

Mécanique des Roches - GEO 3

Chapitre I

Support de cours provisoire 4^{ème} année
2021-2022

Stabilité des massifs rocheux

Les parades

Les différents modes de rupture

Il existe plusieurs types de risques naturels liés aux mouvements de massifs rocheux et pouvant avoir de graves conséquences sur leur environnement proche. On distinguera la chute de bloc rocheux des éboulements.

La chute de blocs est un mouvement rocheux engageant des volumes de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de m³ contrairement aux éboulements rocheux qui impliquent plusieurs dizaines de milliers de m³ (et dont le mode de propagation est assimilable à celui d'un sol ou d'un fluide).

Ainsi, par la différence des volumes impliqués, chutes de blocs et éboulements n'engendrent pas les mêmes séquelles sur leur environnement et conséquences sur le bâti, les infrastructures ou sur les vies.

On peut classer les blocs selon la taille des éléments

Pierres : $V < 1 \text{ dm}^3$

Blocs : $1 \text{ dm}^3 < V < 1 \text{ m}^3$

Gros blocs : $V > 1 \text{ m}^3$



Bloc rocheux, Sud Tyrol, Italie

On peut classer la nature de la rupture selon le volume total concerné

Chutes de pierres ou de blocs : $V_t < 1 \text{ à } 10 \text{ m}^3$

Eboulement en masse : $V_t > 100 \text{ m}^3$

Eboulement en grande masse (écroulement) : $V_t > \text{plusieurs millions m}^3$



La Clapière (2016)

Aléas et Risques Naturels

On distingue ainsi deux notions désignant ces catastrophes naturelles : l'aléa et le risque (naturel).

- Un aléa est un phénomène naturel avéré ou pouvant se produire. La définition d'un aléa prend ainsi en compte à la fois la nature du phénomène et la probabilité qu'il a de se produire.

- La notion de risque est utilisée quand une structure est exposée à un aléa naturel.

L'aléa est un terme intervenant en amont de la notion de risque naturel. Suite à ces risques, sont établies des parades de protection d'origines naturelles ou artificielles et de fonctions passives ou actives.

Les phases caractéristiques d'une chute de blocs

1) Phase de départ du bloc de la falaise ("onset")

Il peut s'agir d'une chute de blocs isolés ou bien en masse. Ils peuvent survenir par basculement, rupture de pied, surplomb, ou encore par glissement banc sur banc.

2) Phase de propagation ("runout distance")

Un bloc peut consister en une chute libre, un rebond, un roulement ou encore un glissement. On caractérise souvent ces mouvements par les énergies potentielles et cinétiques, particulièrement représentatives. C'est au cours de la phase de propagation que les vitesses et les hauteurs de rebonds sont les plus importantes.

3) Phase d'arrêt

Les frottements, les déformations plastiques du sol, les fragmentations du bloc, les chocs inter blocs ainsi que l'impact sur des obstacles sont les causes de la perte d'énergie de chaque bloc durant sa chute et sa course est arrêtée lorsqu'il atteint sa phase d'équilibre.

Facteurs influençant les chutes de blocs

On distingue les facteurs prédisposant des facteurs déclenchant.

Les facteurs prédisposant confèrent au site une propension à la chute de blocs; ils sont permanents et endogènes (propres au massif) tels que

- La morphologie du site et sa géométrie : la présence d'escarpements rocheux par exemple est préjudiciable.
- La structure et la nature des terrains, c'est-à-dire l'empilement des couches.
- La répartition spatiale des discontinuités.
- Le type de roches en présence

conditionnent la sensibilité du massif aux instabilités et déterminent les surfaces de rupture possibles.

La présence d'eau diminue la résistance au frottement des sols et entraîne une altération plus rapide des matériaux.

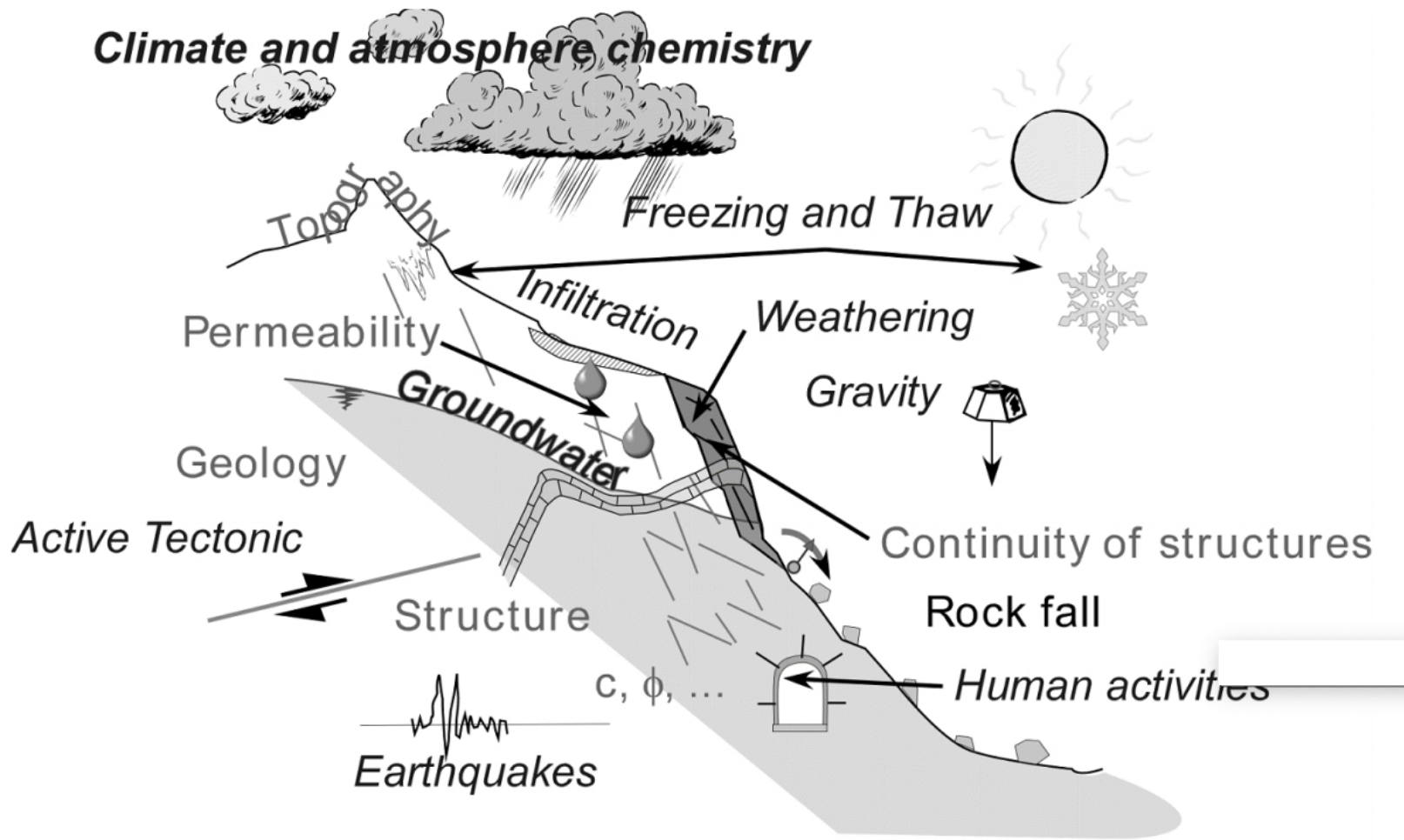
Facteurs influençant les ruptures

Les facteurs déclenchant apportent un élément déstabilisant qui mène à la désolidarisation d'un volume du massif.

Ces facteurs sont variables dans le temps et liés à l'environnement direct du massif dans la majorité des cas (facteurs exogènes).

- Les conditions météorologiques extrêmes peuvent influencer sur les événements.
- Les épisodes de gel-dégel, qui entraînent un gonflement des volumes d'eau et à l'élargissement des discontinuités, se montrent particulièrement préjudiciables.
- La présence de racines de végétaux peut également engendrer ce phénomène d'élargissement.
- Enfin, les épisodes vibratoires liés aux séismes sont préjudiciables pour les massifs puisqu'ils mettent les blocs du massif en mouvement les uns par rapport aux autres.

Climate and atmosphere chemistry



www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/2617/2011/

Les Falaises du littorale

Les risques concernent également les falaises présentes sur le littoral français qui subissent une érosion d'origine

- naturelle (vent, mer, gel-dégel...)
- anthropique (modification du relief, construction...)

L'érosion des falaises peut conduire les autorités à exproprier les habitants pour cause de danger imminent.

L'évolution à la hausse du niveau des mers rend ce problème plus aigu.

La mise en place de parades peut parfois se révéler plus désastreux que le problème à régler (mise en place de digues - appelés épis - déplaçant le problème sans le résoudre et en lui donnant parfois une intensité supplémentaire).

Les différents types de parades

Afin de diminuer voire d'annuler le risque engendré par l'aléa, nous mettons en oeuvre une démarche et des ouvrages; les parades.

Selon leur natures, ces parades peuvent être désignée comme

- passives ou actives
- artificielles ou naturelles

Les différents types de parades

Les parades passives ont pour objectif de limiter les conséquences en cas de survenue d'une chute de bloc. Elles tendent donc à protéger les biens et les populations en stoppant la chute de blocs avant qu'ils n'atteignent les zones habitées. On compte parmi les protections passives les grillages et les filets, les aires de stockages, les merlons, les déviateurs latéraux.

A l'inverse, les parades actives ont pour but d'enrayer le phénomène avant son apparition. On cherche à agir avant la rupture et le détachement du bloc. Pour cela, il est possible d'utiliser des systèmes de retenues de pentes comme le boisement et les murets. On peut également évoquer les dispositifs de drainages afin d'affaiblir en eau les zones sensibles. Enfin, des techniques très communes consistent à conforter les parois existantes par des mur cloutés, du béton projeté ou des filets plaqués. Il faut également noter que les éléments susceptibles de se décrocher du massif peuvent être purgés.

Exemples de parades (protections)

Merlons et digues

Ecrans rigides

Barrières fixes

Ecrans de filets déformables

Grillages et filets pendus

Galeries de protection

Boisement

Suppression de l'aléa

Soutènement Ancrages

Béton projeté

Grillages et filets plaqués

Végétalisation

Drainage de surface

Drainage profond

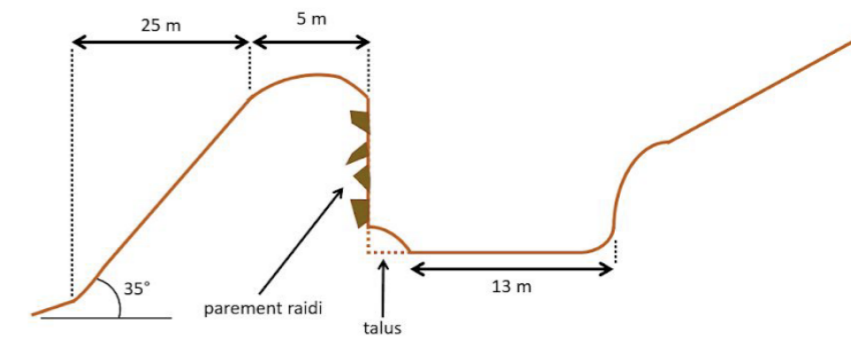
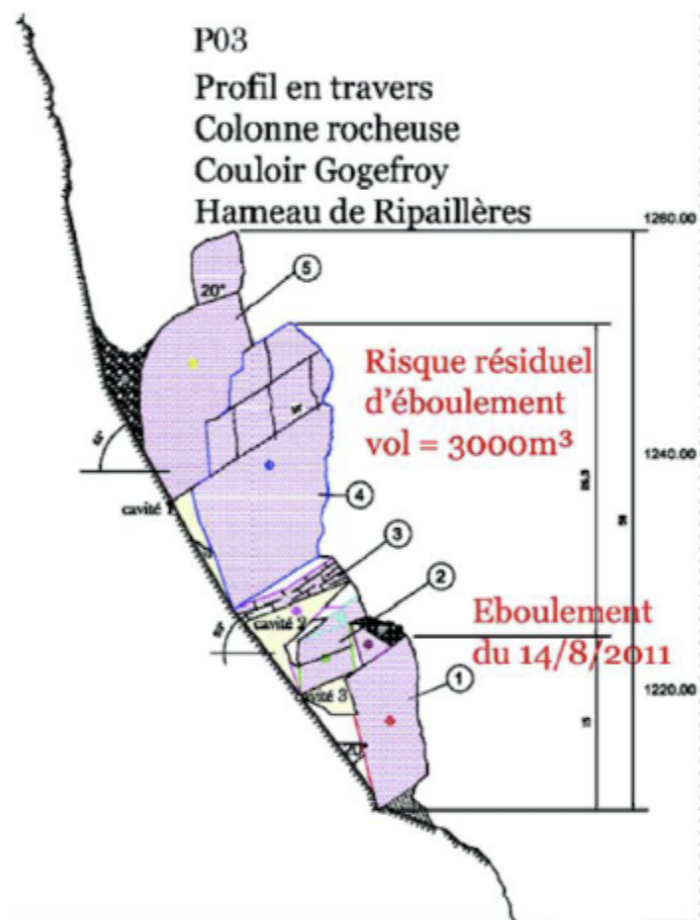
Quelques exemples

Bloc rocheux



© Photothèque IRMa / Sébastien Gominet

Exemple: Le Néron

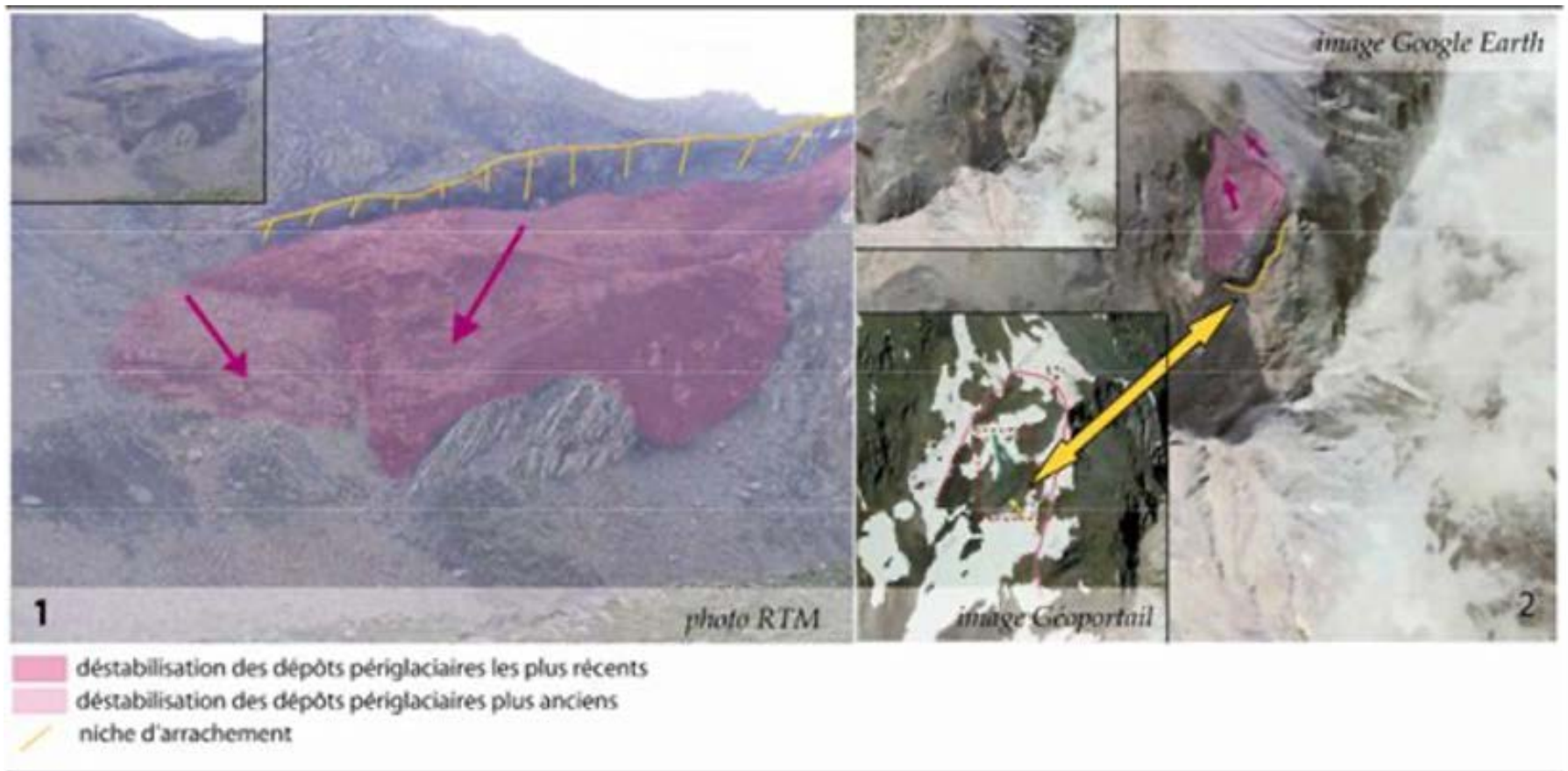


<https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/14/3175/2014/nhess-14-3175-2014.pdf>

Profil en travers de la colonne rocheuse. Source : Paratronic.info
- juil 2013: Gestion d'unrisque rocheux

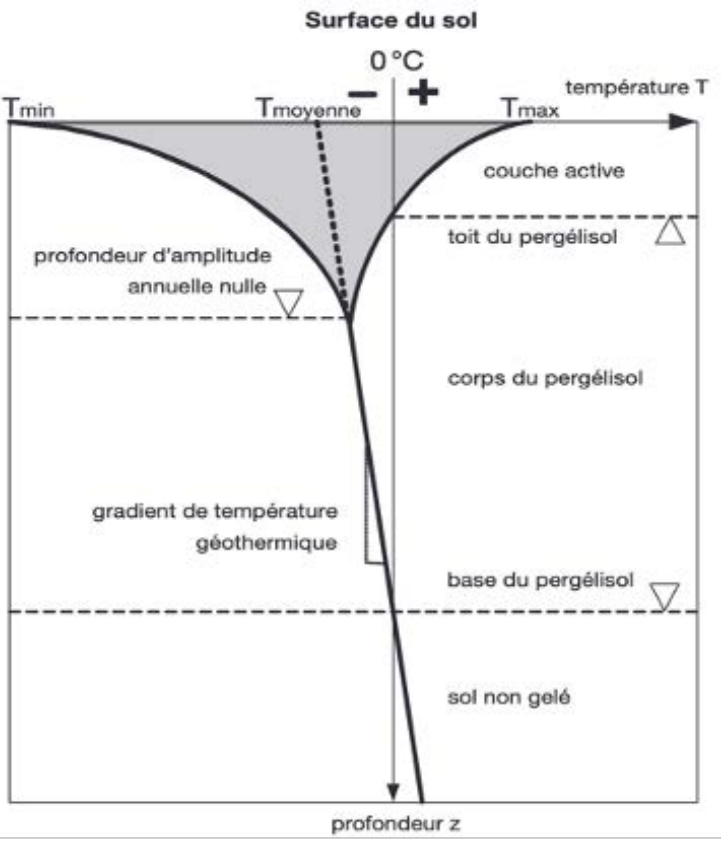
schéma du merlon de Ripaillère

Les risques naturels liés aux zones glaciaires et périglaciaires

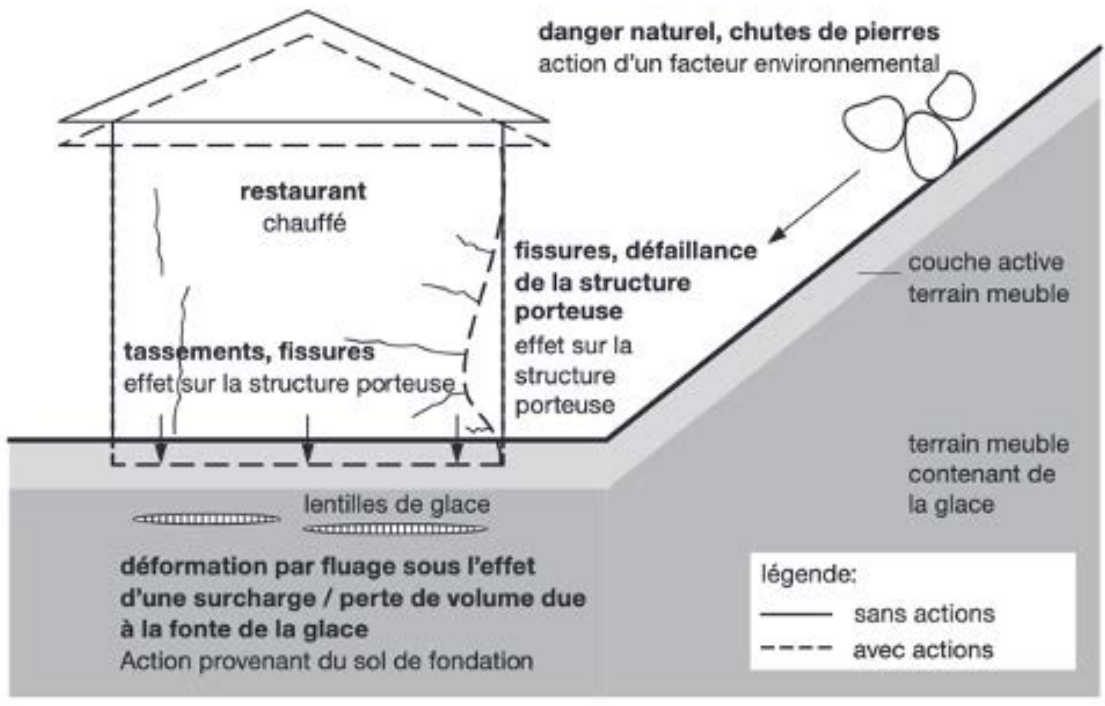


Rupture du glacier du Bérard

Source : http://www.ano-omiv.cnrs.fr/images/Publications/PDFs/Ubaye/MsCThesis/2008-Krysiecki_MScThesis.pdf



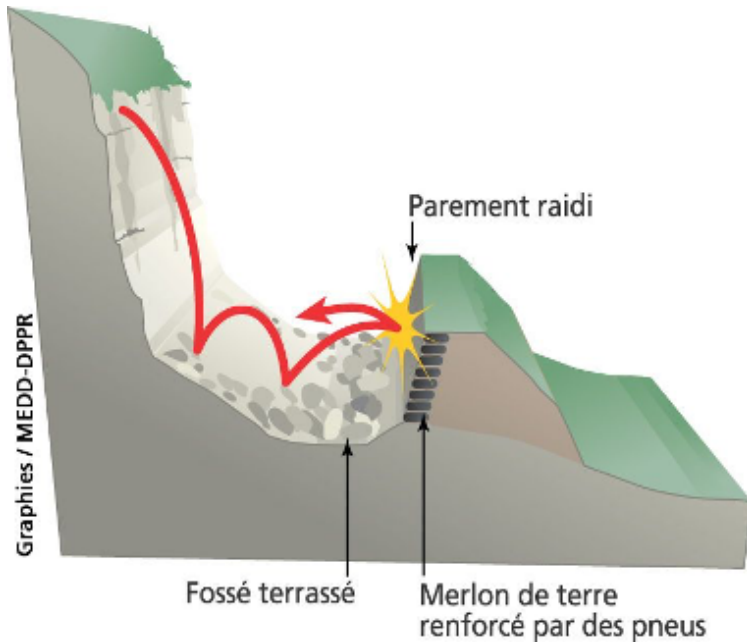
Répartition typique des températures (courbes noires) dans un pergélisol.



Représentation schématique d'un restaurant chauffé situé sur un pergélisol meuble et soumis à l'action ou à l'effet provenant d'un facteur environnemental ou du sol de fondation.

Source : « Construire sur le pergélisol. Guide pratique », https://www.slf.ch/fileadmin/user_upload/SLF/Permafrost/Bauen_im_Permafrost/Bauen_im_Permafrost_F.pdf?fbclid=IwAR3k1ZOqrIub5TdxCk3GYK6F7LWno-5fAFICCqV0Kq7K_Q4d_DtfcKQKKU

Les merlons



Principe de fonctionnement d'un merlon

Source : http://www.cotita.fr/IMG/pdf/Les_parades.pdf

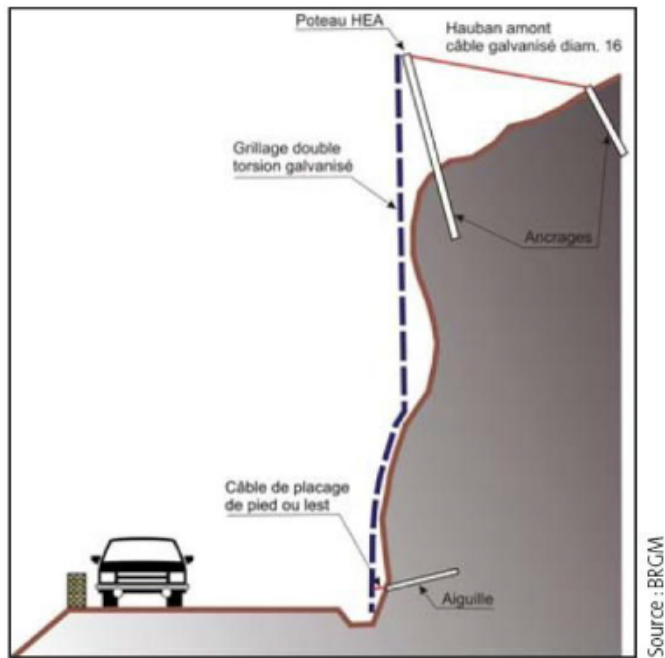
Filets de protection déformables



Écrans rigides



Grillages et filets suspendus



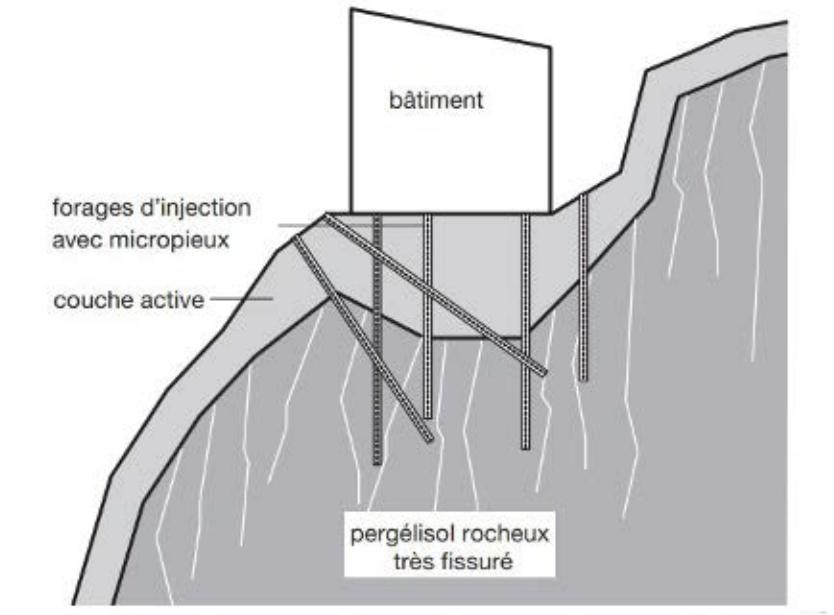
Grillages et filets plaqués



Béton projeté

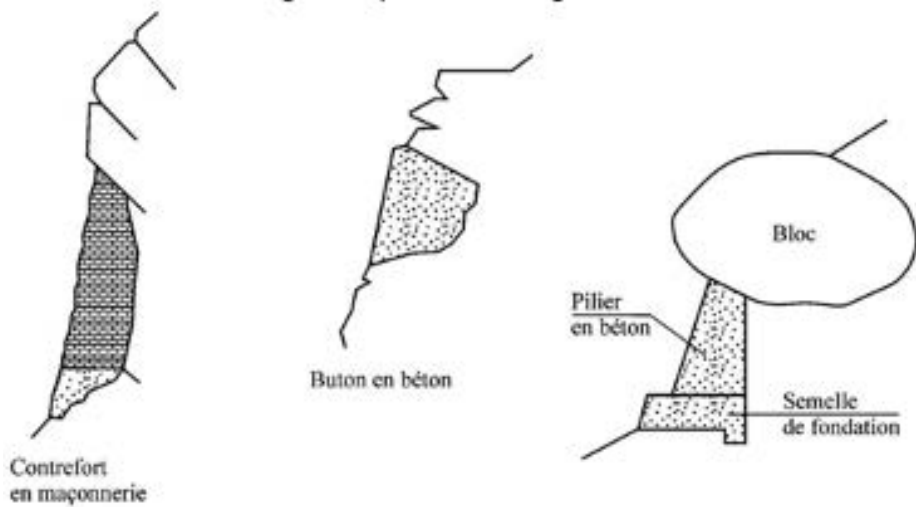


Renforcement de fondations



Source : « Construire sur le pergélisol. Guide pratique »
https://www.slf.ch/fileadmin/user_upload/SLF/Permafrost/Bauen_im_Permafrost/Bauen_im_Permafrost_F.pdf?fbclid=IwAR3k1ZOqrIub5TdxCk3GYK6F7LWno-5fAFICCqV0Kq7K_Q4d_DtfcKQKKU

Soutènements



Exemple de 3 types de soutènement



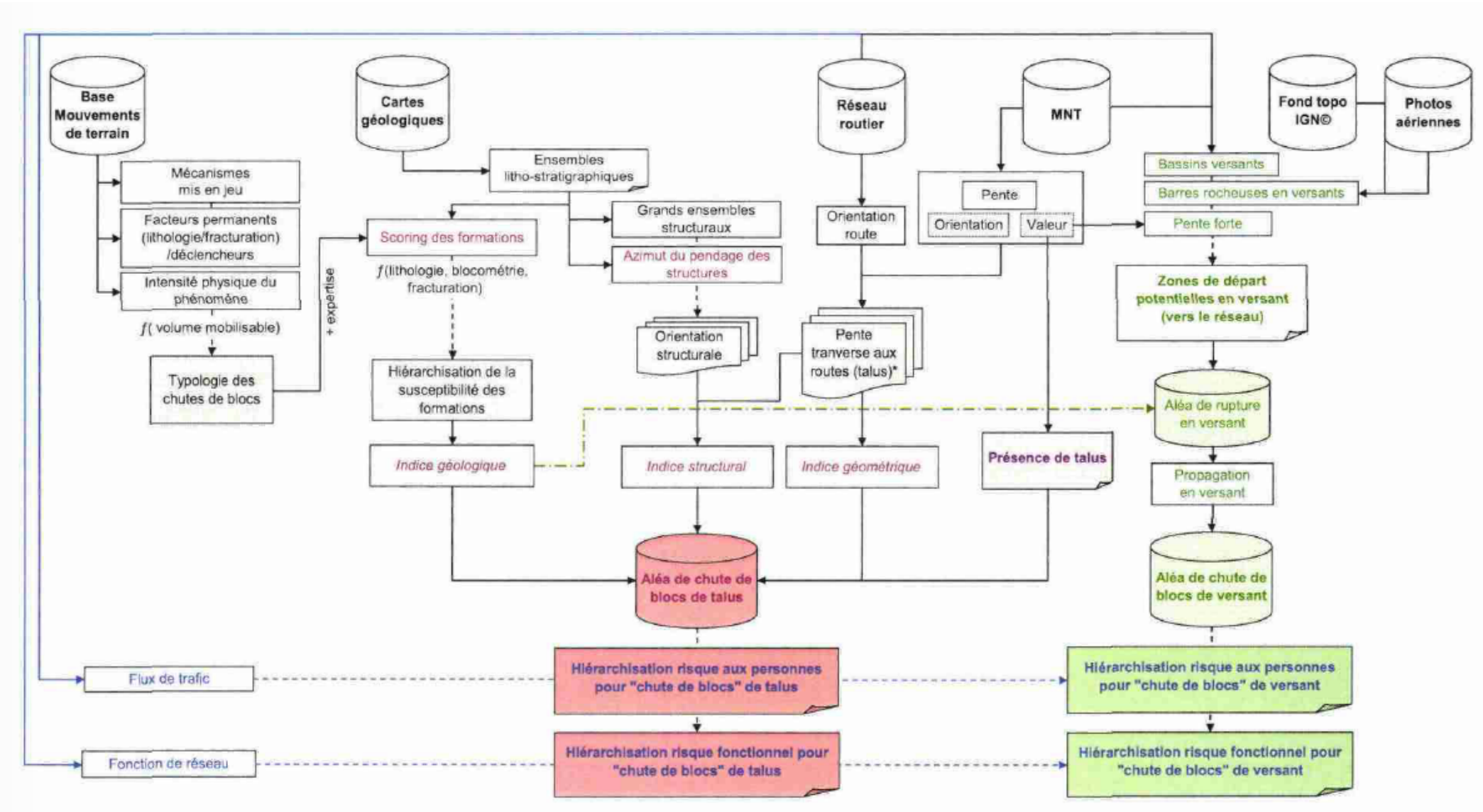
Exemples de contreforts en béton armé et en maçonnerie

Galeries de protection



Exemple d'une hiérarchisation de l'étude d'un risque de chute de blocs

Cas d'un réseau routier dans l'Aude



Aléa : probabilité d'apparition d'un phénomène donné, d'intensité donnée, sur un territoire donné, dans une période de référence donnée

$$\begin{aligned}
 &\text{Aléa} \\
 &= \\
 &\text{Fréquence d'occurrence} \\
 &+ \\
 &\text{Intensité} \\
 &\text{(énergie cinétique)}
 \end{aligned}
 \begin{array}{l}
 \nearrow \\
 \searrow
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{Fréquence de rupture} \\
 \text{(période de retour)} \\
 \times \\
 \text{Probabilité d'atteinte avec} \\
 \text{une certaine intensité}
 \end{array}$$

Intensité

Energie cinétique

0 à 30 kJ
 30 à 300 kJ
 > 300 kJ

Qualification

faible
 moyenne
 forte

Probabilité

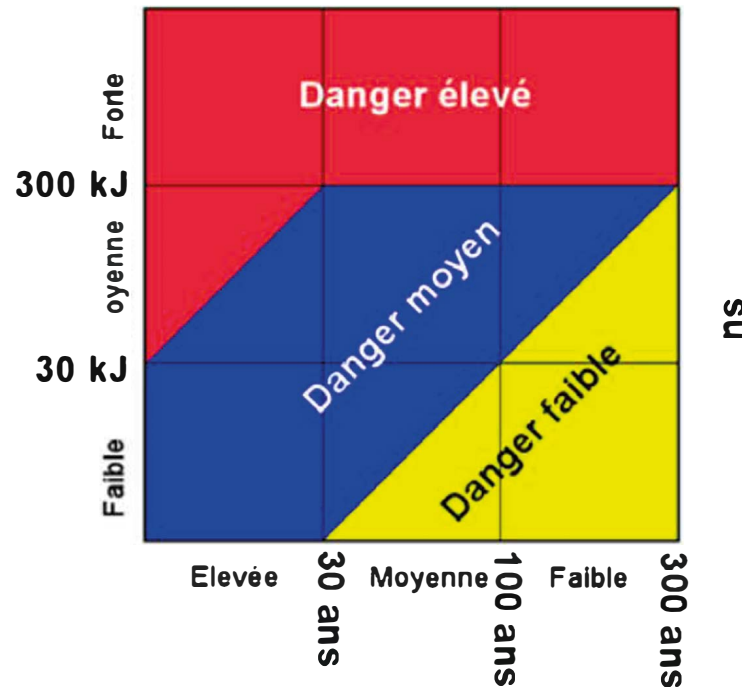
Période de retour

1 à 30 ans
 30 à 100 ans
 100 à 300 ans
 > 300 ans

Qualification

élevée
 moyenne
 faible
 très faible

Période de retour (Probabilité)



(International Strategy of Disaster Reduction)

... 3 degrés de danger (aléa) ...

Estimation du Risque

1. Source

Probabilité ou fréquence moyenne de départ de blocs

2. Propagation

Probabilité qu'un bloc atteigne un point du versant avec une certaine énergie

3. Enjeux et leur vulnérabilité

Personnes et biens

Étendue des dommages directs et indirects

$$\text{Risque} = P(\text{rupture}) \times P(\text{atteinte}) \times \text{Valeur} \times \text{Vulnérabilité}$$

Cinématique : Très lente (?) à très rapide - Discontinue - Brutale	Intensité : Faible à majeure	Gravité : Moyenne à majeure
<p>Très lent :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 mm/an à 12 mm/an <p>Lent :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 mm/mois à 50 mm/mois <p>Moyen :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1,5 mm/jour à 100 mm/jour <p>Rapide :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4 mm/heure à 10 000mm/heure <p>Très rapide :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 500 mm/seconde à 10 000 mm/seconde 	<p>Faible :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Financièrement supportable pour un particulier (ex: purge de blocs) <p>Moyenne :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Financièrement supportable pour un groupe de propriétaires • (ex: comblement cavité, drainage) <p>Forte :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Déborde du cadre parcellaire • Coût important et/ou technique difficile • (ex: stabilisation glissement, confortement de pan de falaise) <p>Majeure :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pas de parade technique (ex: Clapière, Séchilienne..) 	<p>Très faible :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pas d'accident (ex: retrait / gonflement , fluage, glissement lent (< 1m/h)) <p>Moyenne :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Accident isolé (ex:glissement à paroxysme rapide (dam / h)) <p>Forte :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quelques victimes (ex: chutes de blocs, laves torrentielles, fontis) <p>Majeure :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quelques dizaines de victimes (ex: éboulement, effondrement généralisé de carrière)

Actions pour éviter ou limiter le risque

1. Éviter le secteur à risque

Aménagement du territoire pour les collectivités

Modification de tracé pour les axes de communication

2. Intervenir à la source

Action au niveau des masses rocheuses instables au moyen de parades actives

3. Maîtriser les conséquences

Action sur la propagation ou au droit de l'enjeu, au moyen de parades passives

Estimation du risque lié aux chutes de blocs (2D ou 3D)

Estimation du chemin parcouru par un objet de forme et de volume (masse) données selon une topographie du site, la nature de la roche, la présence ou non d'un boisement... en faisant des hypothèses réalistes. L'énergie des blocs peut être estimée sur le trajet ainsi que la distance parcourue.

Pour la trajectographie, nous utiliserons les logiciels Rocfall de Rocscience et Propag du CEREMA.

Pour l'estimation du volume d'un bloc, nous utiliserons le logiciel SWedge de Rocscience.

Nous pouvons ainsi définir des zones de danger et mettre en place des parades en estimant leur efficacité.

Point seeder
 X velocity 3 m/s
 Y velocity 2 m/s
 Rock mass 10 kg

Clean rock face
 Rn 0.53 sd 0.04
 Rt 0.99 sd 0.04
 ϕ 30 sd 2 deg
 Roughness 1

Fall

Bounce

Roll

Rock outcrop
 Rn 0.35 sd 0.04
 Rt 0.85 sd 0.04
 ϕ 30 sd 2 deg
 Roughness 3

Fall

Bounce

Clean rock face
 Rn 0.53 sd 0.04
 Rt 0.99 sd 0.04
 ϕ 30 sd 2 deg
 Roughness 1

Rock outcrop
 Rn 0.35 sd 0.04
 Rt 0.85 sd 0.04
 ϕ 30 sd 2 deg
 Roughness 3

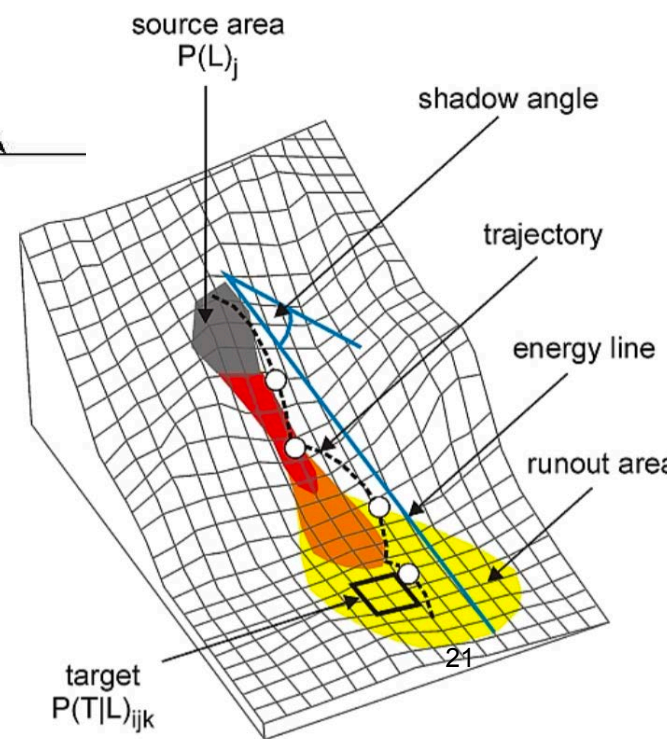
Fall

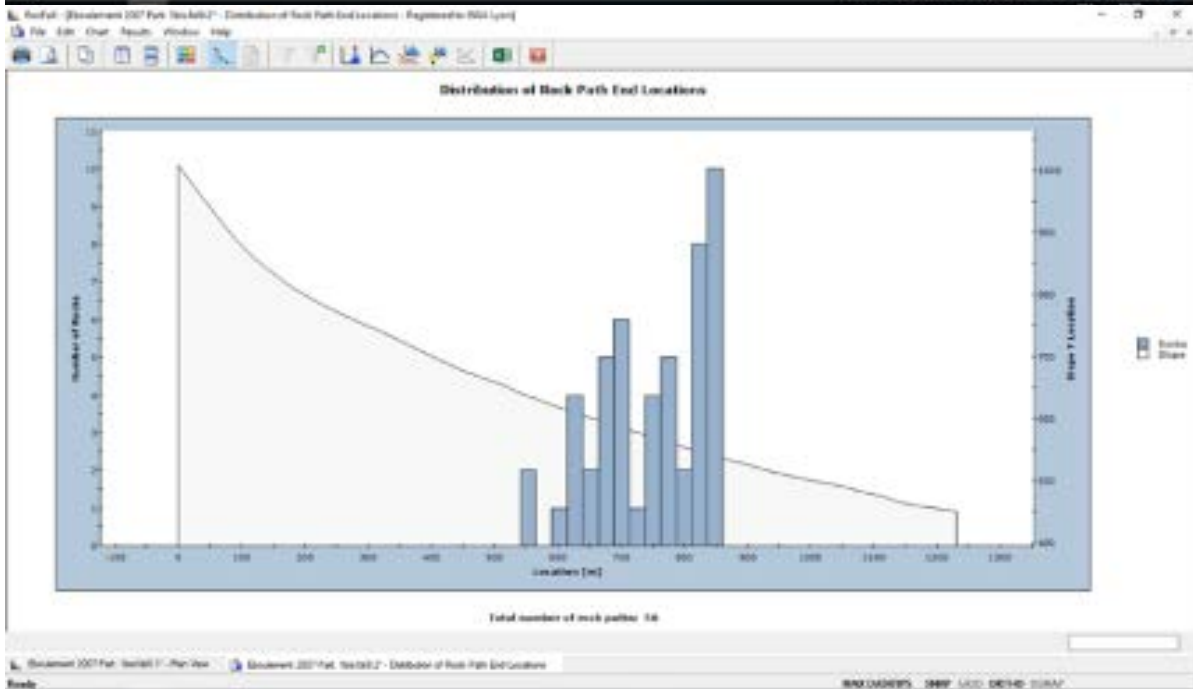
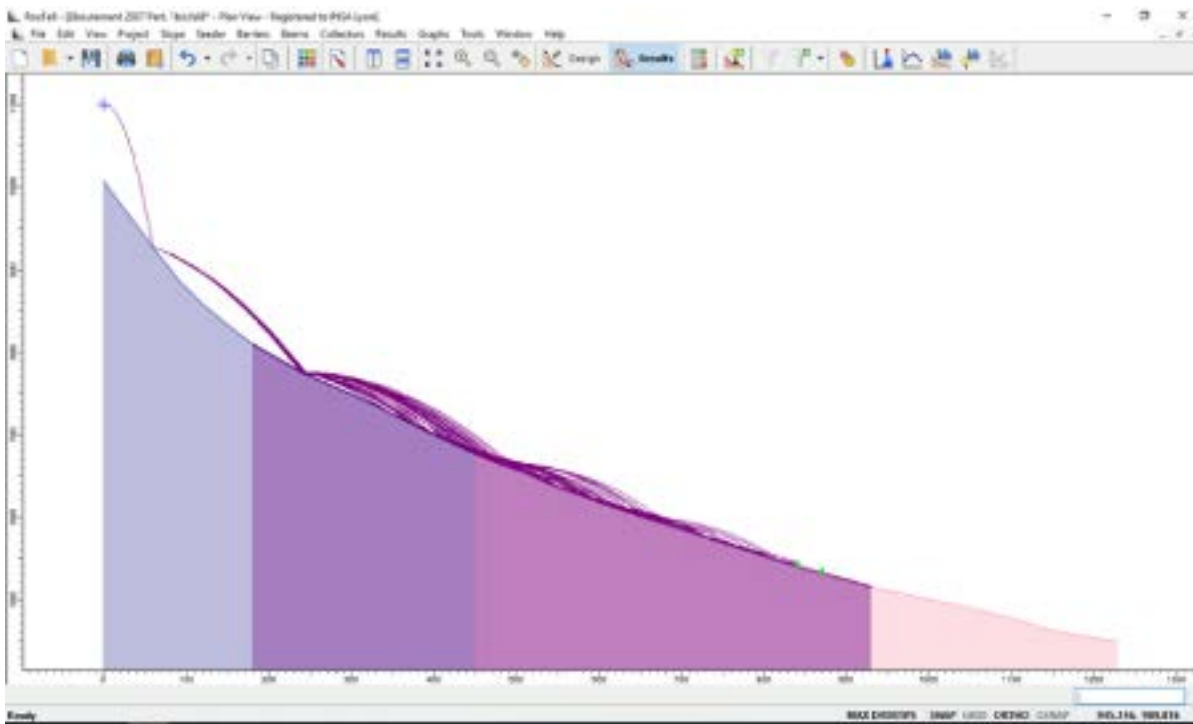
Bounce

Roll

Clean rock face
 Rn 0.53 sd 0.04
 Rt 0.99 sd 0.04
 ϕ 30 sd 2 deg
 Roughness 1

Asphalt surface
 Rn 0.4 sd 0.04
 Rt 0.9 sd 0.04
 ϕ 30 sd 2 deg
 Roughness 0



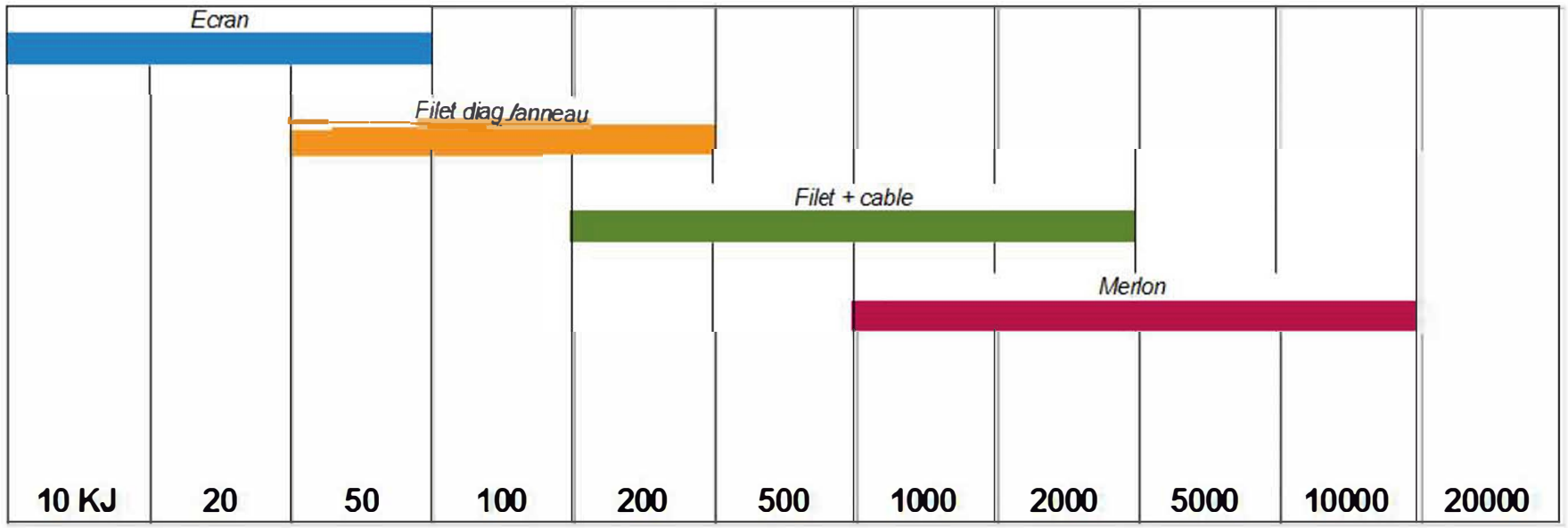


Résultats de la simulation pour une vitesse initiale du bloc $V=10$ m/s

Un écran virtuel peut être dressé à différents endroits clés du site. Il permet de collecter les informations nécessaires à la qualification des aléas de propagation et aux pré dimensionnement des éventuelles protections :

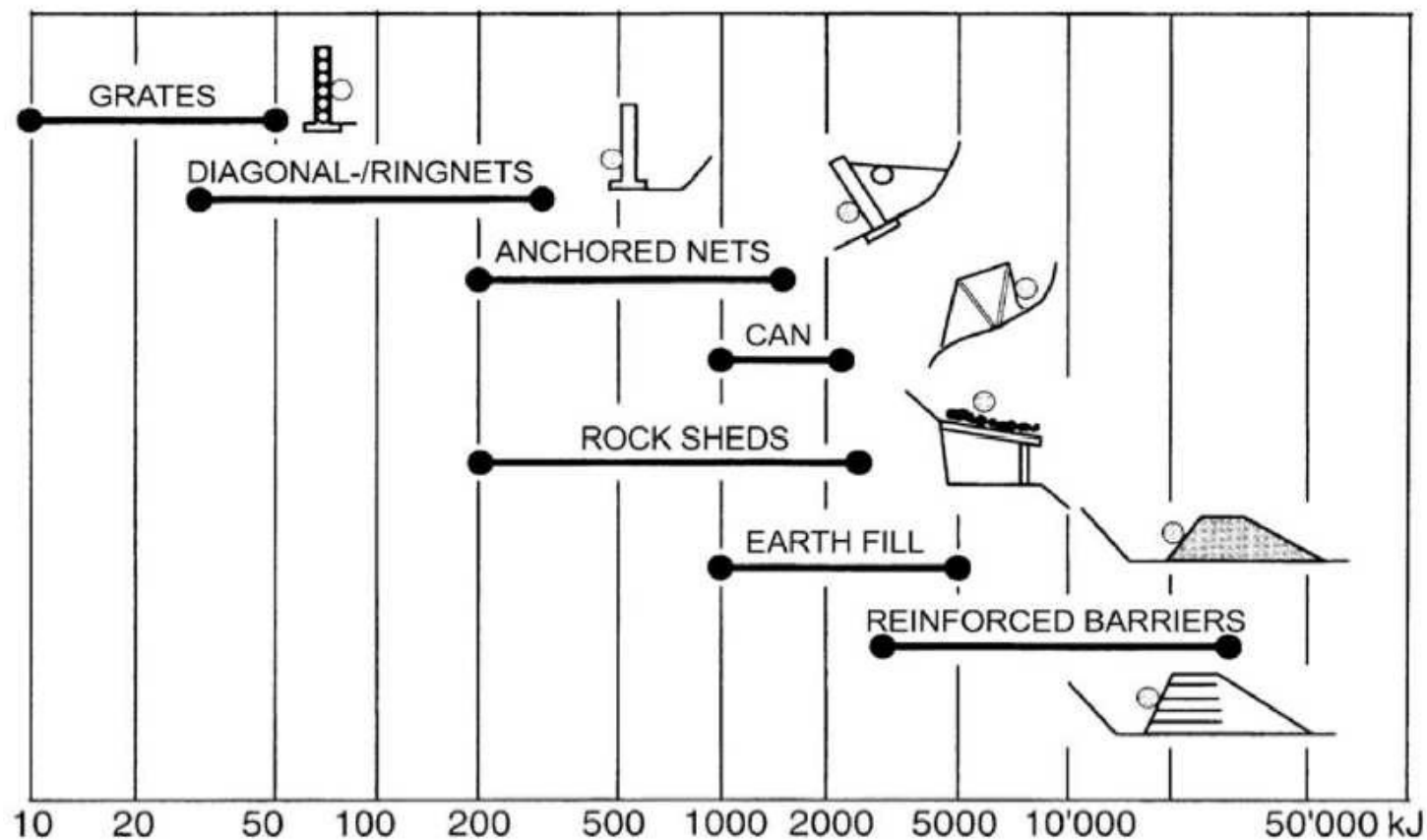
- Nombre de blocs franchissant le mur,
- Énergies moyennes et maximales des blocs,
- Hauteurs de passage moyennes et maximales des blocs,
- Vitesses de passage moyennes et maximales des blocs.

A partir de ces résultats, on peut projeter des parades mises en place de façon optimisées et réduire ainsi l'aléa. La nature de ces parades dépend notamment de l'énergie à stopper ou à dissiper.



Stabilité des massifs rocheux

Les différentes parades



Classification des ouvrages de protection pare-blocs en fonction de l'énergie de l'impactant d'après Descoedres (1997).

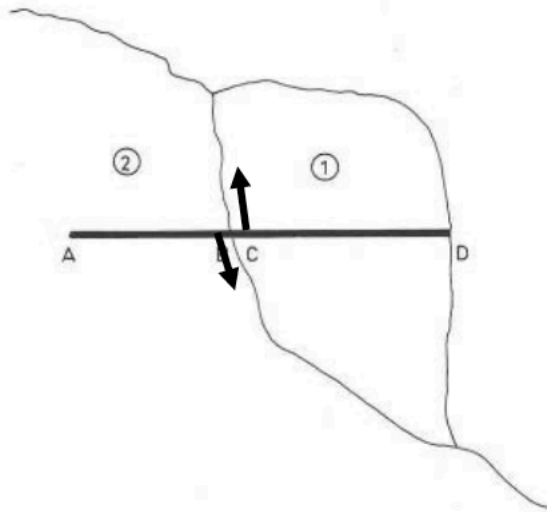
Comparatif des différents types de parades

	Domaine	Energie absorbée	Coût	Entretien/ durée de vie	Limites	Avantages
Ecrans rigides <i>passive</i>	L'aménagement et la consolidation des versants en mouvement	50 à 100 kJ pour les traverse et jusqu'à 1000 kJ pour les écrans	109€/ m ³	Ouvrage métallique assez pérenne même en conditions agressives Ouvrage bois 10 à 15 ans	Doivent être souvent complétés par des fosses ou écrans	Impact visuel minimisable, favorise le rétablissement et/ou la formation d'écosystèmes locaux
Merlons <i>passive</i>	Les secteurs menacés par des instabilités présentant des volumes élevés	globalement entre 30000 et 150000 kJ	entre 150 et 300 €/ m ³	curage régulier, végétalisation, entretien du système de collecte des eaux de ruissellement	Ne peut pas être implanté dans une pente trop raide	Impact visuel peut être minimisé par de la végétation Pas de sensibilité au vieillissement
Barrière fixe de grillage ou de filet <i>passive</i>	Implantée en pied de versant ou en crête de talus	200 à 250 kJ	100-150 €/ m ²	curage régulier, galvanisation Al-Zn si conditions agressives	Sensibles aux impacts directs	Mise en oeuvre rapide, faible impact visuel
Grillage et filets plaqués <i>active</i>	Stabilisation de parois instables	blocs de moins de 1 m ³ à 5 m ³ maximum	45 €/ m ³ + hélicoptère 25€/min	purge des éléments détachés	Efficacité dépend de la qualité du placage, des ancrages qui doivent se trouver hors zone instable	Coût raisonnable, mise en oeuvre rapide, peu d'impact visuel
Grillages et filets pendus <i>passive</i>	Posés sur tous types de pentes Provisoirement lors de minages	blocs de moins de 1 m ³ à 5 m ³ maximum	entre 100 et 200 €/m ²	Vidange, dégagement de la végétation et réparation des déchirures	Nécessite vidange du filets ou création d'une fosse Vulnérable face au gel-dégel	Convient à tout type de pentes et toute hauteur

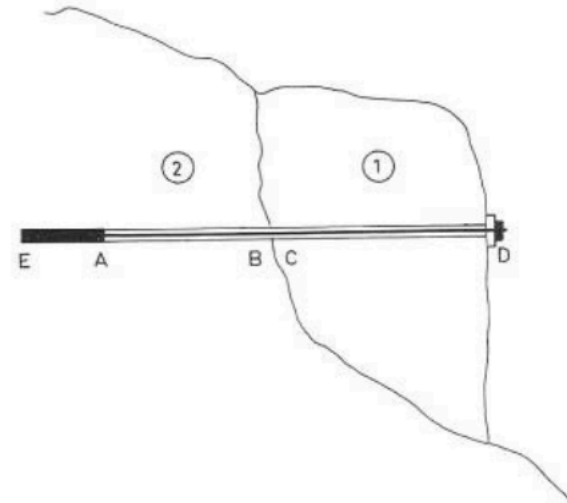
Soutènement active	Volumes rocheux instables, surplombants ou sous-cavés Souvent associé à des ancrages	/	300-500 € le m^3 à majorer si recours à un hélicoptère pour y accéder	Bonne pérennité a priori Drainage primordial à l'arrière Barbacanes potentiellement à déboucher	Très grand impact visuel Seul, le béton ne reprend pas d'efforts horizontaux Coût augmente beaucoup avec hauteur et complexité	Ouvrage pérenne
Ancrages active	Stabilisation et renforcement des structures Tous types de terrains sauf terrains meubles présentant un comportement cohésif	Jusqu'à plusieurs centaines de KN	176 € pour la mise en tension 150 tonnes des tirants d'ancrage 14,60 €/ml pour les clous	maximum 2 ans pour les tirants d'ancrage provisoires et plus de deux ans pour les permanents qu'il faut donc surveiller	Impossibilité sur terrains saturés, sensible à l'érosion, peu compatibles avec la présence de réseaux dans le sol	Impact visuel généralement limité
Boisement passive	Pente faible où il est possible de planter sous les parois à risque d'éboulement.	Capable de retenir des blocs de $5 m^3$	Dépend de l'accès au massif, le prix du bois local, la desserte existante	Besoin de spécialiste dans la sylviculture	éboulements en grande masse ou pour parer des blocs très énergétiques.	Permet également de végétaliser le paysage. La forêt se fond bien dans le paysage.
Galeries de protection passive	Au-dessus d'axes routiers ou ferroviaires.	Excellente protection pour les aléas d'intensités faibles et moyennes	12 000 à 40 000 €/m	50-100 ans	Entreprise de GC pour mise en oeuvre avec beaucoup de travaux, gestion du trafic	Se justifie particulièrement sur des voies de circulation à fort trafic.
Ecrans de filets déformables passive	Zone vaste où la chute de pierre ne peut être déterminée précisément.	12,5 à 500 KJ	140-1600 €/m linéaire	Stopper la corrosion et vérifier le système de freinage	Limitation à plusieurs chutes de blocs successives	Résiste pour des énergies élevées et faible emprise au sol
Béton projeté active	Utilisation temporaire lors des constructions souterraines	/	136€/ m^3 pour le béton et 5,40€ le kg pour le treillis	Durée de vie variable du béton selon sa mise en oeuvre	Risque de corrosion, étanchéité du béton, fort impact visuel, Irrégularités dans le béton	N'a pas besoin d'entretien. Consolide la fracturation d'un massif

Stabilité des massifs rocheux

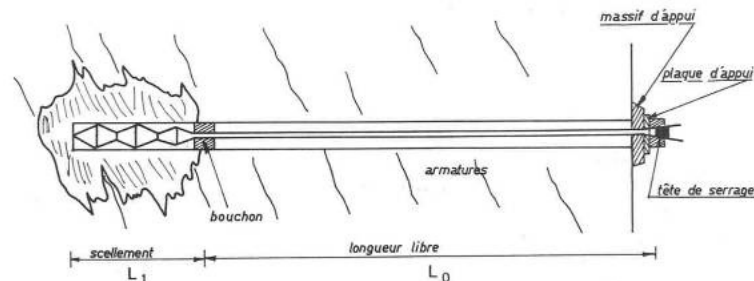
Ancrages passifs et précontraints



Ancrage passif (barre ou boulon) – effort tranchant

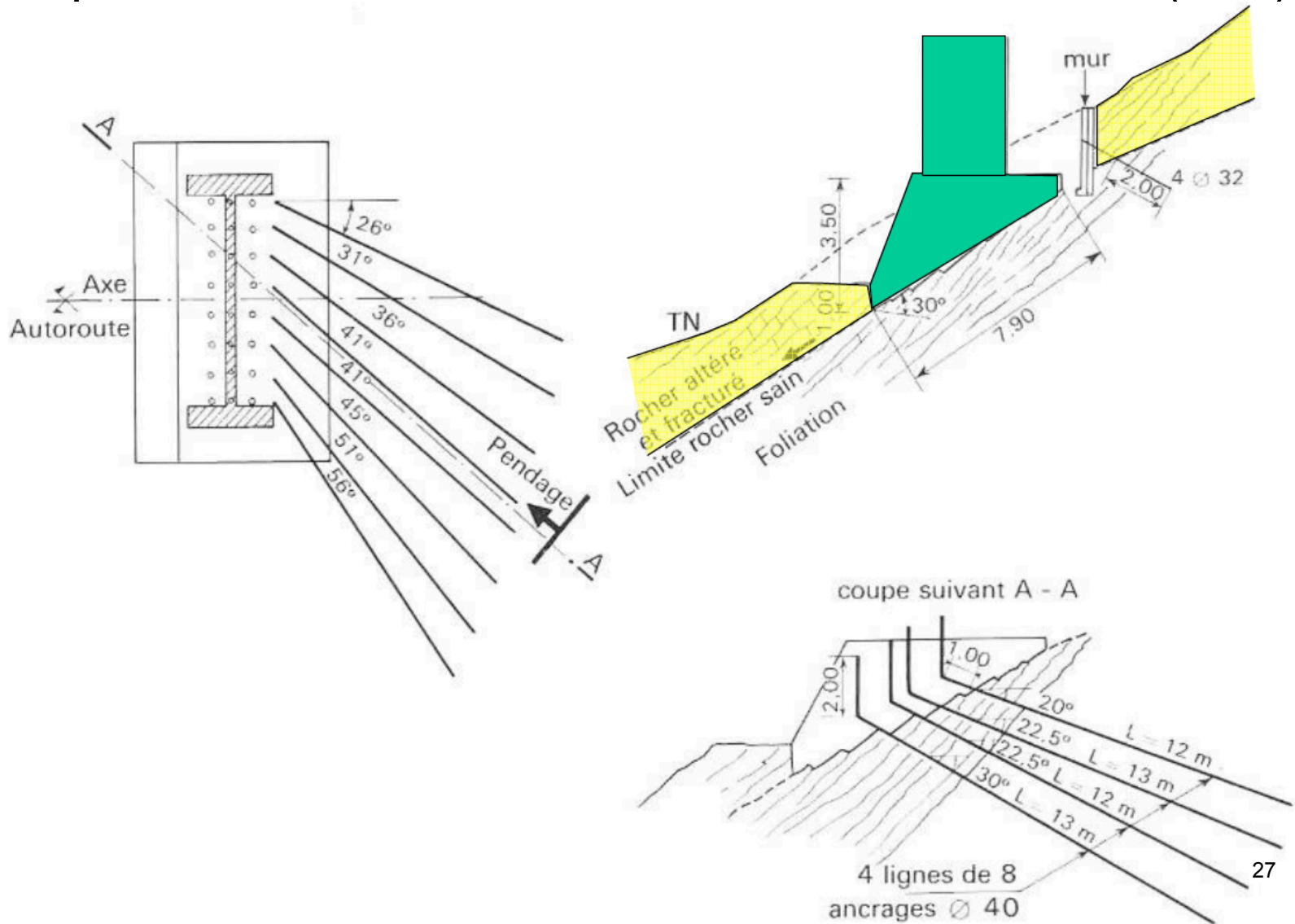


Ancrage précontraint – effort normal / frottement



Stabilité des massifs rocheux

Exemple : fondations du viaduc des Pox et de Rome (A89)



Les sept piliers de la prévention

1. La connaissance des phénomènes, de l'aléa et du risque
2. La surveillance
3. L'information préventive et l'éducation
4. La prise en compte des risques dans l'aménagement
5. La mitigation
6. La planification de l'organisation des secours
7. La prise en compte du retour d'expérience

Carte interactive

5. La mitigation

L'objectif de la mitigation est d'atténuer les dommages, en réduisant soit l'intensité de certains aléas (inondations, coulées de boue, avalanches, etc.), soit la vulnérabilité des enjeux. Cette notion concerne notamment les biens économiques : les constructions, les bâtiments industriels et commerciaux, ceux nécessaires à la gestion de crise, les réseaux de communication, d'électricité, d'eau etc.

Pour aller plus loin...

Des cartes interactives recensant les risques naturels et autres risques sont disponibles sur le site internet suivant

<http://www.georisques.gouv.fr/cartes-interactives#/>

Les connaissances développées dans ce cours de Mécanique des Roches peuvent également s'appliquer entre autres aux risques liés aux effondrements de cavités par exemples. Une documentation concernant les risques d'effondrement se trouve sur le site internet suivant:

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/PPRN_cavités_201210_0.pdf