

ISS 25-26

Mouvements de terrains

Sommaire

1. Introduction
2. Calcul des surfaces de rupture
3. Confortement

Mouvements de terrains

1. Introduction

Sinistres localisés mais aussi de graves accidents



Mouvements de terrain

Instabilité à l'échelle
des travaux



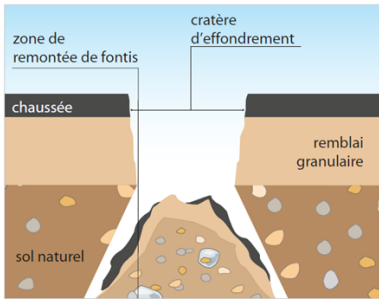
Anticiper par le calcul et les
méthodes constructives

Mouvements des versants
naturels de grande ampleur

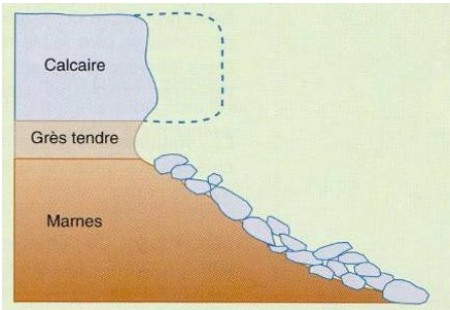


Analyser le risque, surveiller
et sécuriser

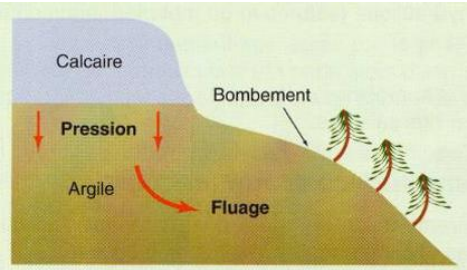
Les affaissements et effondrements



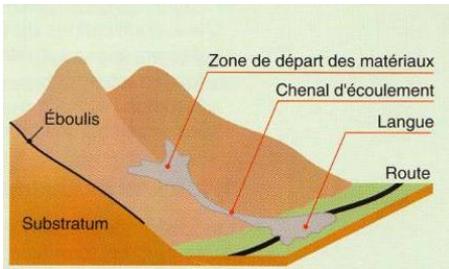
Les écoulements (roches)



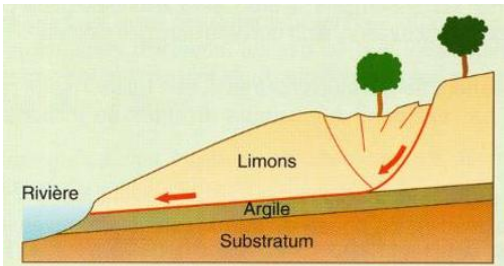
Le fluage des sols



Les coulées boueuses

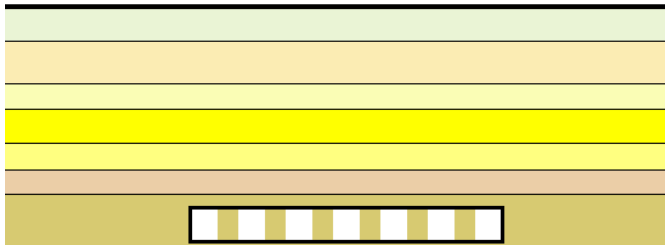


Les glissements (roches et sols)

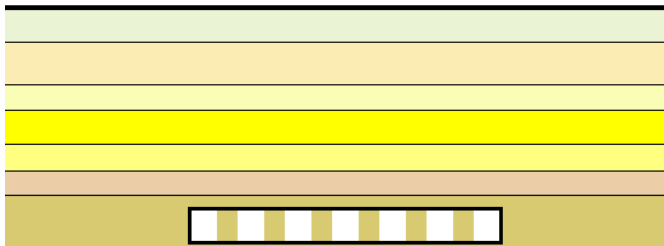


Les affaissements et effondrements

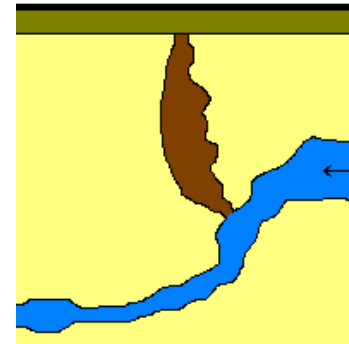
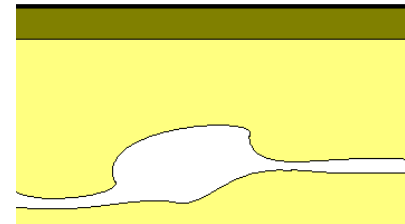
Affaissements



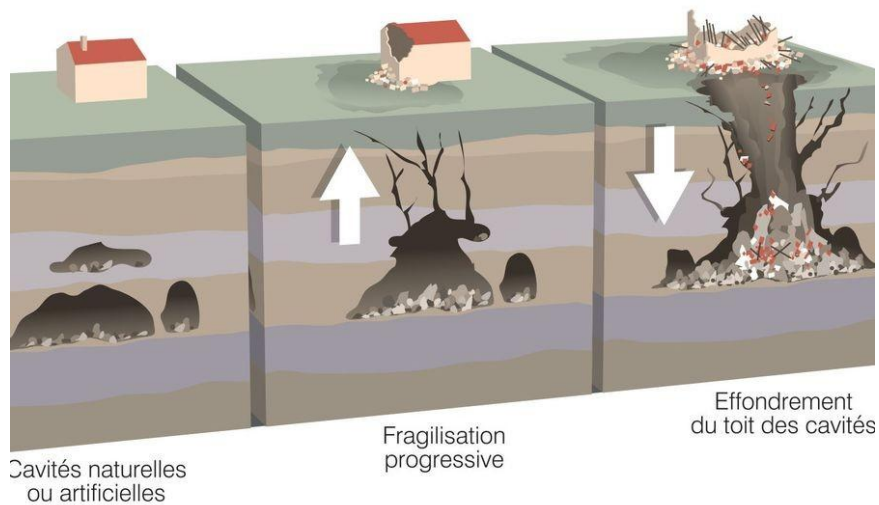
Effondrements généralisés



Effondrements localisés



Les affaissements et effondrements



Les affaissements et effondrements

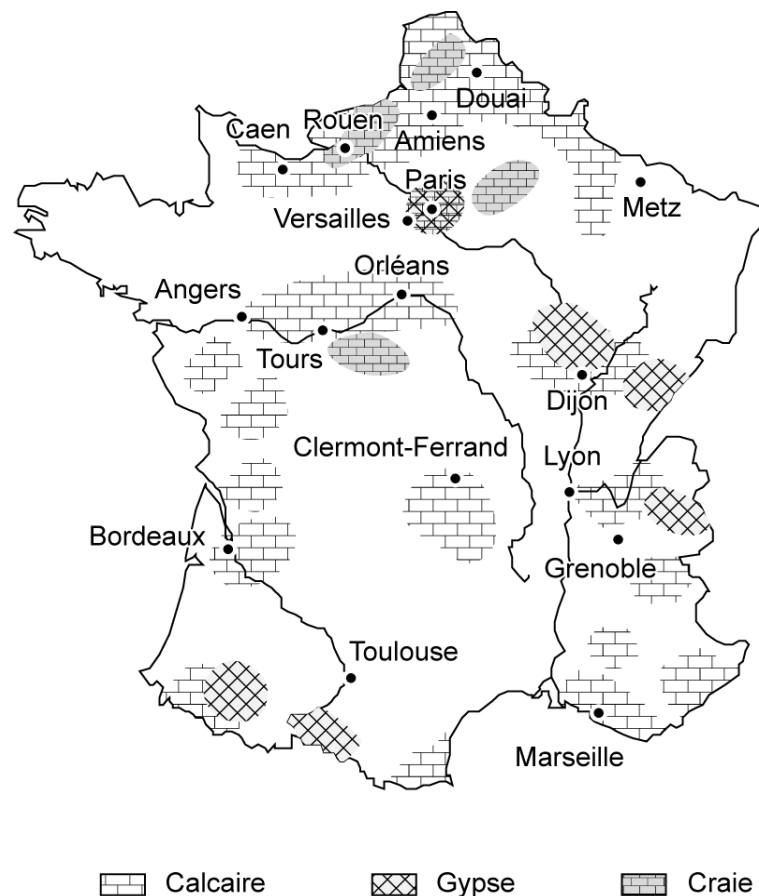
Cavités naturelles

- Zone karstique
- Dissolution du gypse

Cavités anthropiques

- Cartographiées
 - IGC à Paris
 - Infoterre

Détection et sécurisation



Les affaissements et effondrements

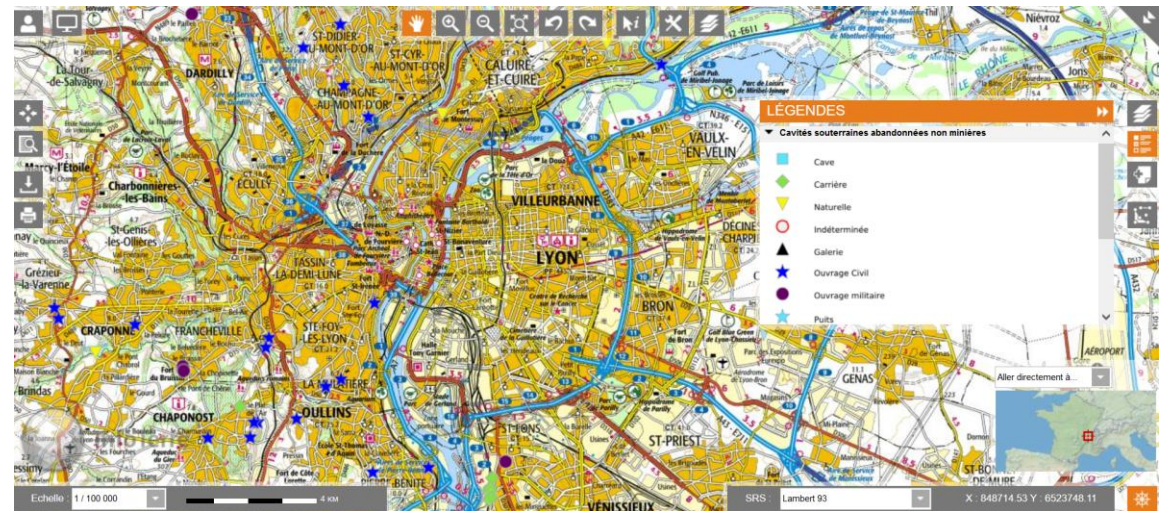
Détection

Recherche sur les cartes

Histoire du site

Méthodes géophysiques

Forages



Les affaissements et effondrements

Détection

Recherche sur les cartes

Histoire du site

Méthodes géophysiques

Forages

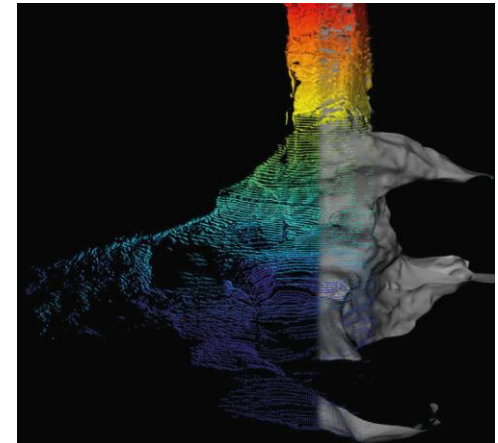


Les affaissements et effondrements

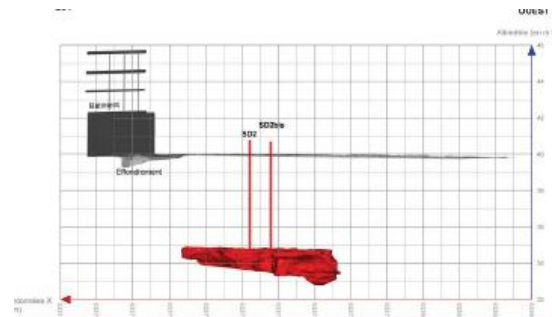
Camera



Sonar



Scan 3D



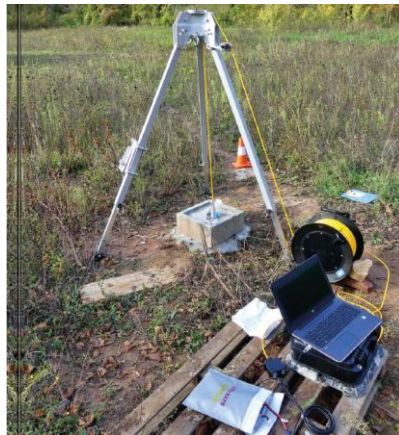
Détection

Recherche sur les cartes

Histoire du site

Méthodes géophysiques

Forages



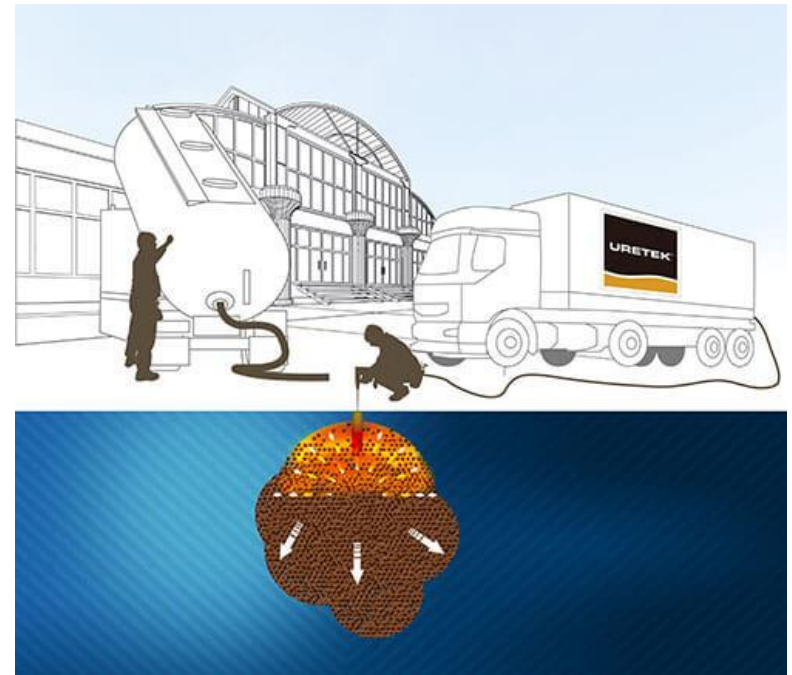
Les affaissements et effondrements

Sécurisation

Injection

Fondations profondes

Renforcement géosynthétique



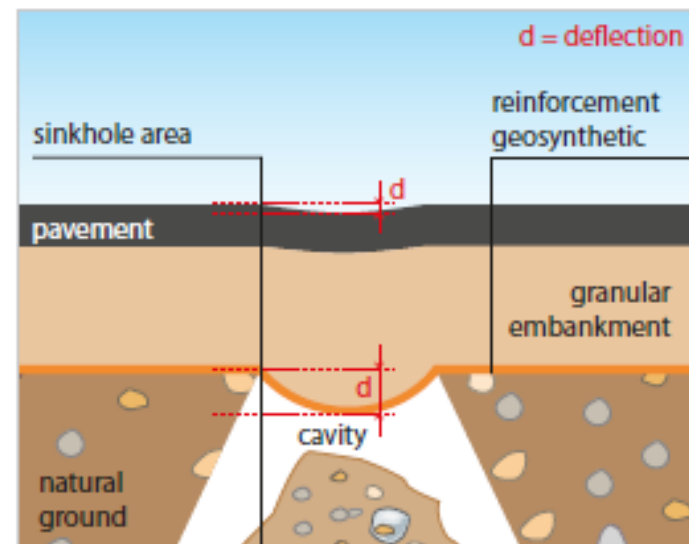
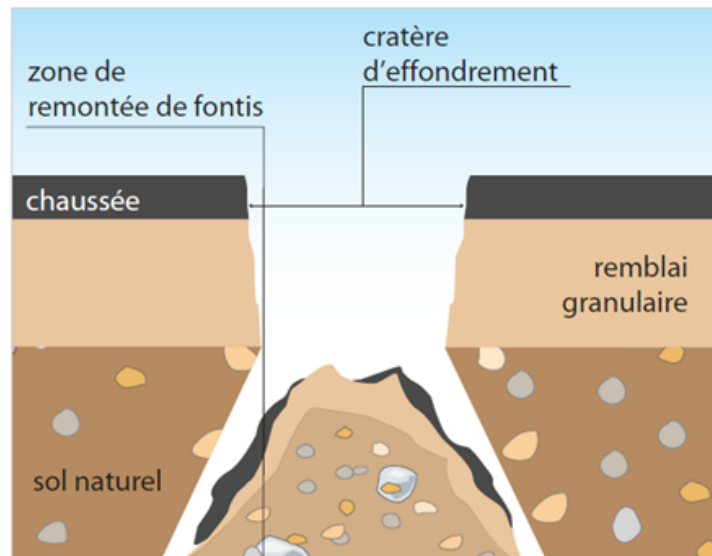
Les affaissements et effondrements

Sécurisation

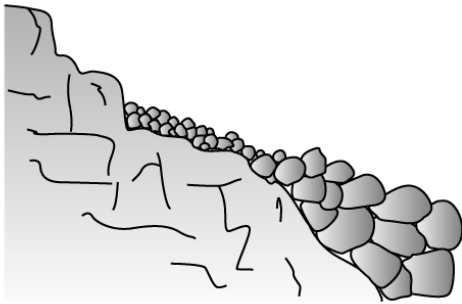
Injection

Fondations profondes

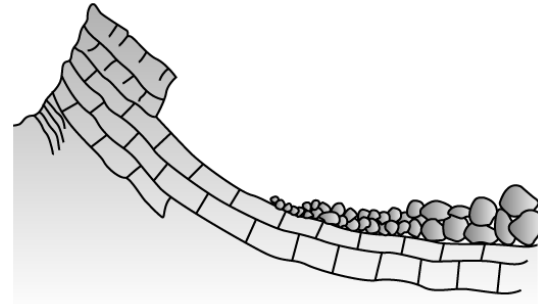
Renforcement géosynthétique



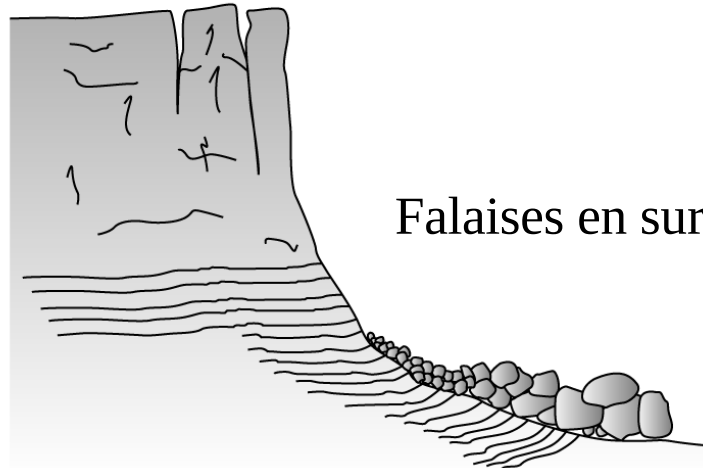
Les écroulements



Dislocation d'une masse
rocheuse fissurée



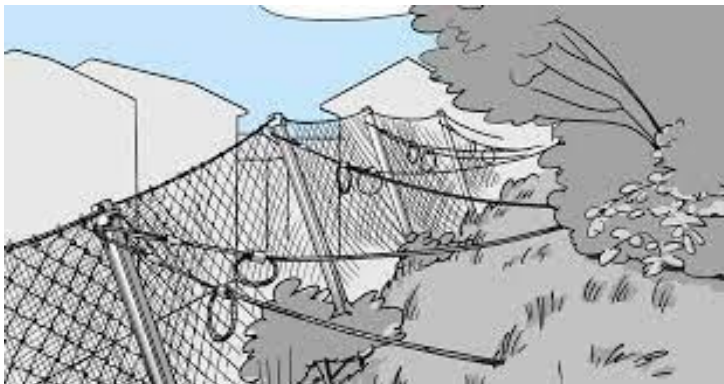
Rupture banc sur banc



Falaises en surplomb

Les écoulements

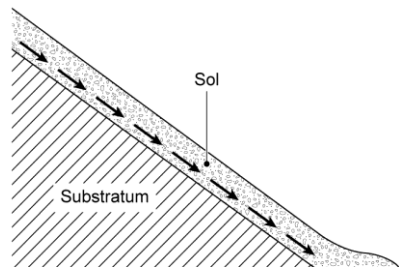
Sécuriser contre les chutes de blocs



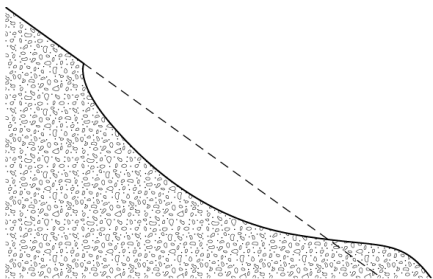
Anticiper le risque



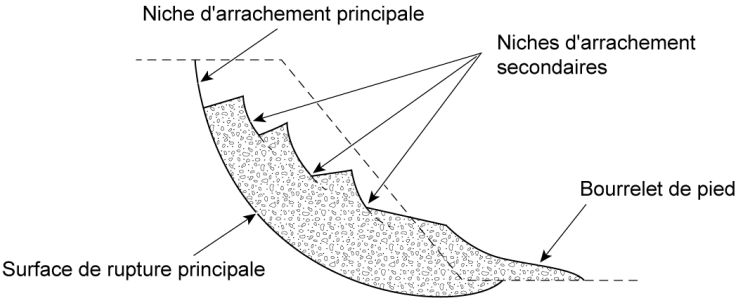
Les glissements



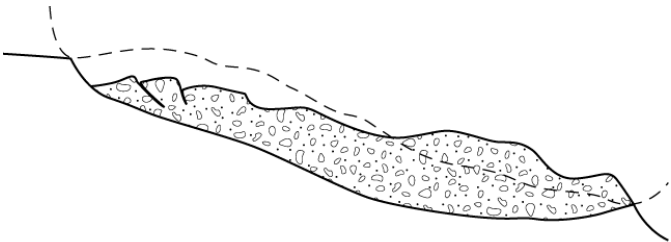
Glissement plan



Glissement rotationnel simple



Glissement rotationnel complexe



Glissement sur une surface quelconque

Les glissements rotationnels

Talus en remblai



Les glissements rotationnels

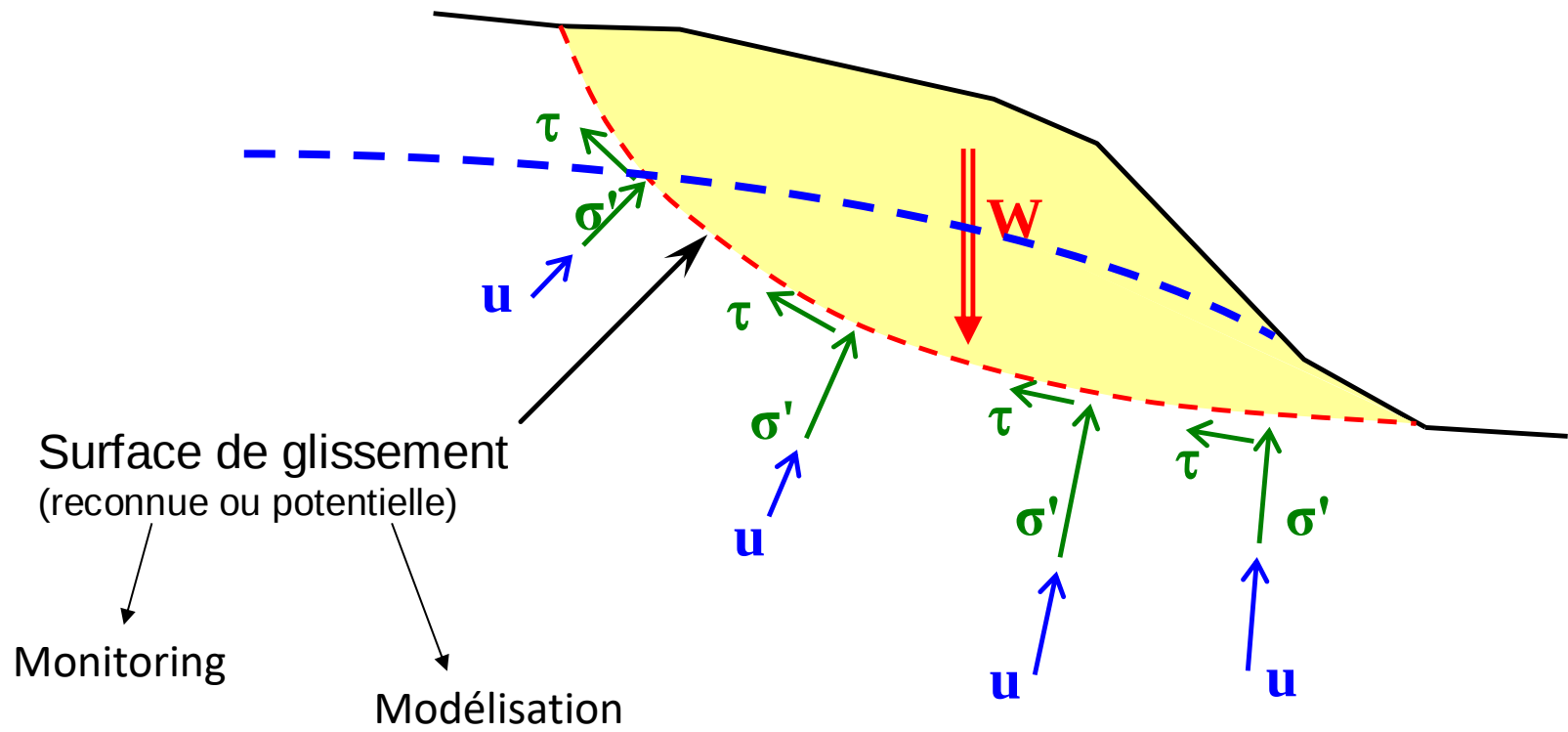
Talus en déblai



Les glissements plans

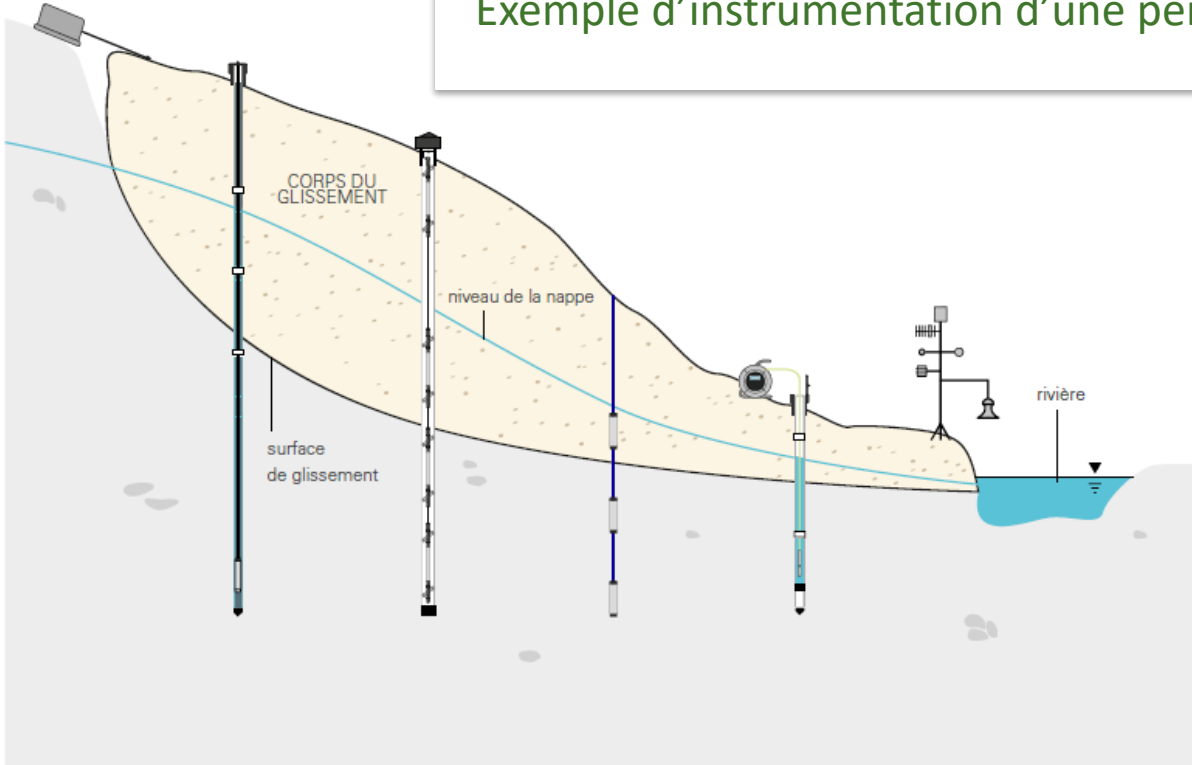


Les glissements



Les glissements

Exemple d'instrumentation d'une pente

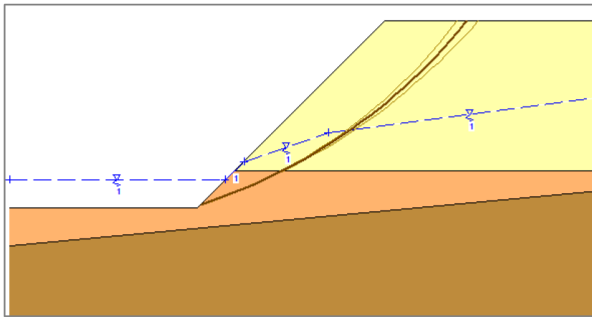


INSTRUMENT	OBJECTIF
 Fissuromètre à fil	Surveillance de fissures ou du déplacement en surface
 Capteur de pression relative	Mesure du niveau d'eau dans un tube piézométrique
 Inclinomètres fixes MEMS numériques	Surveillance des mouvements latéraux en profondeur des zones à risque
 Tube piézométrique (tube à fentes)	Mesure du niveau de la nappe avec indicateur de niveau ou capteur de pression
 Piézomètre Casagrande (tube isolé)	Mesure du niveau de la nappe ou de la pression interstitielle (indicateur ou capteur)
 Station météorologique	Suivi des paramètres météorologiques : précipitations, vent, température, etc...
 Indicateur de niveau d'eau	Mesure du niveau de la nappe dans les tubes piézométriques ou tubes Casagrande

Calcul et Modélisation

Equilibre limite ultime

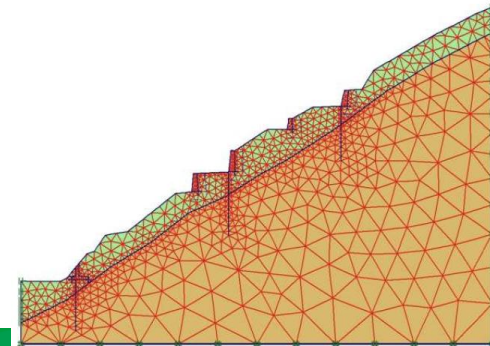
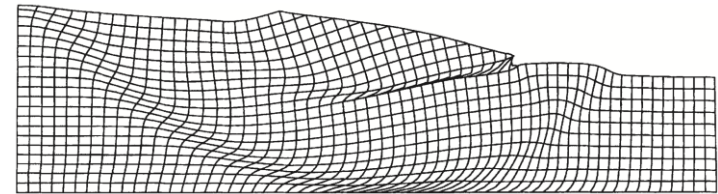
Définition d'un facteur de sécurité
Mouvement du sol supposé
« rigide-plastique »
Hypothèse sur la surface de rupture
Critère de Mohr Coulomb utilisé sur
cette surface (Talren – Geoslope)



$$\tau_{\text{calc}} < \tau_{\text{max}}$$

Codes éléments finis

Description du comportement $\sigma \varepsilon$
Descriptions de géométries complexes
Déformation du sol possible
FEM (Plaxis) FDM (Flac)



Mouvements de terrains

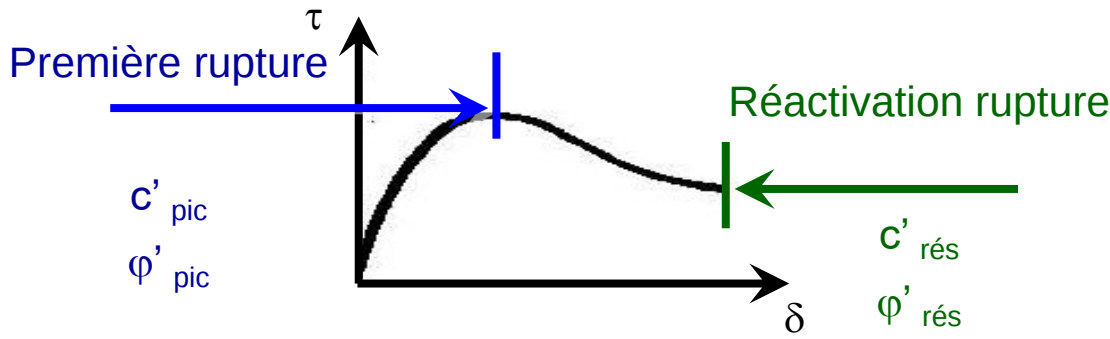
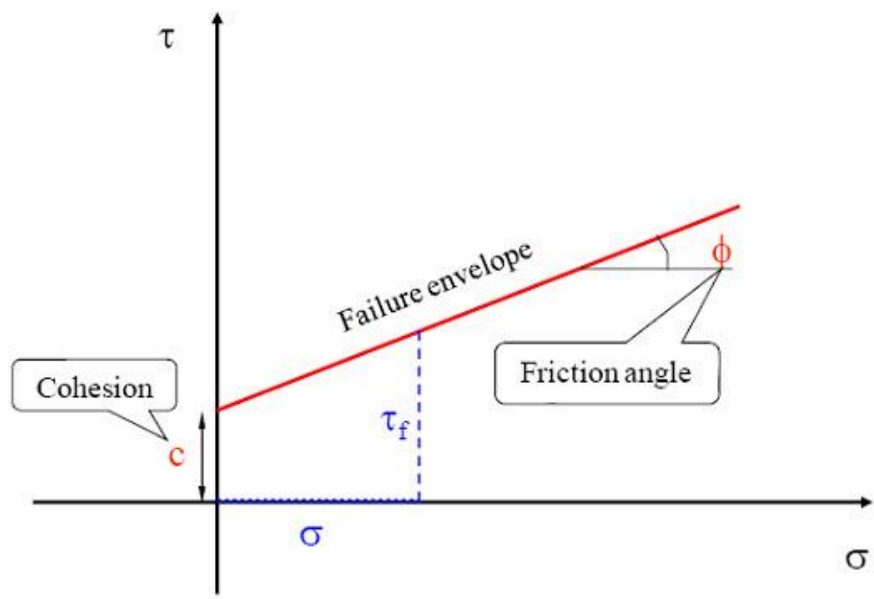
2. Calcul des surfaces de rupture

Equilibre limite ultime

Définition du critère de rupture (Coulomb)

$$\tau_{\max} = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$$

$$\tau_{\max} = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi'$$





Equilibre limite ultime

1. Coefficient de sécurité global

$$F = \frac{\tau_{\max}}{\tau} = \frac{\sigma' \times \tan \varphi' + c'}{\tau}$$

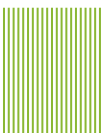
$$\tau = \frac{\sigma' \times \tan \varphi'}{F} + \frac{c'}{F}$$

Cette définition conduit à étudier l'équilibre limite du sol avec des caractéristiques réduites :

$$\frac{\tan \varphi'}{F} \quad \text{et} \quad \frac{c'}{F}$$

1,5 pour les nouveaux ouvrages permanents

1,3 pour les ouvrages provisoires.



Equilibre limite ultime

Approche 3 de l'EC7

2. Coefficients de sécurité partiels

A2 + M2 + R3	
<i>Facteurs partiels A2 pour les actions γ_F ou effets des actions γ_E</i>	
Action permanente défavorable γ_G	1,0
Action permanente favorable γ_G	1,0
Action variable défavorable γ_Q	1,3
Action variable favorable γ_Q	0
<i>Facteurs partiels M2 pour les paramètres de sol γ_M</i>	
Tangente de l'angle de frottement interne ϕ' (γ_ϕ)	1,25
Cohésion effective c' ($\gamma_{c'}$)	1,25
Cohésion non drainée c_u (γ_{cu})	1,4
Poids volumique γ (γ_γ)	1,0
<i>Facteurs partiels R3 de la résistance (γ_R) pour les pentes</i>	
Facteur partiel de la résistance $\gamma_{R,e}$	1,0

Approche 2 de l'EC7

A1 + M1 + R2	
<i>Facteurs partiels A1 pour les actions γ_F ou effets des actions γ_E</i>	
Action permanente défavorable γ_G	1,35
Action permanente favorable γ_G	1,0
Action variable défavorable γ_Q	1,5
Action variable favorable γ_Q	0
<i>Facteurs partiels M1 pour les paramètres de sol γ_M</i>	
Tangente de l'angle de frottement interne ϕ' (γ_ϕ)	1,0
Cohésion effective c' ($\gamma_{c'}$)	1,0
Cohésion non drainée c_u (γ_{cu})	1,0
Poids volumique γ (γ_γ)	1,0
<i>Facteurs partiels R2 de la résistance (γ_R) pour les pentes</i>	
Facteur partiel de la résistance $\gamma_{R,e}$	1,1

Equilibre limite ultime

Cas des glissements plans

Calcul du gradient

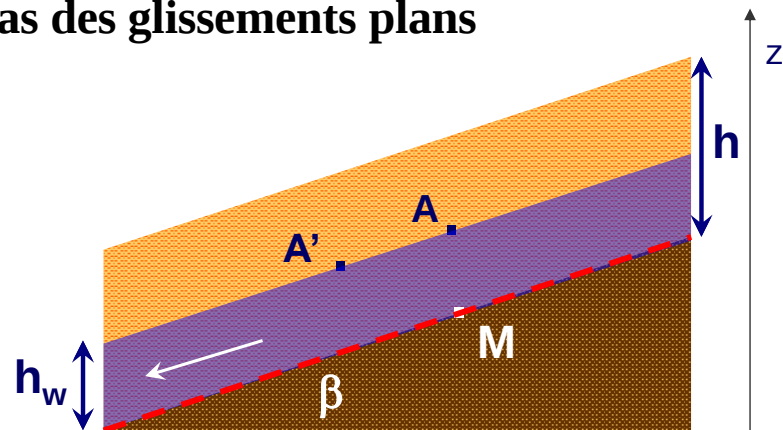
$$i = (h_{A'} - h_A) / A'A$$

$$h_{A'} = u_{A'} / \gamma_w + z_{A'}$$

$$h_A = u_A / \gamma_w + z_A$$

$$i = (z_{A'} - z_A) / A'A$$

$$i = \sin \beta$$



Equilibre limite ultime

Cas des glissements plans

Calcul de la pression interstitielle en M

(équipotentielle MP)

$$h_M = h_P$$

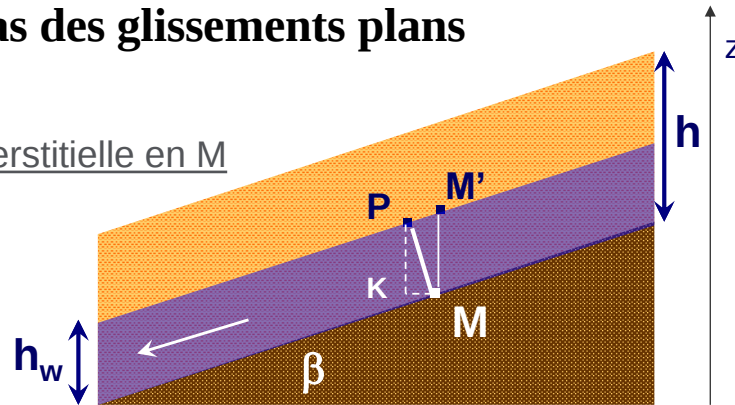
$$h_M = u_M / \gamma_w + z_M$$

$$h_P = u_P / \gamma_w + z_P$$

$$u_M = (z_P - z_M) / \gamma_w$$

$$(z_P - z_M) = KP = PM \cos \beta = MM' \cos^2 \beta$$

$$u_M = h_w \cos^2 \beta \gamma_w$$



Equilibre limite ultime

Cas des glissements plans

Equilibre du sol

$$W = L \cos\beta \times$$

$$[h_w \gamma_2 + (h - h_w) \gamma_1]$$

$$W_N = W \cos\beta$$

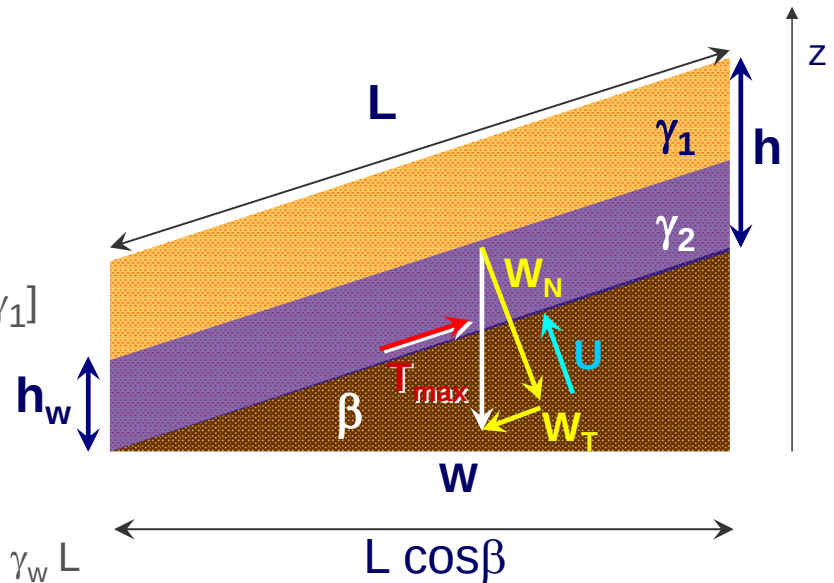
$$W_T = W \sin\beta$$

$$U = h_w \cos^2\beta \gamma_w L$$

$$W'_N = W \cos\beta - h_w \cos^2\beta \gamma_w L$$

$$T_{\max} = W'_N \tan\phi' + c' L$$

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



Equilibre limite ultime

Cas des glissements plans

Equilibre du sol

$$W = L \cos\beta \times$$

$$[h_w \gamma_2 + (h - h_w) \gamma_1]$$

$$W_N = W \cos\beta$$

$$W_T = W \sin\beta$$

$$U = h_w \cos^2\beta \gamma_w L$$

$$W'_N = W \cos\beta - h_w \cos^2\beta \gamma_w L$$

$$T_{\max} = W'_N \operatorname{tg}\varphi' + c' L$$

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

Contraintes

$$\sigma = \cos^2\beta \times [h_w \gamma_2 + (h - h_w) \gamma_1]$$

$$\tau = \cos\beta \sin\beta \times [h_w \gamma_2 + (h - h_w) \gamma_1]$$

$$u = h_w \cos^2\beta \gamma_w$$

$$\sigma' = \cos^2\beta \times [h_w \gamma_2 + (h - h_w) \gamma_1 - h_w \gamma_w]$$

$$\tau_{\max} = (\sigma - u) \operatorname{tg}\varphi' + c'$$

$$F = \tau_{\max} / \tau$$

$$F = \frac{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w (\gamma_2 - \gamma_w)] \operatorname{tg}\varphi'}{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w \gamma_2] \operatorname{tg}\beta} + \frac{c'}{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w \gamma_2] \sin\beta \cos\beta}$$

Equilibre limite ultime

Cas des glissements plans

Sol frottant non cohérent & sans nappe

$$h_w = 0 \quad \text{et} \quad c' = 0$$

$$F = \frac{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w (\gamma_2 - \gamma_w)] \operatorname{tg} \varphi'}{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w \gamma_2] \operatorname{tg} \beta} + \frac{c'}{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w \gamma_2] \sin \beta \cos \beta}$$

$$F = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \beta}$$

Rupture talus = angle de frottement naturel
Indépendant de la hauteur h

Equilibre limite ultime

Cas des glissements plans

Sol frottant non cohérent & nappe affleurante

$$h_w = h \quad \text{et} \quad c' = 0$$

$$F = \frac{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w (\gamma_2 - \gamma_w)] \operatorname{tg} \varphi'}{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w \gamma_2] \operatorname{tg} \beta} + \frac{c'}{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w \gamma_2] \sin \beta \cos \beta}$$

$$F = \frac{(\gamma_2 - \gamma_w) \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma_2 \operatorname{tg} \beta} \quad \text{Indépendant de la hauteur } h$$

Equilibre limite ultime

Cas des glissements plans

Sol frottant cohérent & sans nappe

$$h_w = 0$$

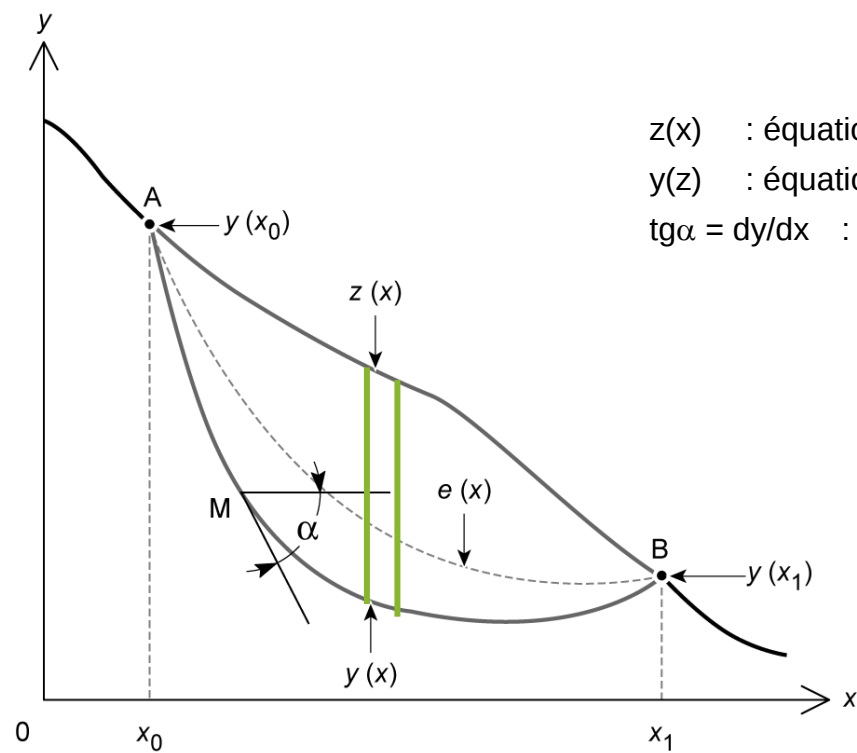
$$F = \frac{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w (\gamma_2 - \gamma_w)] \operatorname{tg} \varphi' + c'}{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w \gamma_2] \operatorname{tg} \beta} + \frac{c'}{[(h - h_w) \gamma_1 + h_w \gamma_2] \sin \beta \cos \beta}$$

$$F = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{c'}{h \gamma_1 \sin \beta \cos \beta}$$

Dépendant de la hauteur h

Equilibre limite ultime

Cas des glissements circulaires



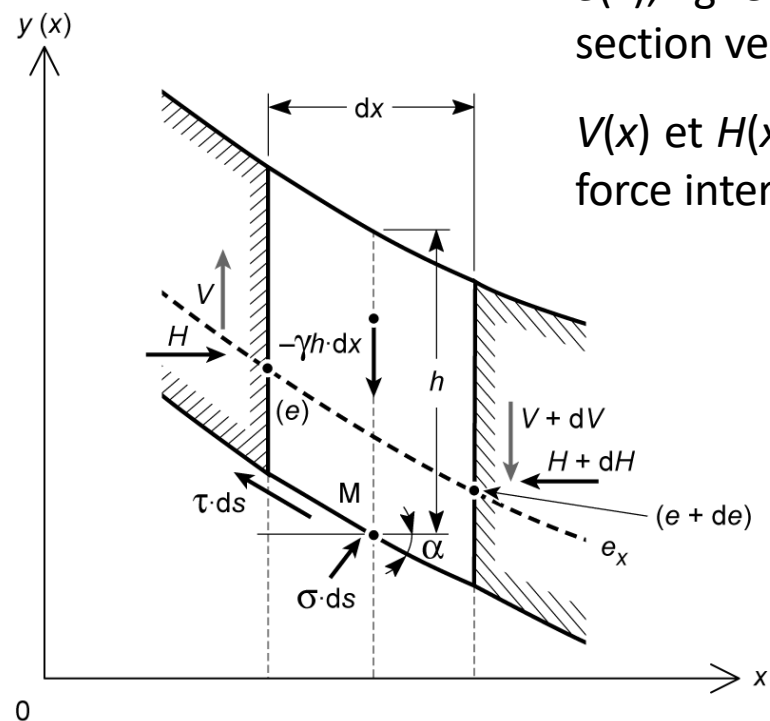
$z(x)$: équation de la surface du talus
 $y(z)$: équation de la surface de glissement
 $\tan \alpha = dy/dx$: tangente de la surface de glissement

Découpe du massif au dessus de la surface en n tranches verticales

Equilibre limite ultime

Cas des glissements circulaires

$e(x)$, ligne d'action de la force interne qui s'exerce sur une section verticale ;
 $V(x)$ et $H(x)$, les composantes verticale et horizontale de la force interne.

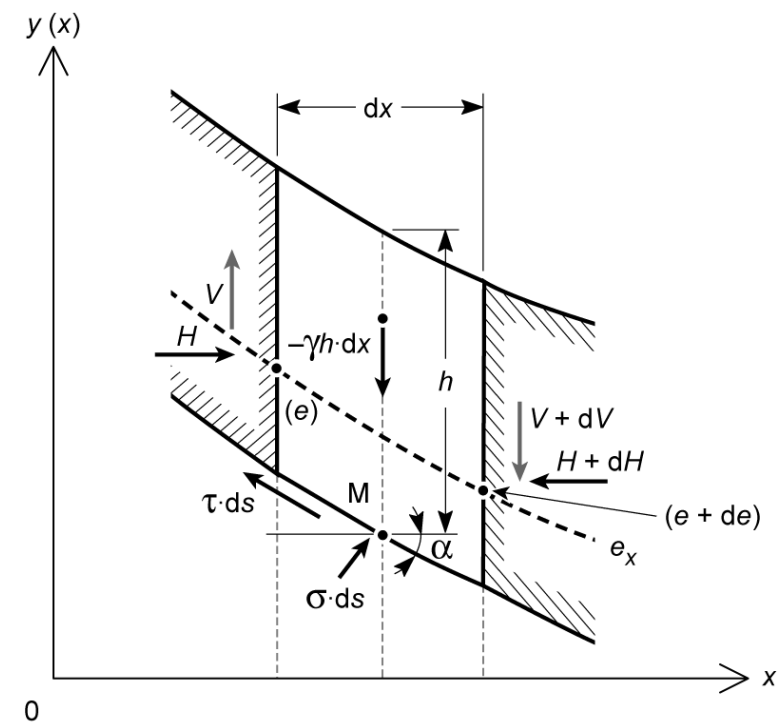


Chaque tranche est en équilibre sous l'action des forces extérieures qui lui sont appliquées :

- forces volumiques (poids volumique, eau...) ;
- forces surfaciques (réactions entre tranches, réactions à la base de la partie stable sur la partie qui glisse).

Equilibre limite ultime

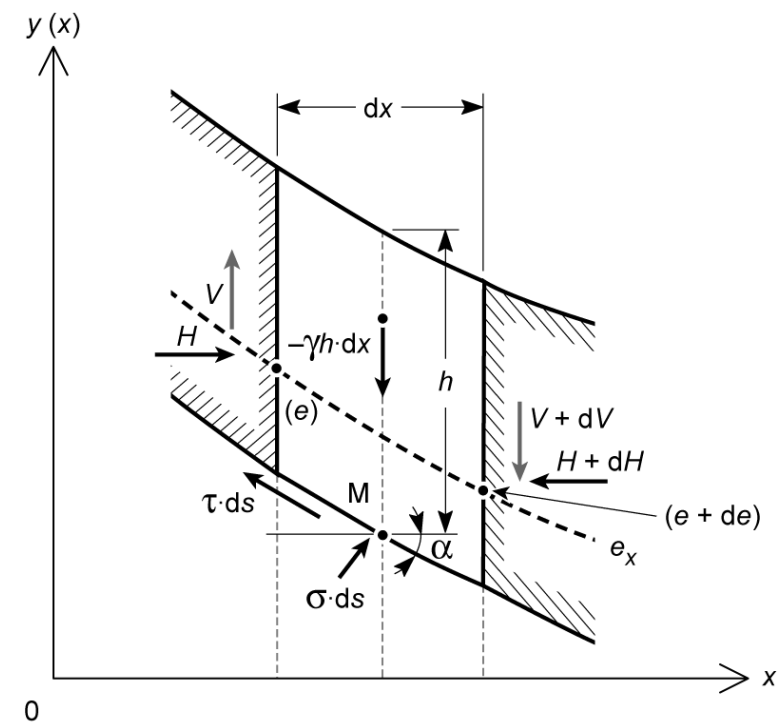
Cas des glissements circulaires



Inconnues:	
Efforts inter tranches	$2 (n - 1)$
Ligne d'application	
efforts inter tranches	$(n-1)$
σ glissement	n
τ glissement	n
Coefficient de sécurité	1
Total	$5 n - 2$

Equilibre limite ultime

Cas des glissements circulaires



Inconnues:	5 n - 2
Equations	
Équilibre forces	2 n
Équilibre moments	n
Loi rhéologique	n
Total	4 n

Il manque (n - 2) équations

Equilibre limite ultime

Cas des glissements circulaires

Hypothèses nécessaires à la résolution du problème

L'hypothèse complémentaire peut porter soit :

- sur une répartition des forces internes (**Fellenius, Bishop**, Morgenstern et Price...) ;
- sur la position de la ligne d'action e (Janbu...) ;
- sur la répartition de la contrainte normale (Raulin *et al.*, 1974)
généralement appelée méthode des perturbations.

Equilibre limite ultime

Méthode de Fellenius

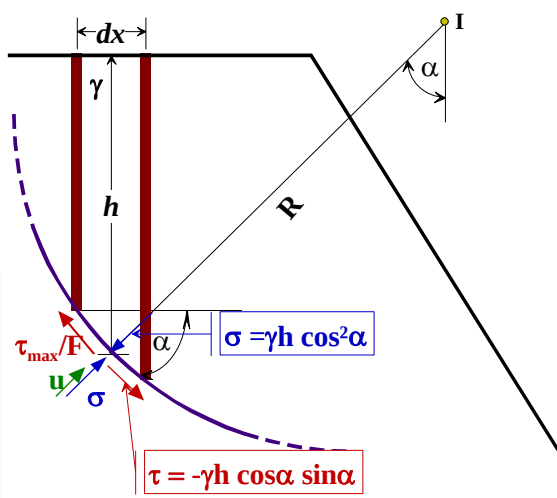
- surface circulaire
- sol homogène
- forces inter-tranches nulles
- équation d'équilibre parallèle glissement non respectée

Inconnues

$F(1), \sigma(n), \tau(n)$

$2n + 1$

Cas des glissements circulaires



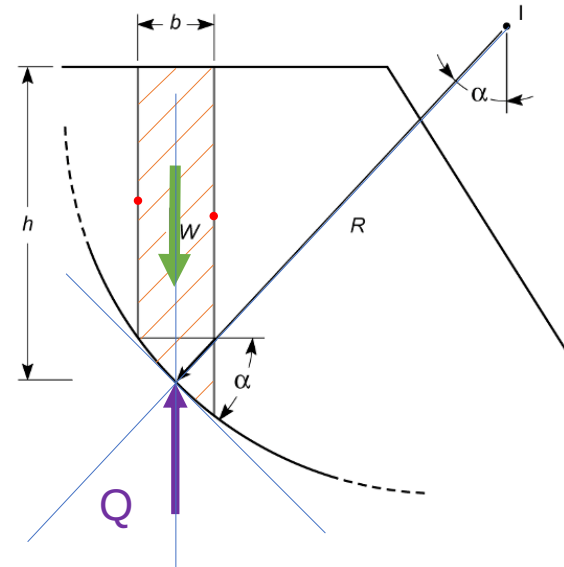
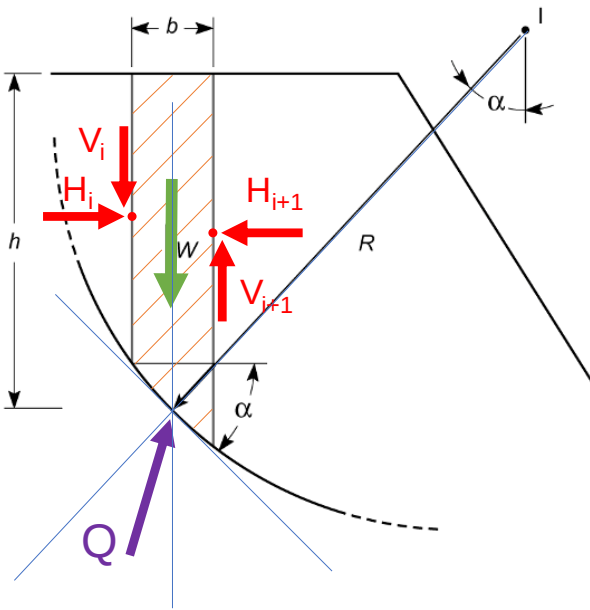
Équations

- Équilibre perpen surface (n),
- Moment global (1)
- Loi rhéologique (n)

$2n + 1$

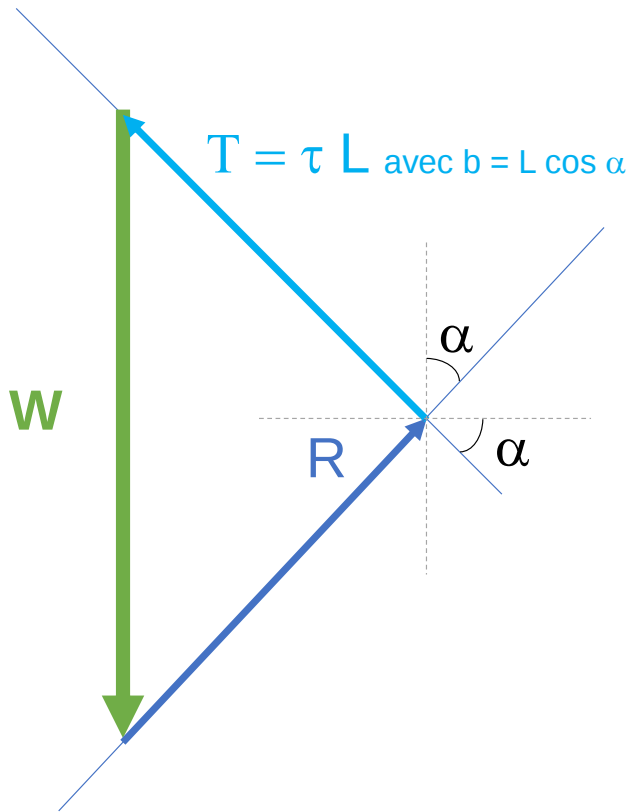
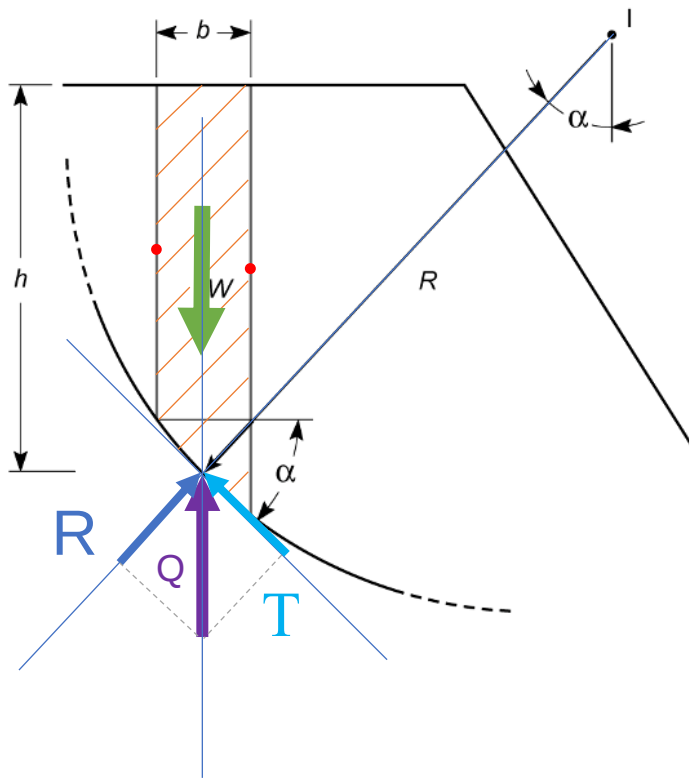
Equilibre limite ultime

Cas des glissements circulaires



Equilibre limite ultime

Cas des glissements circulaires



Equilibre limite ultime

Cas des glissements circulaires

Méthode de Fellenius

Pour une tranche

$$\sigma = \gamma h \cos^2 \alpha$$

$$\tau = - \gamma h \cos \alpha \sin \alpha$$

Avec $\tau_{\max} = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi' + c'$


$$\frac{(\gamma h \cos^2 \alpha - u) \operatorname{tg} \varphi' + c'}{F} = - \gamma h \cos \alpha \sin \alpha$$

Équation du moment global


$$\frac{\sum_1^n [(\gamma_i h_i \cos^2 \alpha_i - u_i) \operatorname{tg} \varphi_i' + c_i'] ds_i}{F} \times R = \sum_1^n [- \gamma_i h_i \cos \alpha_i \sin \alpha_i ds_i] \times R$$

Avec $W_i = \gamma_i h_i dx_i$ et $dx_i = ds_i \cos \alpha_i$

$$F = \frac{\sum_1^n [W_i \cos \alpha_i - (u_i b_i / \cos \alpha_i)] \operatorname{tg} \varphi_i' + c' b_i / \cos \alpha_i}{\sum_1^n W_i \sin \alpha_i}$$

Équilibre limite ultime

Cas des glissements circulaires

Méthode de Fellenius pour le calcul à court terme

Équation du moment global

- en contraintes totales
- Avec les caractéristiques à court terme (c_u)

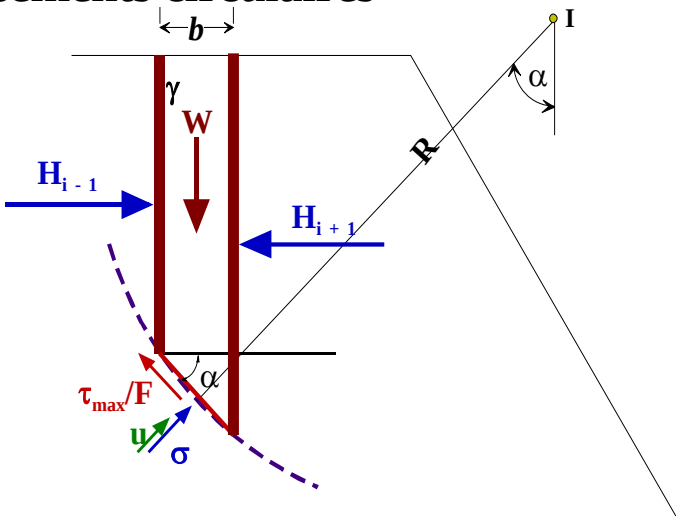
$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \left[c_{u_i} \frac{b_i}{\cos \alpha_i} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[W_i \sin \alpha_i \right]}$$

Equilibre limite ultime

Cas des glissements circulaires

Méthode de Bishop simplifiée

- surface circulaire
- sol homogène
- forces inter-tranches horizontales
- $F_s \text{ (local)} = F_s \text{ (Global)}$



Inconnues

$F(1), s(n), t(n)$
forces inter-tranches $(n - 1)$

$3 n$

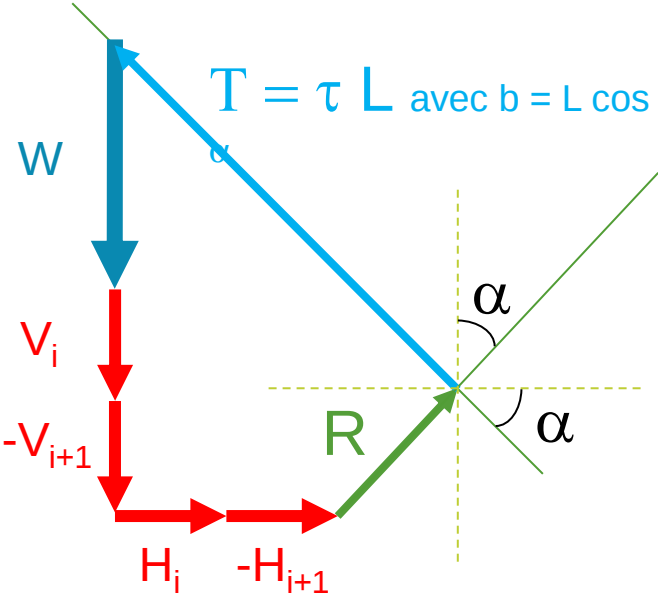
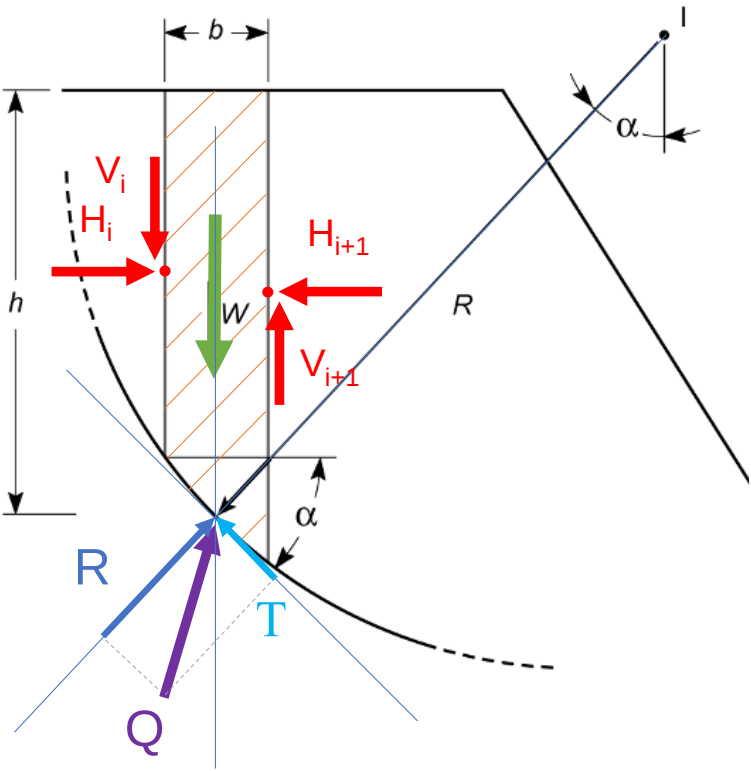
Équations

Équilibre horizontal (n) , moment global (1) , loi rhéologique (n) ,
forces inter-tranche horiz. $(n - 1)$

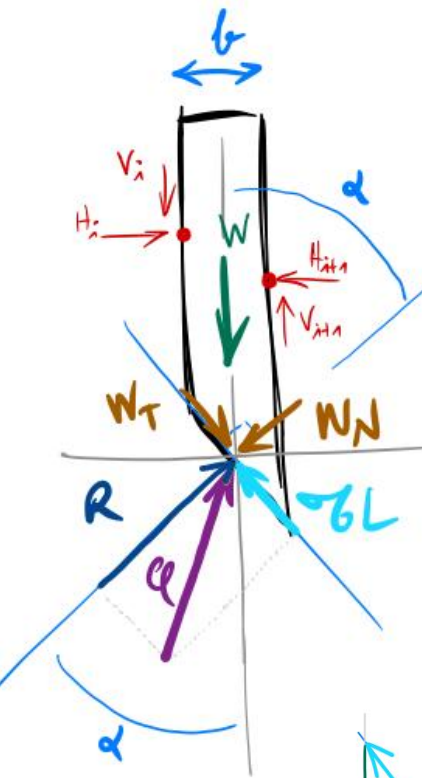
$3 n$

Equilibre limite ultime

Cas des glissements circulaires



Forces inter-tranches horizontales



For a slice

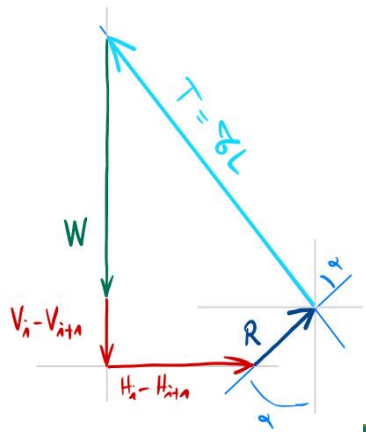
$$F_s = \frac{\sigma_{max}}{\tau} \text{ eq(1)}$$

Thus $\tau = \frac{\sigma_{max}}{F_s}$

Vertical projection

$$W + V_i - V_{i+1} = R \cos \alpha + T \sin \alpha$$

where
$$\begin{cases} R = \sigma L = (\sigma' + u)L \\ T = \frac{\sigma_{max} L}{F_s} = \frac{(\sigma' \tan \phi + c') L}{F_s} \end{cases}$$



BISHOP postulates: $V_i - V_{i+1} = 0$ Thus

$$W = (R' + uL) \cos \alpha + \frac{(\sigma' \tan \phi + c') L}{F_s} \sin \alpha$$

which leads to

$$R' = \frac{W - \frac{c' L}{F_s} \sin \alpha - uL \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{F_s} \tan \phi} \text{ eq(2)}$$

R' is a function of F_s

Forces inter-tranches horizontales

$$F_s \text{ (local)} = F_s \text{ (Global)}$$

$$F_s = \underbrace{\frac{\tau_{\max}}{\tau}}_{\text{local definition}} = \underbrace{\frac{R \sum_{i=1}^n T_{\max}^i}{R \sum_{i=1}^n W_T^i}}_{\text{global definition}}$$

$$F_s = f(F_s)$$

where

$$\left\{ \begin{aligned} T_{\max}^i &= R_i' \tan \phi_i + c_i' L_i \\ W_T^i &= \frac{c_i' L_i \sin \alpha_i - u_i L_i \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \tan \phi_i}{F_s}} \quad \text{eq(2)} \\ W_T^i &= W^i \sin \alpha_i \end{aligned} \right.$$

Equilibre limite ultime

Cas des glissements circulaires

Méthode de Bishop simplifiée

On exprime le coefficient de sécurité F_n comme le rapport du moment stabilisateur sur le moment déstabilisateur :

$$F_n = \frac{\sum_1^n \frac{[(W_i - (u_i \times b_i) \tan \varphi'_i)] + (c'_i \times b_i)}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \frac{\tan \varphi'_i}{F_{n-1}}}}{\sum_1^n W_i \times \sin \alpha_i}$$

On a donc avec la méthode de Bishop simplifiée un coefficient de sécurité implicite.

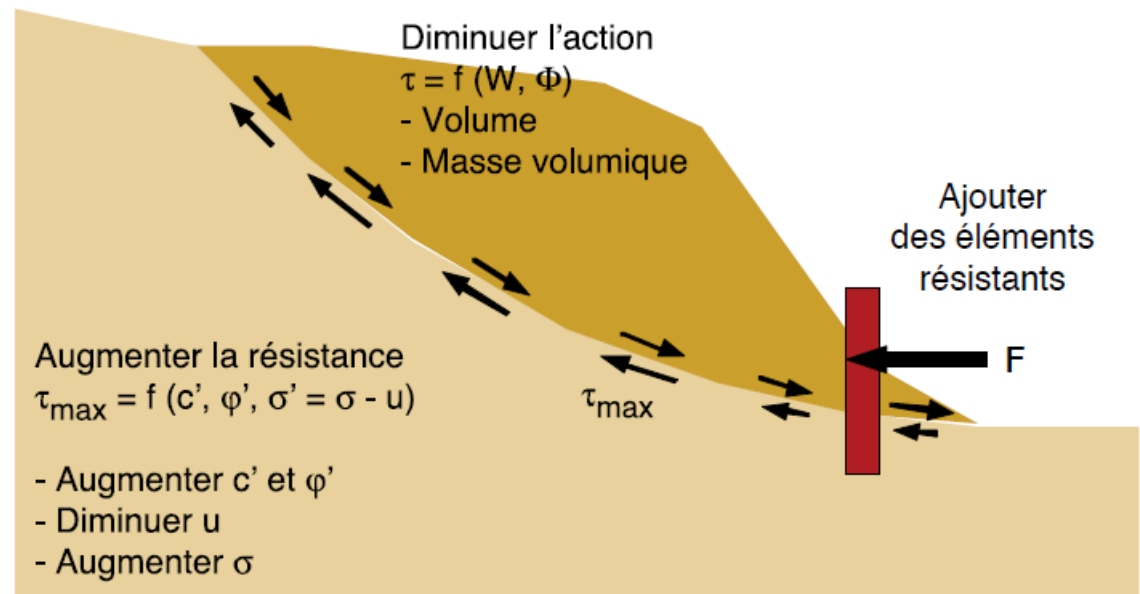
On fixe la valeur initiale du coefficient F_0 , qui peut être obtenue, par exemple, par la méthode de Fellenius ; on opère ensuite par itérations successives jusqu'à la précision désirée : $\frac{F_n - F_{n-1}}{F_{n-1}}$

Mouvements de terrains

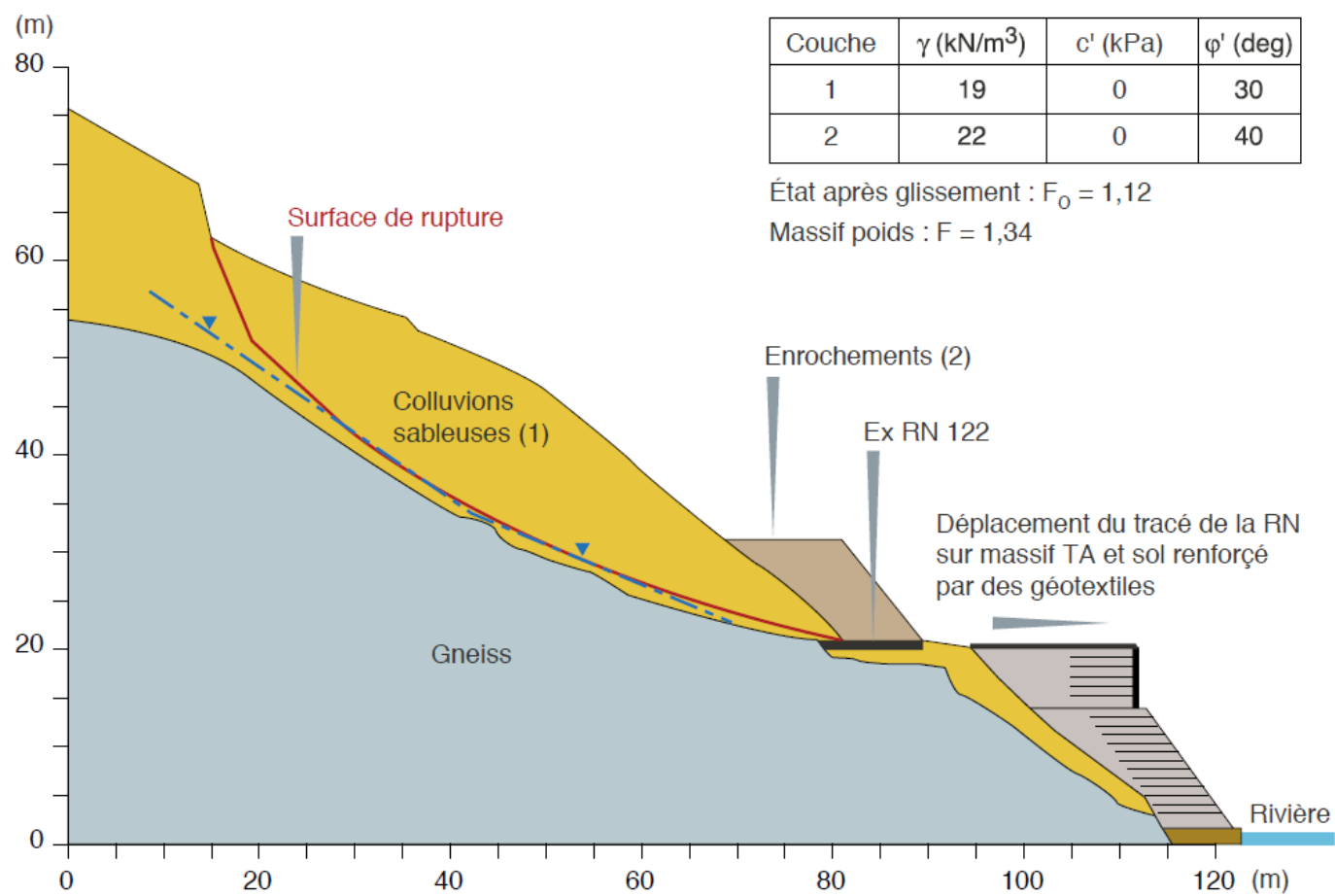
3. Confortement

Magan JP & Rieffsteck Ph (2010) Prévention et stabilisation des glissements de terrain : Conception, mise en œuvre et maintenance des dispositifs : Guide technique

1. Terrassement
2. Drainage
3. Renforcement

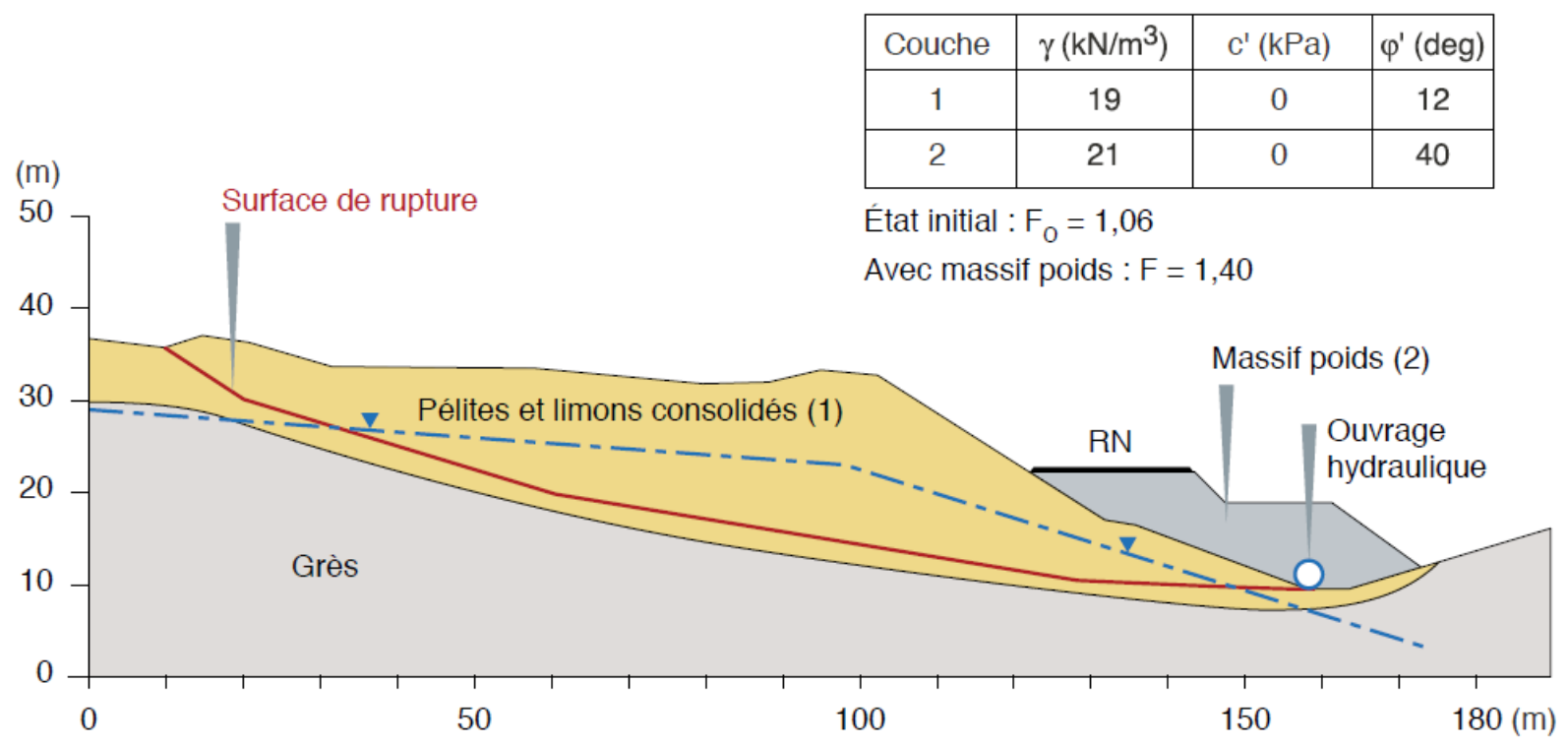


1. Terrassement – Chargement de pied et butée de pied



. RN 122 - Instabilité de Ferrières : solution adoptée

1. Terrassement – Chargement de pied et butée de pied



RN 121 à Lanteuil : solution adoptée en deux points.

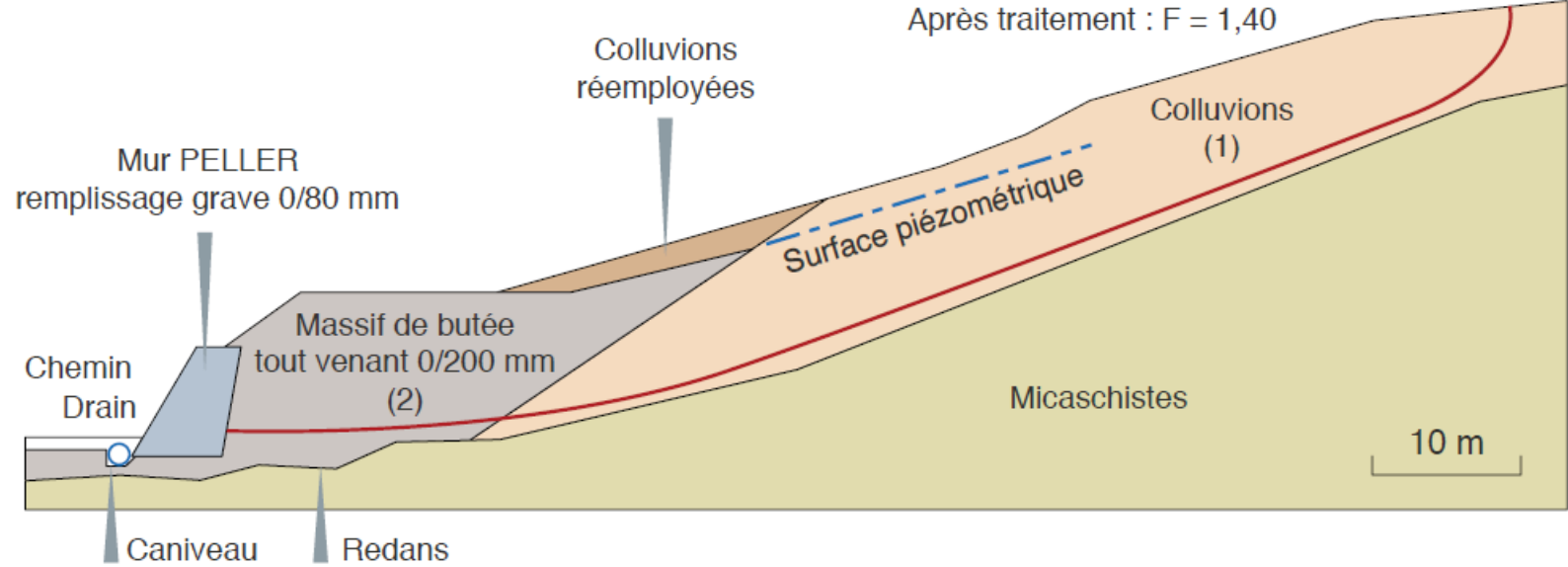
1. Terrassement – Soutènement souple

gabions,
sol renforcé par des GSY
sol renforcé par des grilles métalliques,
murs cellulaires souples ou rigidifiés

Couche	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (deg)
1	21	0	20
2	20	0	35

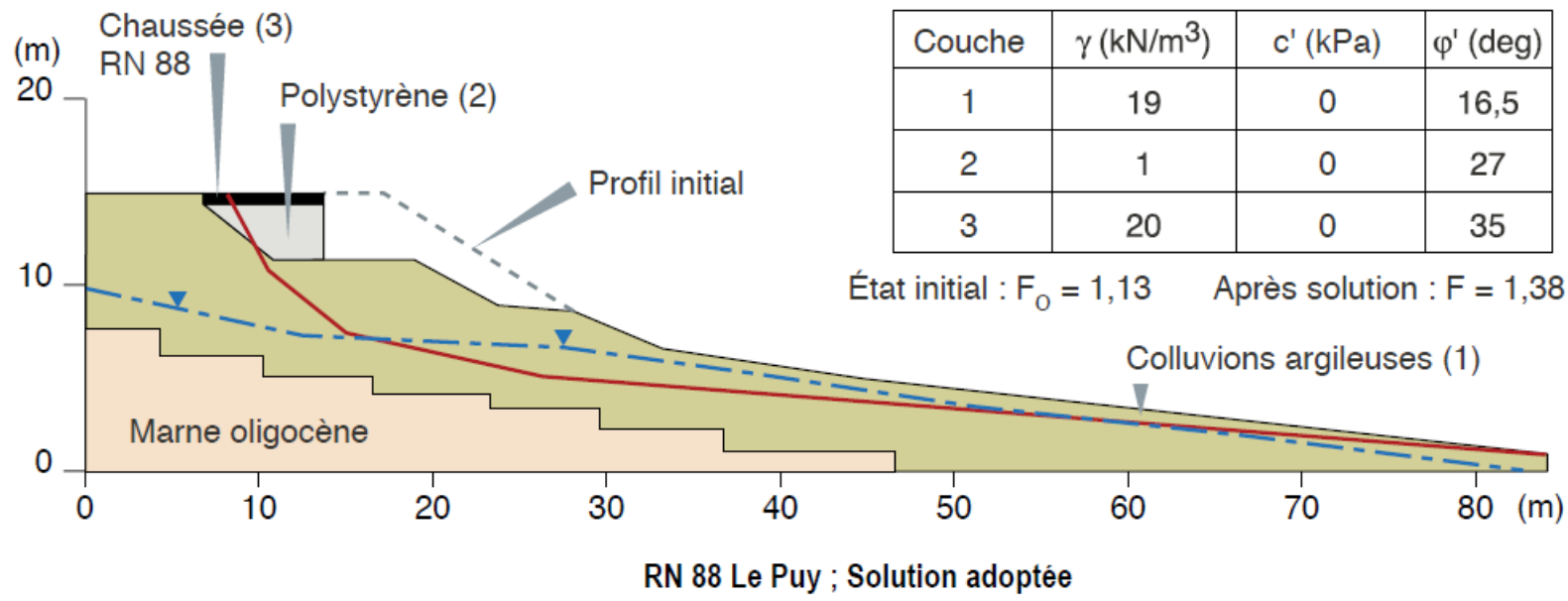
État initial : $F = 1,12$

Après traitement : $F = 1,40$

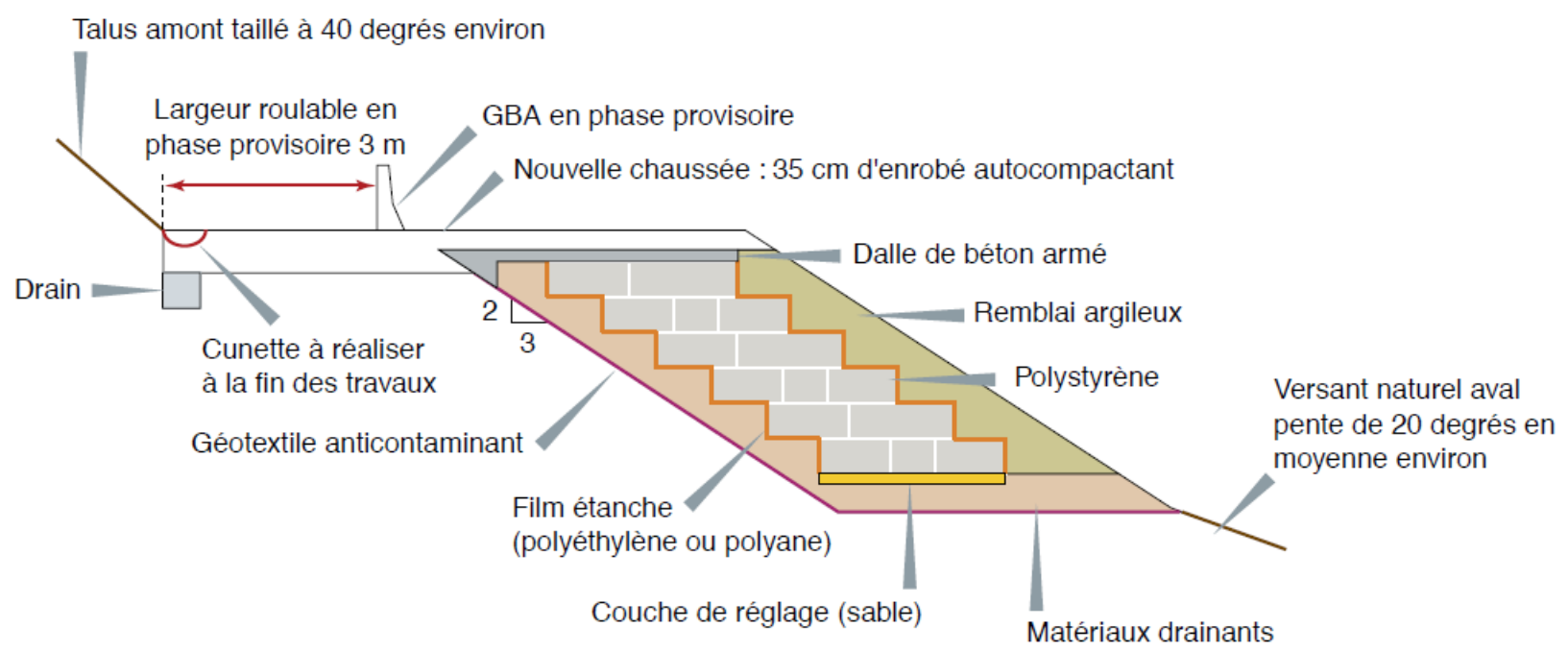


Autoroute A72, lieu-dit La Fouillouse.
Solution associant butée de pied et soutènement souple.

1. Terrassement – Déchargement en tête

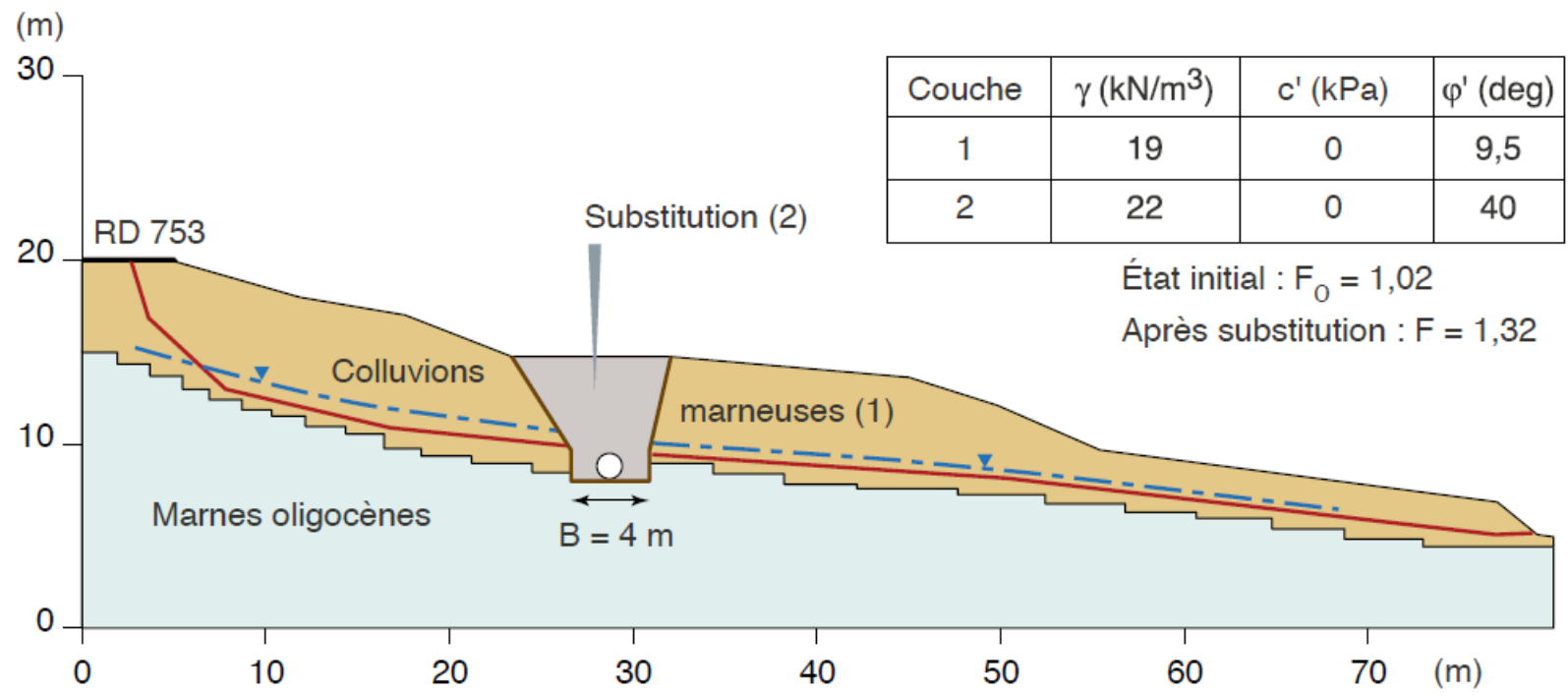


1. Terrassement – Déchargement en tête



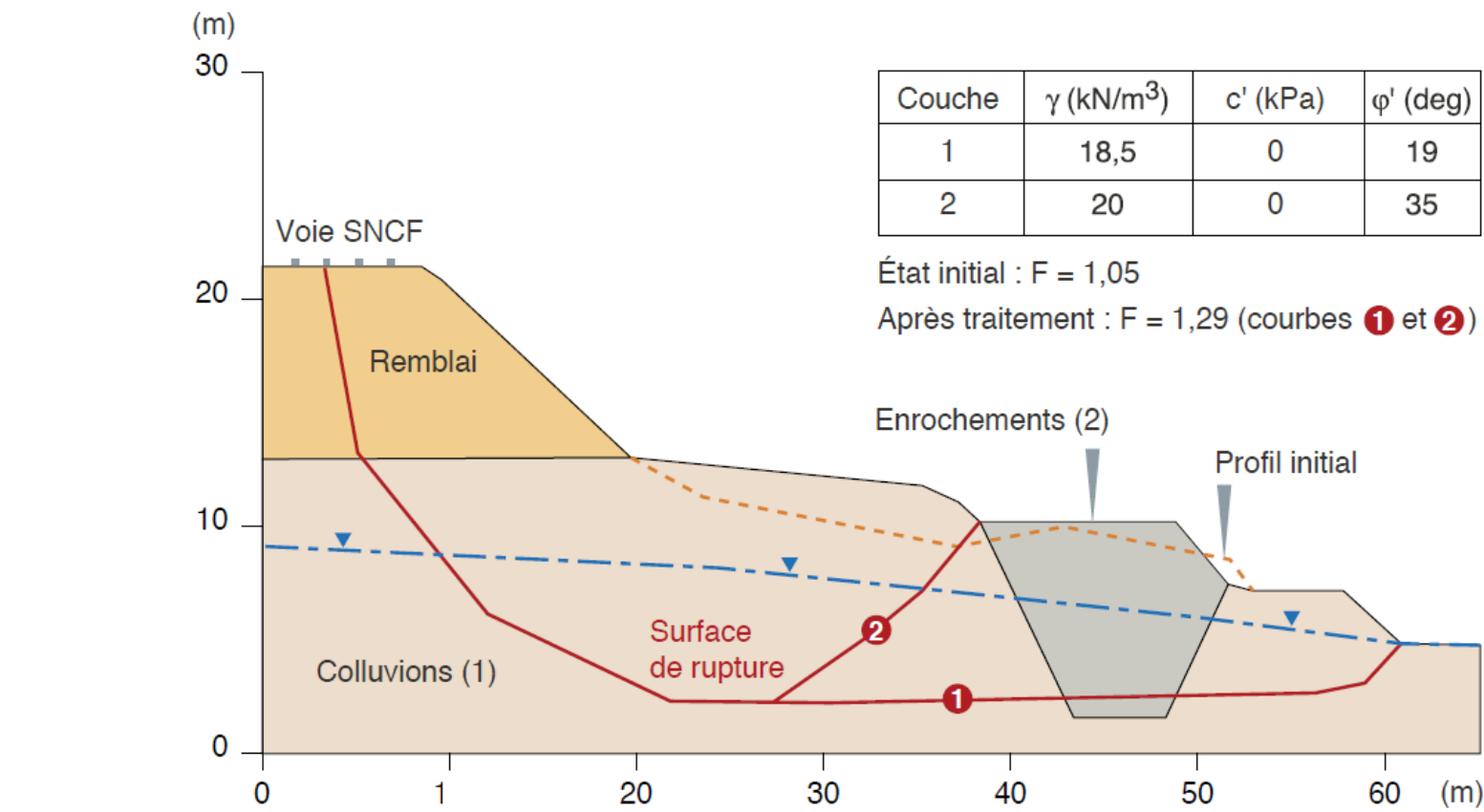
. RN 6 col du Mont-Cenis.
Confortement par allègement en tête du glissement du Molin.

1. Terrassement – Substitution et masque



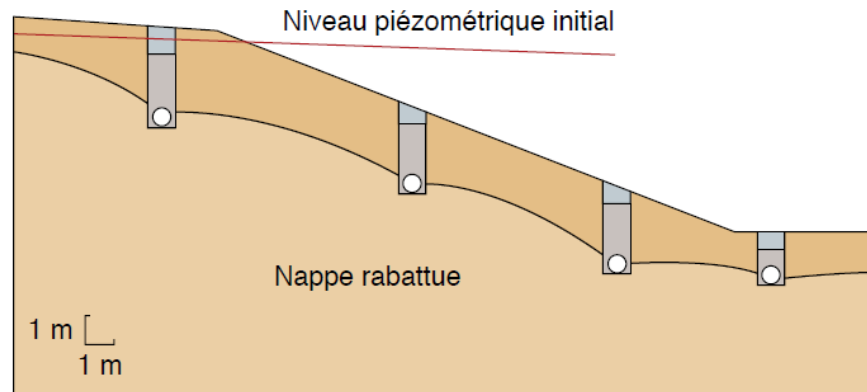
Glissement de la RD 753 à Corent : solution adoptée.

1. Terrassement – Substitution et masque

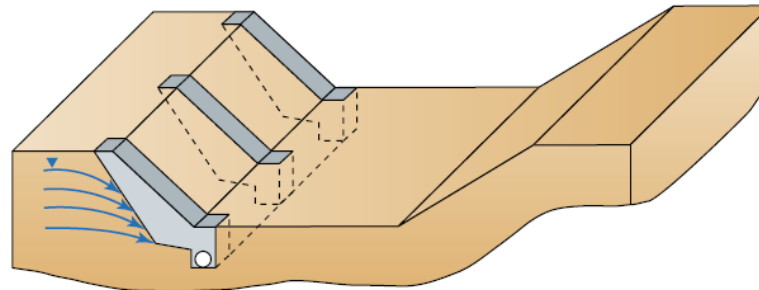


Ligne SNCF à Lezoux (Puy-de-Dôme). Solution de substitution adoptée.

2. Drainage – Tranchées drainantes et éperons

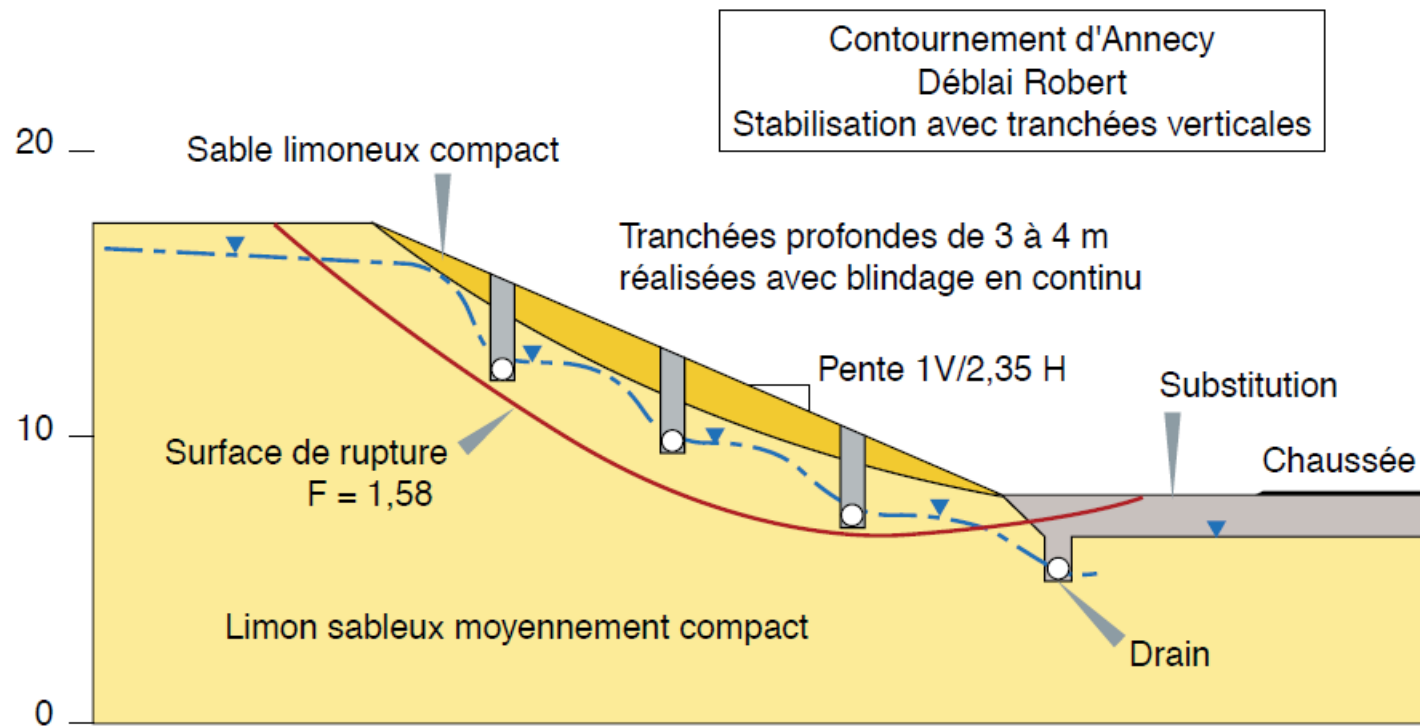


. Tranchées perpendiculaires à la ligne de pente dans un déblai et dans des sols de forte perméabilité.

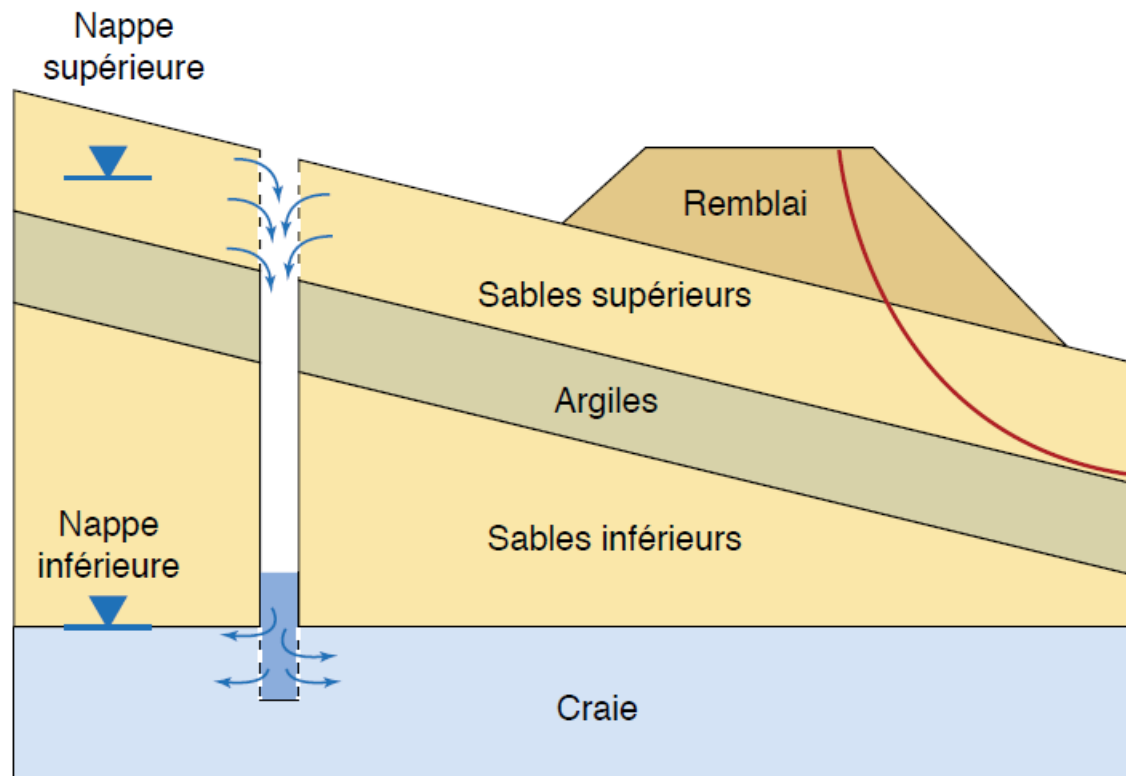


Éperons drainants (le collecteur doit déboucher dans un regard muni d'un exutoire)

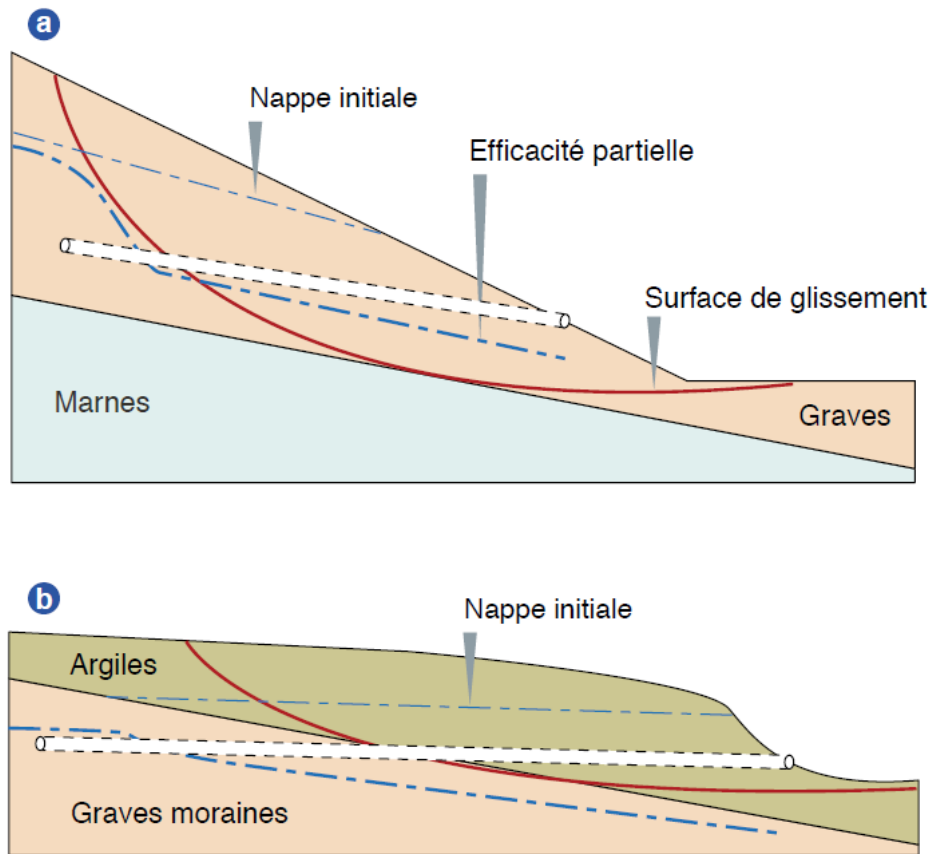
2. Drainage – Tranchées drainantes et éperons



2. Drainage – Puits drainants



2. Drainage – Drains subhorizontaux



Deux domaines d'application des drains subhorizontaux :

a) aquifère sur niveau imperméable ; b) aquifère sous niveau imperméable (d'après documents J.-C. Gress)

3. Renforcement – Clouage

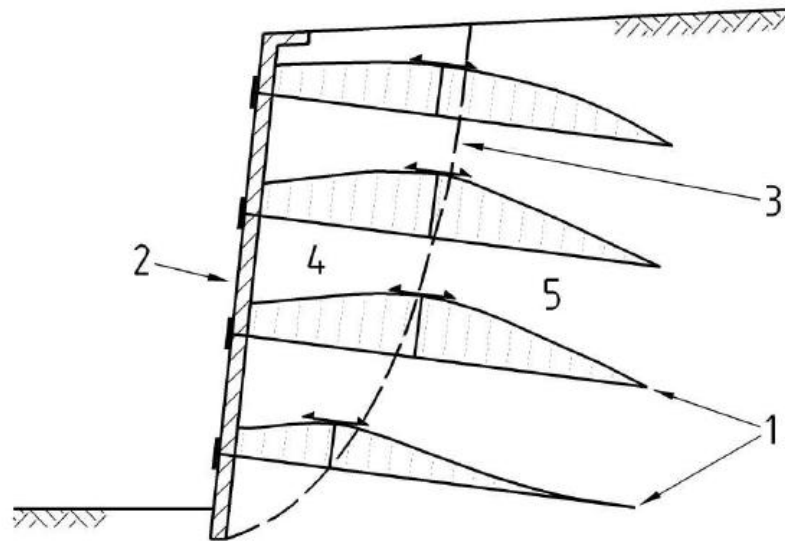
NF P 14-270 (2020) – Calculs géotechniques – Ouvrages de soutènement –
Remblais renforcés et massifs en sols cloués

NF EN 14490 (2010) – Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Clouage



3. Renforcement – Clouage

Mobilisation de la traction dans les clous

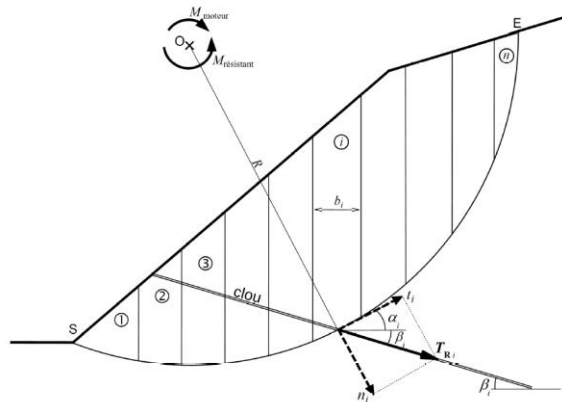


Légende :

- | | | | |
|---|-------------------------------|---|-----------------|
| 1 | Renforcements | 4 | Zone active |
| 2 | Parement | 5 | Zone résistante |
| 3 | Ligne des tractions maximales | | |

3. Renforcement – Clouage

Dimensionnement



$T_{Ri} = \min (R_n, \text{résistance de l'ancrage})$

La composante tangentielle à la ligne de glissement :

$$t_i = T_{Ri} \cos(\alpha_i + \beta_i)$$

$$\Rightarrow T_{i \text{ moteur}} = W_i \sin \alpha_i - t_i$$

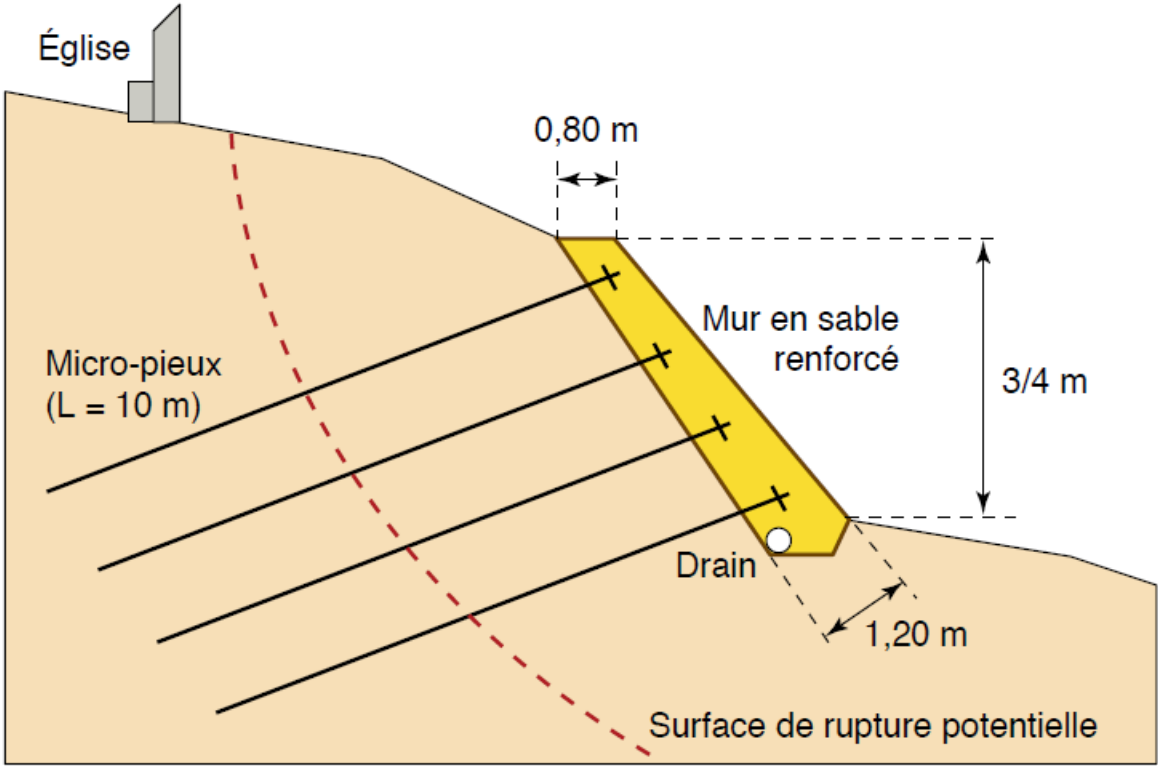
La composante normale à la ligne de glissement :

$$n_i = T_{Ri} \sin(\alpha_i + \beta_i)$$

$$\Rightarrow T_{i \text{ résistant}} = (W_i \cos \alpha_i + n_i - U_i) \tan \varphi'_i + c'_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i}$$

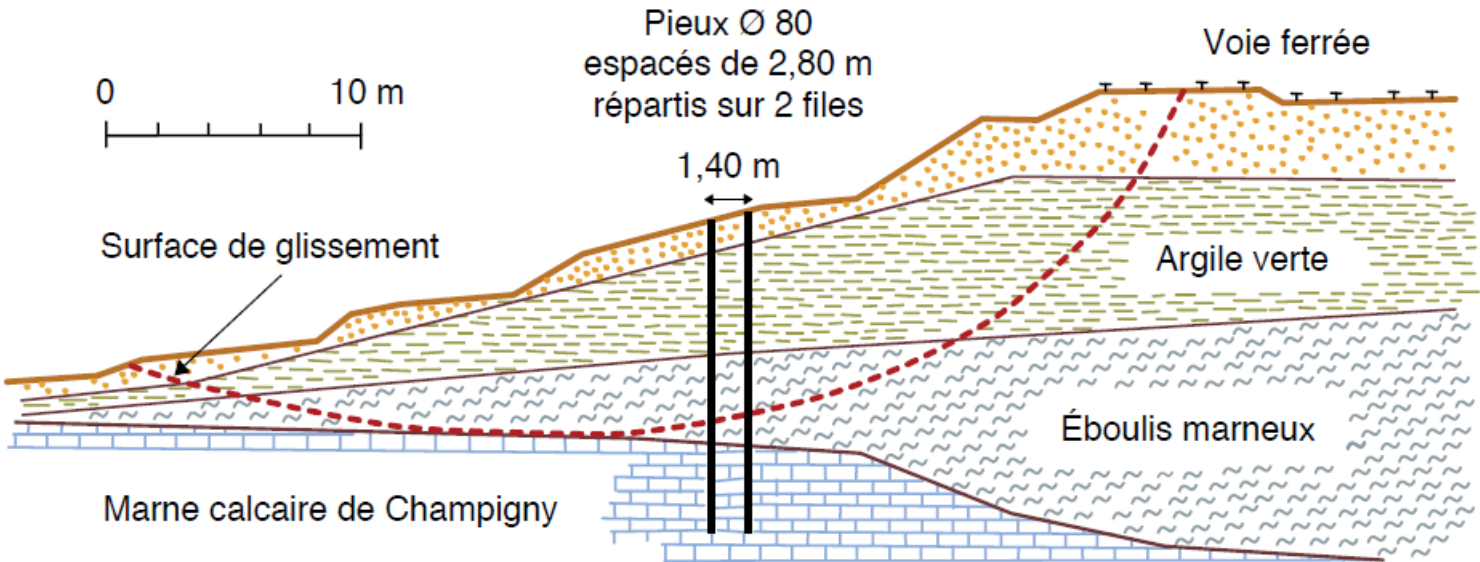
$$\Rightarrow F = \frac{\sum_{i=1}^n \left[(W_i \cos \alpha_i + n_i - U_i) \tan \varphi'_i + c'_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} \right]}{\sum_{i=1}^n [W_i \sin \alpha_i - t_i]}$$

3. Renforcement – Clouage



Coupe schématique du clouage de Varengueville-sur-Mer

3. Renforcement – Pieux

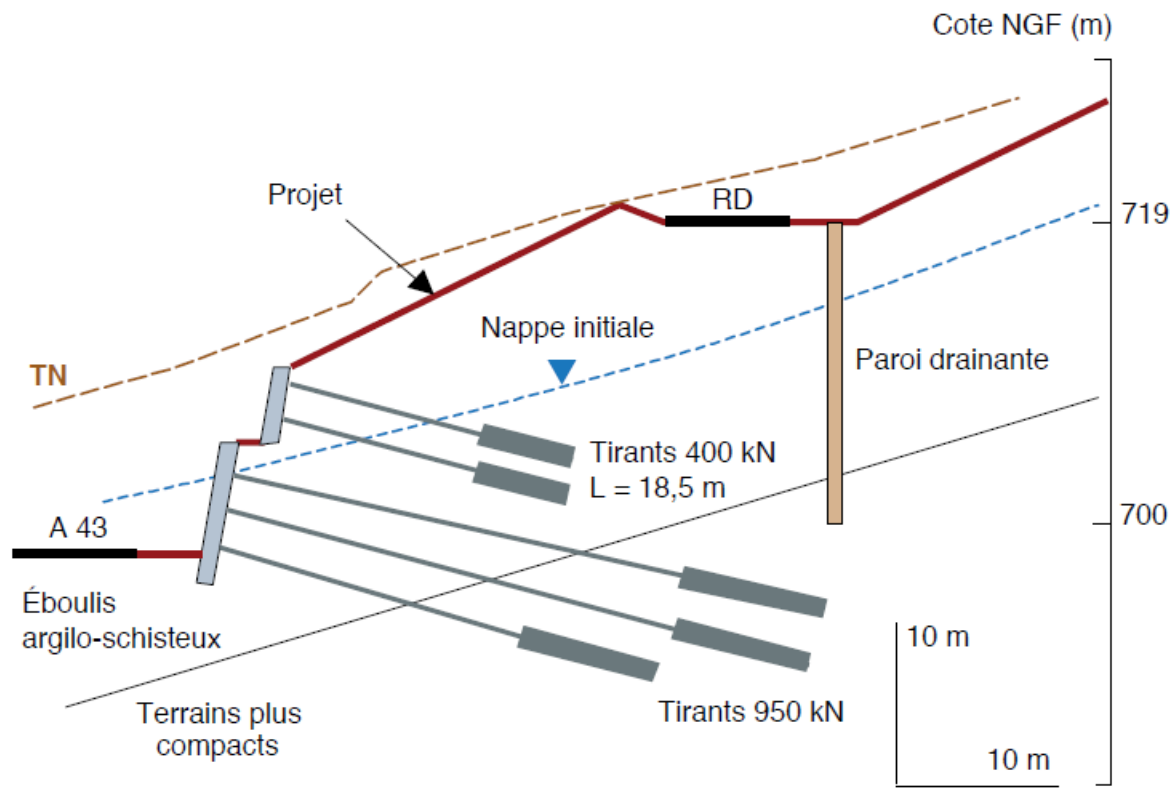


. Profil géotechnique du site de Boussy-Saint-Antoine (d'après Cartier, 1986)

TIRANTS D'ANCRAGE
TA 2020

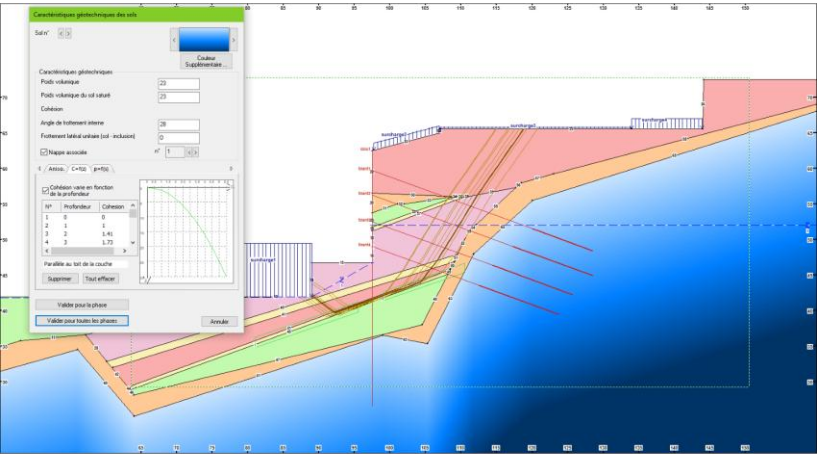
RÈGLES PROFESSIONNELLES
relatives à la conception, au calcul,
à l'exécution, au contrôle
et à la surveillance

3. Renforcement – Tirants d’ancrage



Déblai de Saint-Martin-la-Porte (autoroute A 43)

Geostab



Talren

