



**POLYTECH**  
GRENOBLE

**Département Géotechnique**

**Cours de Géologie appliquée**

# ***MOUVEMENTS GRAVITAIRES***

## ***2. MOUVEMENTS DE PENTE***

### ***PROTECTION***

# ***MOUVEMENTS GRAVITAIRES***

## ***2. MOUVEMENTS DE PENTE***

### ***PROTECTION***

#### **A. INTRODUCTION A L'ANALYSE MECANIQUE DES MOUVEMENTS DE PENTES**

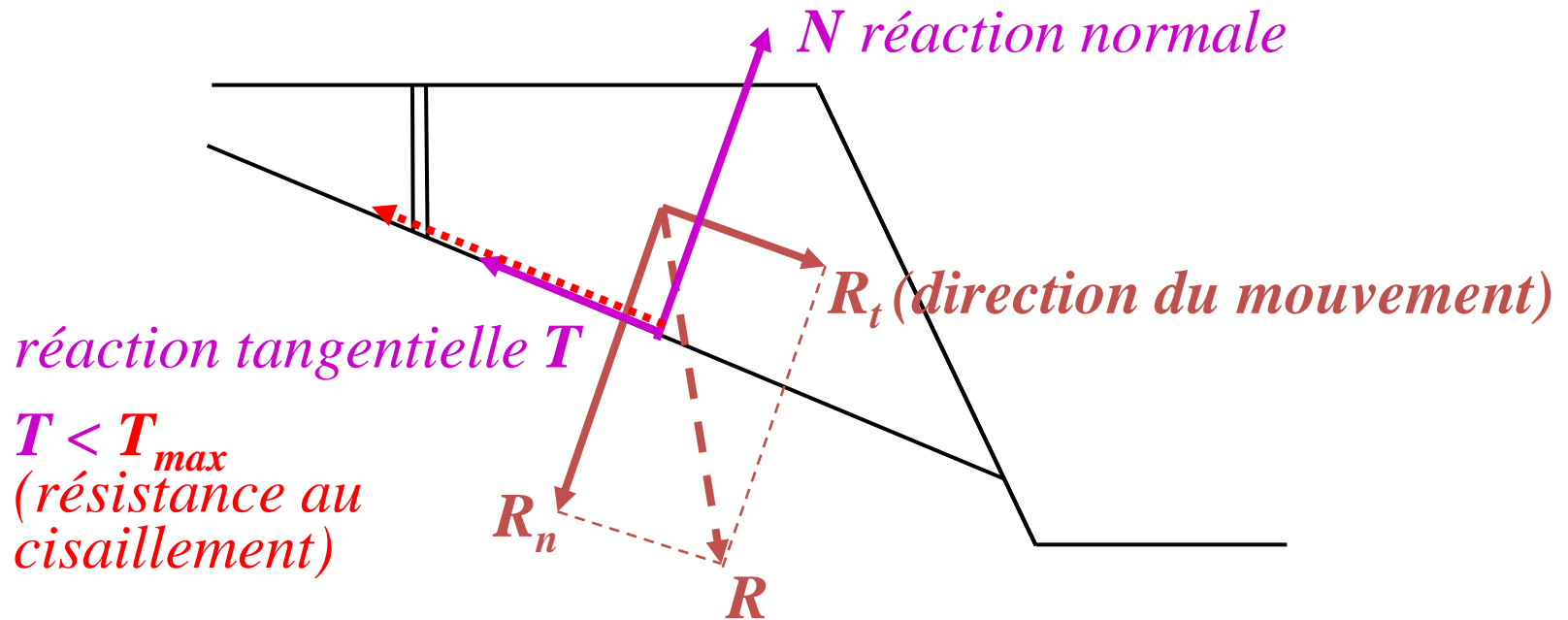
- **Glissement translationnel sur un plan**
- **Glissement fractionné**
- **Propagation**

#### **B. METHODES DE PROTECTION ACTIVES ET PASSIVES**

## Glissement translationnel sur un plan



## Glissement d'un bloc sur un plan



- Si  $R_t < T_{max}$ ,  $T = R_t$  ; le bloc est stable
- Si  $R_t = T_{max}$ ,  $T = R_t = T_{max}$  ; le bloc est en équilibre limite
- Si  $R_t > T_{max}$ ,  $T = T_{max}$  ; le bloc subit une accélération  $a$  telle que  $M a = R_t - T_{max}$

Pour quantifier la stabilité d'une pente, on utilise le coefficient de sécurité

$$F = T_{max} / R_t$$

## Glissement d'un bloc sur un plan

$$\text{Coefficient de sécurité} = \frac{\text{Force résistante maximale mobilisable}}{\text{Force motrice}}$$

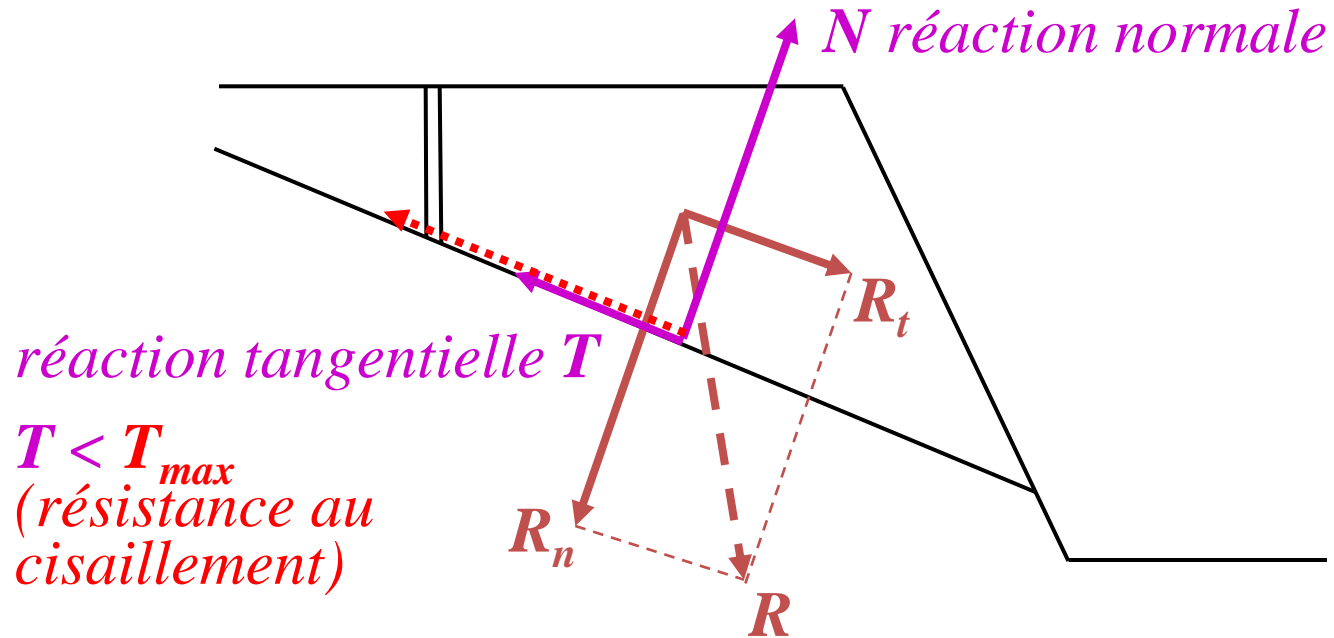
$$F = T_{\max} / R_t$$

*En théorie,*

- *une pente est stable si  $F > 1$*
- *une pente est instable si  $F < 1$*

*Dans un projet d'ouvrage, dont la stabilité doit être assurée, on prend une marge de sécurité en recherchant un coefficient nettement plus grand que 1 (1,5 par exemple)*

## Glissement d'un bloc sur un plan

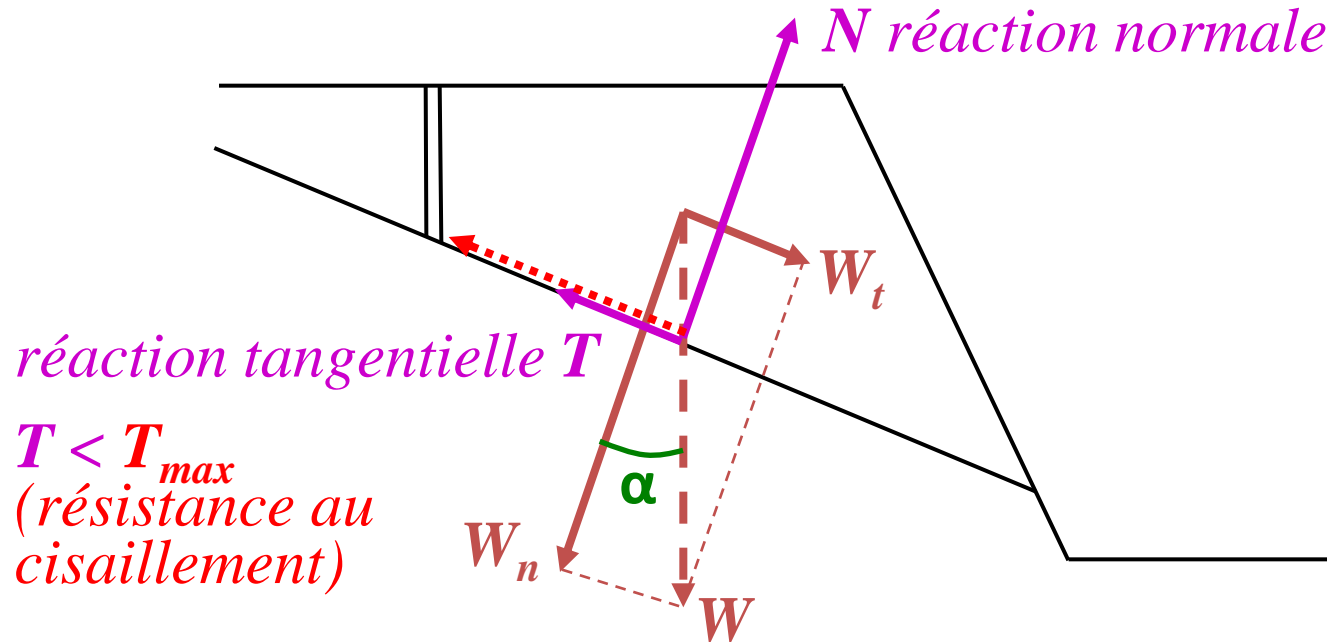


$$F = \frac{T_{max}}{R_t} = \frac{R_n \tan \phi + cA}{R_t}$$

$A$  : aire de la surface de glissement



## Glissement d'un bloc sur un plan, sous l'action de son seul poids



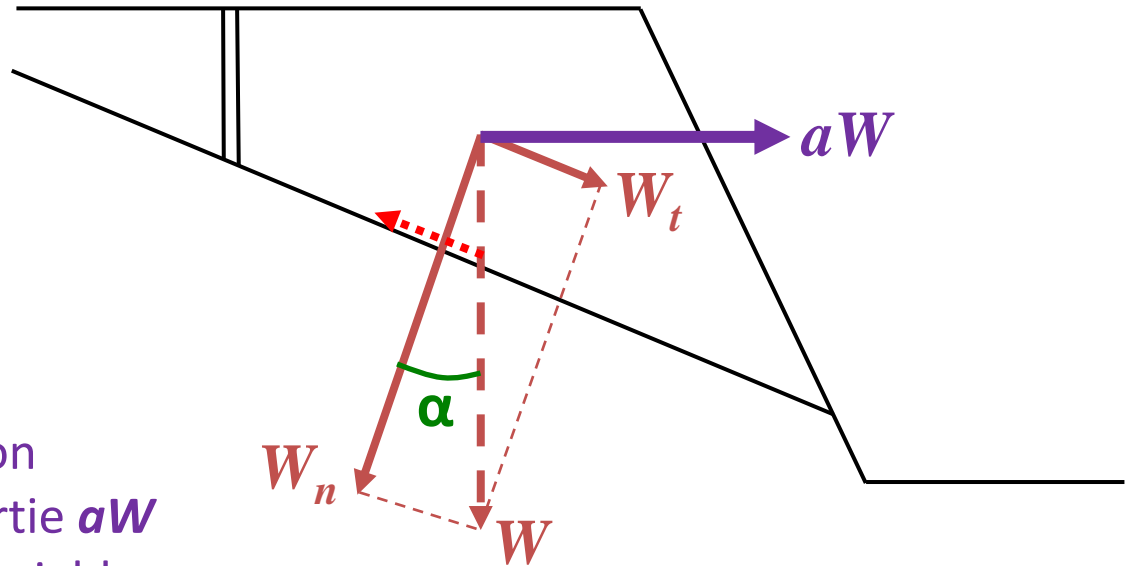
$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{W \cos \alpha \tan \phi + cA}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{cA}{W \sin \alpha}$$

A : aire de la surface de glissement

$\alpha$  : pendage du plan de glissement

$$\text{Si } c = 0 : \quad F = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

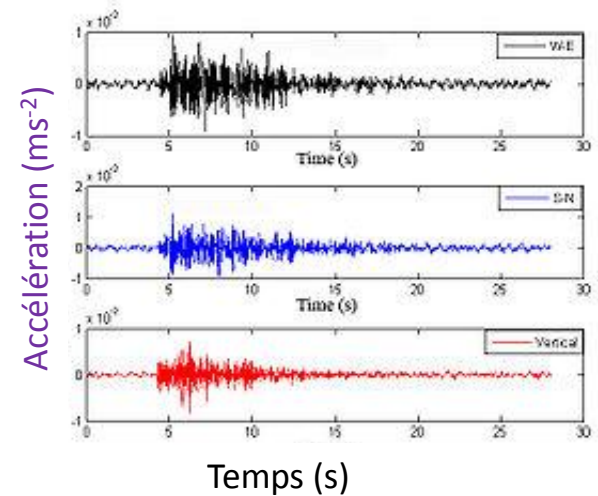
# Glissement d'un bloc sur un plan, sous l'action de son poids et d'un séisme



Lors d'un **séisme** d'accélération horizontale **a**, une force d'inertie **aW** s'exerce sur le bloc, de sens variable au cours du séisme.

Lorsqu'elle s'exerce vers l'aval, **la stabilité est réduite**.

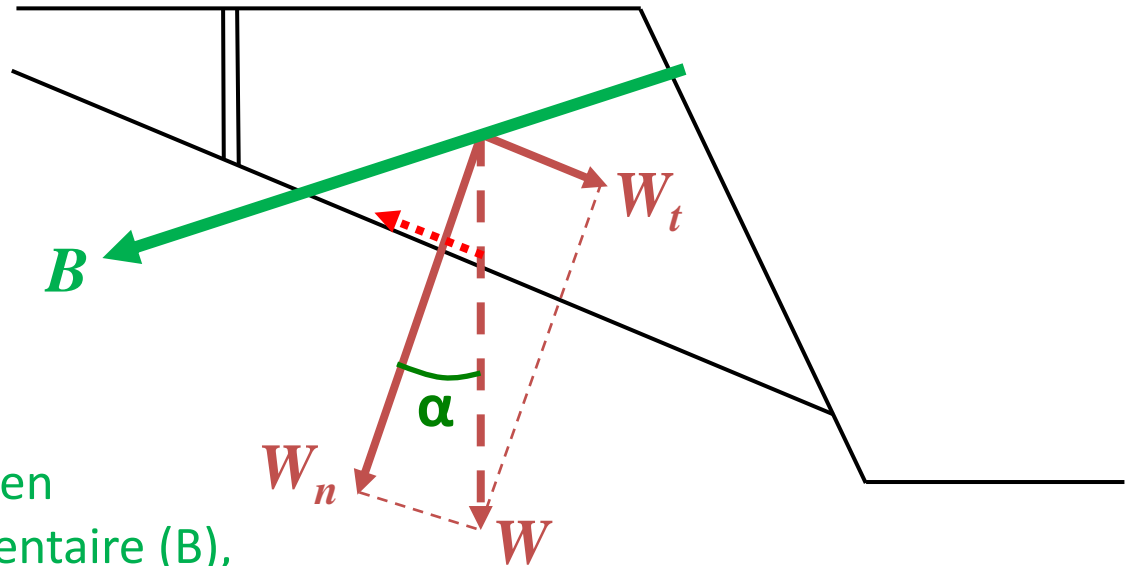
$$F = \frac{T_{max}}{R_t} = \frac{R_n \tan \phi + cA}{R_t}$$



*A : aire de la surface de glissement*



## Glissement d'un bloc sur un plan, sous l'action de son seul poids



On peut **améliorer la stabilité** en appliquant une force supplémentaire (B),

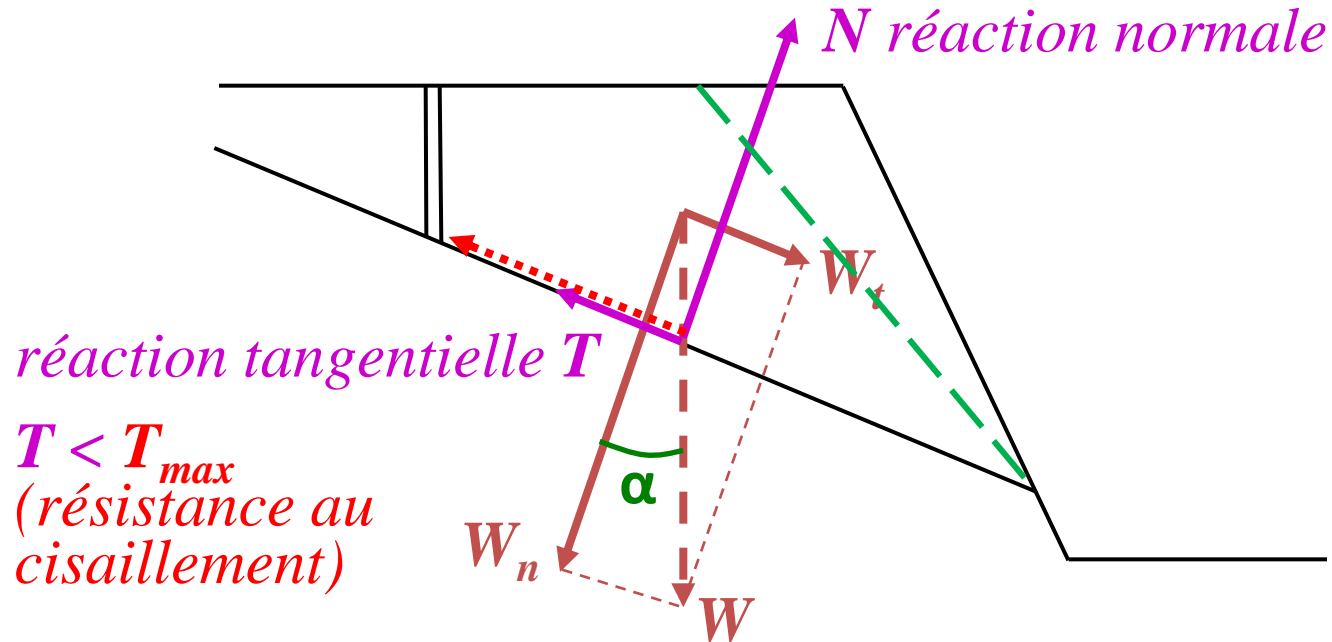
- qui réduit la force motrice ( $W_t$ ) et
- qui augmente la force normale ( $W_n$ )

Cette force est fournie par un ancrage

$$F = \frac{T_{max}}{R_t} = \frac{R_n \tan \phi + cA}{R_t}$$

*A : aire de la surface de glissement*

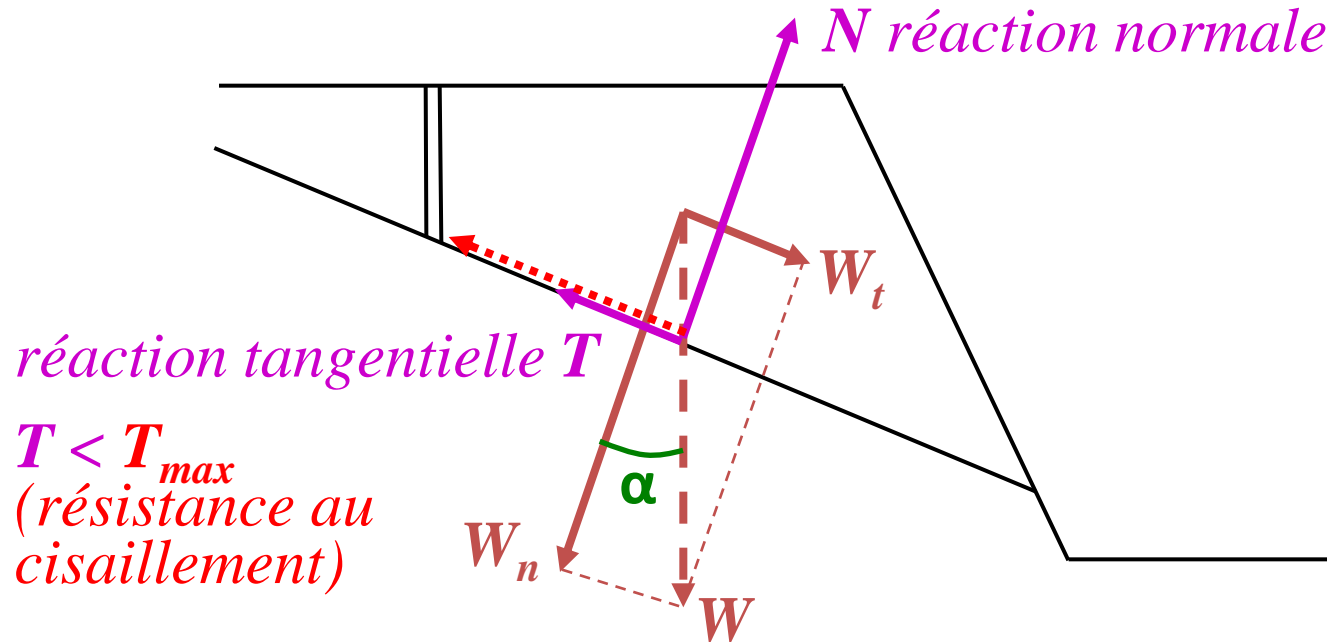
## Glissement d'un bloc sur un plan, sous l'action de son seul poids



$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{W \cos \alpha \tan \phi + cA}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{cA}{W \sin \alpha}$$

Pour améliorer la stabilité, on peut diminuer le poids (terrassément, minage)

**Glissement d'un bloc prismatique sur un plan, sous l'action de son seul poids**  
(prisme droit)

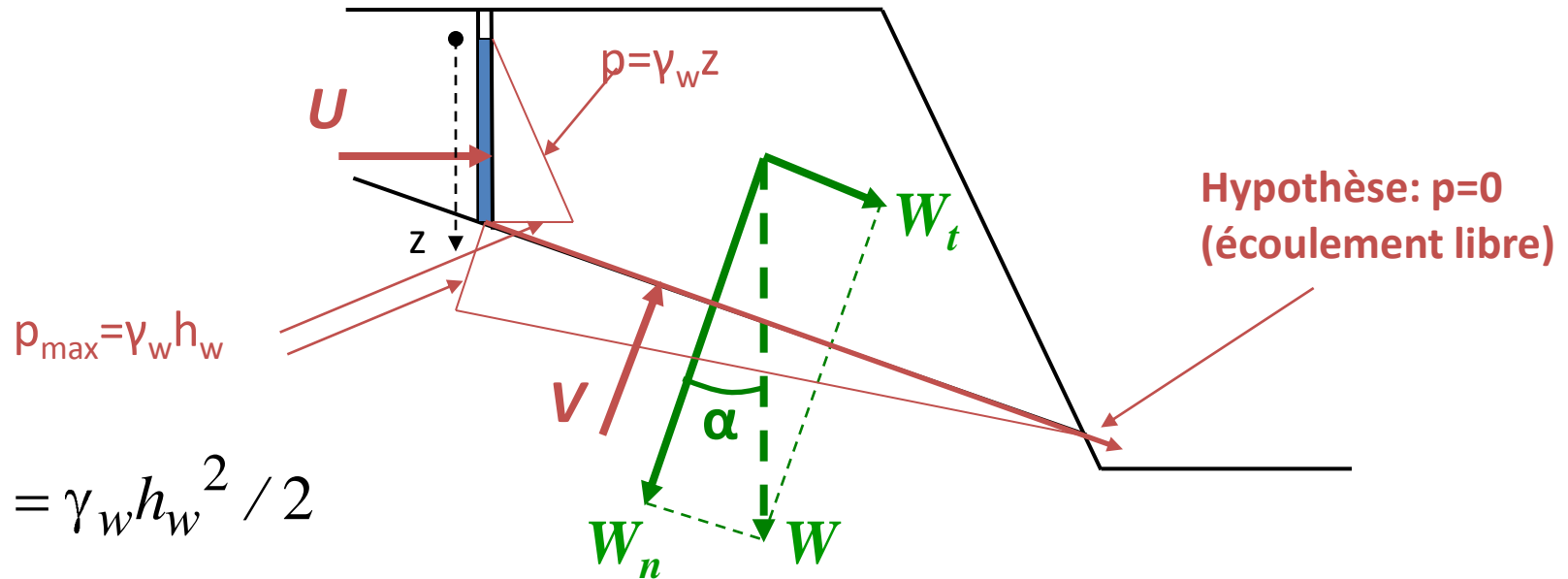


$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{W \cos \alpha \tan \phi + cL}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{cL}{W \sin \alpha}$$

$W$  : poids par mètre de largeur (poids d'une tranche d'1 m d'épaisseur)

$L$  : Longueur de la surface de glissement ;  $\alpha$  : pendage du plan de glissement

# Glissement d'un bloc prismatique sur un plan, sous l'action de son poids et de la pression de l'eau



$$U = \gamma_w h_w^2 / 2$$

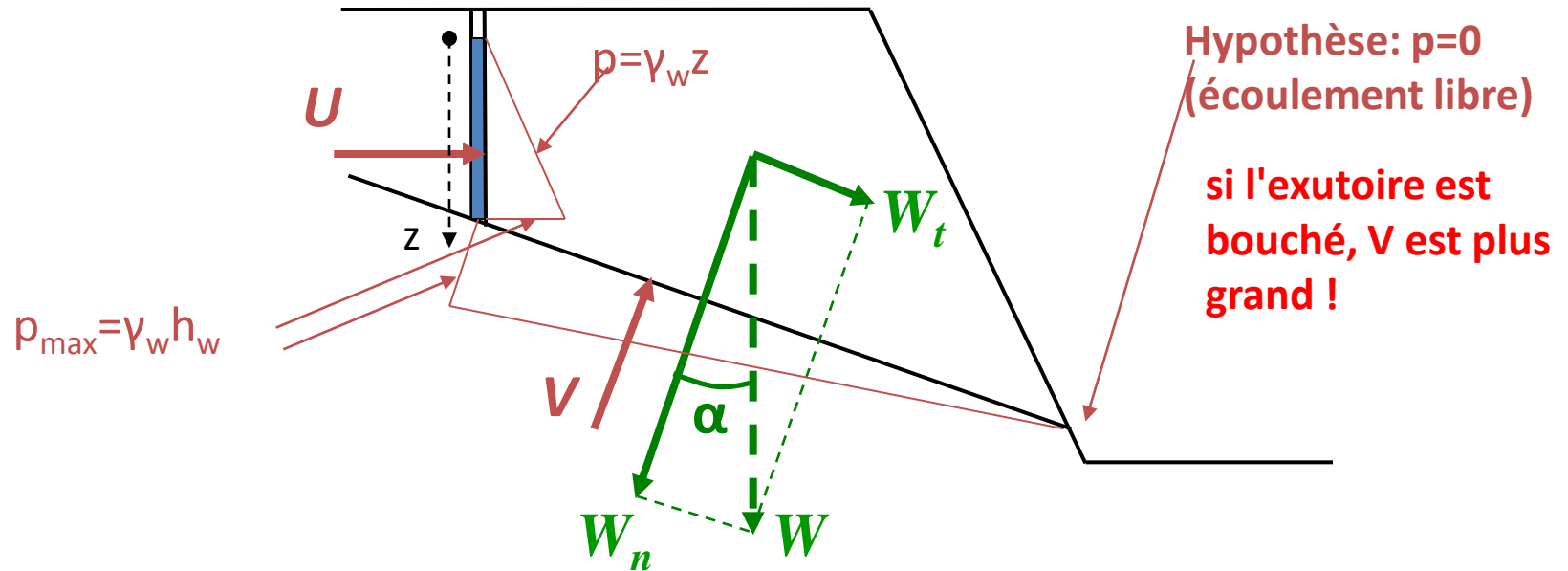
$$V = \gamma_w h_w L / 2$$

$$F = \frac{T_{\max}}{W_t} = \frac{(W \cos \alpha - V - U \sin \alpha) \tan \phi + cL}{W \sin \alpha + U \cos \alpha}$$

**W** : poids par mètre de largeur ;  $\gamma_w$  : poids volumique de l'eau

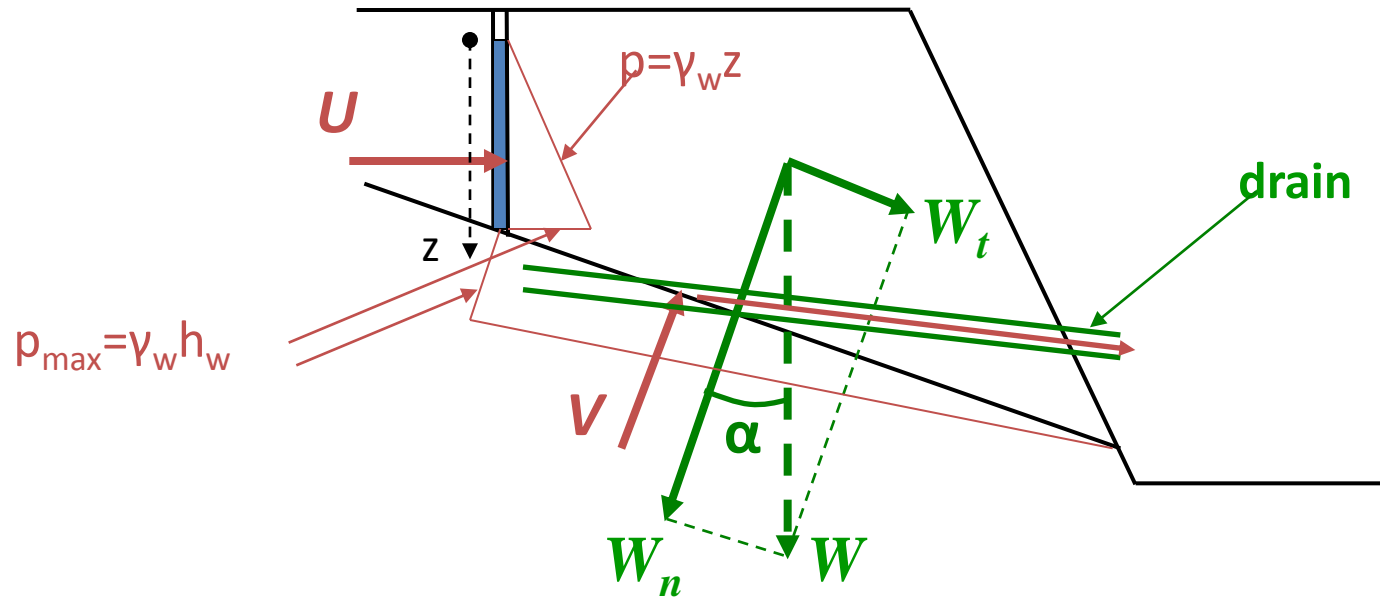
**L** : longueur du plan de glissement ;  $\alpha$  : pendage du plan de glissement ;

# Glissement d'un bloc prismatique sur un plan, sous l'action de son poids et de la pression de l'eau



$$F = \frac{T_{\max}}{W_t} = \frac{(W \cos \alpha - V - U \sin \alpha) \tan \phi + cL}{W \sin \alpha + U \cos \alpha}$$

## Glissement d'un bloc prismatique sur un plan, sous l'action de son poids et de la pression de l'eau

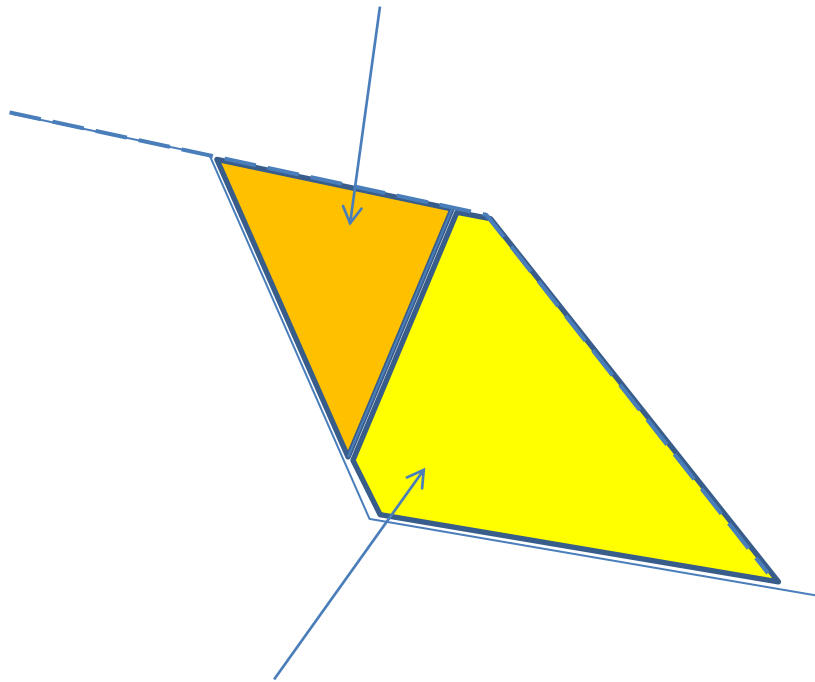


$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{(W \cos \alpha - V - U \sin \alpha) \tan \phi + cL}{W \sin \alpha + U \cos \alpha}$$

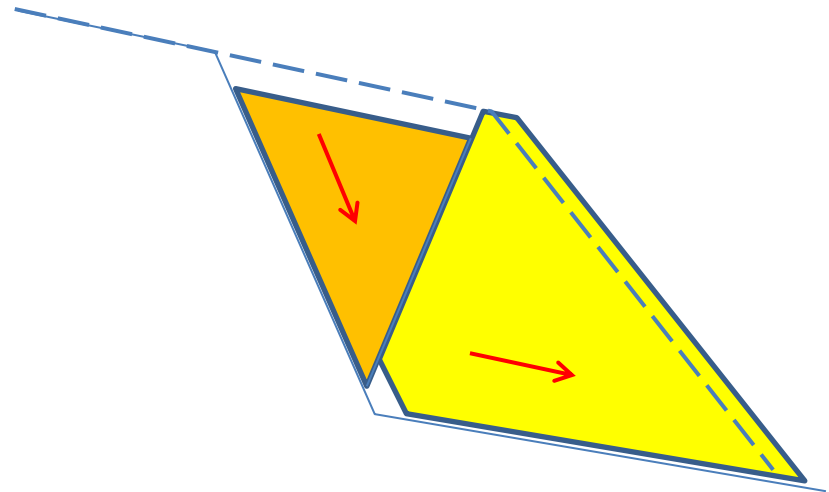
Pour améliorer la stabilité, il faut diminuer  $U$  et  $V$   
 → drainage

## Glissement fractionné de plusieurs blocs

**Bloc actif** (exerce une poussée sur l'autre bloc)



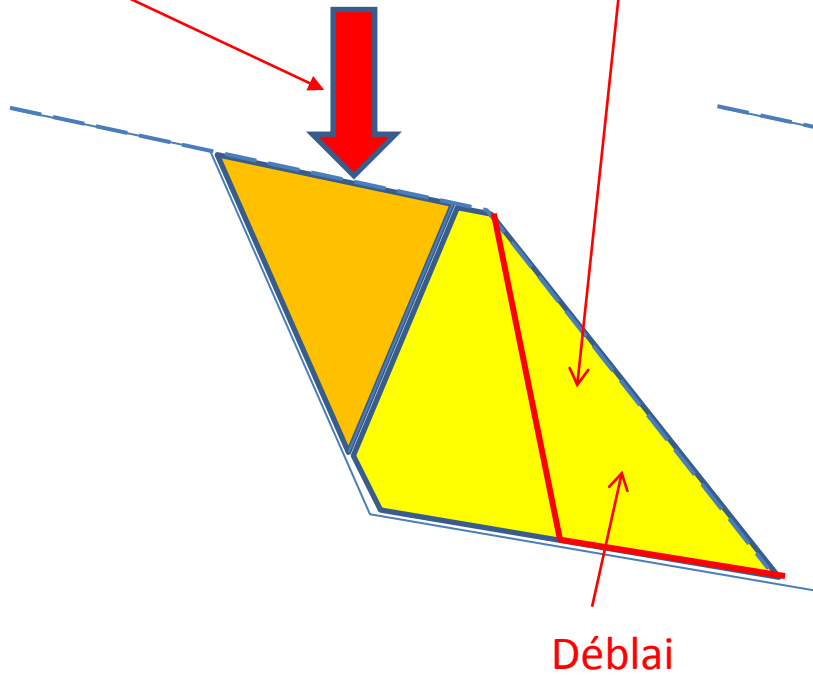
**Bloc passif** (exerce une réaction sur le bloc actif)



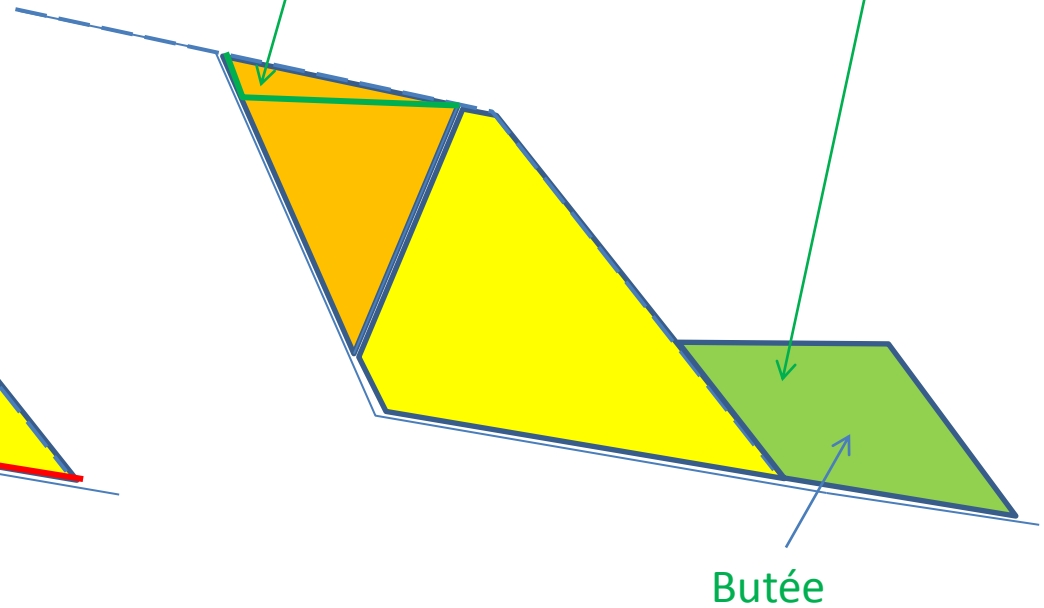


## Glissement fractionné de plusieurs blocs

*Si on charge le bloc actif  
ou si on réduit le bloc passif,  
on diminue la stabilité*



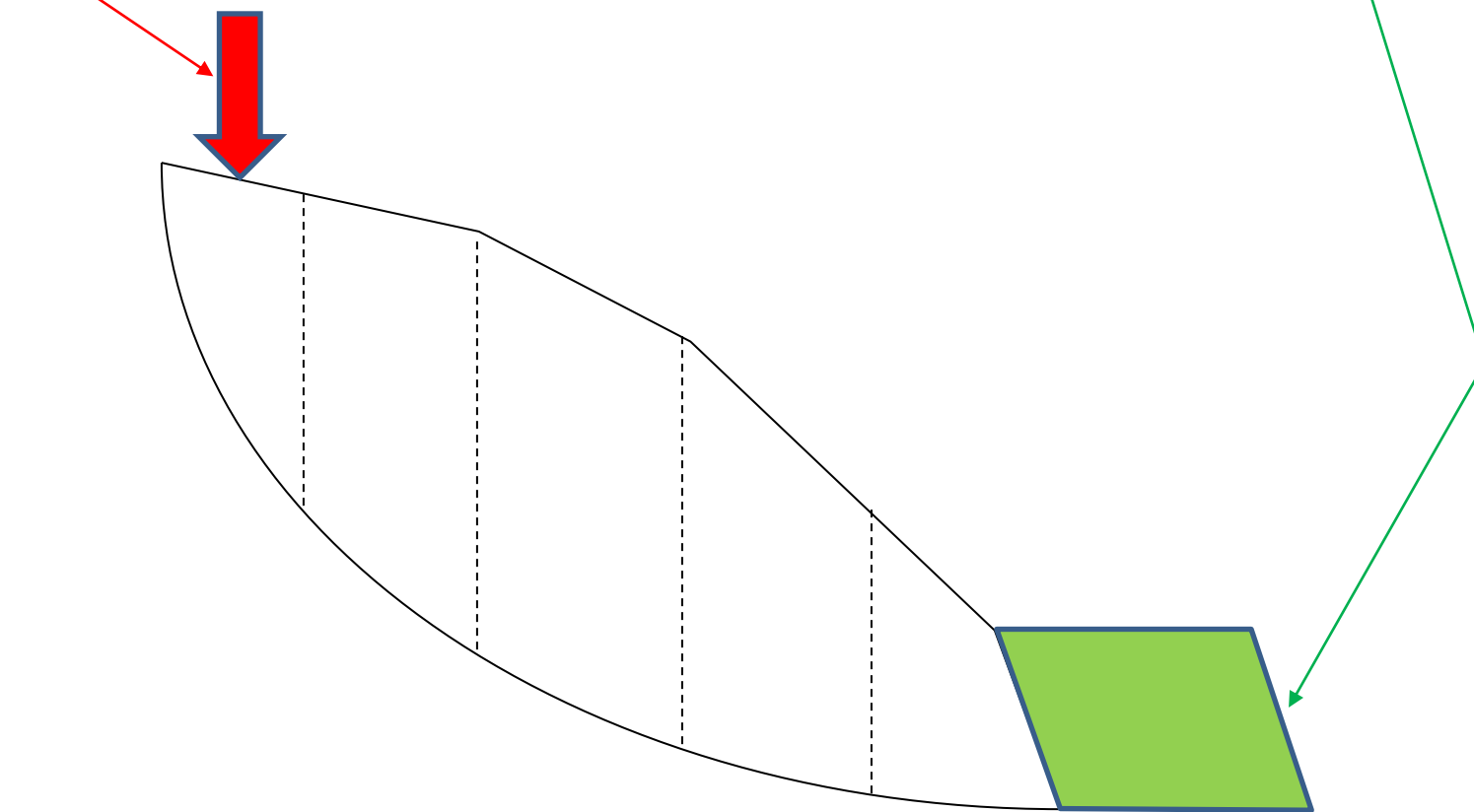
*Si on allège le bloc actif  
ou si on agrandit le bloc passif,  
on améliore la stabilité*



## Glissement rotationnel

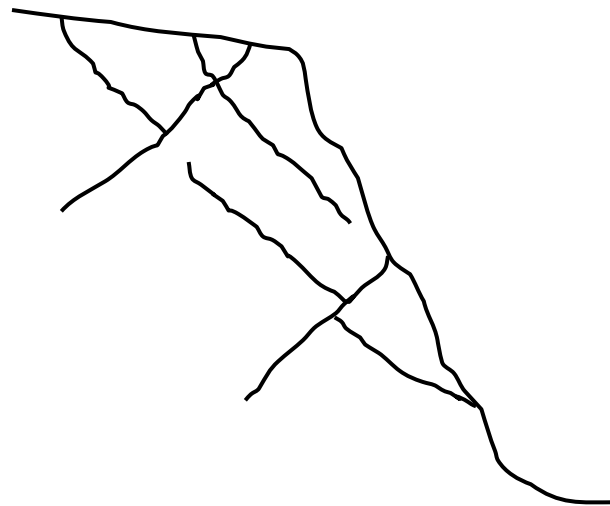
*Si on charge en tête  
ou si on décharge en pied,  
on diminue la stabilité*

*Si on décharge en tête  
ou si on charge en pied,  
on améliore la stabilité*



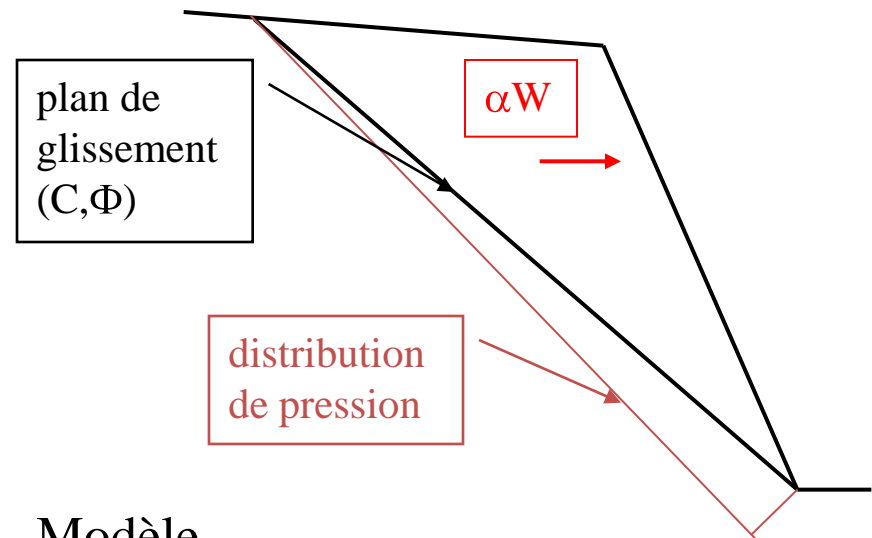
# INCERTITUDES DANS L'ÉVALUATION DE LA STABILITÉ

**MODELISATION** : SIMPLIFICATION DE LA REALITE, PERMETTANT UNE ANALYSE MECANIQUE DE LA STABILITE



Massif rocheux

incertitudes



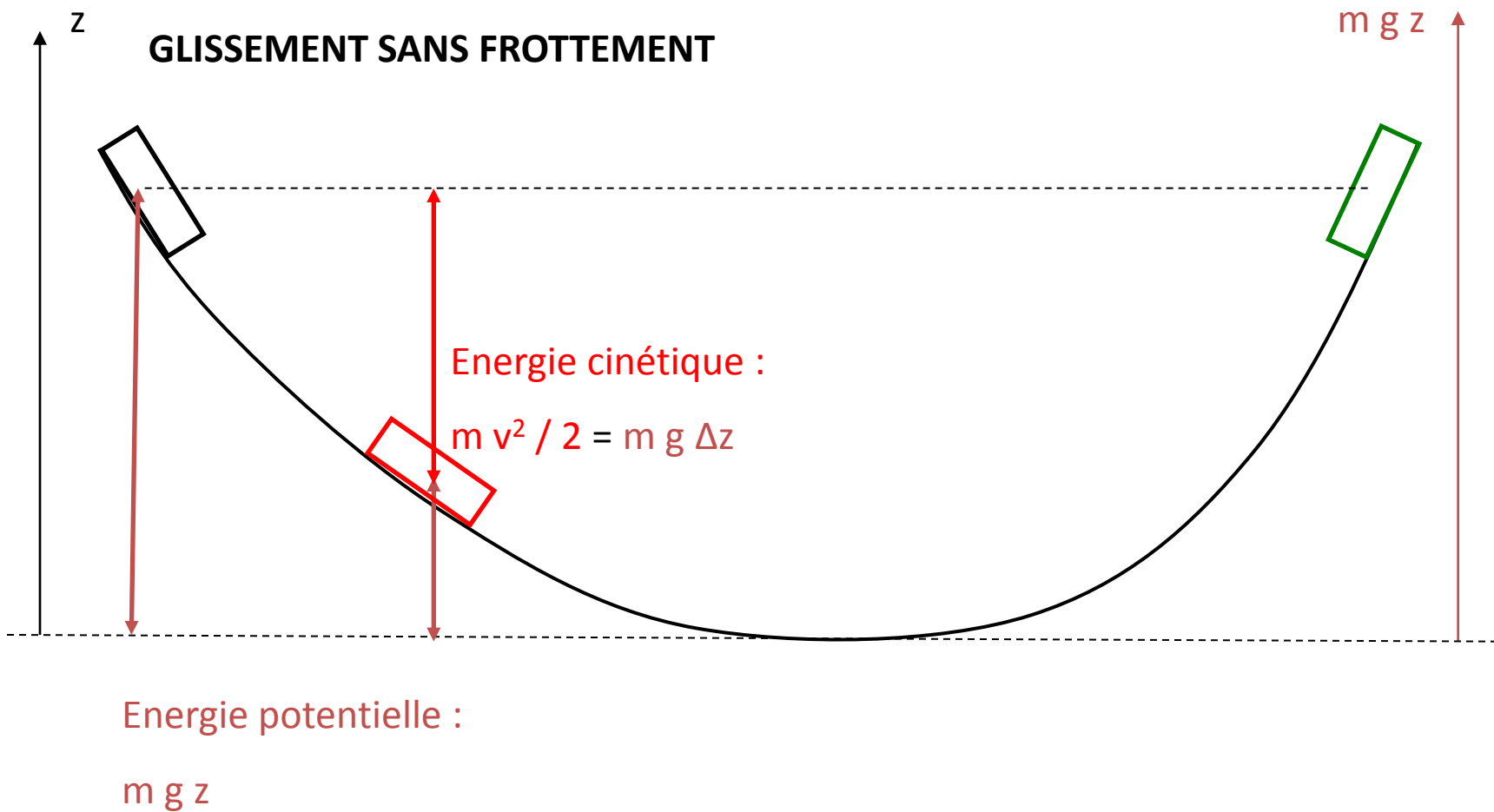
Modèle

déterministe ou probabiliste

# Propagation des mouvements de pentes

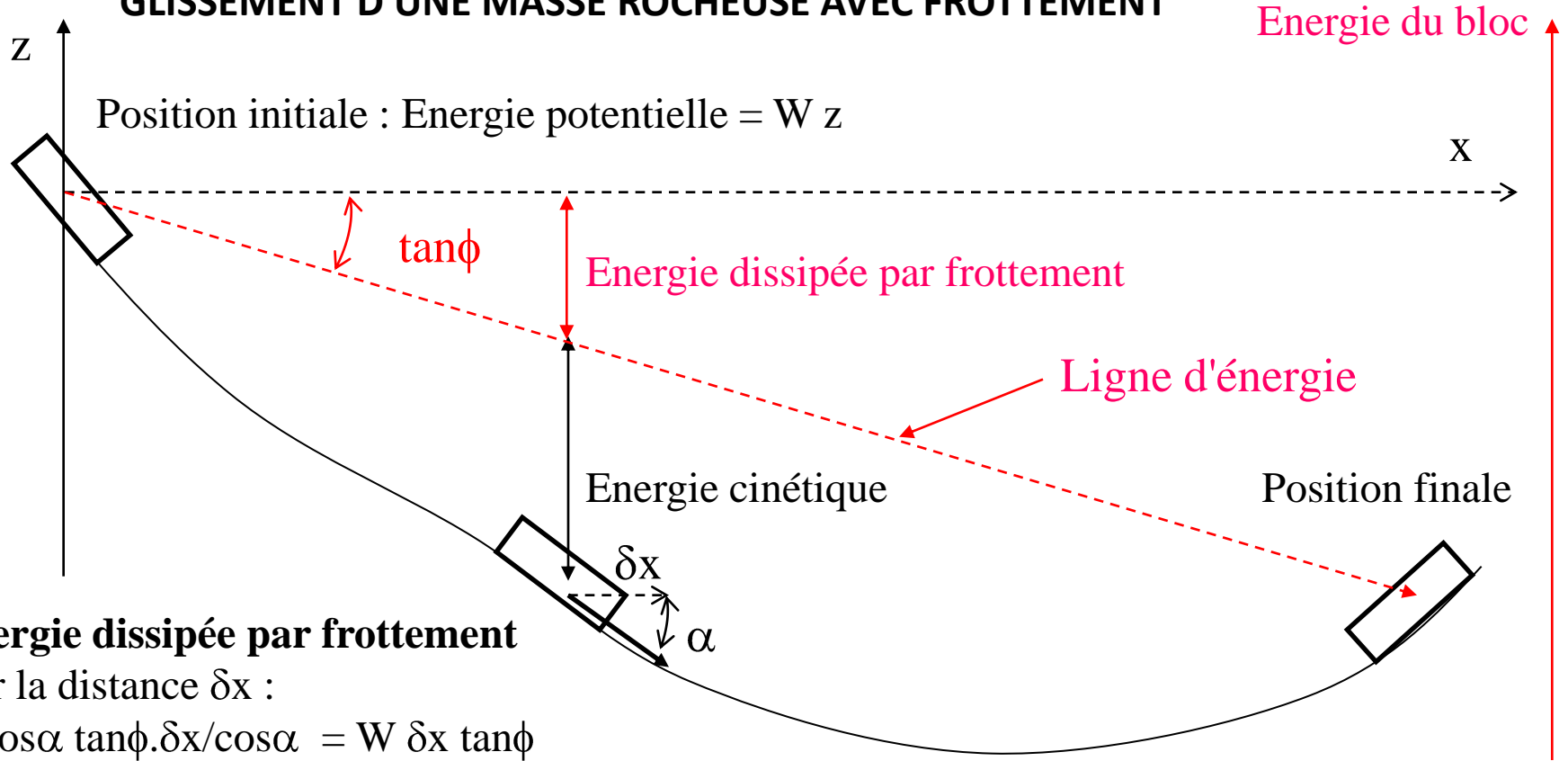
## Propagation des glissements

### GLISSEMENT SANS FROTTEMENT



# Propagation des mouvements de pentes

## GLISSEMENT D'UNE MASSE ROCHEUSE AVEC FROTTEMENT



### Energie dissipée par frottement

-sur la distance  $\delta x$  :

$$W \cos\alpha \tan\phi \cdot \delta x / \cos\alpha = W \delta x \tan\phi$$

-depuis le départ :  $W x \tan\phi$

### Perte d'énergie potentielle

depuis le départ :  $W \Delta z$

Position finale ( $v=0$ ) :  $W x \tan\phi = W \Delta z$

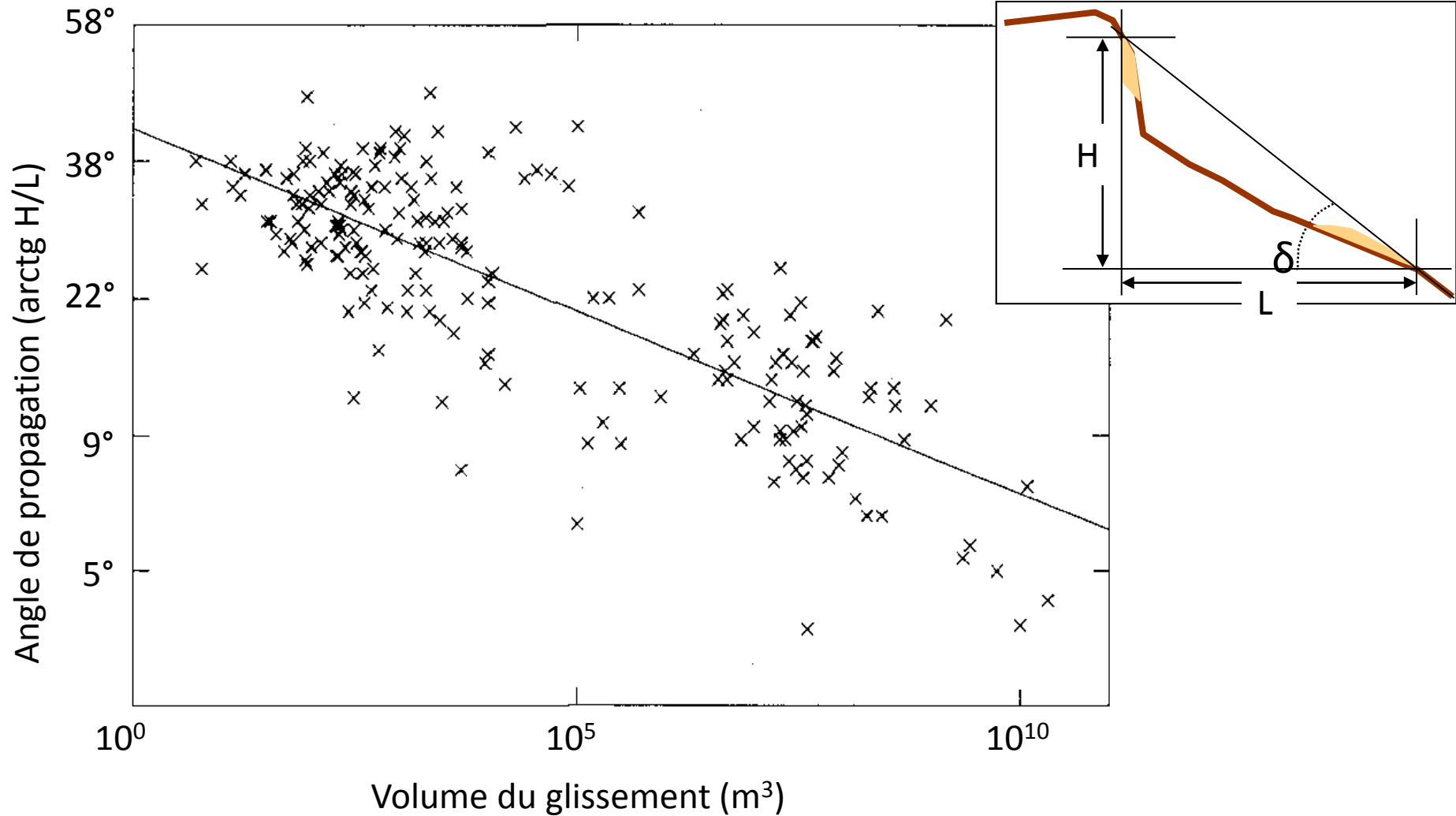
D'où :  $\Delta z / x = \tan\phi$

$\phi$  est l'angle de propagation du glissement

# Propagation des mouvements de pentes

## ANGLES DE PROPAGATION OBSERVES

pour 204 glissements, éboulements et coulées  
(d'après Corominas, 1996, Can. Geotech. J. 33: 260-271)

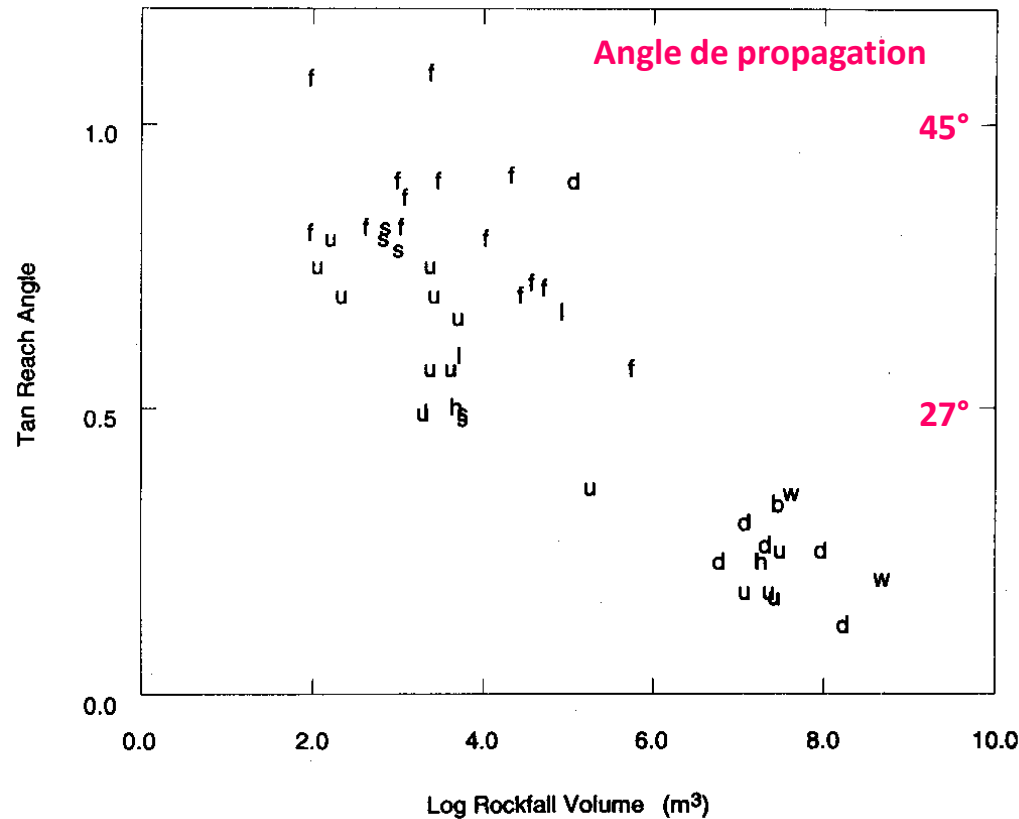


# Propagation des mouvements de pentes

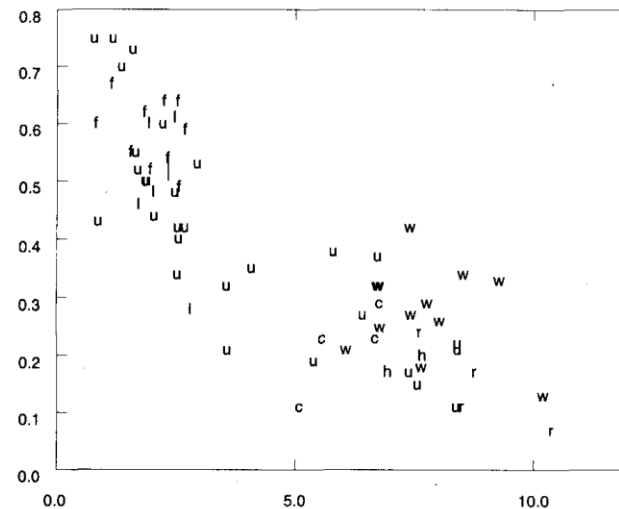
## ANGLES DE PROPAGATION OBSERVES pour 47 éboulements et 69 glissements translationnels

(d'après Corominas, 1996, Can. Geotech. J. 33: 260-271)

**Fig. 3.** Plot of rockfall and rockfall avalanche volume versus tangent of the reach angle for 47 events. Labels correspond to obstacles and topographic constraints of the path: f, dense forest; l, open forest; s, scree deposit; b, bends; d, deflections; h, channeling; w, opposing wall; u, unobstructed.



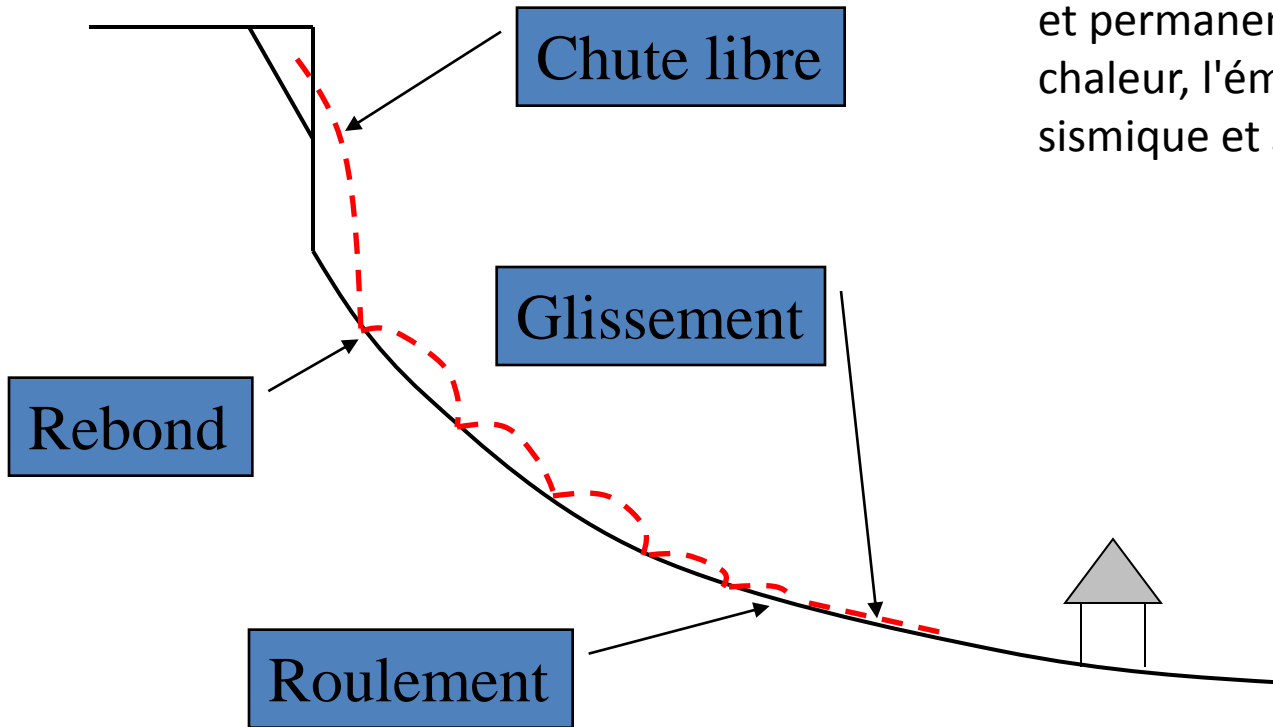
**g. 5.** Plot of translational slide volume versus tangent of reach angle for 69 events. Labels correspond to obstacles and topographic constraints of the path: f, dense forest; open forest; c, confined; h, channeling; r, run-up over a gentle slope; w, opposing wall; u, unobstructed.





# Propagation des mouvements de pentes

## CHUTE D'UN BLOC ROCHEUX



Le rebond est un phénomène complexe faisant intervenir des déformations du terrain (élastiques et permanentes), un dégagement de chaleur, l'émission d'énergie sismique et sonore

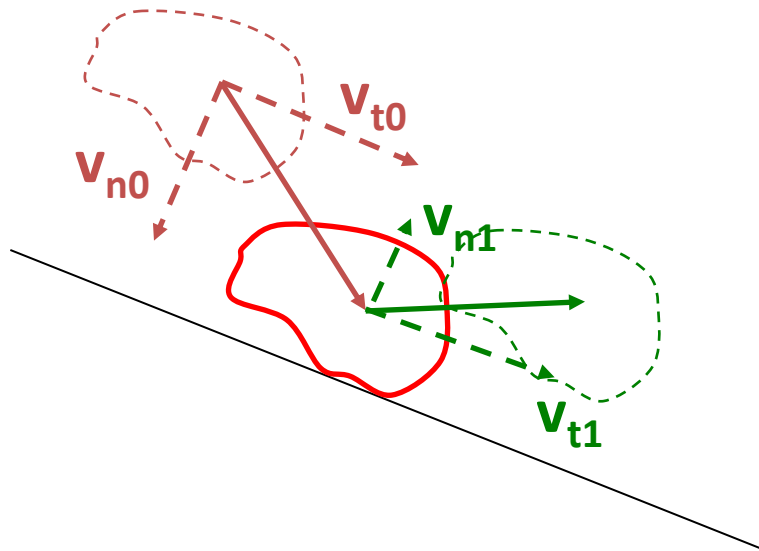
# Propagation des mouvements de pentes

## CHUTE D'UN BLOC ROCHEUX

Une analyse rigoureuse doit prendre en compte :

- la géométrie exacte du bloc et du terrain (échelle adaptée)
- leurs caractéristiques physiques, élastiques et de résistance
- la présence d'arbres

Les caractéristiques mécaniques étant très difficiles à déterminer, de nombreuses méthodes utilisent des coefficients de restitution, déterminés empiriquement, qui permettent de déduire la vitesse "réfléchie" de la vitesse incidente.



$$K_n = v_{n1} / v_{n0}$$

$$K_t = v_{t1} / v_{t0}$$

# Propagation des mouvements de pentes

## CHUTE D'UN BLOC ROCHEUX

**Méthodes rigoureuses** considérant la géométrie réelle des blocs et leur rotation (*ex: éléments discrets*)

**Méthodes à masse concentrée** ne considérant pas la vitesse de rotation

### **COEFFICIENTS DE RESTITUTION**

(d'après Barbieri et al., 1988)

<i>Terrain</i>	$K_n$	$K_t$
<i>Rocher</i>	<i>0,50</i>	<i>0,95</i>
<i>Rocher recouvert de gros blocs</i>	<i>0,35</i>	<i>0,85</i>
<i>Eboulis</i>	<i>0,30</i>	<i>0,70</i>
<i>Sol couvert de végétation</i>	<i>0,25</i>	<i>0,55</i>

# ***MOUVEMENTS GRAVITAIRES***

## ***2. MOUVEMENTS DE PENTE***

### ***PROTECTION***

**A. INTRODUCTION A L'ANALYSE MECANIQUE  
DES MOUVEMENTS DE PENTES**

**B. METHODES DE PROTECTION ACTIVES ET PASSIVES**

- **Protection active : stabilisation de la pente**

  - *Terrassement*

  - *Drainage*

  - *Renforcement*

- **Protection passive : protection des enjeux par des ouvrages**

# STABILISATION DES VERSANTS

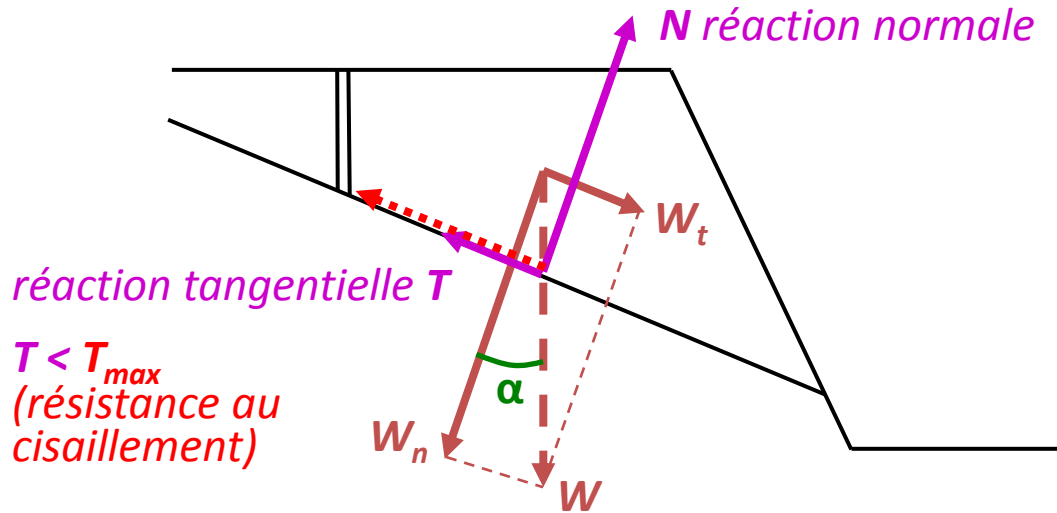
Modification de la répartition des masses → **TERRASSEMENT**

Diminution des pressions interstitielles → **DRAINAGE**

Introduction d'éléments résistants → **RENFORCEMENT**

# STABILISATION DES VERSANTS PAR TERRASSEMENT

## Exemple du glissement sur 1 plan sous l'action du poids seul

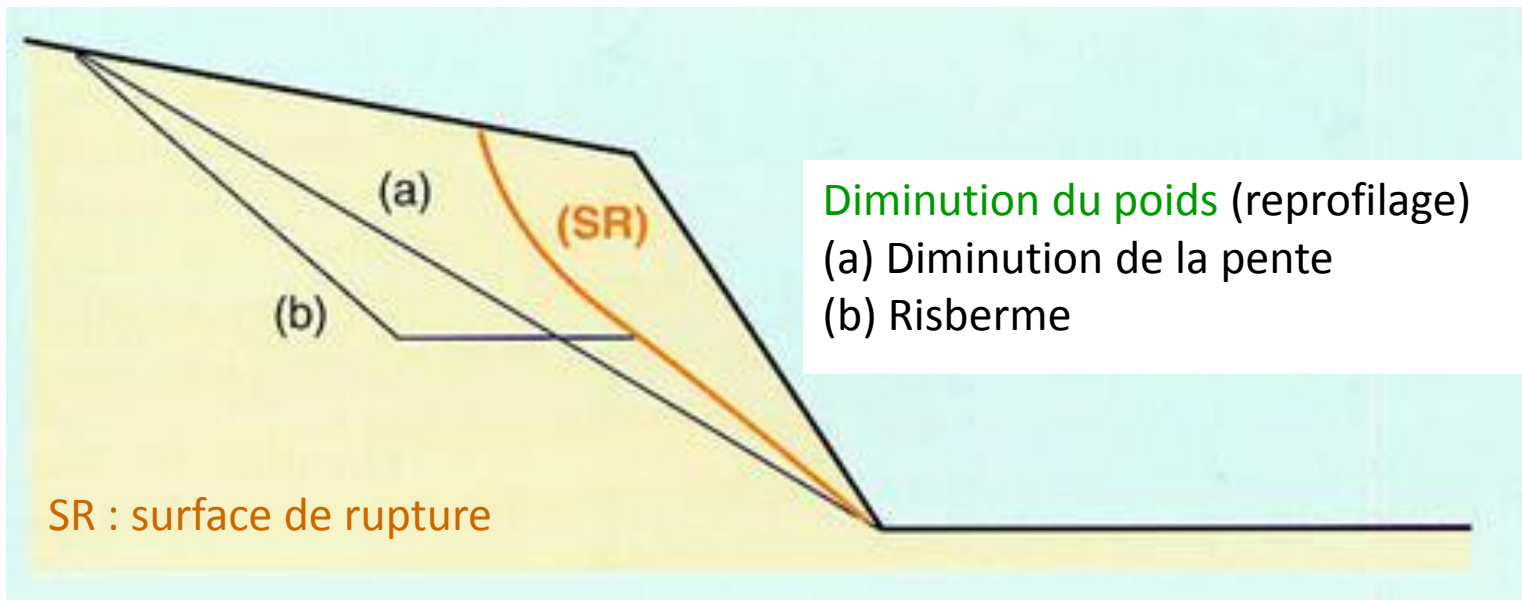


$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{W \cos \alpha \tan \phi + cA}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{cA}{W \sin \alpha}$$

Pour améliorer la stabilité, on peut diminuer le poids (terrassement)

# STABILISATION DES VERSANTS PAR TERRASSEMENT

## Diminution du poids

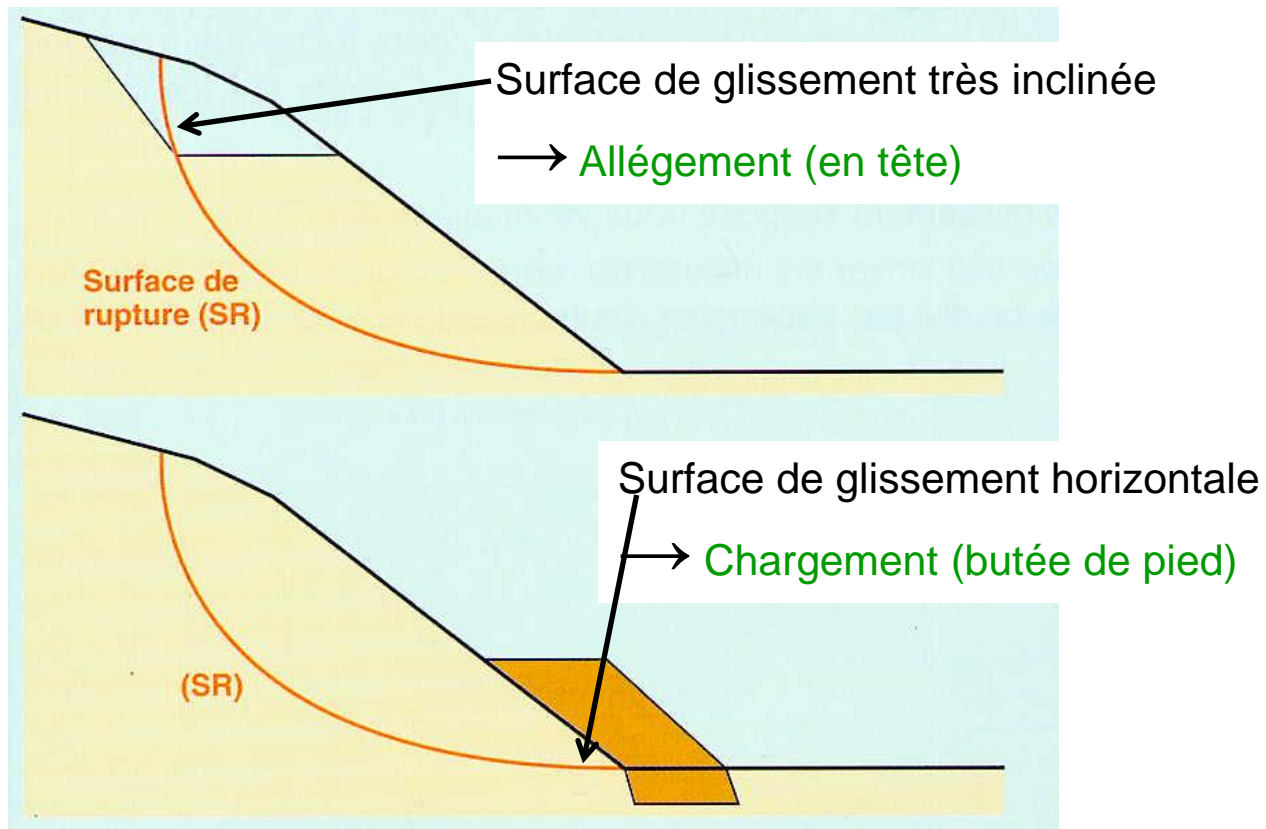




# STABILISATION DES VERSANTS PAR TERRASSEMENT

## Glissement rotationnel ou fractionné

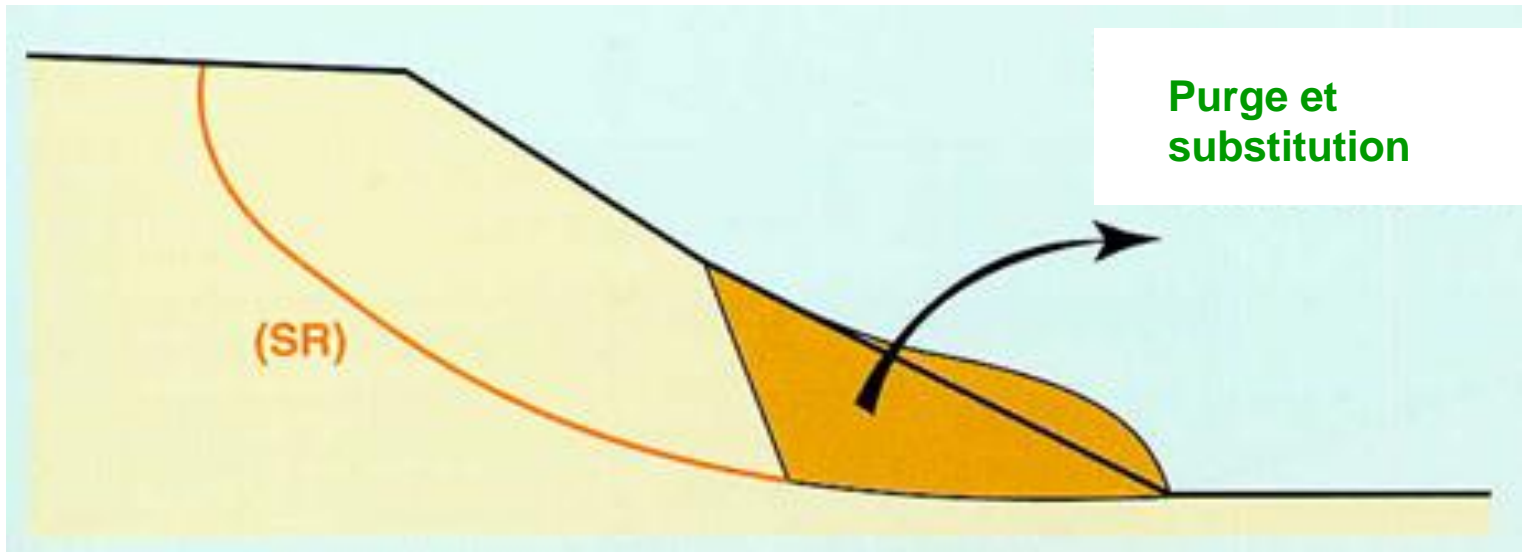
Pour améliorer la stabilité, on peut diminuer le poids ou le répartir différemment



# STABILISATION DES VERSANTS PAR TERRASSEMENT

$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{W \cos \alpha \tan \phi + cA}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{cA}{W \sin \alpha}$$

On peut aussi augmenter  $\Phi$  ou  $c$  en remplaçant un sol par un autre



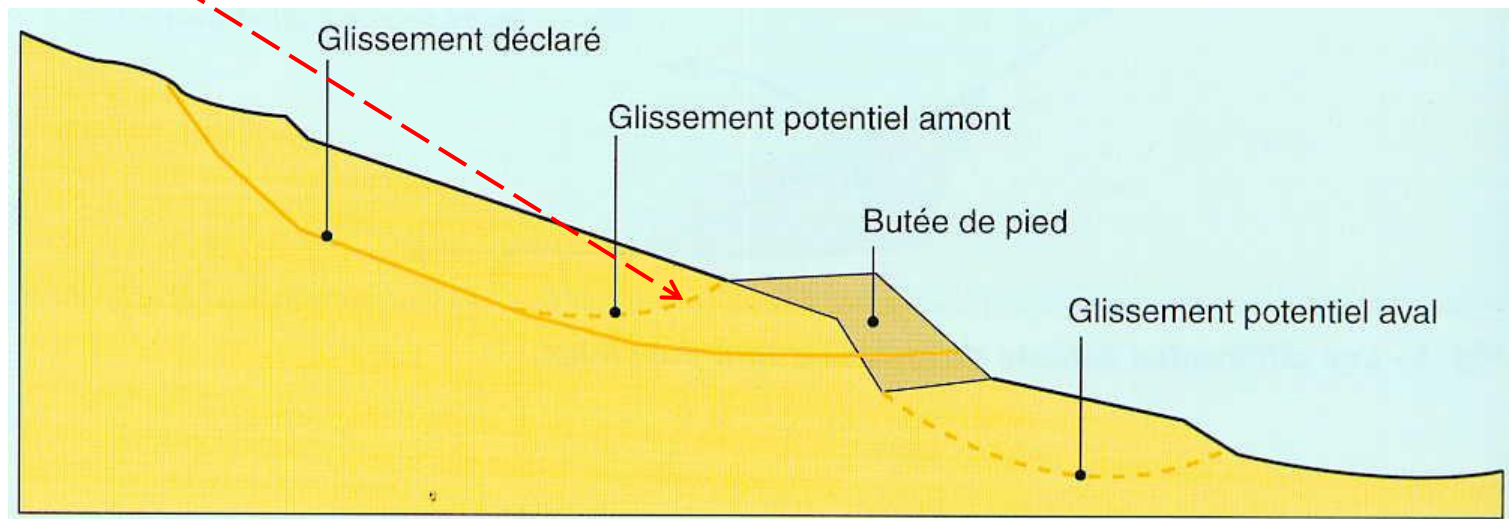
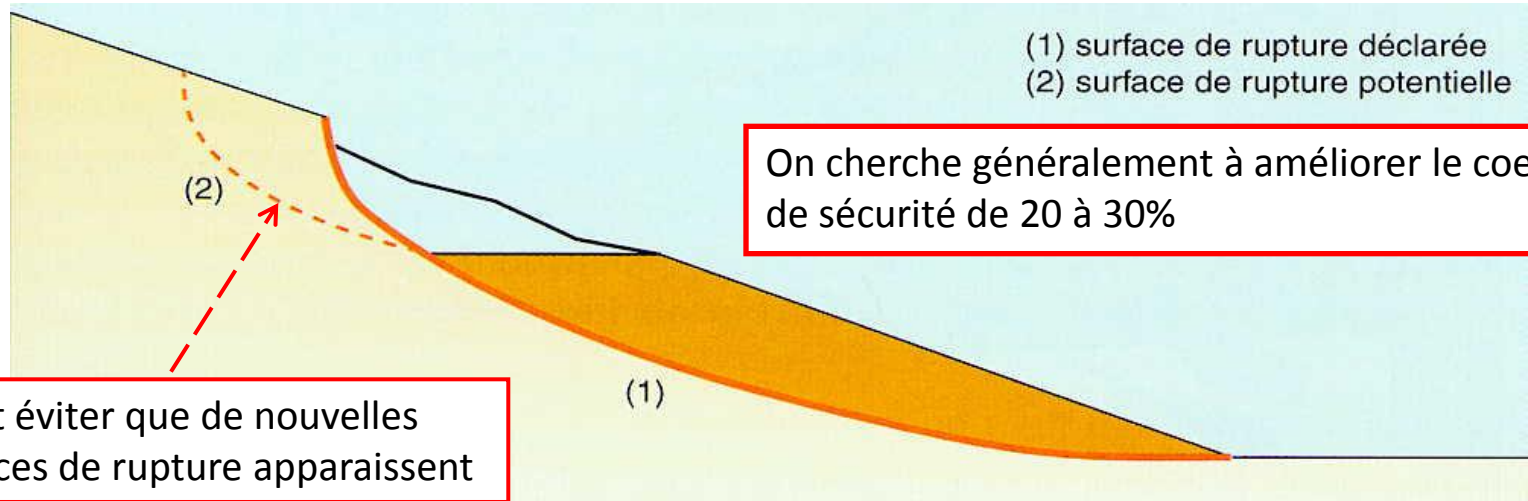






# STABILISATION DES VERSANTS PAR TERRASSEMENT

## Exemples d'allègement en tête et de butée en pied

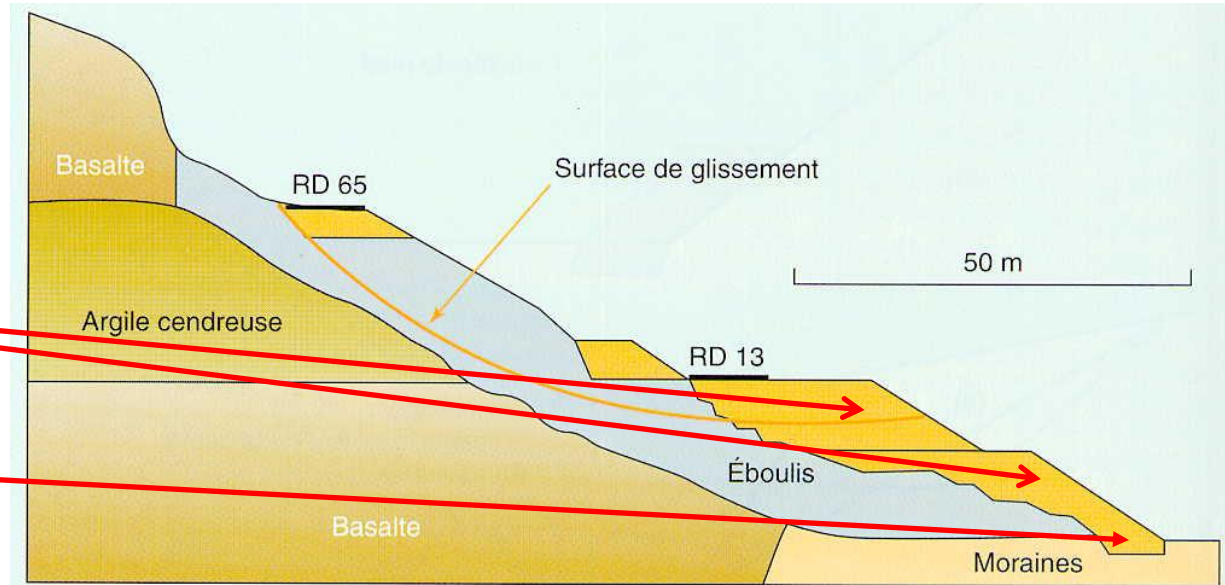


# STABILISATION DES VERSANTS PAR TERRASSEMENT

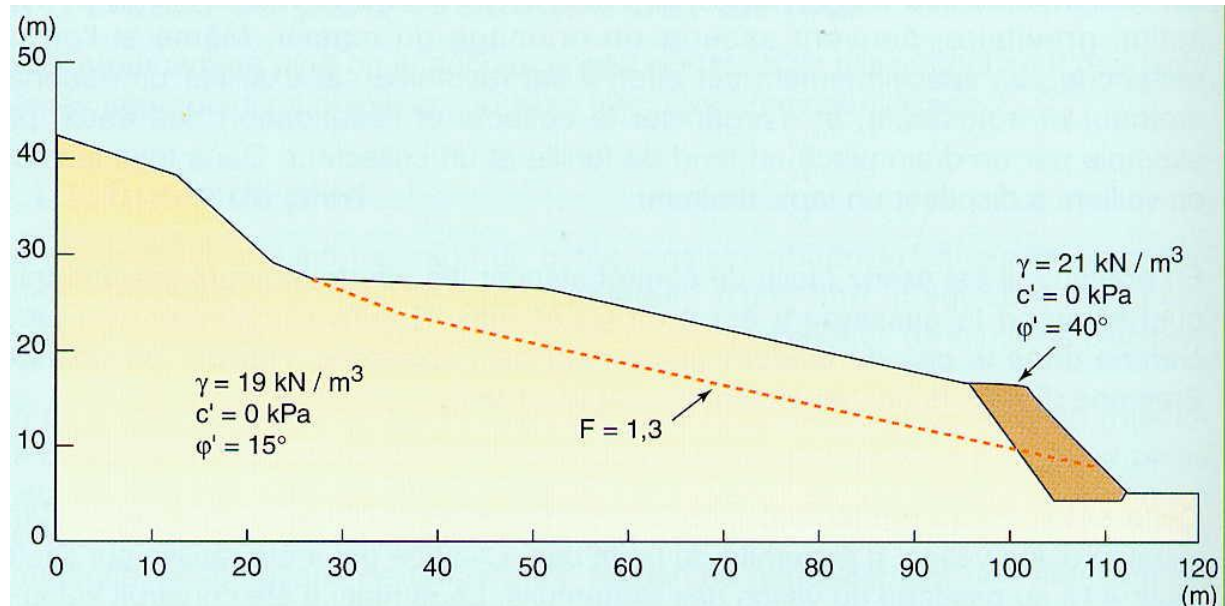
## Exemples d'allègement en tête et de butée en pied

Stabilisation du glissement de Saint-Urtize (Cantal) par plusieurs niveaux de butées

*Ancrage dans une formation stable*



Stabilisation par butée en enrochements, du glissement de l'autoroute A75 au Piou (Lozère)

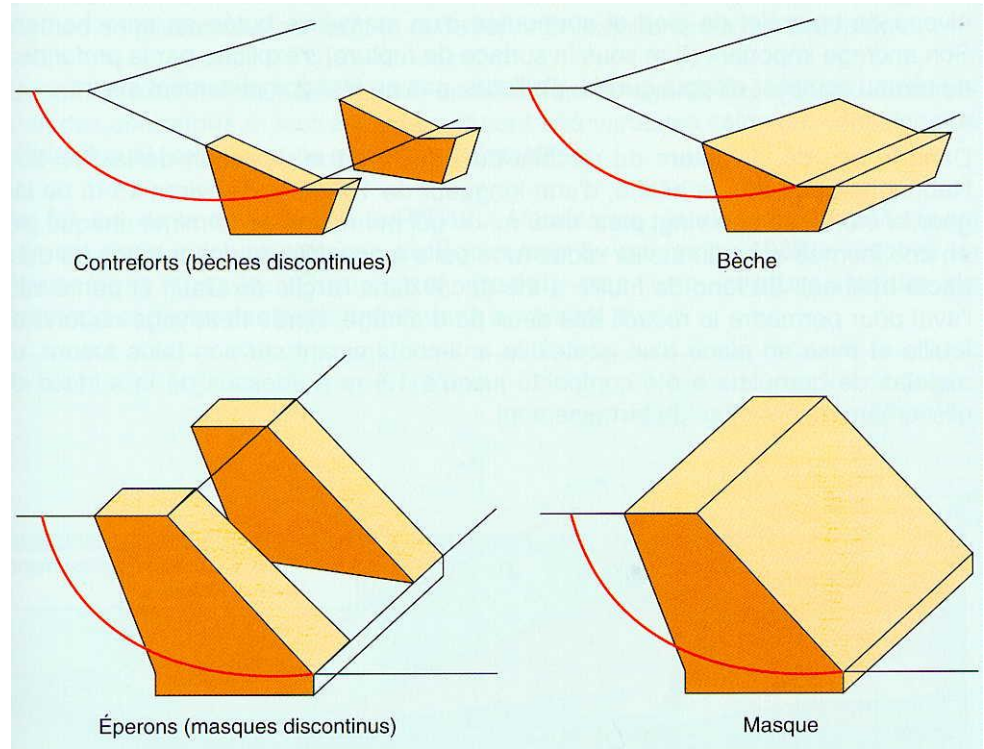




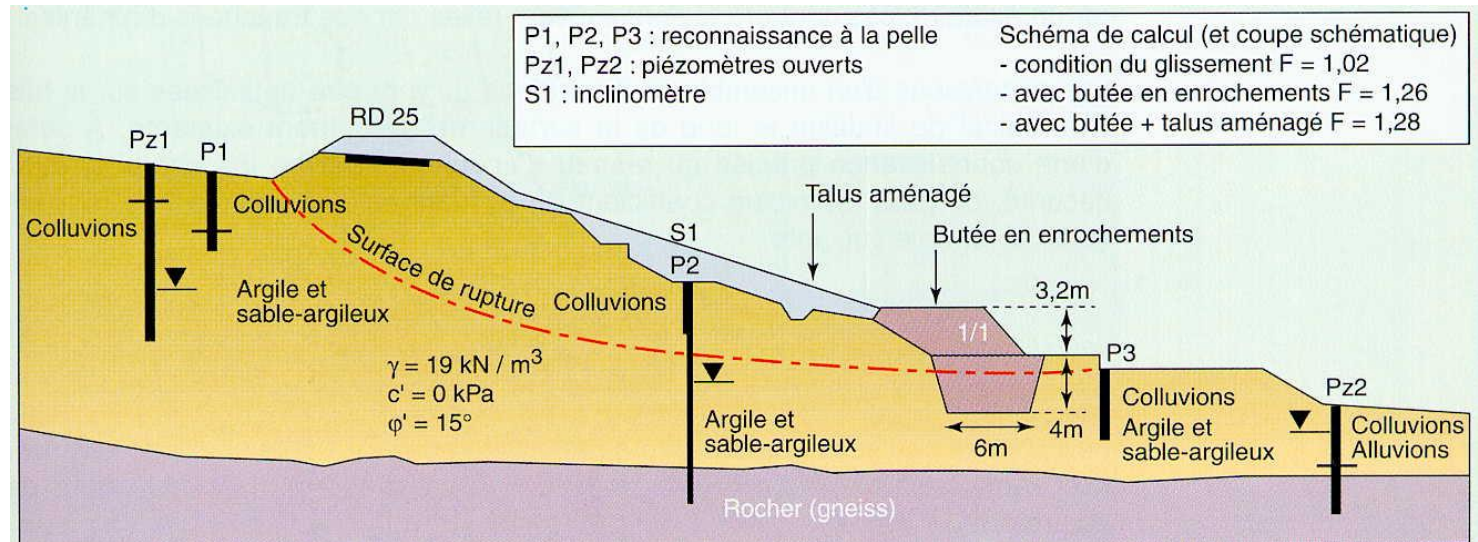


# STABILISATION DES VERSANTS PAR TERRASSEMENT

## Substitution partielle



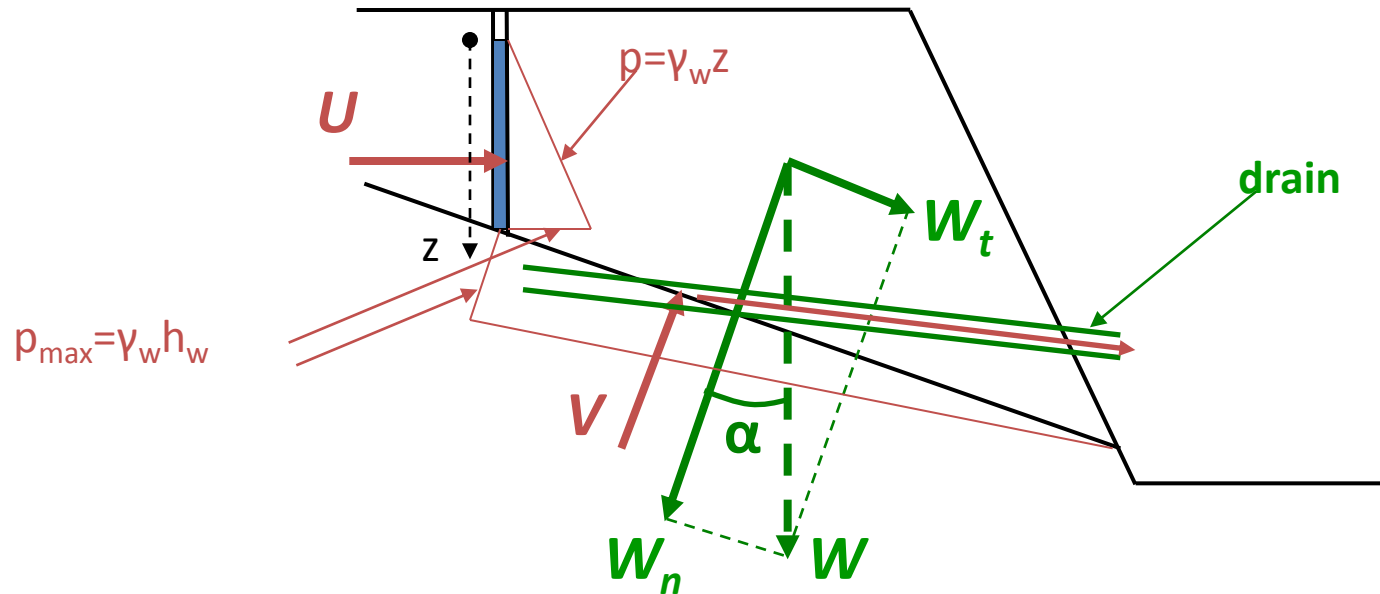
## Stabilisation du glissement de La Rochelambert (Haute-Loire)





# STABILISATION DES VERSANTS PAR DRAINAGE

Exemple du glissement sur 1 plan d'un bloc cylindrique sous l'action de son poids et de la pression de l'eau



$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{(W \cos \alpha - \textcircled{V} - \textcircled{U} \sin \alpha) \tan \phi + cL}{W \sin \alpha + \textcircled{U} \cos \alpha}$$

Pour améliorer la stabilité, il faut diminuer  $U$  et  $V$   
 → drainage

# STABILISATION DES VERSANTS PAR DRAINAGE

## Drainage de surface

But : empêcher l'eau de s'infiltrer dans le terrain

*Exemple : drainage de surface au Mas d'Avignonet (Isère)*

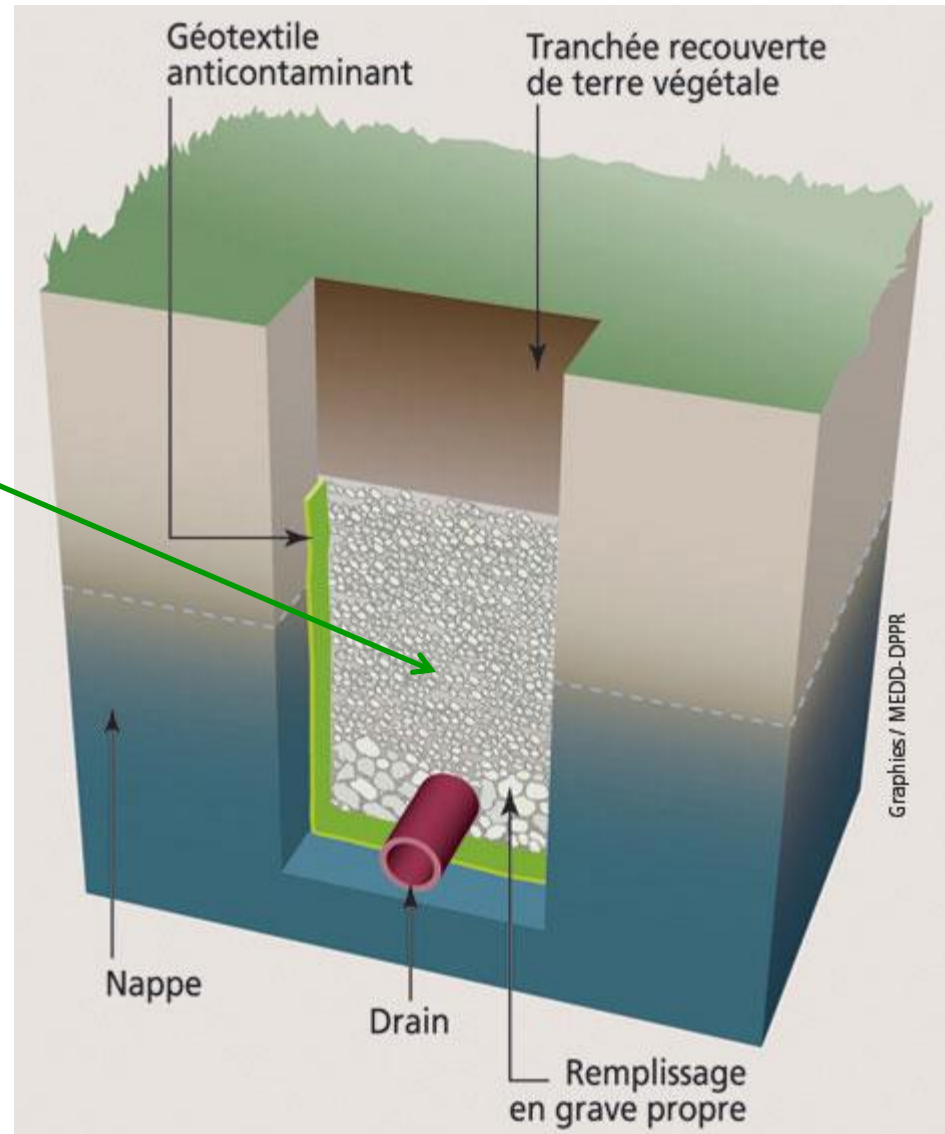


# STABILISATION DES VERSANTS PAR DRAINAGE

## Drainage profond

But : évacuer l'eau souterraine

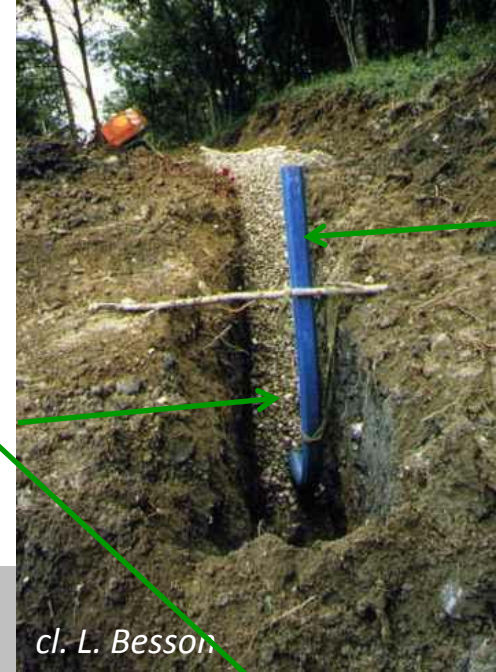
*Tranchée drainante*



# STABILISATION DES VERSANTS PAR DRAINAGE

## Drainage profond

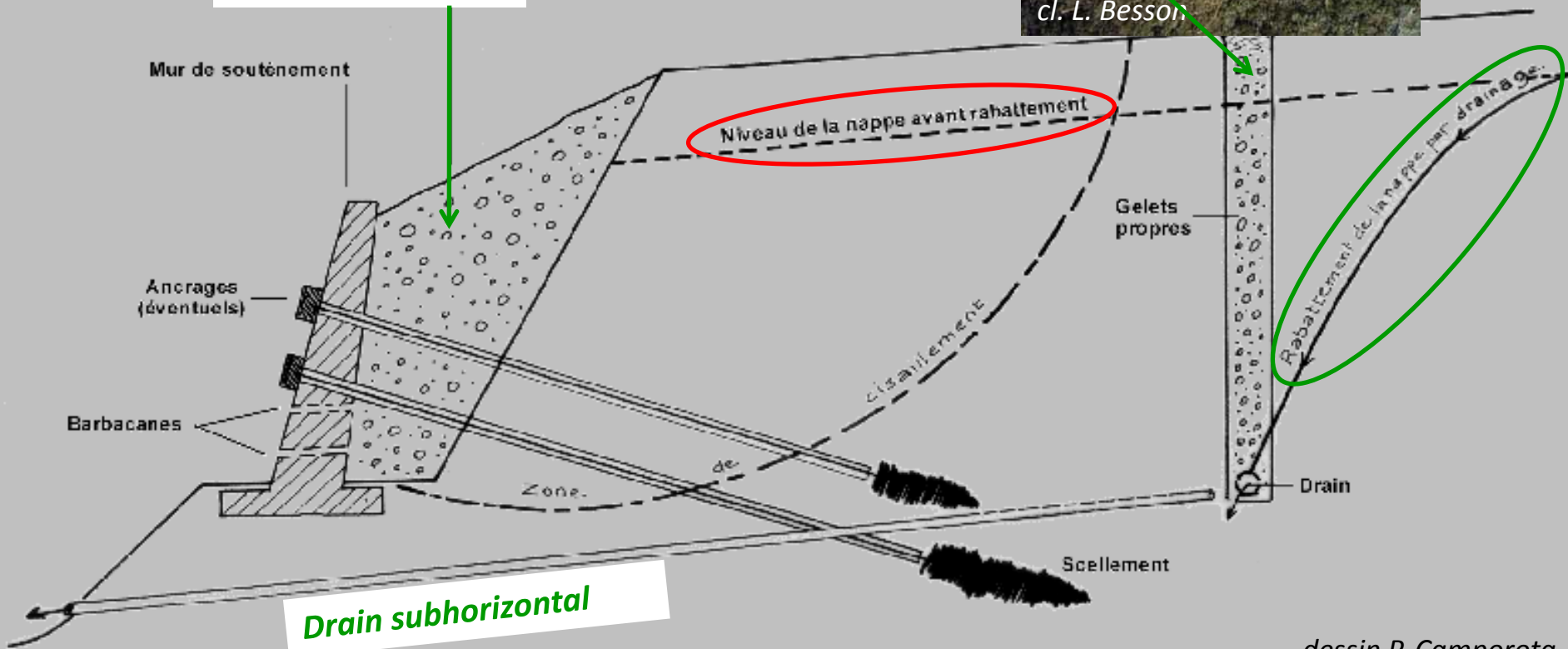
Mise en œuvre de différentes méthodes



Drain

Tranchée drainante

Masque drainant

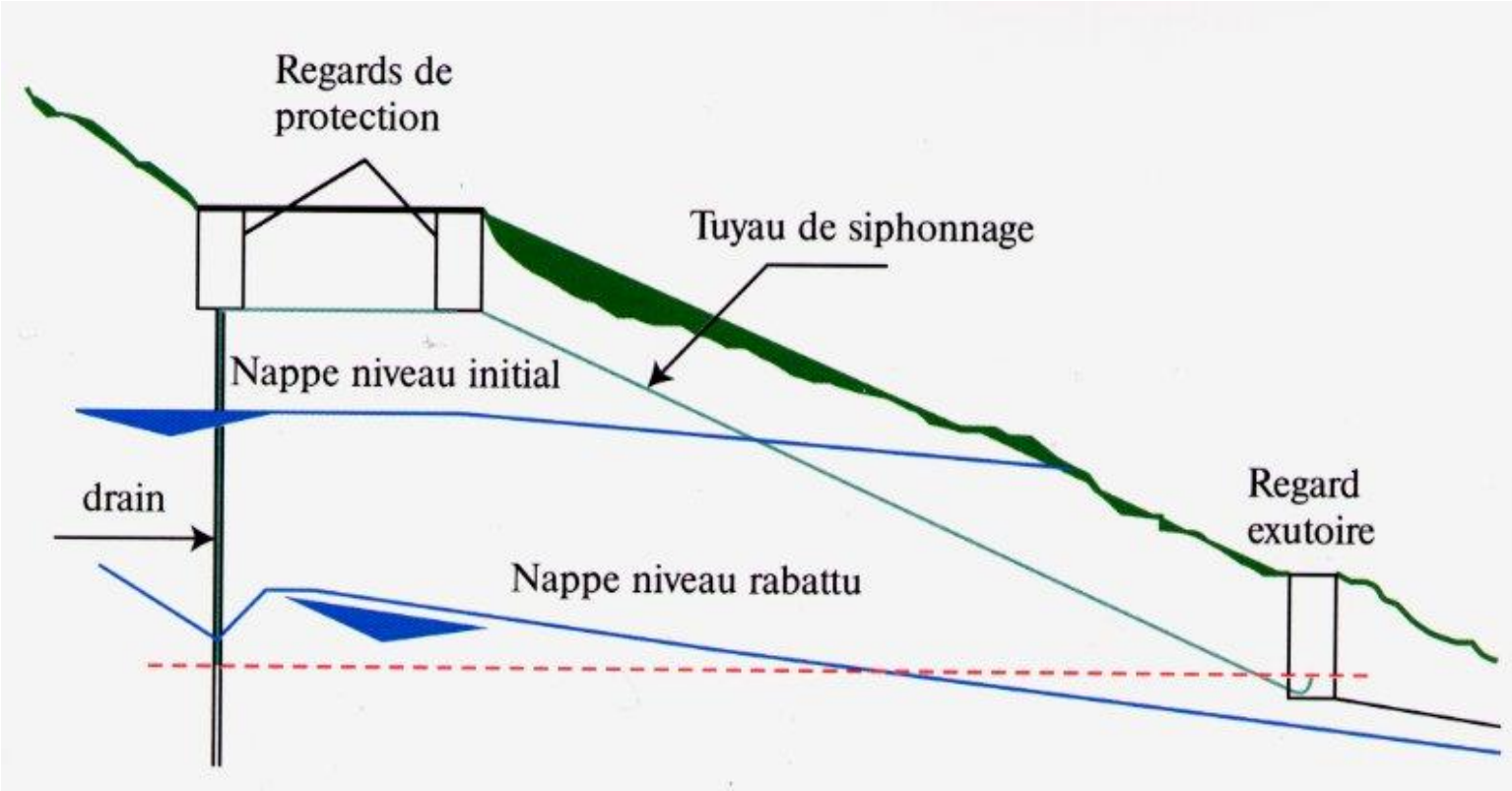


cl. L. Besson

dessin P. Camporota



# DRAINS-SYPHONS



# DRAINS-SYPHONS

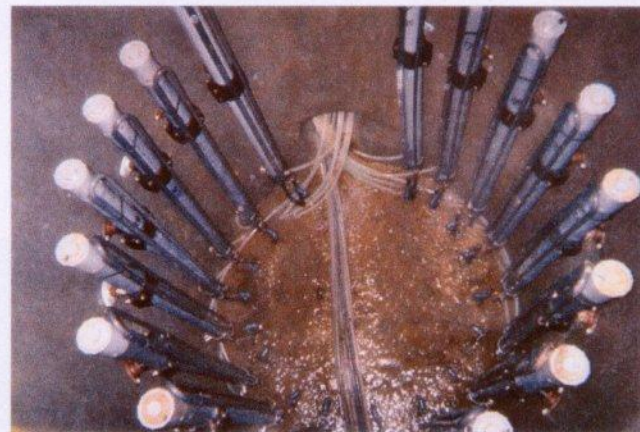
## 1. TERRASSEMENTS



## 2 VUES SUR REGARDS DE PROTECTION



*Regard type pour drain siphon*



*Regard exutoire  $\Phi 1500\text{mm}$  avec chasses automatiques*

# STABILISATION DES VERSANTS PAR DRAINAGE

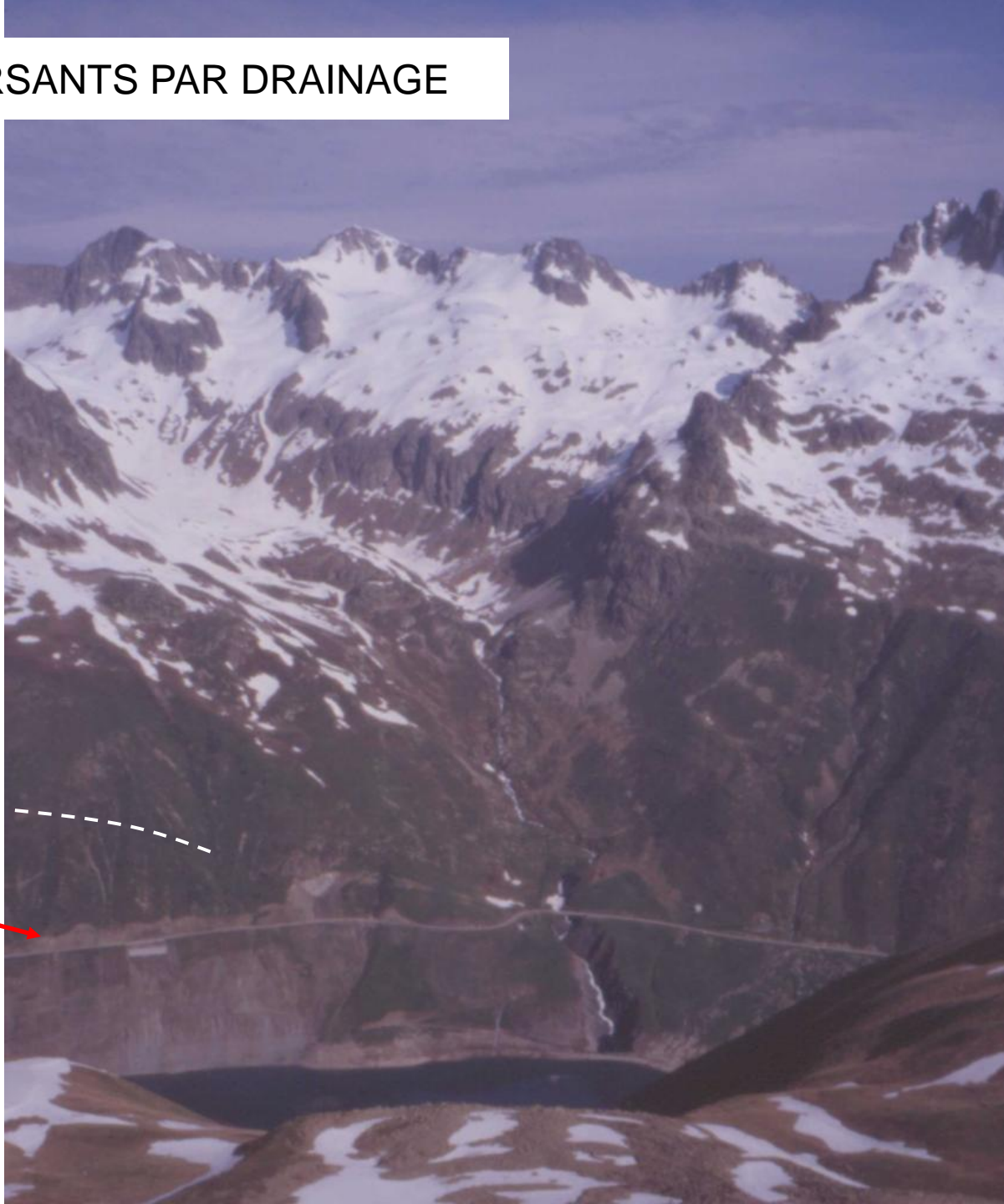
## Galerie drainante

GLISSEMENT DU BILLAN  
survenu en mai 1986  
pendant la mise en eau du  
barrage de Grand-Maison

Escarpement  
longueur: 300m  
hauteur: 1m

Fissures et affaissements  
sur la route

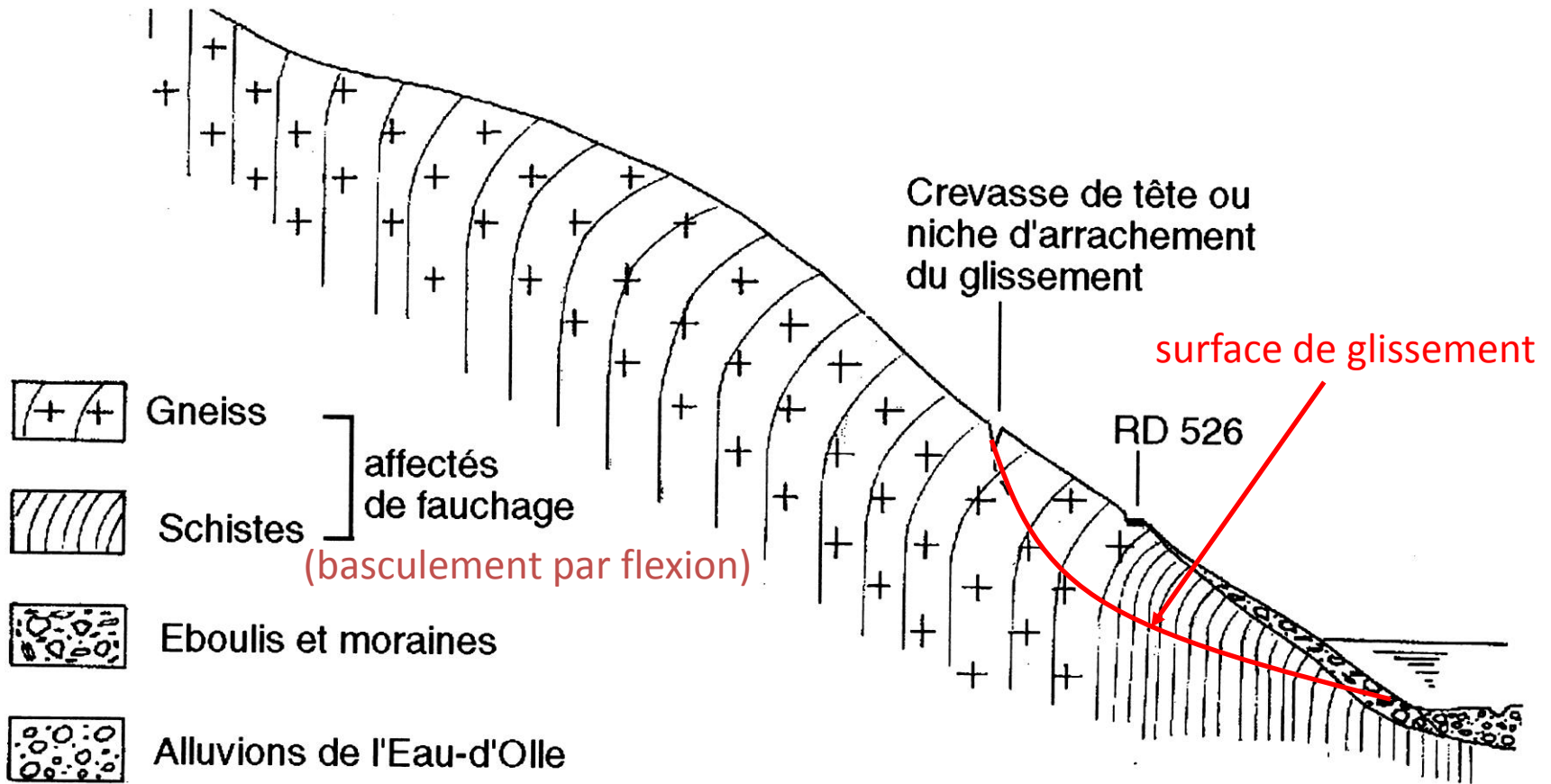
→ Abaissement du plan d'eau





# STABILISATION DES VERSANTS PAR DRAINAGE

0 100 200 m



*Coupe géologique schématique du versant rive droite de l'Eau-d'Olle, au droit du glissement du Billan (Dubié et al. 1991).*



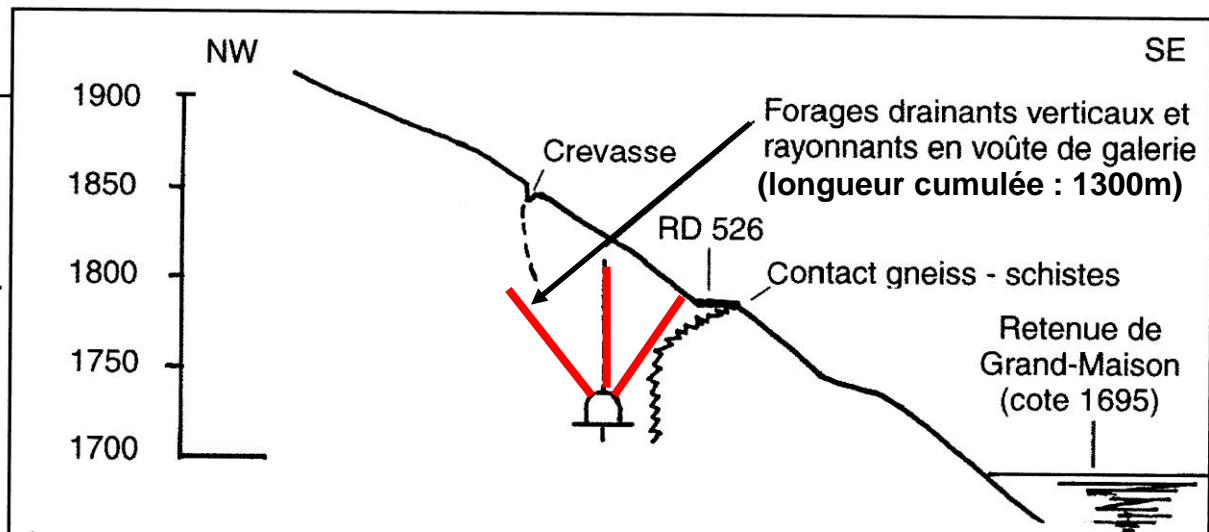
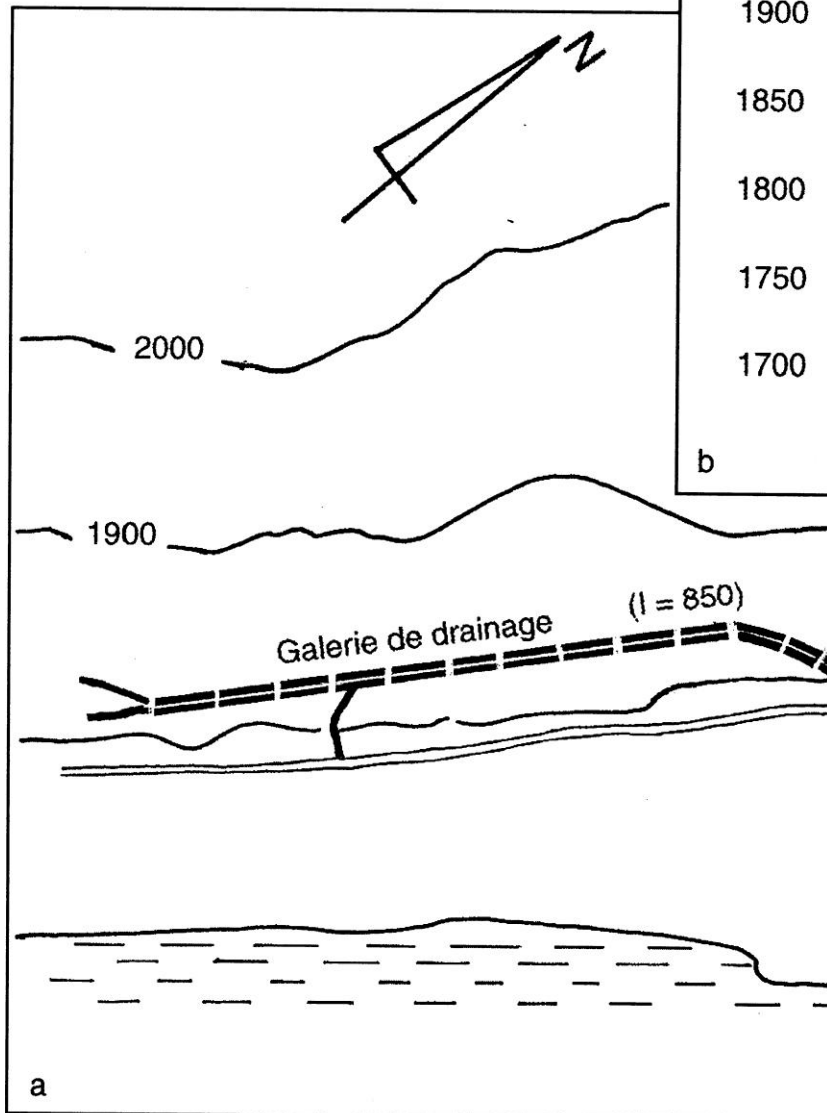
# STABILISATION DES VERSANTS PAR DRAINAGE



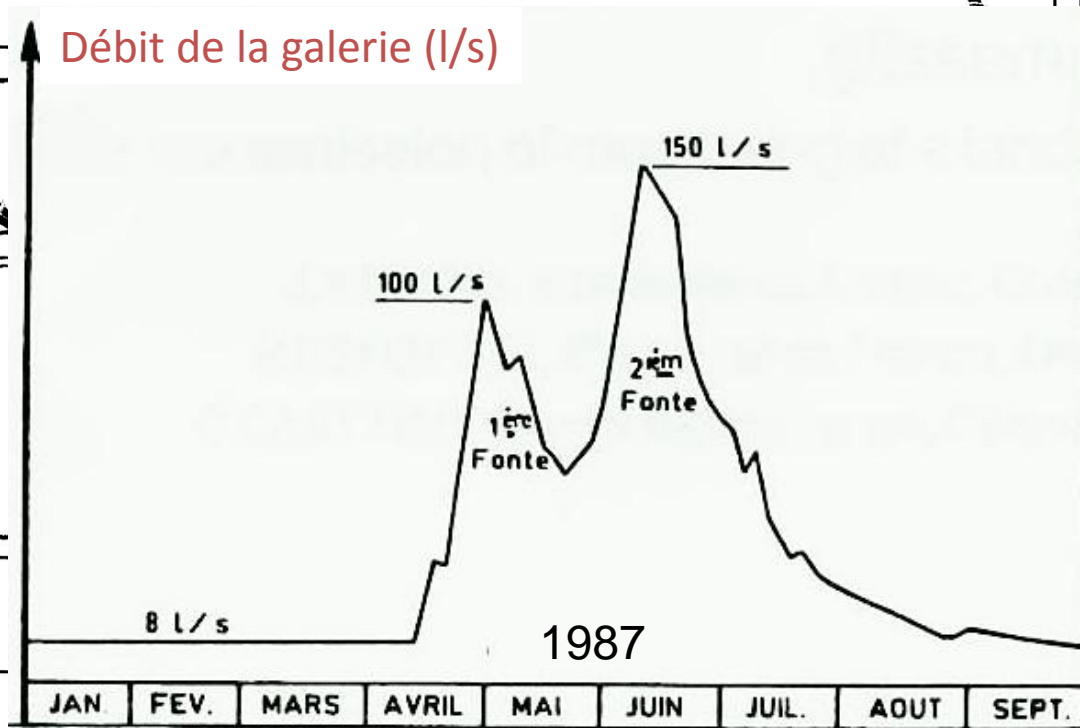
# STABILISATION DES VERSANTS PAR DRAINAGE

## Galerie de drainage

(hiver 1986-87)



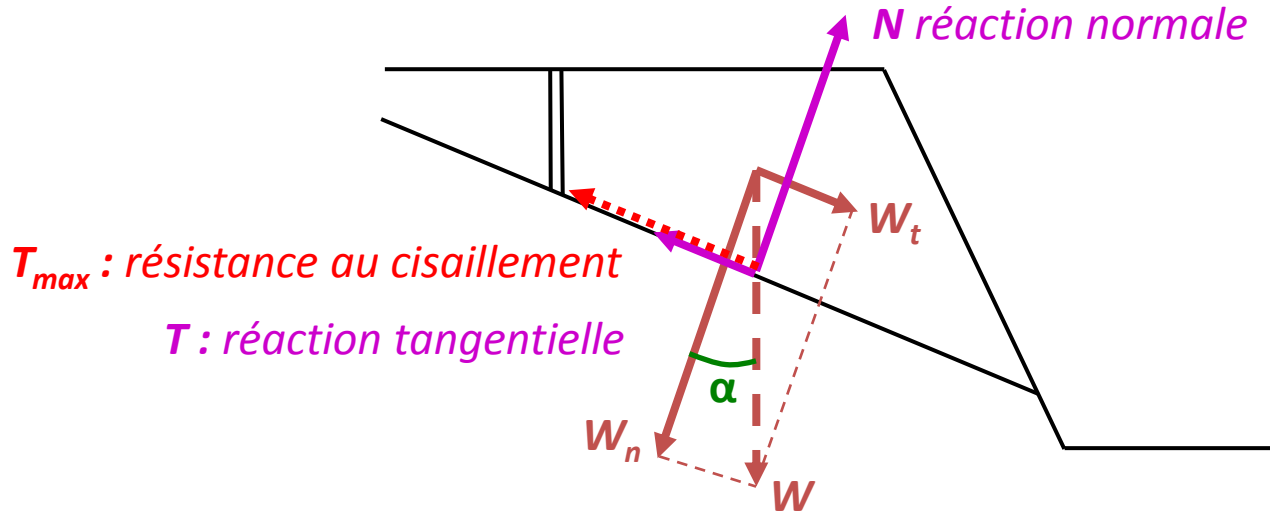
## Débit de la galerie (l/s)



d'après Dubié et al., 1988, 1991

# STABILISATION DES VERSANTS PAR RENFORCEMENT

## Exemple du glissement sur 1 plan sous l'action du poids seul

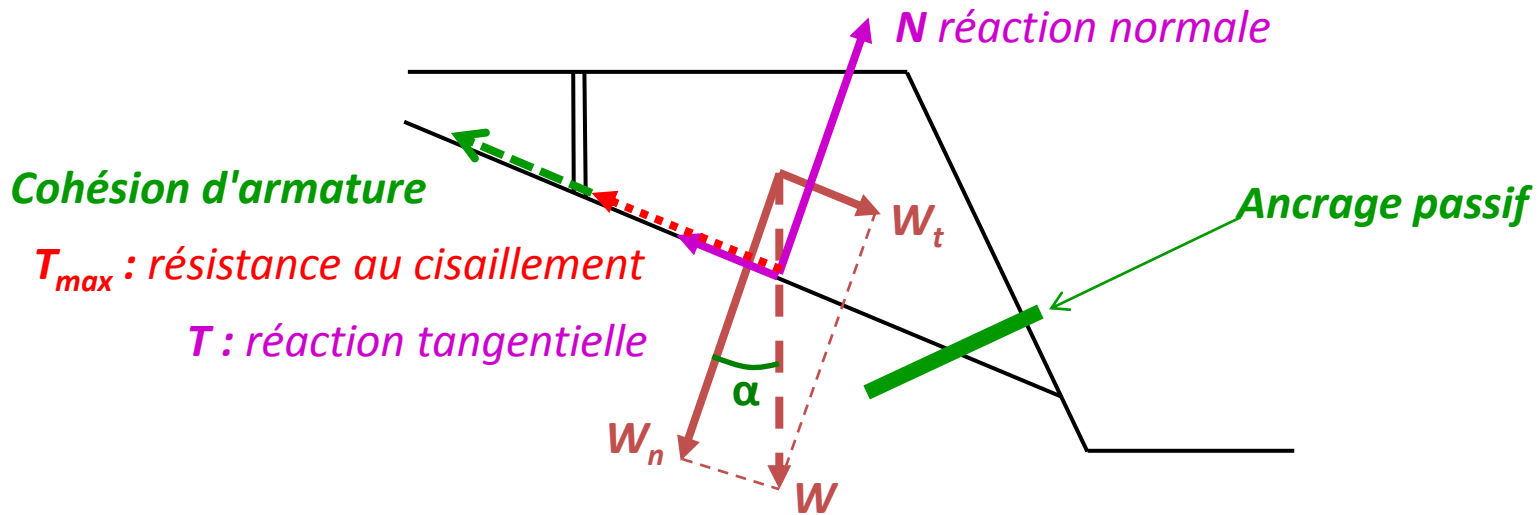


$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{W \cos \alpha \tan \phi + cA}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{cA}{W \sin \alpha}$$

Pour améliorer la stabilité, on peut augmenter la **force de cohésion** en installant des **ancrages passifs**, qui sont sollicités en cas de mouvement (*cohésion d'armature*)

# STABILISATION DES VERSANTS PAR RENFORCEMENT

## Exemple du glissement sur 1 plan sous l'action du poids seul



$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{W \cos \alpha \tan \phi + cA + C_a}{W \sin \alpha}$$

La force de réaction exercée par l'ancrage (**cohésion d'armature**) dépend des déformations du terrain et de l'armature. Son calcul est complexe.



# STABILISATION DES VERSANTS PAR RENFORCEMENT

## Exemple d'ancrage passif

- barres d'acier scellées pour les gros blocs
- grillage pour les plus petits





# STABILISATION DES VERSANTS PAR RENFORCEMENT

## Exemple d'ancrage passif : barre d'acier scellée (boulon)

*Forage*



*Tube pour injecter le coulis de ciment*

*Barre d'acier*



# STABILISATION DES VERSANTS PAR RENFORCEMENT

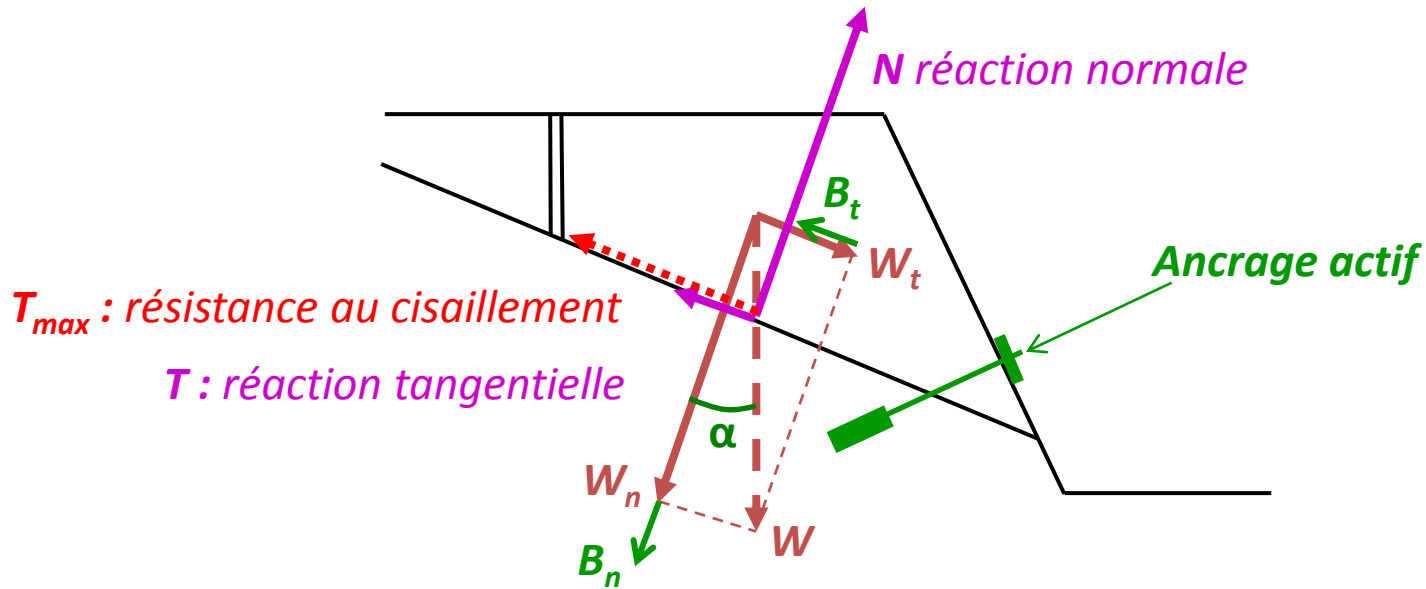
Exemple d'ancrage passif : barres  
d'acier scellées dans le Vercors



# STABILISATION DES VERSANTS PAR RENFORCEMENT

## Exemple du glissement sur 1 plan sous l'action du poids seul

Les **ancrages actifs**, dès leur installation, exercent des forces qui réduisent la force motrice et augmentent la force normale



$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{(W \cos \alpha + B_n) \tan \phi + cA}{W \sin \alpha - B_t}$$

$B_n, B_t$  : composantes normale et tangentielle de la force d'ancrage

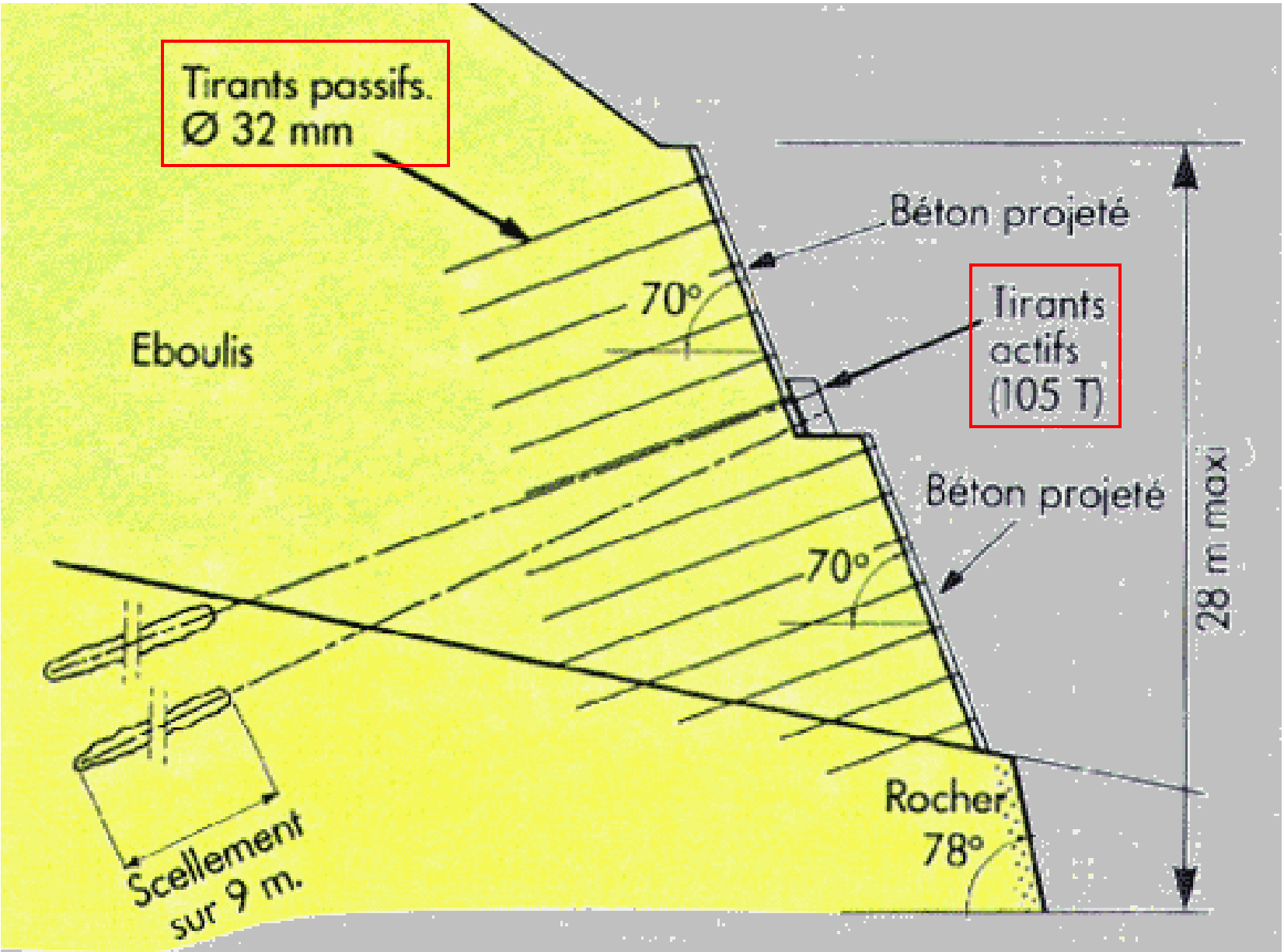
La force exercée par l'ancrage est connue. Elle est mesurée lors de la mise en tension.



Boulons actifs dans les gorges de la Bourne (Vercors)



PROTECTION ACTIVE : EXEMPLE DE RENFORCEMENT DE TALUS ROUTIER



29 tirants de protection



# DIMENSIONNEMENT DU RENFORCEMENT

Exemple de rupture due à un dimensionnement insuffisant





# MODES DE RUPTURE D'UN ANCRAGE PASSIF PAR ARMATURE RIGIDE

Rupture ou plastification de la barre



Ecrasement de la roche (ou du sol)



Arrachement de la barre



# PROTECTION CONTRE LES MOUVEMENTS DE VERSANTS

1. **STABILISATION DU VERSANT** (parades actives car on empêche le déclenchement du mouvement)
2. **CONSTRUCTION D'OUVRAGES DE PROTECTION** (parades passives)
3. **EVITEMENT** (évacuation des personnes, déplacement des biens, zonage réglementaire)
4. **SURVEILLANCE** (déclenchement d'une alerte lorsque l'évènement est sur le point de se réaliser)

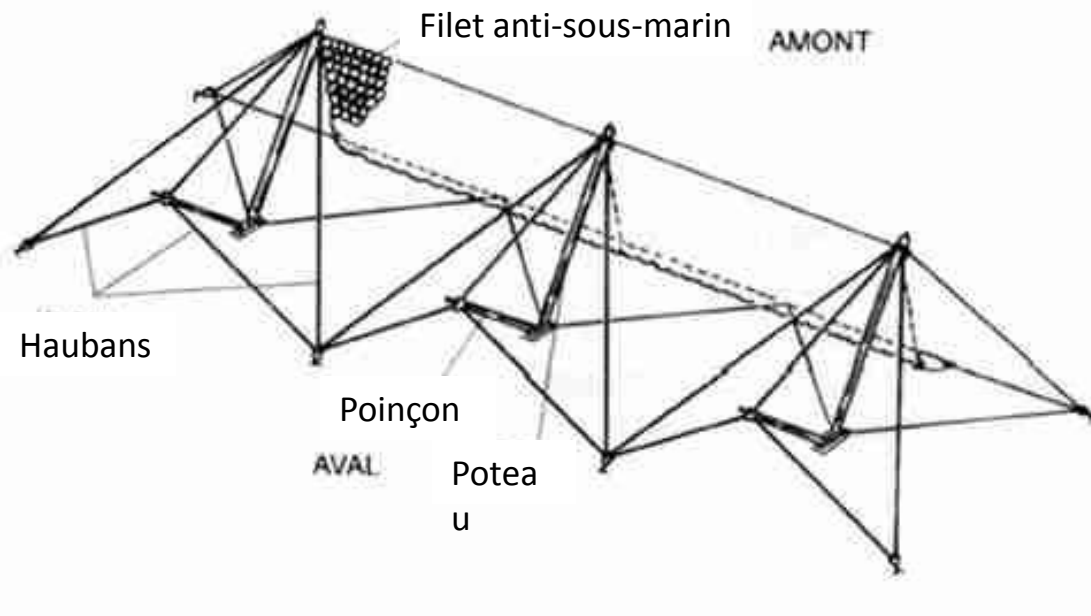
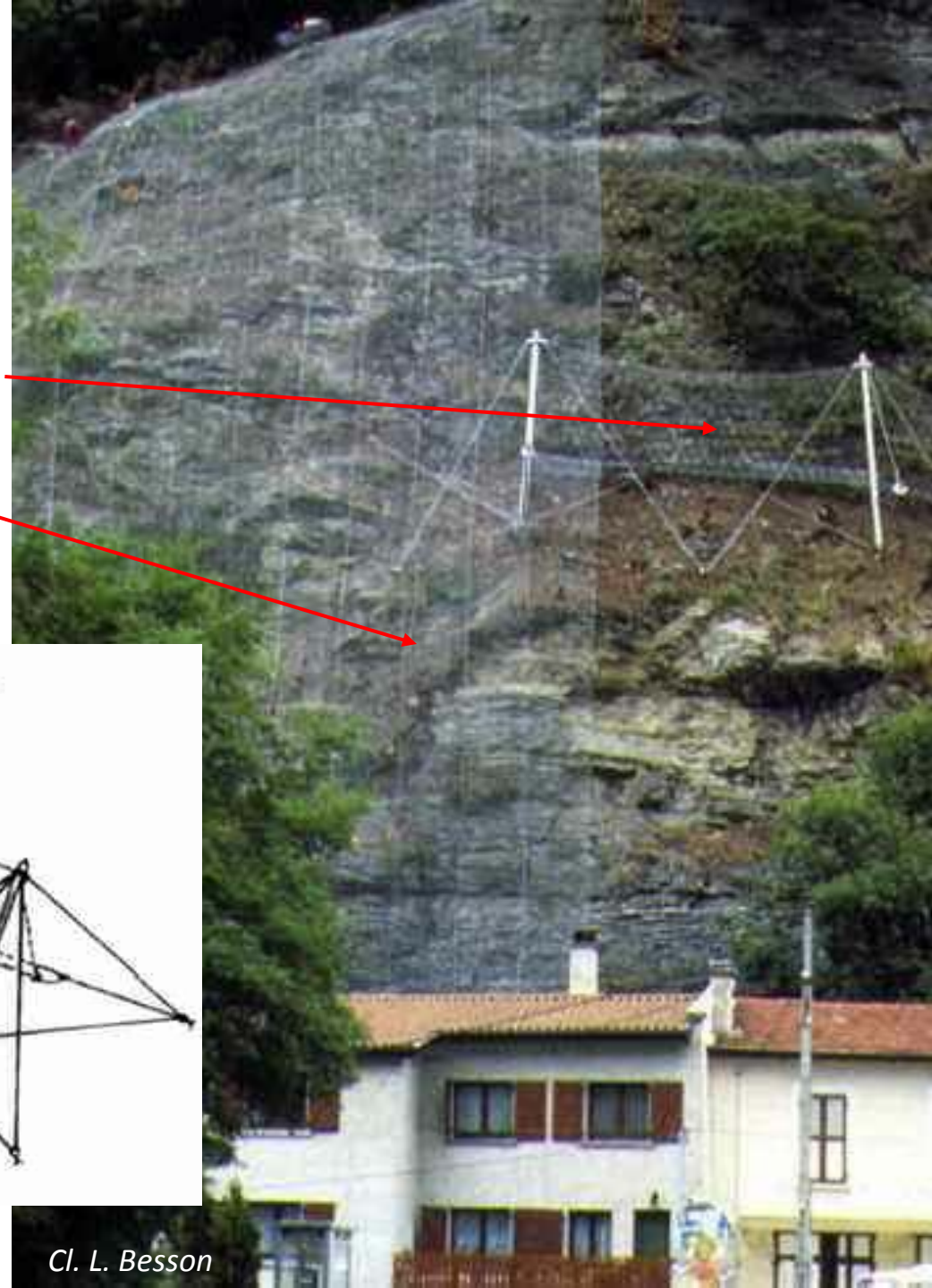
## **OUVRAGES DE REFERENCE**

- *Parades contre les instabilités rocheuses (2001, LCPC)*
- *Stabilisation des glissements de terrain (1998, LCPC)*
- *Plans de prévention des risques naturels (1999, la documentation française)*
- *Surveillance des pentes instables (1994, LCPC)*



# PROTECTION PASSIVE

## FILETS PARE-BLOCS HAUBANES ET NAPPES DE GRILLAGE





# PROTECTION PASSIVE

## Filets anti sous-marins et grillage dans les gorges de la Bourne (Isère)









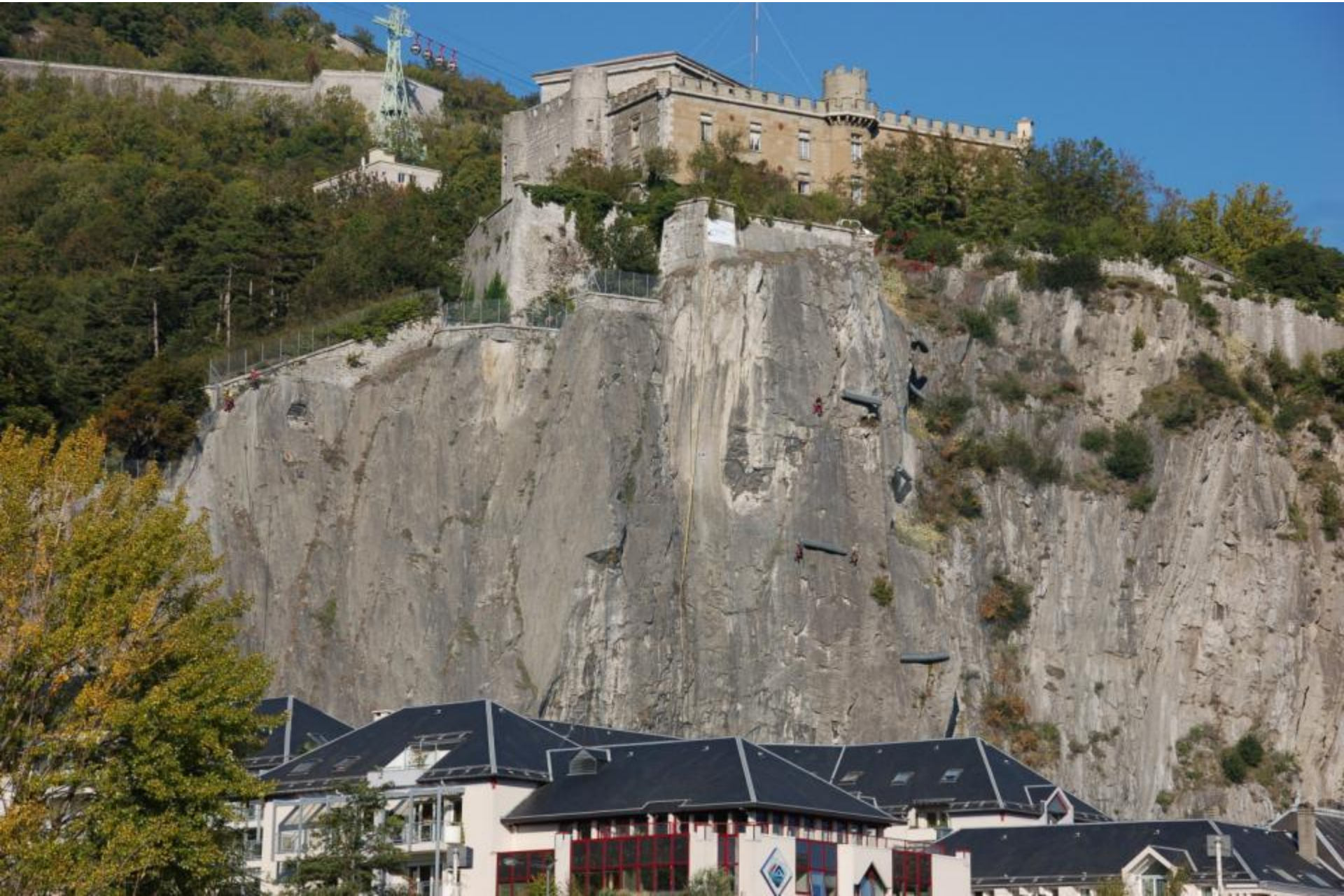
## PROTECTION PASSIVE

### Protection d'une route par un grillage (Saint-Julien en Vercors, Isère)





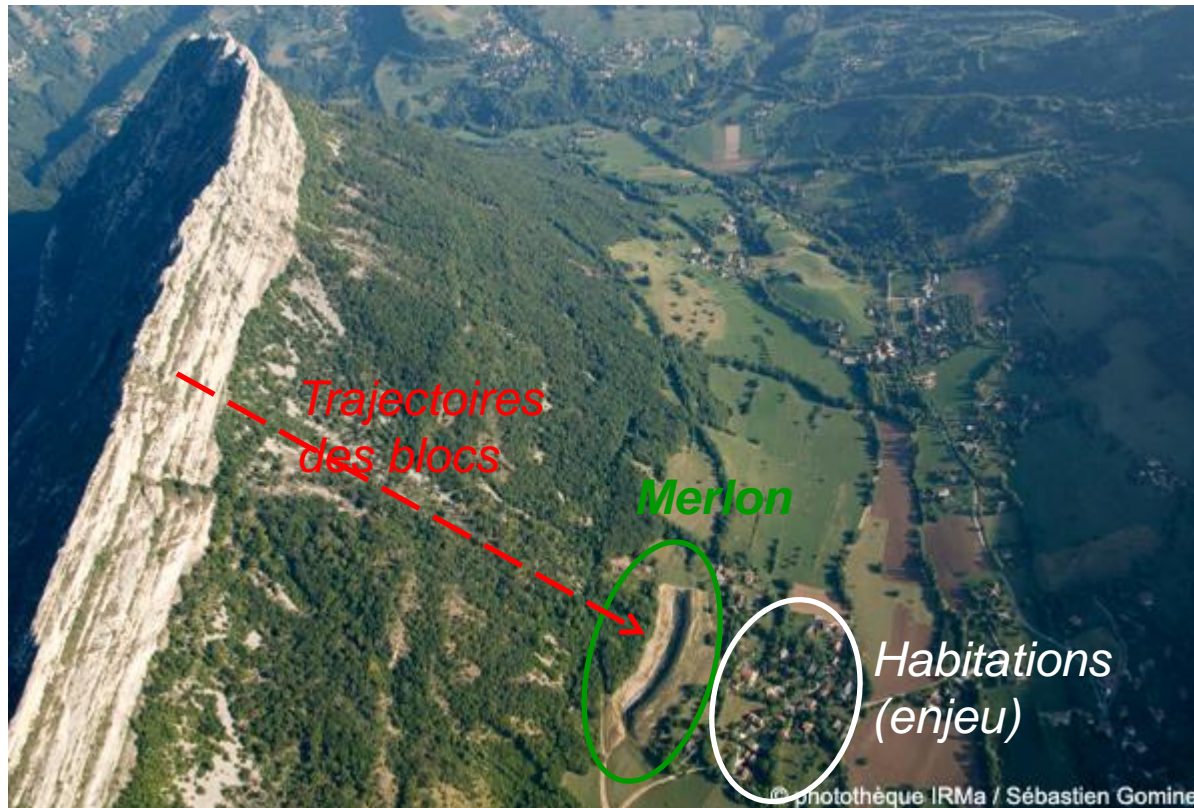
# Pose de grillages à la Porte de France (Grenoble)





# PROTECTION PASSIVE

## Merlons pare-blocs (=digues de protection)



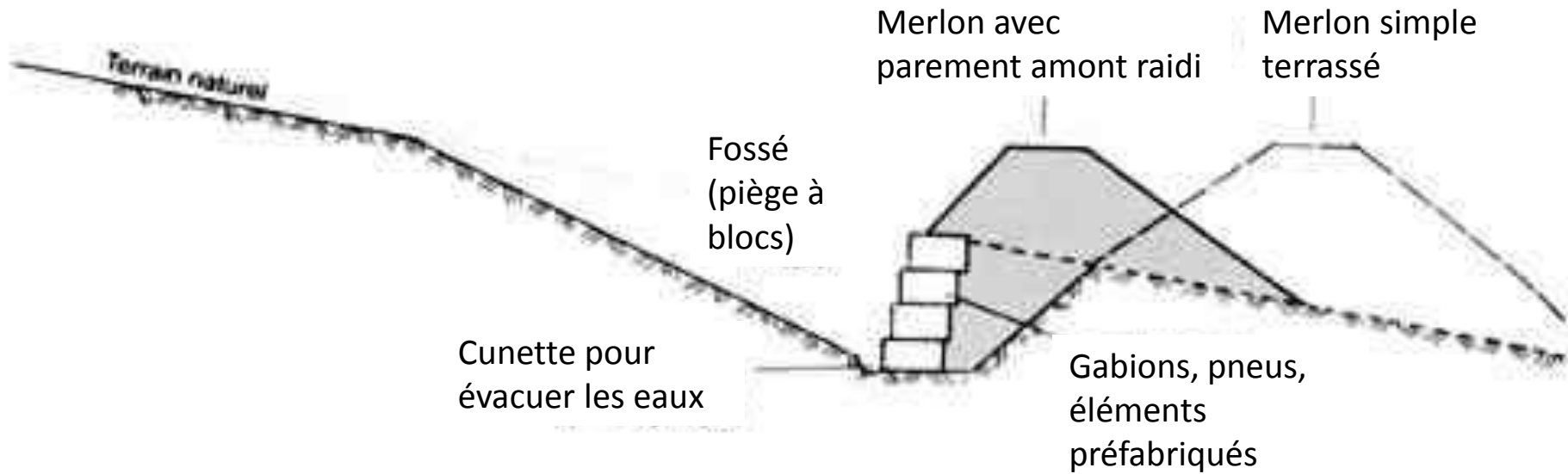
*Vue aérienne sur le merlon pare-blocs réalisé pour protéger le hameau de Ripaillère des chutes de blocs du versant Est du Néron (Saint Martin le Vinoux - 38)*





# PROTECTION PASSIVE

## Merlons pare-blocs



# PROTECTION PASSIVE

## Merlons pare-blocs (=digues de protection)

### *Merlon pare-blocs à Briançon (Hautes-Alpes)*





# EBOULEMENT D'AIGUEBLANCHE (1/5/77)

