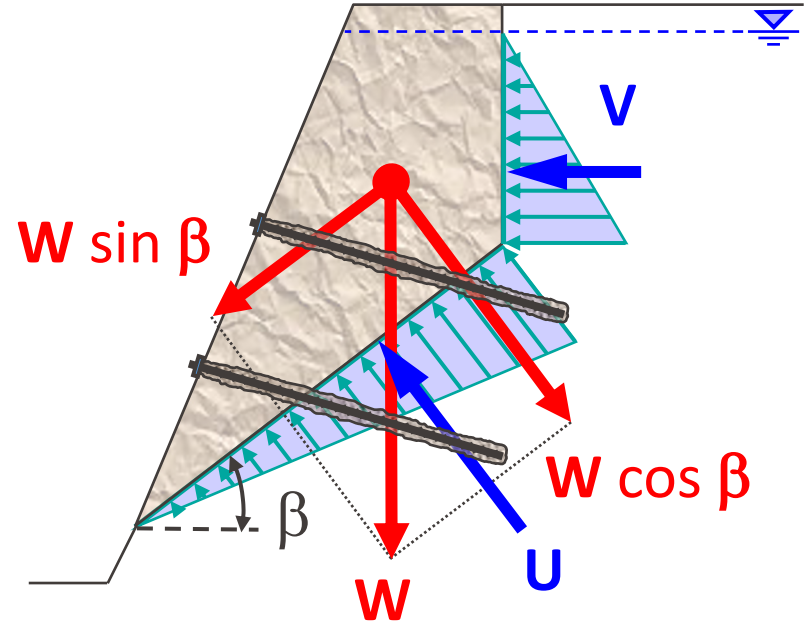
! En réalité, en plus de la flexion et du cisaillement, les barres sont aussi sollicitées en traction...

2.1.4 Confortements – Mesures passives

$$F_s = \frac{N \cdot \tan \varphi + \cancel{c^* \cdot S} + c_a \cdot S}{T}$$

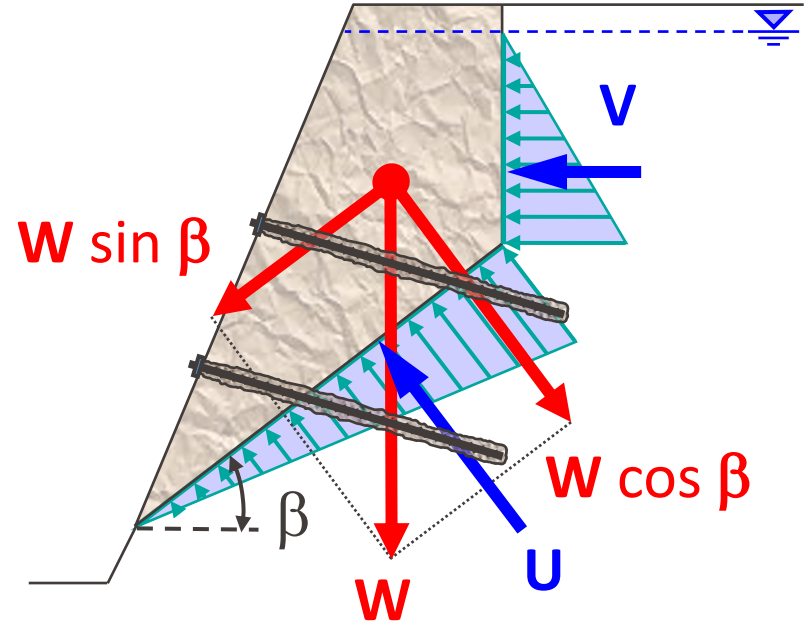
! soit $c^* \cdot S$ soit $c_a \cdot S$!

(ne pas sommer les contributions)



$$\uparrow : N = W \cdot \cos \beta - U - V \cdot \sin \beta$$

$$\leftarrow : T = W \cdot \sin \beta + V \cdot \cos \beta$$



$$F_s = \frac{N \cdot \tan \varphi + c_a \cdot S}{T}$$

$$F_s = \frac{(W \cdot \cos \beta - U - V \cdot \sin \beta) \cdot \tan \varphi + c_a \cdot S}{W \cdot \sin \beta + V \cdot \cos \beta}$$

1. Introduction

2. Analyse de stabilité

2.1. Glissement plan

2.2. Glissement dièdre

2.2.1 Établissement des équations

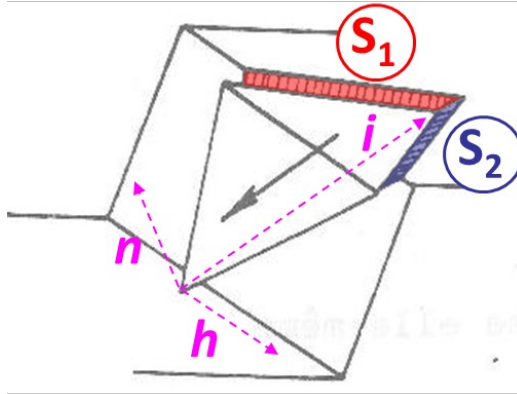
2.2.2 Effet de coin et abaques

2.3. Basculement – Fauchage

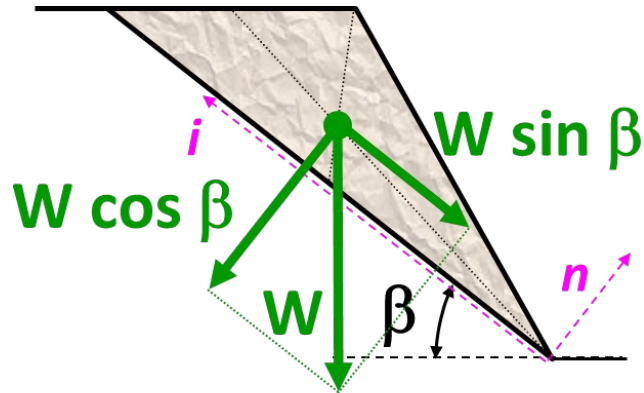
2.4. Glissement rotationnel

3. Considérations pratiques

2.2.1 Glissement dièdre - équations

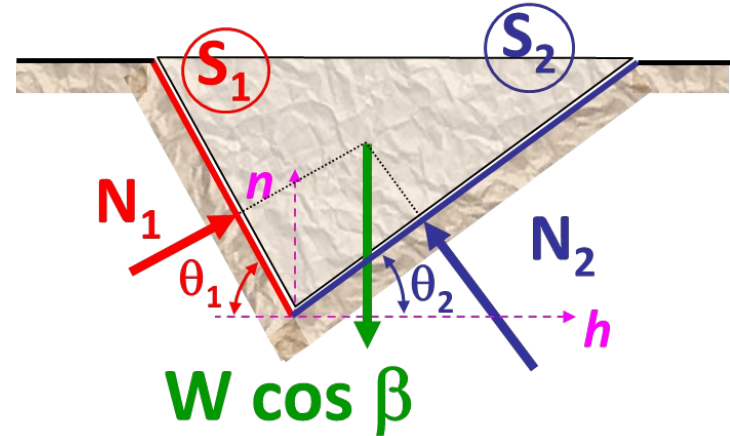


Plan vertical

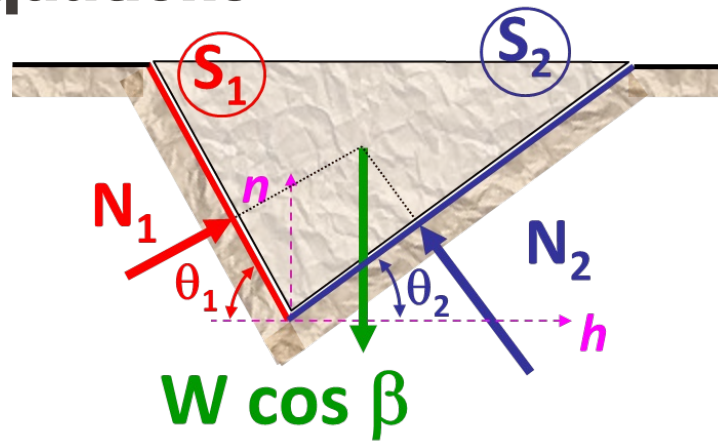
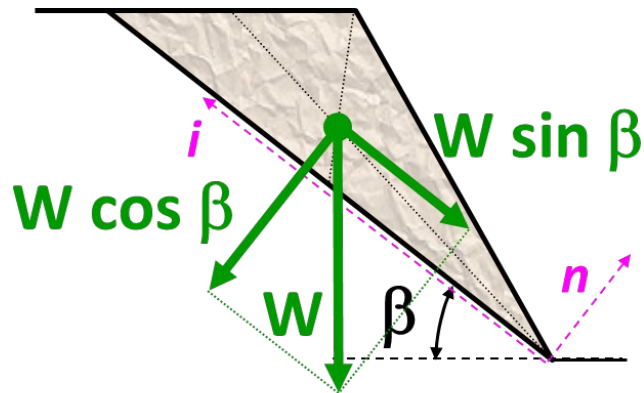


Glissement d'un dièdre rocheux sur les plans S_1 et S_2 . Le glissement se produit dans la direction de la droite d'intersection des 2 plans i .

Coupe perpendiculaire à la direction i



2.2.1 Glissement dièdre - équations



Résolution des équations d'équilibre dans les directions h , i et n :

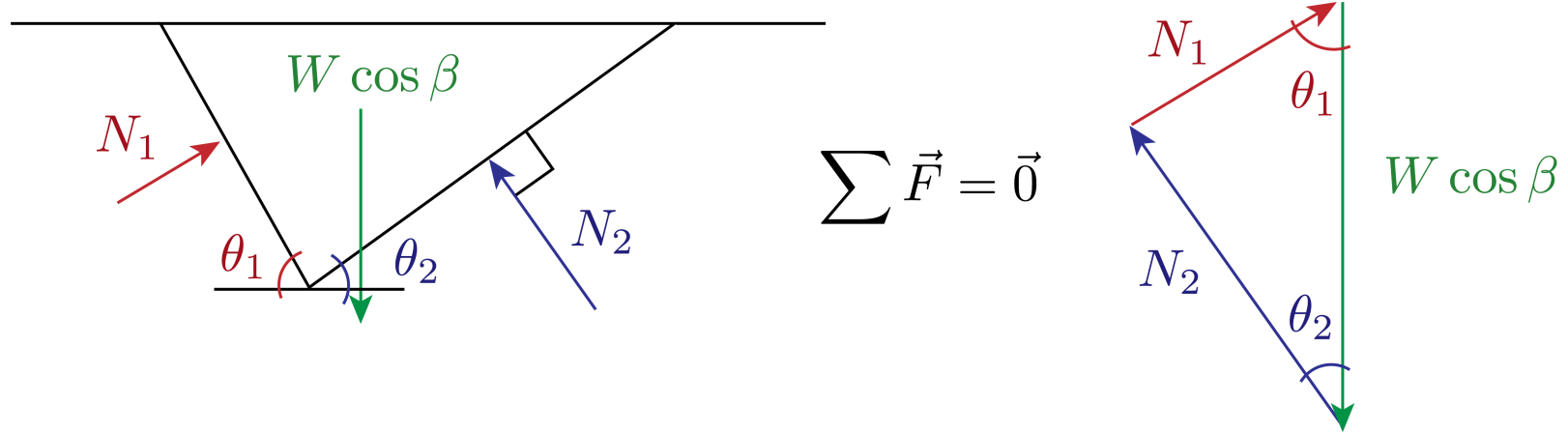
$$F_s = \frac{N_1 \cdot \tan \varphi_1 + N_2 \cdot \tan \varphi_2 + c_1^* \cdot S_1 + c_2^* \cdot S_2}{W \cdot \sin \beta}$$

$$N_1 = \frac{W \cdot \cos \beta \cdot \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}$$

$$N_2 = \frac{W \cdot \cos \beta \cdot \sin \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}$$

2.2.1 Glissement dièdre - équations

- Décomposition force N_1 , N_2 (forces normales aux 2 surfaces) :



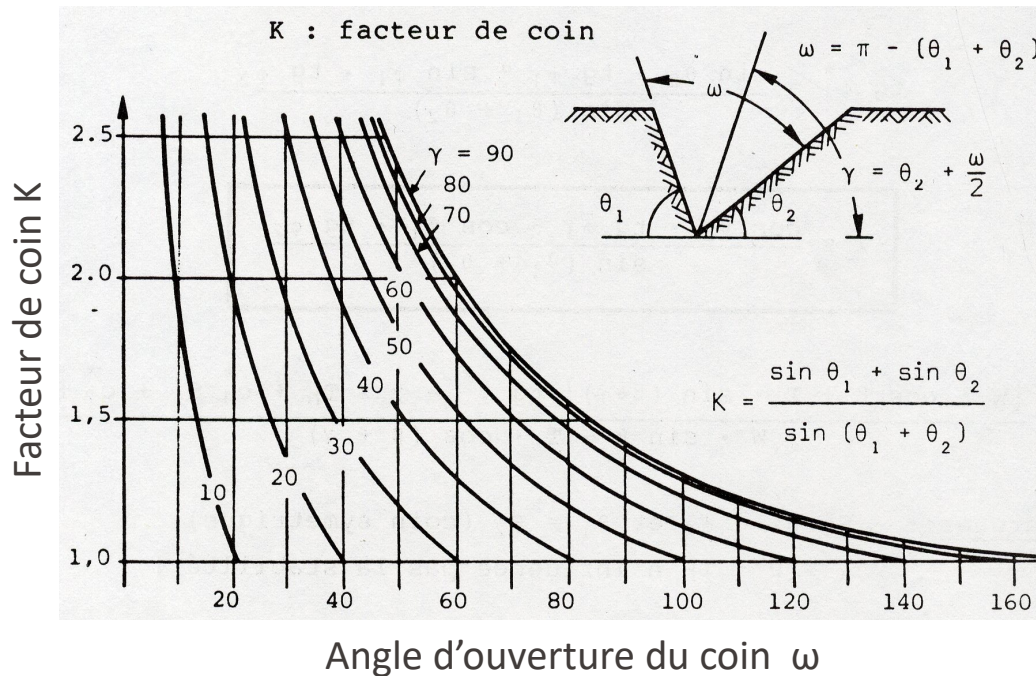
$$\sum F_h = N_1 \sin \theta_1 - N_2 \sin \theta_2 = 0$$

$$\sum F_n = -W \cos \beta + N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2 = 0$$

$$\Leftrightarrow N_1 = \frac{W \cos \beta \sin \theta_2}{\sin (\theta_1 + \theta_2)}, N_2 = \frac{W \cos \beta \sin \theta_1}{\sin (\theta_1 + \theta_2)}$$

2.2.2 Glissement dièdre – effet de coin

si $c_1^* = c_2^* = 0$ (joints lisses) et $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ (plans de même angle de frottement)



$$F_s = K \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$

avec K : Facteur de coin

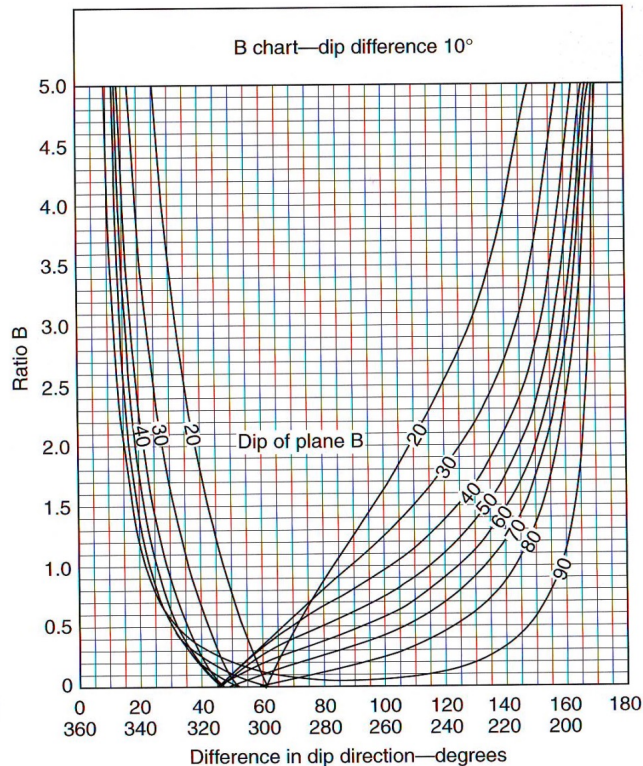
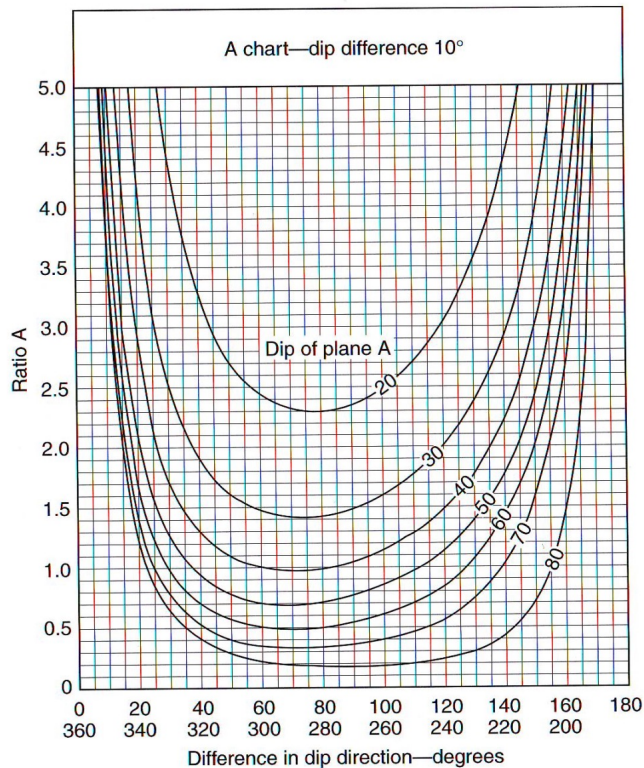
$$K = \frac{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}{\sin (\theta_1 + \theta_2)}$$

La stabilité d'un dièdre est toujours plus grande que celle du glissement plan:

- plus le dièdre est fermé (angle ω petit), meilleure est la stabilité;
- plus le dièdre est droit (angle γ de la bissectrice proche de 90°), meilleure est la stabilité.

2.2.2 Glissement dièdre – effet de coin

Lorsque les angles de frottement φ_A et φ_B sont différents: $F_s = A \cdot \tan \varphi_A + B \cdot \tan \varphi_B$ avec A et B des facteurs adimensionnels fonction du pendage et de la direction. Ces deux facteurs sont tabulés.



Fouilles en rocher

1. Introduction

2. Analyse de stabilité

2.1. Glissement plan

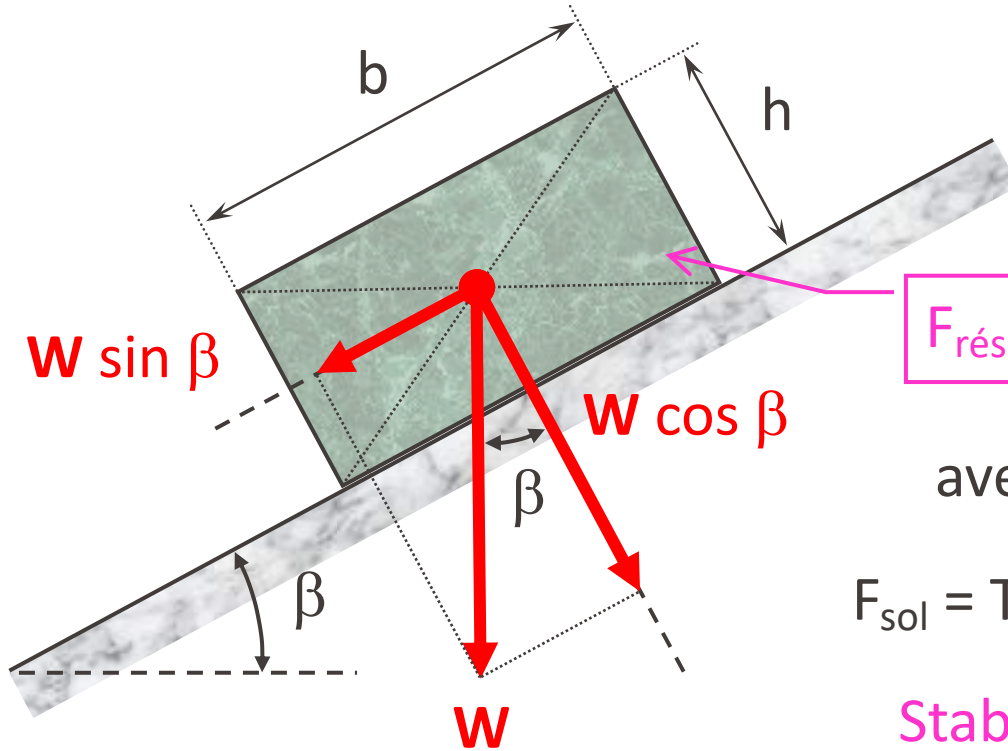
2.2. Glissement dièdre

2.3. Basculement – Fauchage

2.4. Glissement rotationnel

3. Considérations pratiques

2.3.1 Stabilité au glissement d'un bloc



$$F_{\text{rés}} = N \tan \varphi + c^* A$$

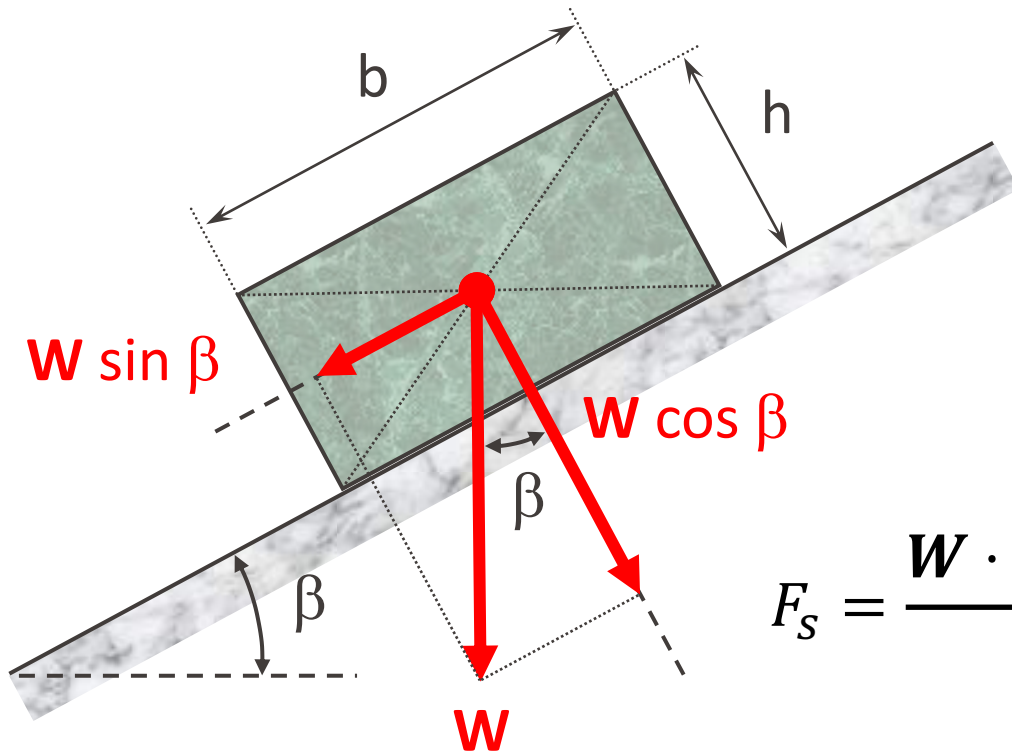
avec $N = W \cdot \cos \beta$

$$F_{\text{sol}} = T = W \cdot \sin \beta$$

Stable si $F_{\text{sol}} < F_{\text{rés}}$

$$W \cdot \sin \beta < (W \cdot \cos \beta) \cdot \tan \varphi + c^* A$$

2.3.1 Stabilité au glissement d'un bloc

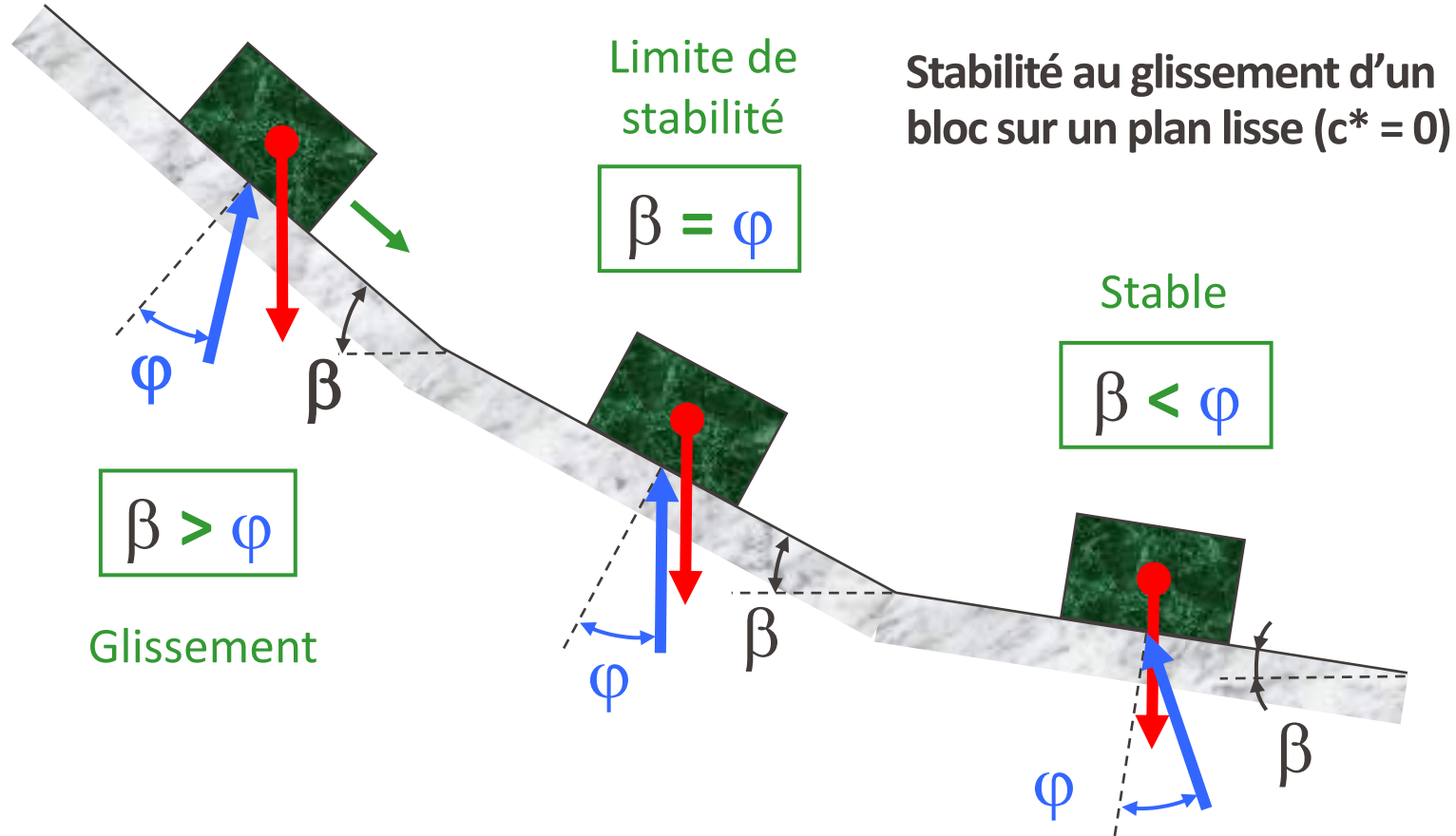


$$F_s = \frac{F_{rés}}{F_{sol}}$$

$$F_s = \frac{W \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi + c^* \cdot A}{W \cdot \sin \beta}$$

Facteur de sécurité au glissement :
$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} + \frac{c^* \cdot A}{W \cdot \sin \beta}$$

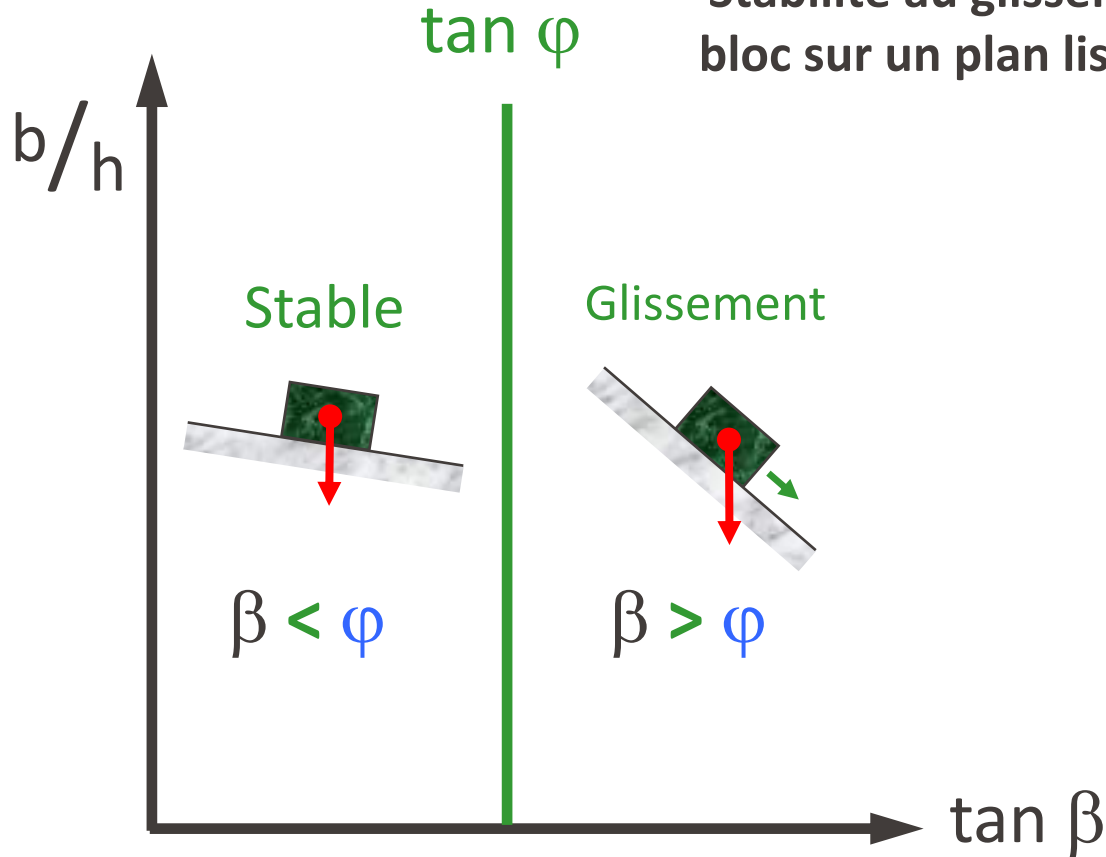
2.3.1 Stabilité au glissement d'un bloc



2.3.1 Stabilité au glissement d'un bloc



Stabilité au glissement d'un
bloc sur un plan lisse ($c^* = 0$)



2.3.1 Stabilité au glissement d'un bloc

$$M_{\text{déstabilisant},0} = W \cdot \sin \beta \cdot h/2$$

$$M_{\text{stabilisant},0} = W \cdot \cos \beta \cdot b/2$$

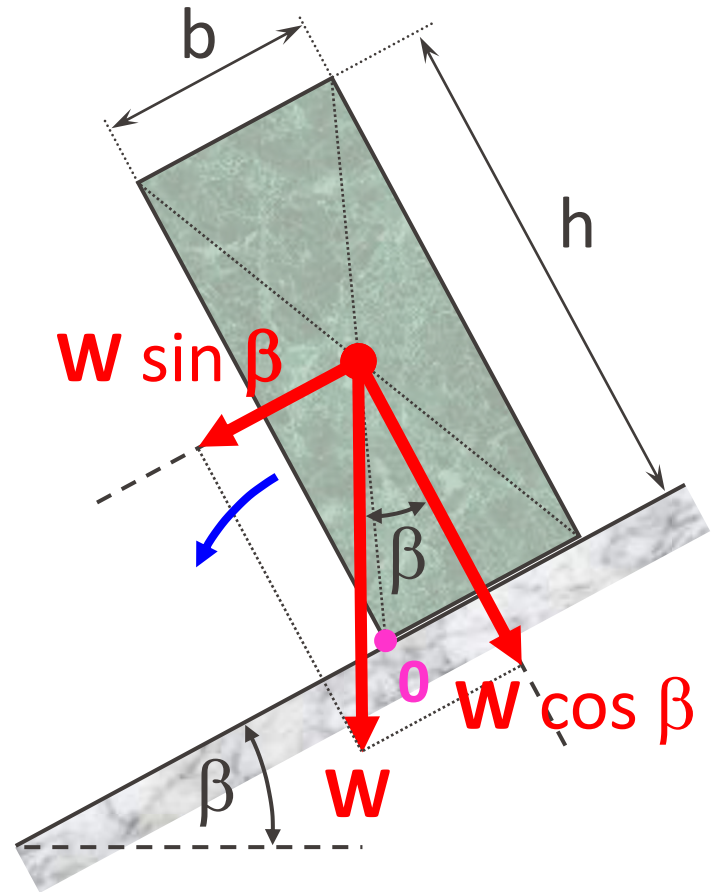
Stable si $M_{\text{déstab},0} < M_{\text{stab},0}$

$$\tan \beta < b/h$$

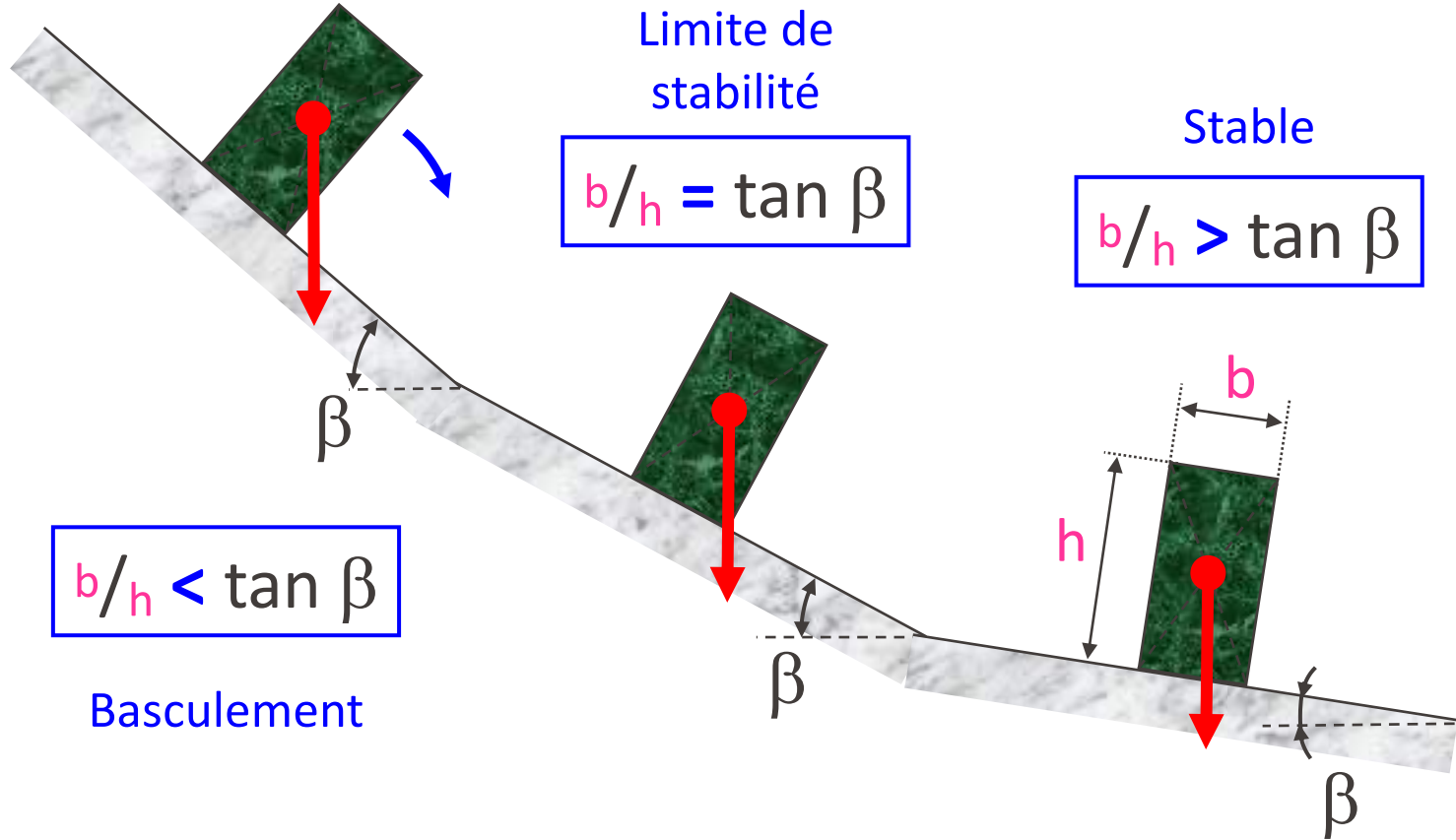
Instabilité au basculement si la ligne d'action du **vecteur poids propre W** recoupe la surface du versant en dehors de la base de la colonne.

Facteur de sécurité au basculement:

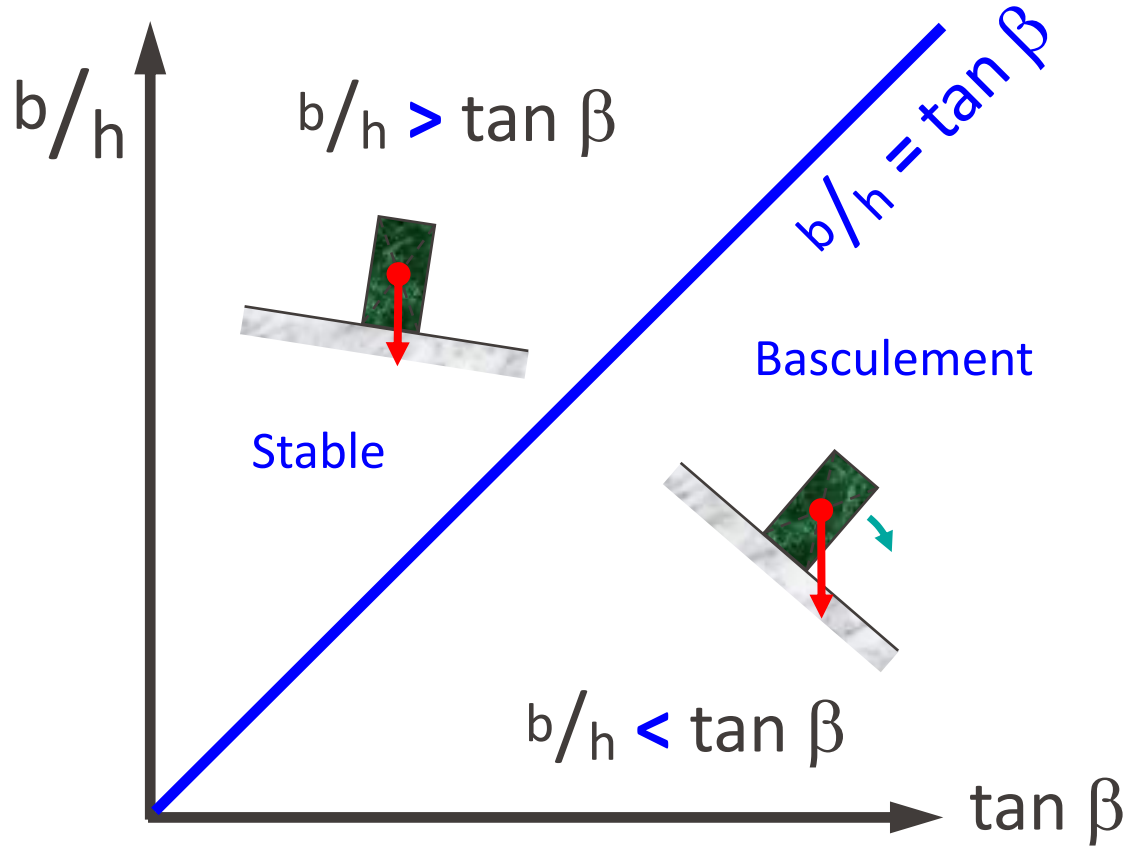
$$F_s = \frac{M_{\text{stab},0}}{M_{\text{déstab},0}} = \frac{b}{h \cdot \tan \beta}$$



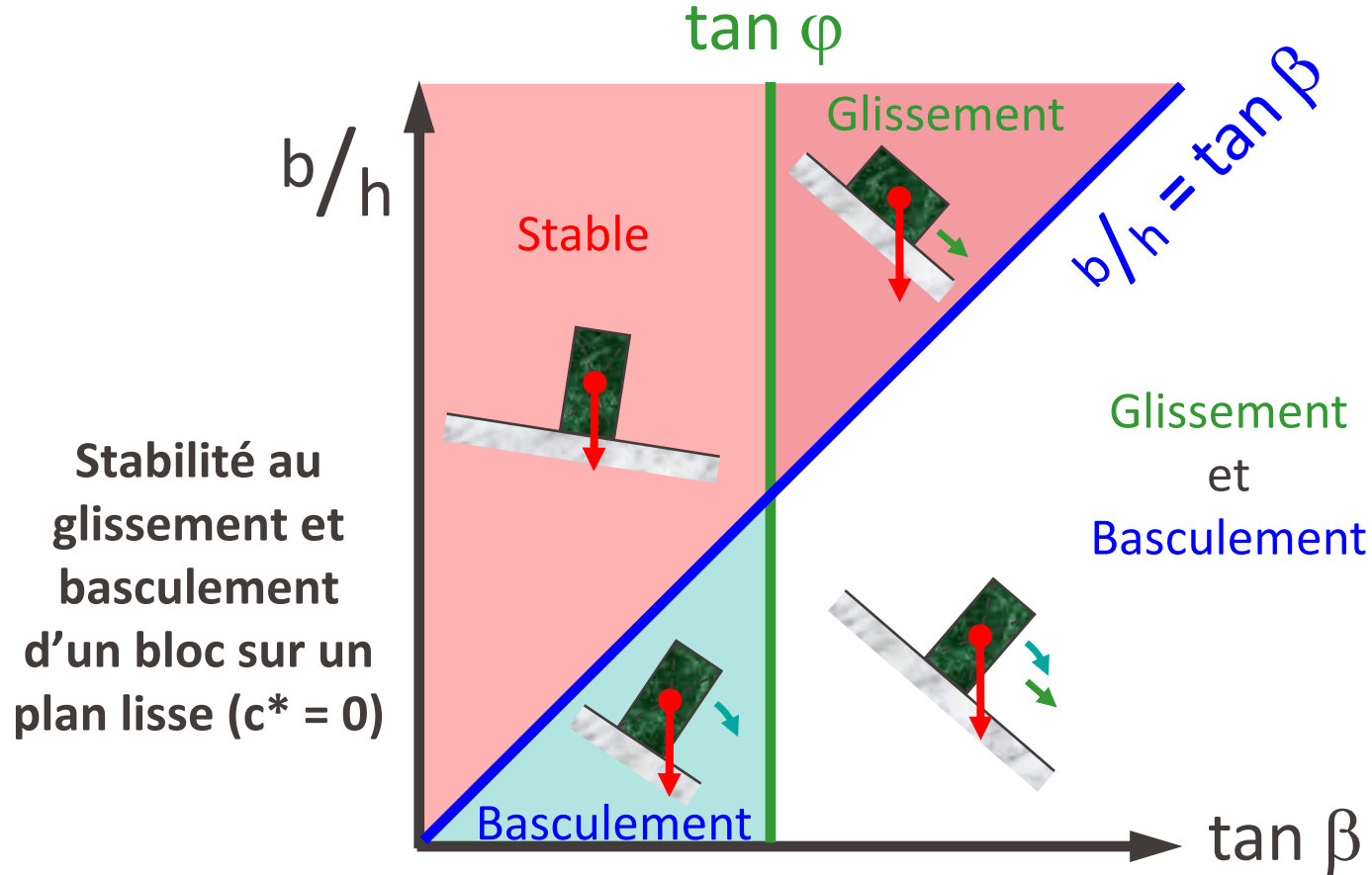
2.3.1 Stabilité au glissement d'un bloc



2.3.1 Stabilité au glissement d'un bloc



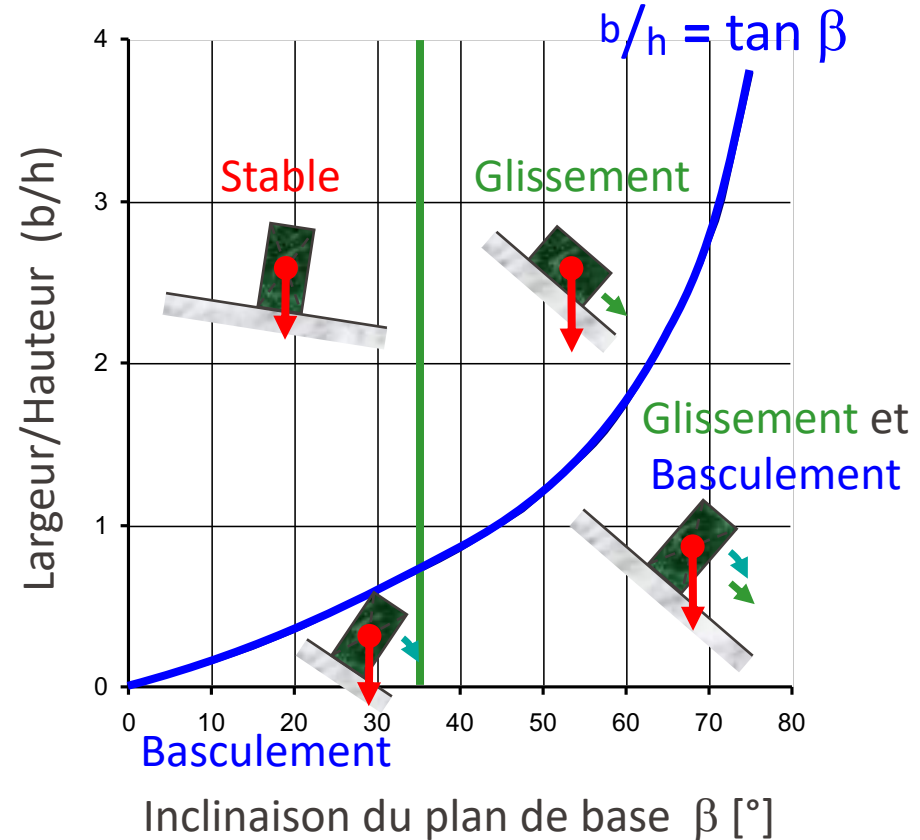
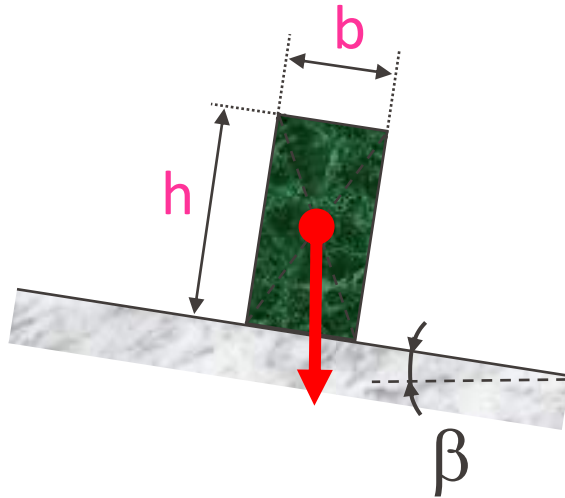
2.3.1 Stabilité au basculement et glissement



2.3.1 Stabilité au basculement et glissement



Stabilité au glissement et basculement d'un bloc sur un plan lisse ($c^* = 0$)



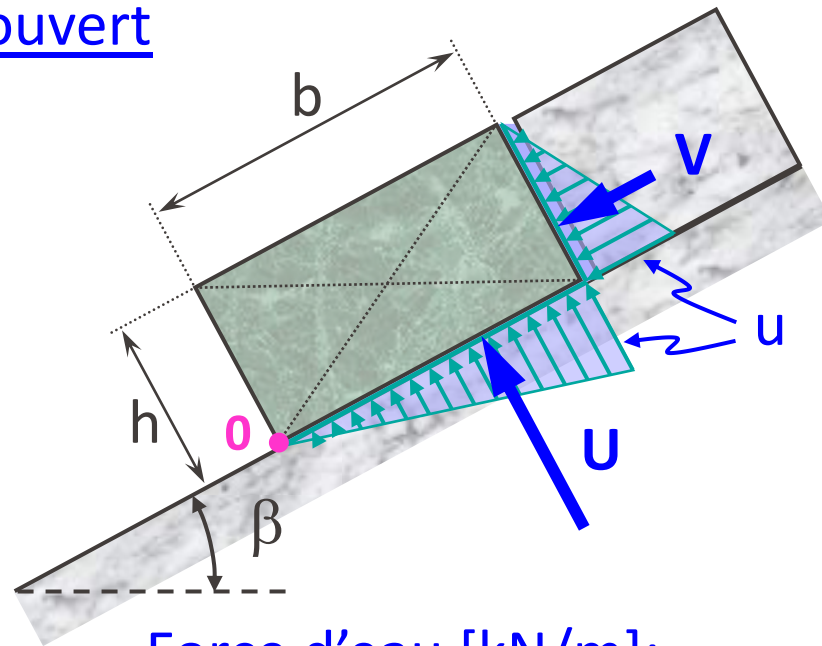
Présence d'eau + exutoire ouvert

Hypothèses:

- Répartition hydrostatique dans la fissure arrière.
- Ecoulement avec gradient constant dans le plan de glissement.

→ Pression à l'exutoire: $u_0 = 0$

→ Pression au pied de la fissure
arrière: $u = \gamma_w \cdot h \cdot \cos \beta$



Force d'eau [kN/m]:

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot h^2 \cdot \cos \beta$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot h \cdot b \cdot \cos \beta$$

2.3.1 Stabilité d'un bloc en présence d'eau

Présence d'eau + exutoire ouvert

Stable au glissement si :

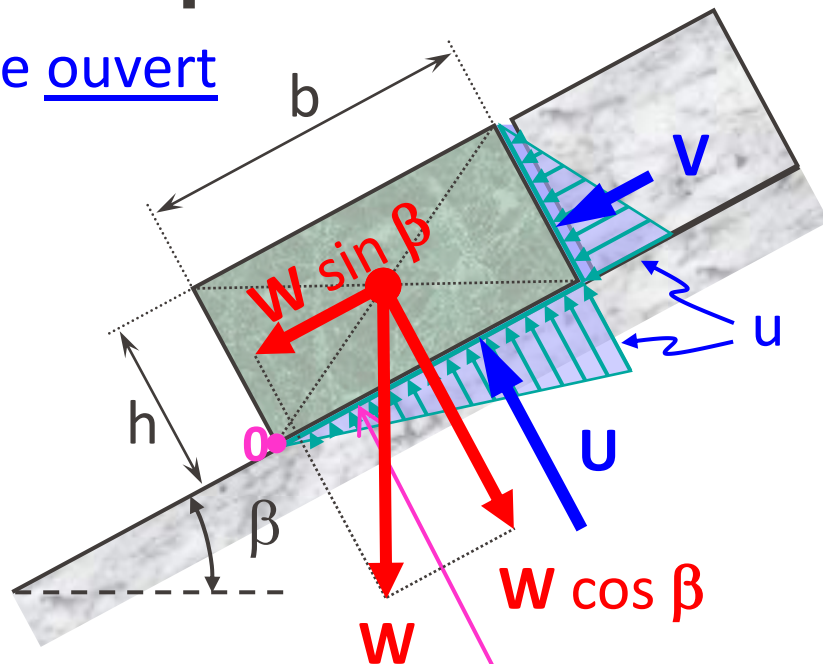
$$F_{sol} < F_{rés} = N' \tan \varphi + c * A$$

$$N' = (W \cdot \cos \beta - U)$$

$$F_{sol} = T = (W \cdot \sin \beta + V)$$

$$F_s = \frac{F_{rés}}{F_{sol}} = \frac{(W \cdot \cos \beta - U) \cdot \tan \phi + c * A}{W \cdot \sin \beta + V}$$

→ La résistance au glissement est réduite



$$F_{rés} = N \tan \varphi + c * A$$

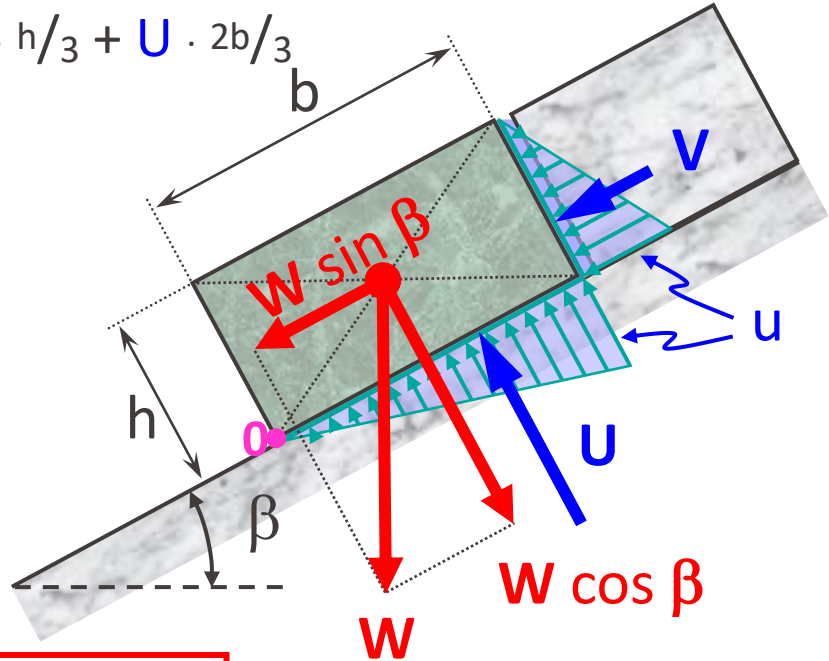
2.3.1 Stabilité d'un bloc en présence d'eau

$$M_{\text{déstabilisant},0} = W \cdot \sin \beta \cdot h/2 + V \cdot h/3 + U \cdot 2b/3$$

$$M_{\text{stabilisant},0} = W \cdot \cos \beta \cdot b/2$$

Stable au basculement si :

$$M_{\text{déstab},0} < M_{\text{stab},0}$$



$$F_s = \frac{M_{\text{stab},0}}{M_{\text{déstab},0}} = \frac{W \cdot \cos \beta \cdot b/2}{W \cdot \sin \beta \cdot h/2 + V \cdot h/3 + U \cdot 2h/3}$$

*Stabilité au basculement
beaucoup plus précaire*

2.3.1 Stabilité d'un bloc en présence d'eau



Présence d'eau + exutoire bouché

Hypothèse:

- Pas d'écoulement dans la fissure basale.
- → Répartition hydrostatique jusqu'à l'exutoire.

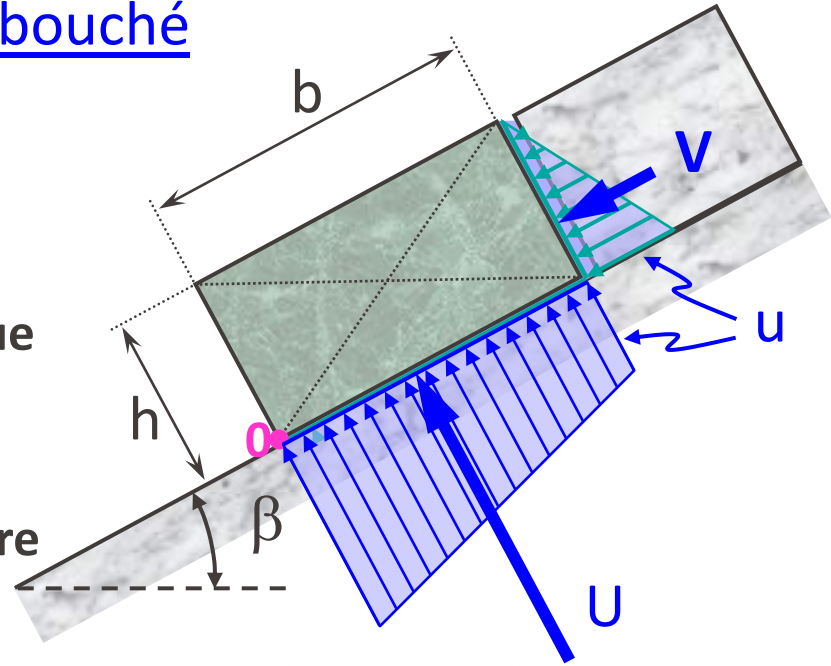
→ Pression au pied de la fissure arrière: $u = \gamma_w \cdot h \cdot \cos \beta$

→ Pression à l'exutoire: $u_0 = \gamma_w \cdot (h \cdot \cos \beta + b \cdot \sin \beta)$

Force d'eau [kN/m]:

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot h^2 \cdot \cos \beta$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot b \cdot (2 \cdot h \cdot \cos \beta + b \cdot \sin \beta)$$



1. Introduction

2. Analyse de stabilité

3. Considérations pratiques

3.1. Estimation empirique de la stabilité

3.2. Excavation

3.3. Mesures de renforcement et de protection

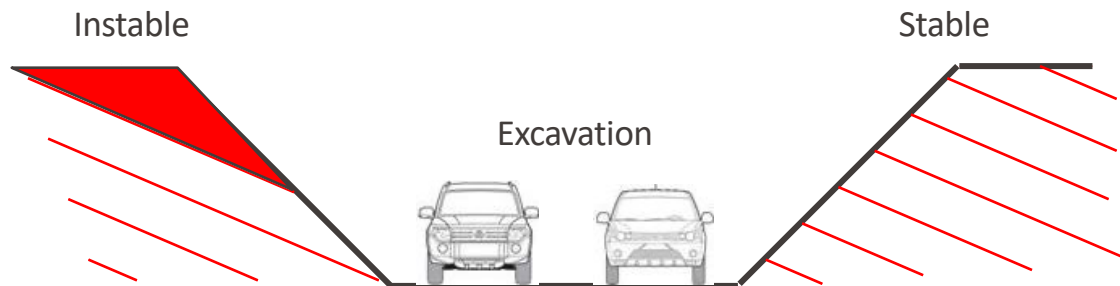
3.1 Estimation empirique de la stabilité

Estimation de la stabilité à l'aide du Rock Mass Rating

La stabilité de fouilles en rocher dépend de la qualité et des propriétés mécaniques du massif rocheux. Le RMR permet d'estimer cette qualité.

Ajustement du RMR

Cependant, lorsqu'une fouille est réalisée dans un massif rocheux, la stabilité des talus dépend également de l'orientation des discontinuités par rapport au talus. Une correction due à l'orientation des discontinuités doit ainsi être faite.



3.1 Estimation empirique de la stabilité

Rock Mass Rating (RMR)

(a) RMR

Le RMR est la somme de cinq paramètres. Chacun caractérise une propriété: (i) Résistance, (ii) RQD, (iii) Espacement des discontinuités, (iv) Qualité des discontinuités (v) Conditions hydrauliques

RMR	>81	61 – 80	41 – 60	21 – 40	< 20
Qualité du rocher	Très Bon	Bon	Moyen	Mauvais	Très Mauvais

(b) Ajustement des discontinuités

		Très Favorable	Favorable	Sans importance	Défavorable	Très Défavorable
Type d'ouvrage	Tunnels	0	– 2	– 5	– 10	– 12
	Fondations	0	– 2	– 7	– 15	– 25
	Pentes	0	– 5	– 25	– 50	– 60

3.1 Estimation empirique de la stabilité



Ajustement du RMR pour la stabilité des pentes

Cet ajustement est prévu pour des instabilités de type plan, dièdre et de basculement. L'orientation des discontinuités est importante.

$$\text{Note d'ajustement du RMR} = (A * B * C) + D$$

$$\text{RMR ajusté} = \text{RMR} + [(A * B * C) + D]$$

Les notes A, B et C sont liées à l'orientation des discontinuités, tandis que la note D est fonction de la qualité d'exécution de la pente excavée.

3.1 Estimation empirique de la stabilité

Ajustement du RMR pour la stabilité des pentes

Ajustement	Très Favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très Défavorable
Différence d'azimut de pendage entre talus & discontinuités	< -30 ou > 30	-30 à -20 30 à 20	-20 à -10 20 à 10	-10 à -5 10 à 5	-5 à 5
A	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Pendage des discontinuités	< 20	20 à 30	30 à 35	35 à 45	> 45
B	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Différence de pendage entre discontinuités & talus	> 10	10 à 0	0	0 à -10	< -10
C	0	-6	-25	-50	-60
Type de pente	Pente naturelle	Prédécoupage	Explosif (travail soigné)	Explosif/ripage	Explosif (sans soin)
D	+15	+10	+8	0	-8

3.1 Estimation empirique de la stabilité

Direction des discontinuités – direction talus

Lorsqu'elles sont proches, le développement d'un glissement est plus probable.

Pendage des discontinuités

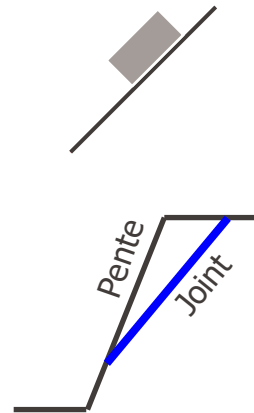
Le pendage doit être significatif pour qu'il y ait glissement ($>$ angle de frottement).

Pendage des discontinuités – pendage talus

Si le pendage des discontinuités $<$ pendage du talus, le glissement peut se produire.

Type de pente

Des talus réalisés soigneusement ont moins de chance d'être instables.



3.1 Estimation empirique de la stabilité



RMR pour la stabilité des pentes

RMR ajusté	Qualité du massif rocheux	Stabilité du talus	Mode de rupture	Renforcement
> 81	Très bon	Très stable	Aucun	Aucun
61 ~ 80	Bon	Stable	Renversement de quelques blocs	Ponctuel
41 ~ 60	Moyen	Partiellement stable	Quelques ruptures planes, plusieurs en dièdre	Systématique
21 ~ 40	Mauvais	Instable	Ruptures planes ou grands dièdres	Significatif, correctif
< 20	Très mauvais	Très instable	Grands dièdres ou rupture circulaire	Reprofilage

Fouilles en rocher

1. Introduction

2. Analyse de stabilité

3. Considérations pratiques

3.1. Estimation empirique de la stabilité

3.2. Excavation

3.3. Mesures de renforcement et de protection

Excavation

Les explosifs sont utilisés pour l'excavation de roches dures. Les explosifs doivent être utilisés avec minutie et la roche préparée avant d'être explosée.

Les roches tendres sont quant à elles excavées avec des machines.



3.2 Excavation des massifs rocheux



«Smooth blasting»

Découpage postérieur à l'explosion principale

Une rangée de trous parallèles est forée avec un espacement de 60 à 100 cm.

Les charges sont faibles.

Elles sont découplées des charges présentes au sein du volume à terrasser.

L'explosion de cette rangée de trous est réalisée après l'explosion principale.



3.2 Excavation des massifs rocheux



Prédécoupage

Découpage préalable à l'explosion principale

Une série de trous parallèles avec un espacement de 50 à 80 cm est forée le long de la face du futur talus.

Les charges sont très faibles.

Elles sont découplées des charges présentes au sein du volume à terrasser.

L'explosion de cette rangée de trous est réalisée avant l'explosion principale.



1. Introduction

2. Analyse de stabilité

3. Considérations pratiques

3.1. Estimation empirique de la stabilité

3.2. Excavation

3.3. Mesures de renforcement et de protection

3.3 Mesures de renforcement et de protection



Drainages :

En surface

En profondeur

Béton :

Projeté

Poutres

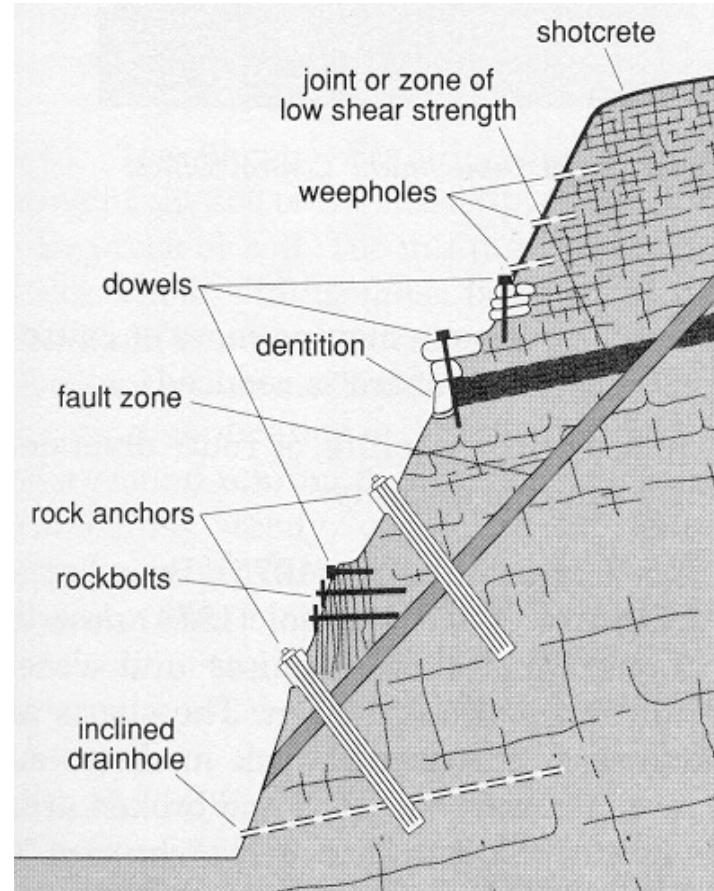
Mur de soutènement en pied

Stabilisation / confortement :

Clous

Ancrages

Filets plaqués



3.3 Mesures de renforcement et de protection

Pas de support :

Correction de pente

Bermes intermédiaires

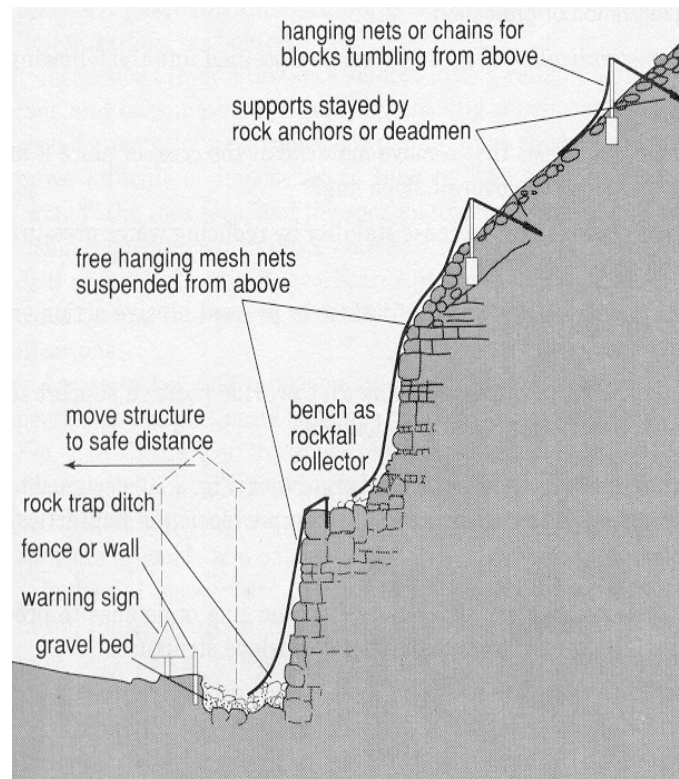
Ouvrages de protection :

Filets pendus

Fosse de réception

Digue

Barrière (en pied de pente)



3.3 Mesures de renforcement et de protection



Bon rocher peu fracturé (Espacement moyen des discontinuités $> 1\text{m}$):

Renforcement systématique tous les 3 à 4 m.

Bon rocher fracturé (Espacement moyen des discontinuités 0.3 à 1m):

Renforcement systématique tous les 1 à 3 m ou $3\times$ l'espacement des joints.

Bon rocher très fracturé (Espacement moyen des discontinuités $< 0.3\text{m}$):

Renforcement systématique tous les 1m avec béton projeté de 15 à 25cm.

Rocher érodé avec discontinuités remplies de matériaux

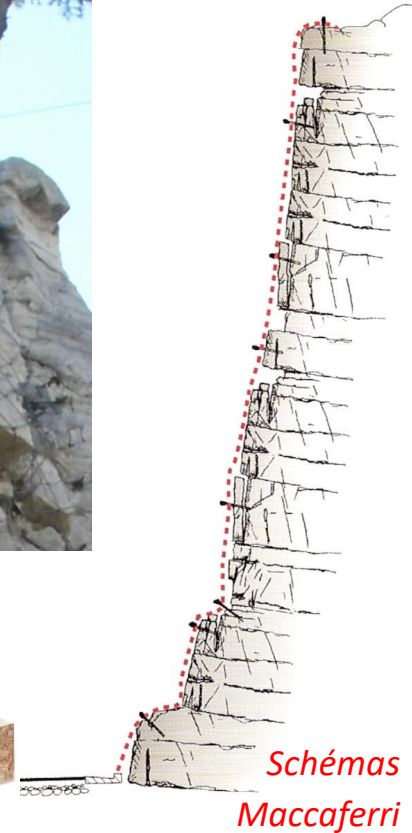
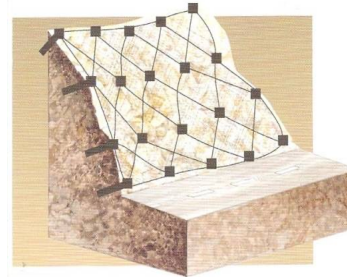
Clouage des blocs. La longueur et la répartition des clous dépend du réseau des discontinuités.

Roche tendre (Résistance uniaxiale $< 25\text{ MPa}$):

Renforcement systématique avec béton projeté pour obtenir une résistance entre 5 et 25 MPa. Les clous ne peuvent pas être utilisés pour des rochers avec une résistance $< 5\text{ MPa}$.

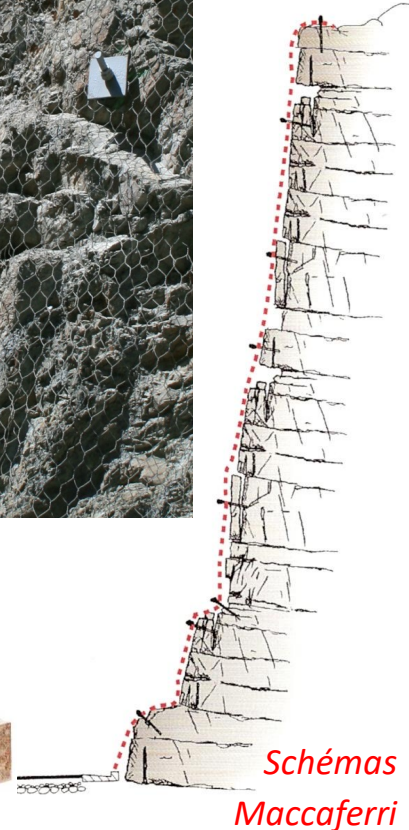
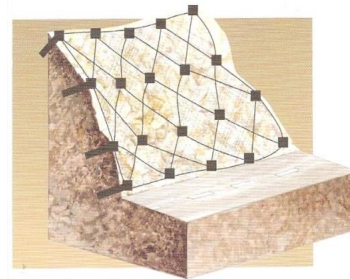
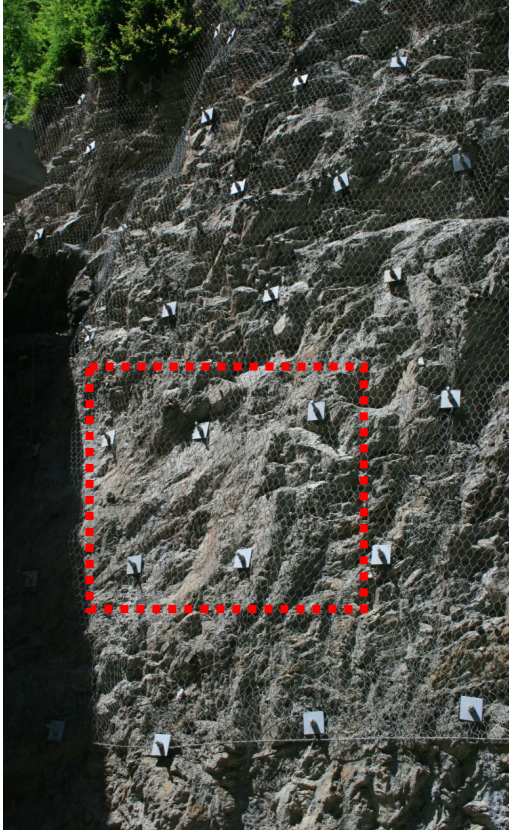
3.3 Filets plaqués ou emmaillotage

assurent la stabilité superficielle de la paroi rocheuse (→ évitent le départ de pierres)



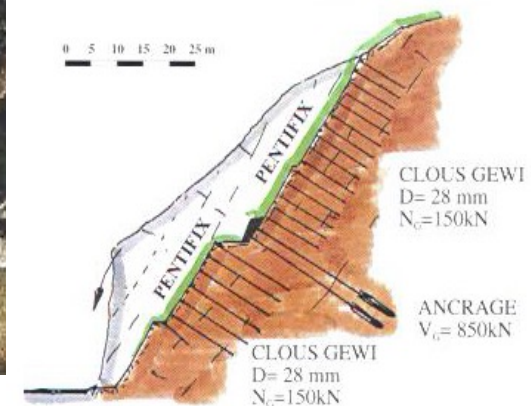
3.3 Filets plaqués ou emmaillotage

assurent la stabilité superficielle de la paroi rocheuse (→ évitent le départ de pierres)

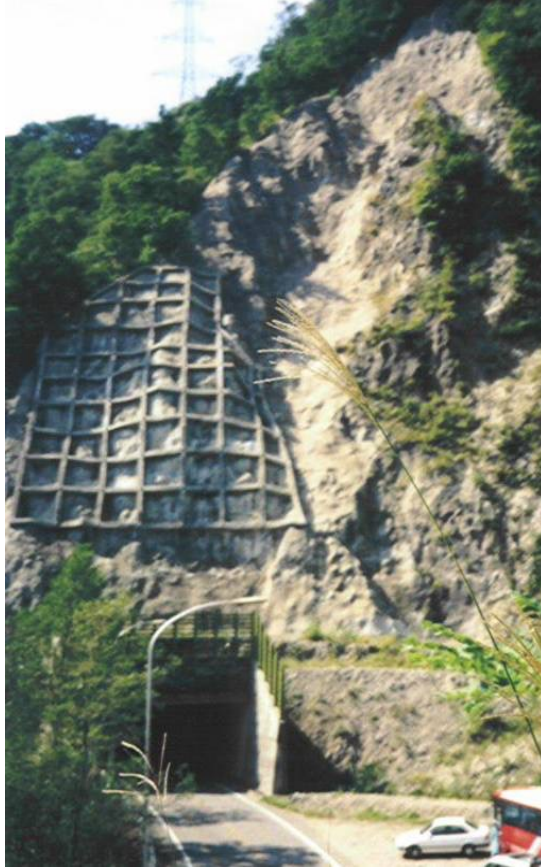


3.3 Filet plaqué végétalisé

- + reprofilage du versant
- + ancrages actifs (tirants précontraints)
- + ancrages passifs (clous)



3.3 Confortement par tirants d'ancrage précontraints

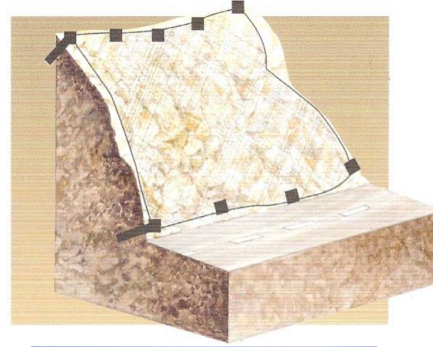


3.3 Béton projeté

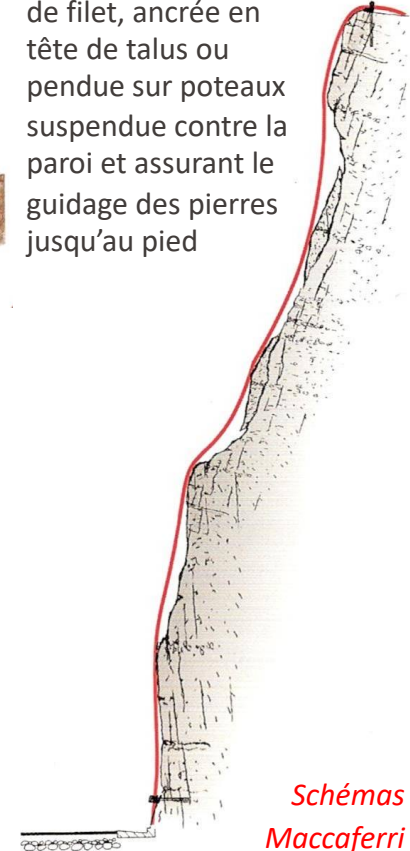
- Couche de béton projetée sur la paroi pour :
 - protéger celle-ci de l'érosion (pluie, ruissellement) et de l'altération (agents atmosphériques et cycles gel-dégel)
 - maintenir en place des petits éléments instables
- Ce béton à prise rapide est généralement projeté sur une nappe de treillis préalablement ancrée dans le massif.
- Il est essentiel de prévoir des drains et/ou barbacanes pour éviter une mise en pression d'eau derrière le béton.



3.3 Grillage ou filet pendu



Nappe de grillage ou de filet, ancrée en tête de talus ou pendue sur poteaux suspendue contre la paroi et assurant le guidage des pierres jusqu'au pied



*Schémas
Maccaferri*

3.3 Grillage ou filet pendu



En pied, le grillage est soit :

- laissé libre
- lesté (barres métalliques, plots en béton)
- maintenu par un câble horizontal amovible ancré au rocher

Une fosse de réception des matériaux est nécessaire en pied de talus



3.3 Fosse de réception et digue

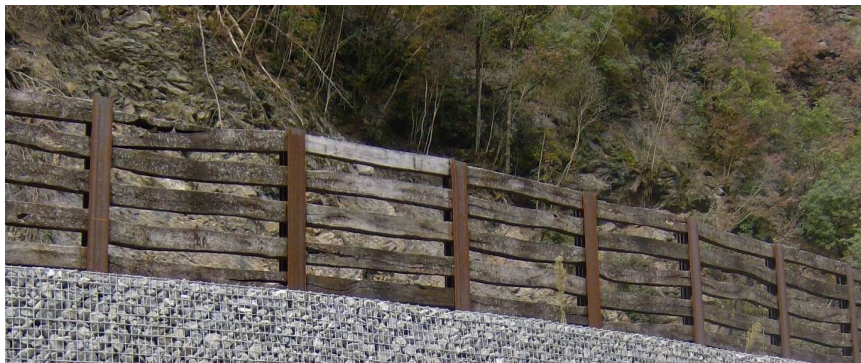
Route
Vallorbe - Le Pont

Fossé et digue
(carrière Visinand)

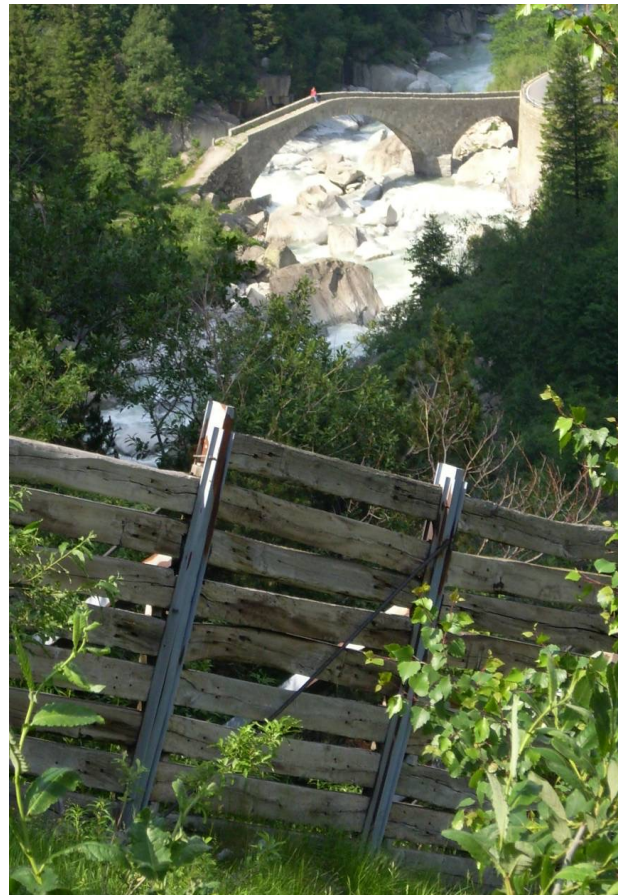
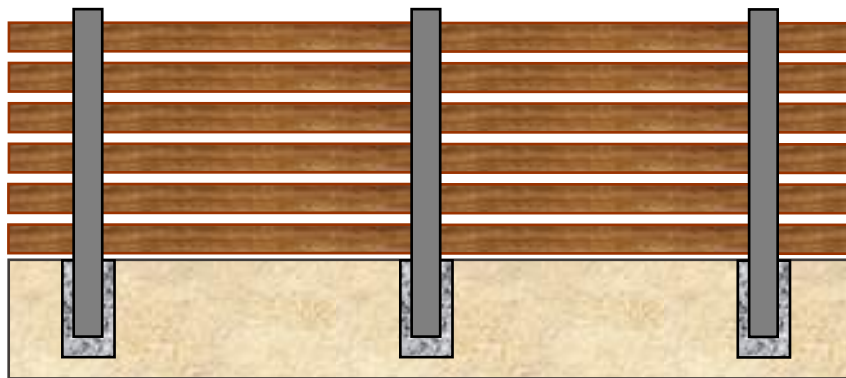


Document Bonnard & Gardel

3.3 Ecrans rigides

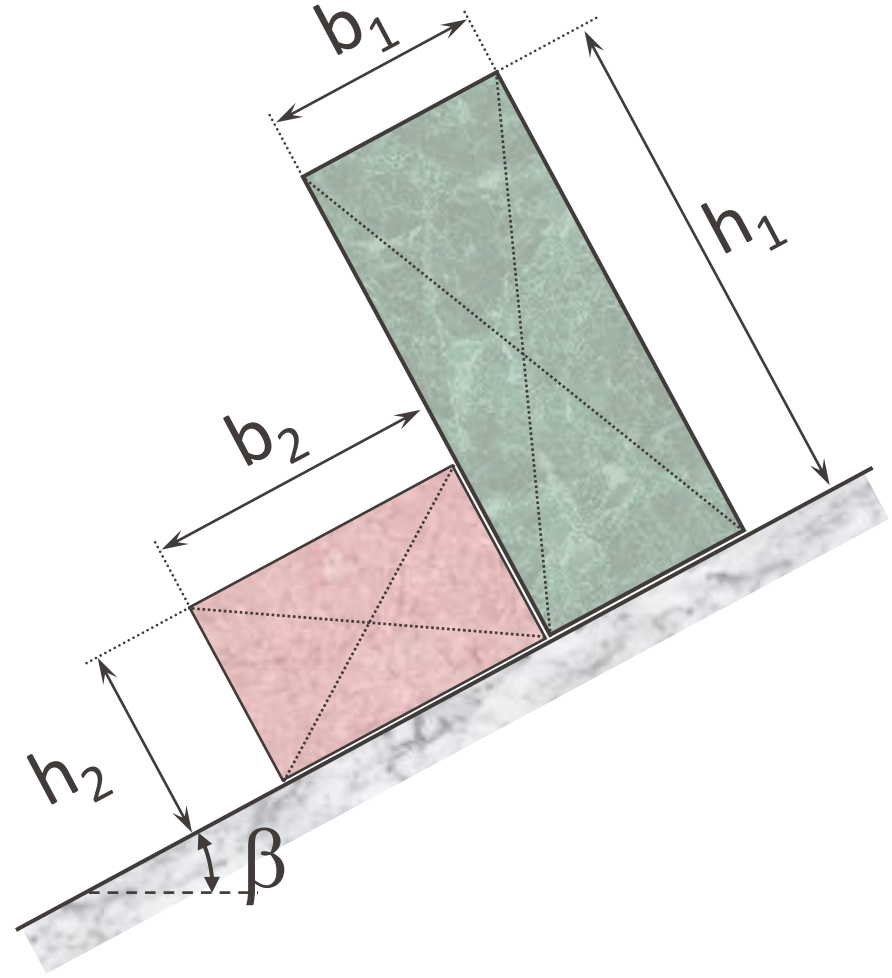
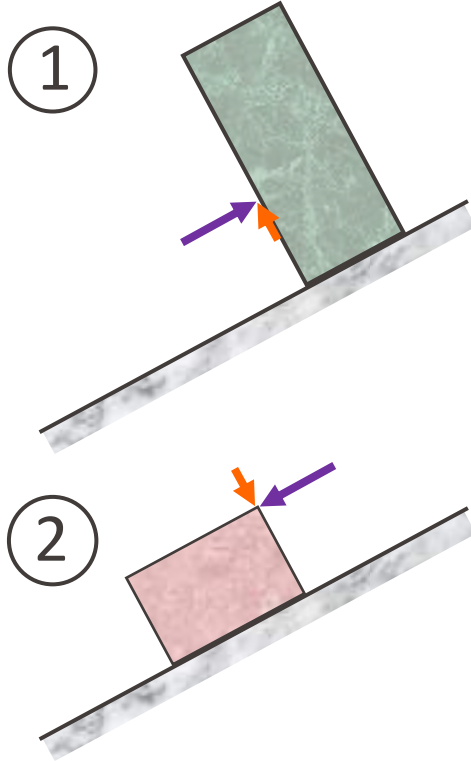


Impression de sécurité... **mais...**
capacité d'absorption d'énergie très réduite !
(30 à 50 kJ)



2.3.2 Stabilité de deux blocs

Stabilité des deux blocs à vérifier en deux étapes:

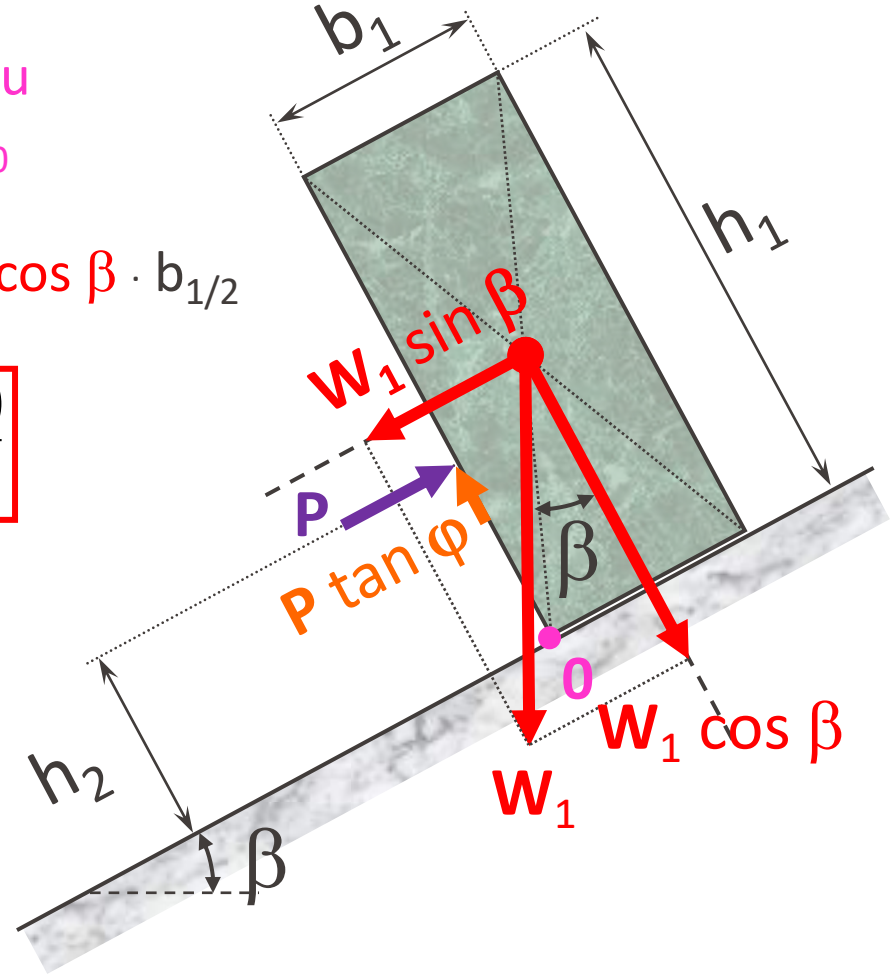


2.3.2 Stabilité de deux blocs

Stabilité au basculement du
bloc 1 si : $M_{\text{stab},0} > M_{\text{déstab},0}$

$$P \cdot h_2 \geq W_1 \sin \beta \cdot h_{1/2} - W_1 \cos \beta \cdot b_{1/2}$$

$$P \geq \frac{W_1 \cdot (\sin \beta \cdot h_1 - \cos \beta \cdot b_1)}{2 \cdot h_2}$$

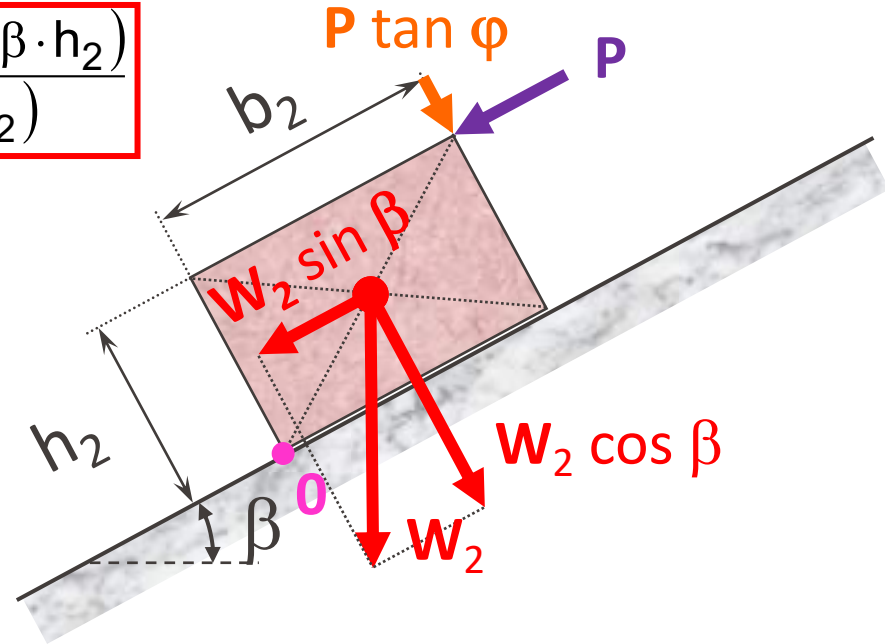


2.3.2 Stabilité de deux blocs

Stabilité au basculement du bloc 2 si : $M_{\text{stab},0} > M_{\text{déstab},0}$

$$W_2 \cos \beta \cdot b_{2/2} + P \tan \varphi \cdot b_2 \geq P \cdot h_2 + W_2 \sin \beta \cdot h_{2/2}$$

$$P \leq P_B = \frac{W_2 \cdot (\cos \beta \cdot b_2 - \sin \beta \cdot h_2)}{2 \cdot (h_2 - \tan \varphi \cdot b_2)}$$



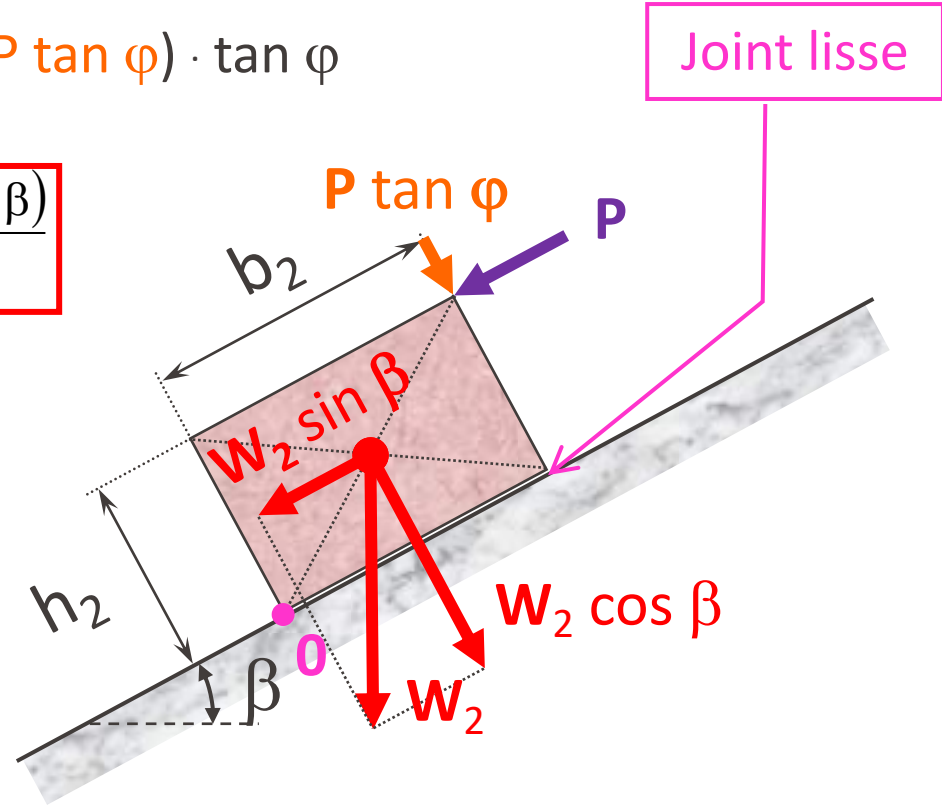
2.3.2 Stabilité de deux blocs



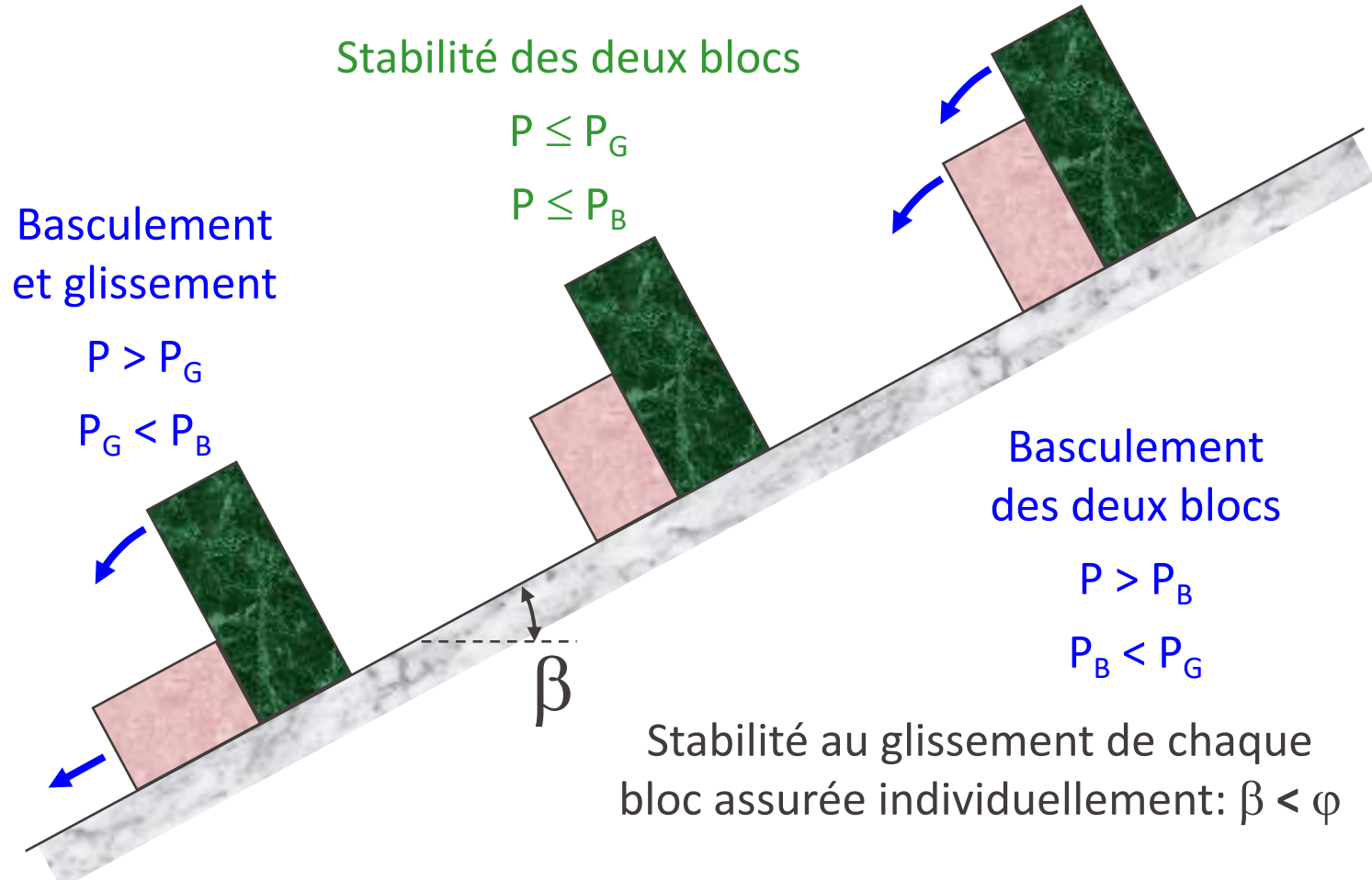
Stabilité au glissement du bloc 2 si : $\tau_{\text{sol}} < \tau_{\text{rés}} = \sigma' \tan \varphi$

$$P + W_2 \sin \beta \leq (W_2 \cos \beta + P \tan \varphi) \cdot \tan \varphi$$

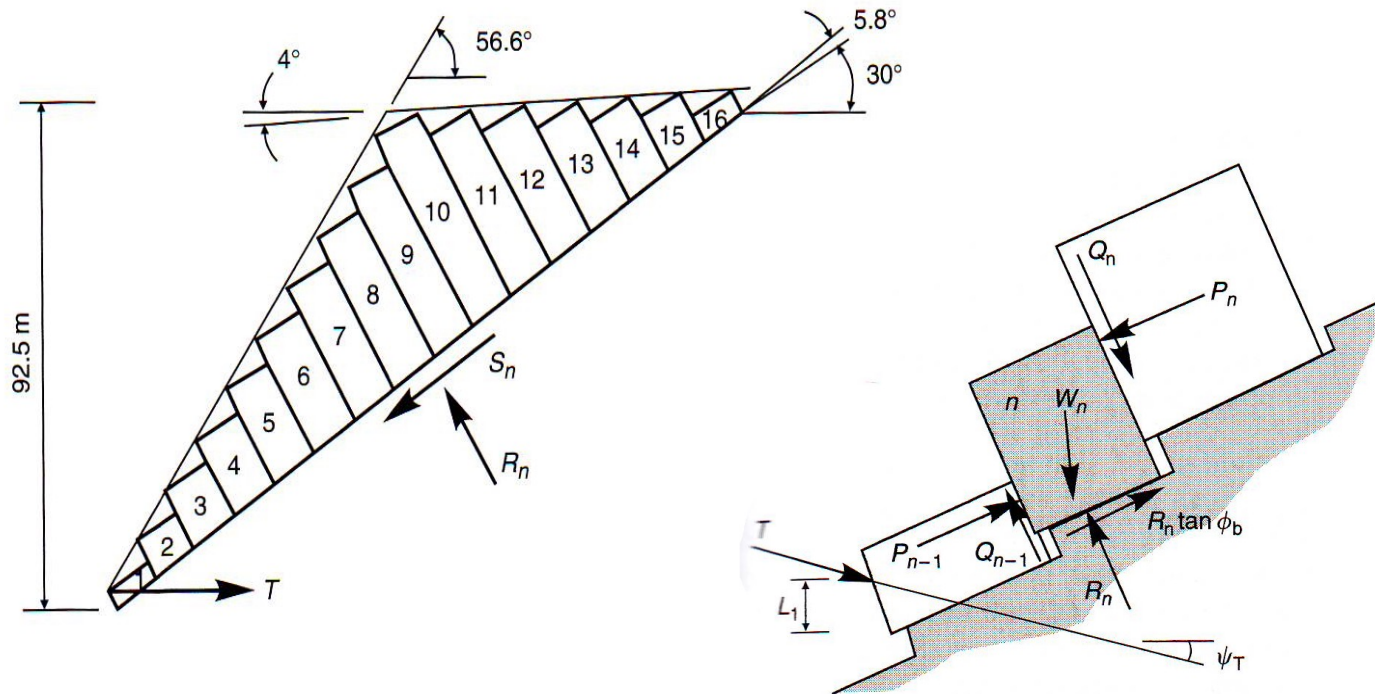
$$P \leq P_G = \frac{W_2 \cdot (\cos \beta \cdot \tan \varphi - \sin \beta)}{1 - \tan^2 \varphi}$$



2.3.2 Stabilité de deux blocs



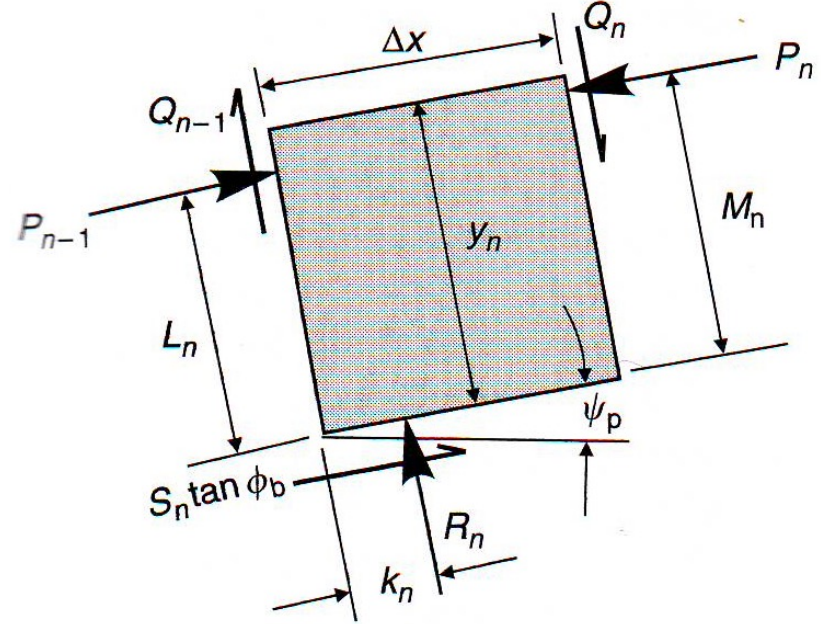
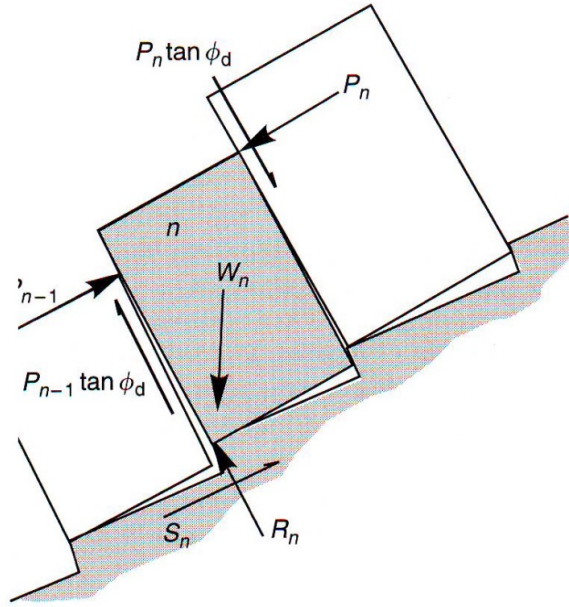
2.3.3 Stabilité de plusieurs blocs



Forces décomposées selon les directions normale et tangentielle:

- Forces à la base: (R_n , S_n)
- Forces aux interfaces avec les autres blocs: (P_n , Q_n , P_{n-1} , Q_{n-1})

2.3.3 Stabilité de plusieurs blocs



Points d'application: (M_n, L_n)

2.3.3 Stabilité de plusieurs blocs



Calcul de l'équilibre limite

- i. Commencer avec la colonne (bloc) supérieure (n).
- ii. Vérifier le renversement.
- iii. Pour le bloc situé en-dessous (n-1), les forces nécessaires pour assurer la stabilité au glissement $P_{n-1,s}$ et au basculement $P_{n-1,t}$ sont calculées:

$$P_{n-1,s} = P_n - \frac{W_n (\cos \psi_p \tan \varphi_p - \sin \psi_p)}{1 - \tan \varphi_p \tan \varphi_d}$$

$$P_{n-1,t} = [P_n (M_n - \Delta x \tan \varphi_d) + (W_n/2) (y_n \sin \psi_p - \Delta x \cos \psi_p)] / L_n$$

2.3.3 Stabilité de plusieurs blocs

Calcul de l'équilibre limite

- iv. Renversement du bloc (n-1) si : $P_{n-1,s} < P_{n-1,t}$
 Glissement du bloc (n-1) si : $P_{n-1,t} < P_{n-1,s}$ (1er calcul)
 Prendre $P_{n-1} = \max (P_{n-1,t} ; P_{n-1,s})$
- v. Vérifier le glissement (2ème calcul)

$$R_n = W_n \cos \psi_p + (P_n - P_{n-1}) \tan \varphi_d$$

$$> 0$$

$$S_n = W_n \sin \psi_p + (P_n - P_{n-1})$$

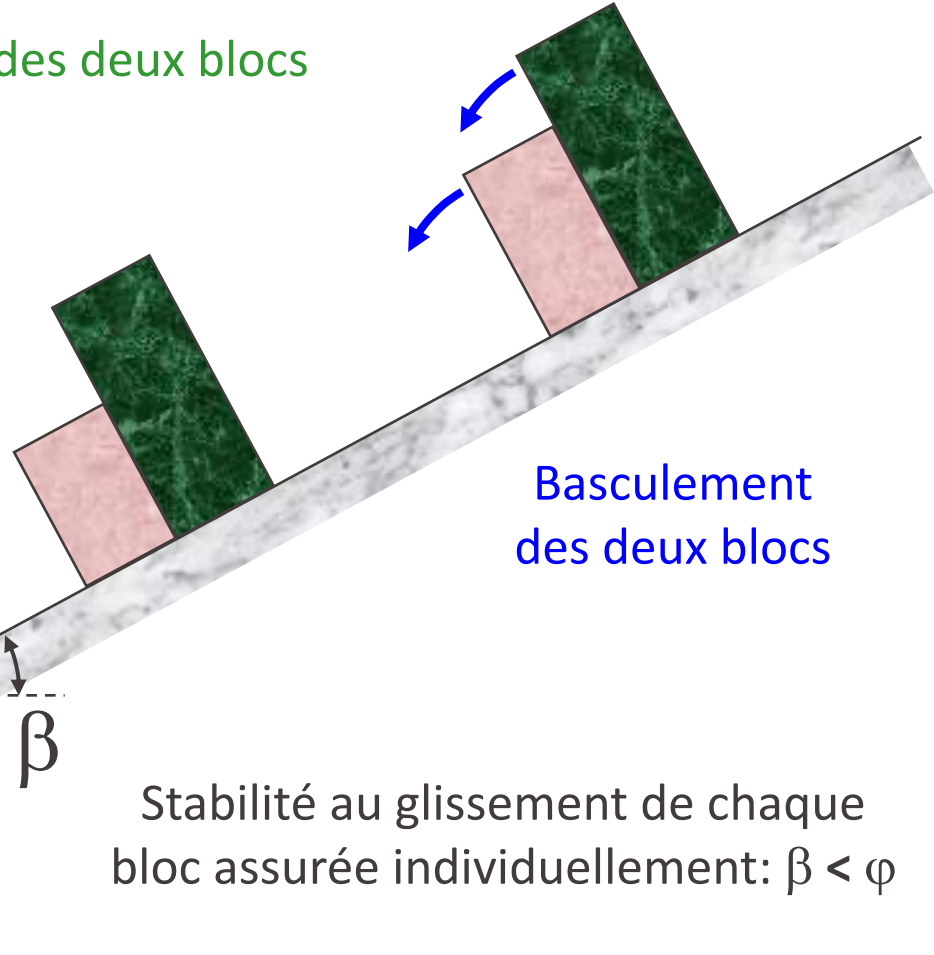
$$> R_n \tan \varphi_p$$
- vi. Poursuivre le calcul de proche en proche...

2.3.2 Stabilité de deux blocs

Stabilité des deux blocs

Basculement
et glissement

Basculement
des deux blocs



Stabilité au glissement de chaque
bloc assurée individuellement: $\beta < \varphi$

2.3.2 Stabilité de deux blocs

