

ISS – Mécanique des Roches



Stabilité des massifs rocheux Risques & Parades

UN EXEMPLE DANS UN CONTEXTE DE RÉSEAU

ÉVÉNEMENT

27-28 août 2023 — Freney, Maurienne (Savoie). Falaise de la Praz (Roche Fleurie)

- plus de 10 000 m³ de roche détachés, tunnel ferroviaire de la Brèche recouvert de débris
- le plus gros éboulement sur le réseau ferré français depuis 45 ans.

10 000 m³

de roche détachée en une seule fois

19 mois

de fermeture de la ligne ferroviaire
(réouverte le 31 mars 2025)

13 M€

de travaux de confortement et
reconstruction (SNCF Réseau)

CONSÉQUENCES RÉSEAU

Ligne internationale Chambéry–Modane–Turin totalement coupée (fret + TGV Paris–Milan ; 3 à 4 Mt de fret/an habituellement) · poids lourds déviés par le tunnel du Mont-Blanc · A43 fermée ~12 jours (réouverte le 8 sept. 2023).

Exemples routiers : Gorges de la Bourne et de l'Arly

UN EXEMPLE DANS UN CONTEXTE DE RÉSEAU

Chute de blocs : risque local, mais conséquences réseau potentiellement considérables sur des territoires enclavés !

Le risque ne se résume pas au volume du bloc :
il combine aléa, exposition, vulnérabilité et conséquences.

Sommaire

1. Cadrer le risque
2. Caractériser l'aléa de départ
3. Modéliser la propagation
4. Choisir la stratégie de protection
5. Dimensionner et maintenir les ouvrages

Cadrer le risque

Typologies, enjeux et chaîne de décision



Differents types d'instabilités rocheuses

- Classification usuelle:
 - $V < 0.1 \text{ m}^3$: *chute de pierres*
 - $0.1 < V < 100 \text{ m}^3$: *chute de bloc*
 - Définition (chute de pierres et blocs): type de mouvement de terrain lors duquel un volume de roche se met en mouvement depuis un versant (en particulier à partir de discontinuités, de joints stratigraphiques..) , et se déplace vers l'aval par une succession de chutes libres, rebonds, et phases de roulemen
 - Vitesse : jusqu'à 30 m/s sur pente, voir plus si chute libre !
 - $V > 100 \text{ m}^3$:
 - *éboulement en masse et éboulement en grande masse*
 - *avalanche rocheuse*
- Concernent : falaises (montagne et littoral), affleurements rocheux, carrières...

Mouvement
de bloc isolé



Mouvement
en masse
(« fluide »)

Differents types d'instabilités rocheuses

Terminologie proposée pour les volumes unitaires mobilisés

Pierres	Petits Blocs	Blocs	Gros blocs
Inférieur à quelques décimètres cubes < 0,01 m ³ (10 l)	Quelques décimètres à un mètre cube 0,01 m ³ à 1 m ³	Du mètre cube à quelques mètres cubes 1 à 10 m ³	Dizaine de mètres cubes et plus > 10 m ³

Terminologie proposée pour les volumes totaux mobilisés

Écroulement en grande masse	Éboulement en grande masse	Éboulement en masse limitée	Chute de pierres ou de blocs
Million de mètres cubes et plus > 1 000 000 m ³	Dizaine à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes 10 000 à 1 000 000 m ³	Quelques centaines à milliers de mètres cubes 100 à 10 000 m ³	Jusqu'à une centaine de mètres cubes < 100 m ³

APPLICATION A L'ALÉA ROCHEUX

Risque = Aléa x Exposition x Vulnérabilité x Coût



« conséquences » (économique, personnes)

Aléa = Probabilité d'occurrence x Intensité



=énergie cinétique du bloc

Probabilité d'occurrence = P(départ) x P(atteinte)

période de retour « distance de propagation »

Chutes de blocs en France

8 200

événements de chute de blocs recensés
Alpes françaises (6 départements) · 1900-2019

26

 événements avec victimes (blessés ou tués)

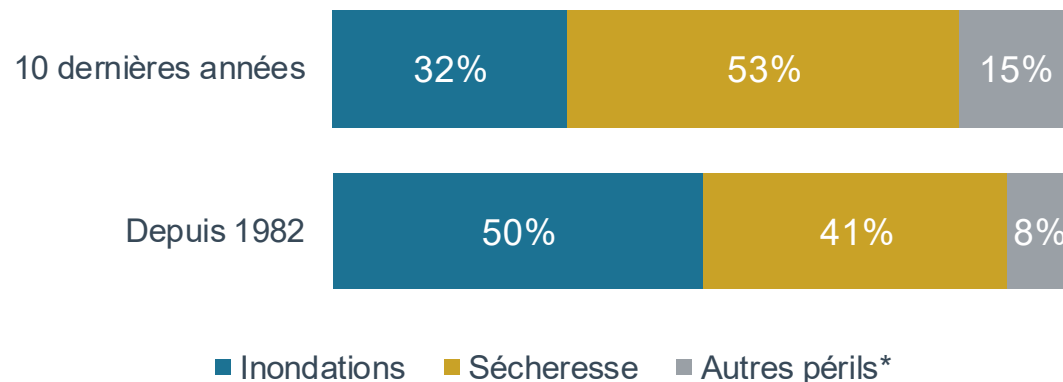
Eckert et al., 2020 · SDES, Chiffres clés des risques naturels, éd. 2023

RAPPEL D'ACTUALITÉ

Haute-Savoie, août 2025 — chute de pierres sur route : **2 morts**

Le risque reste statistiquement faible, mais occasionnellement meurtrier en France métropolitaine.

Coût pour les assurances — régime Cat Nat français



Répartition de la sinistralité indemnisée par péril (CCR)

SCÉNARIO EXTRÊME CHIFFRÉ PAR LA CCR

Éboulement du Mont Granier (Chartreuse, Savoie)

≈ 800 M€ de dommages assurés modélisés

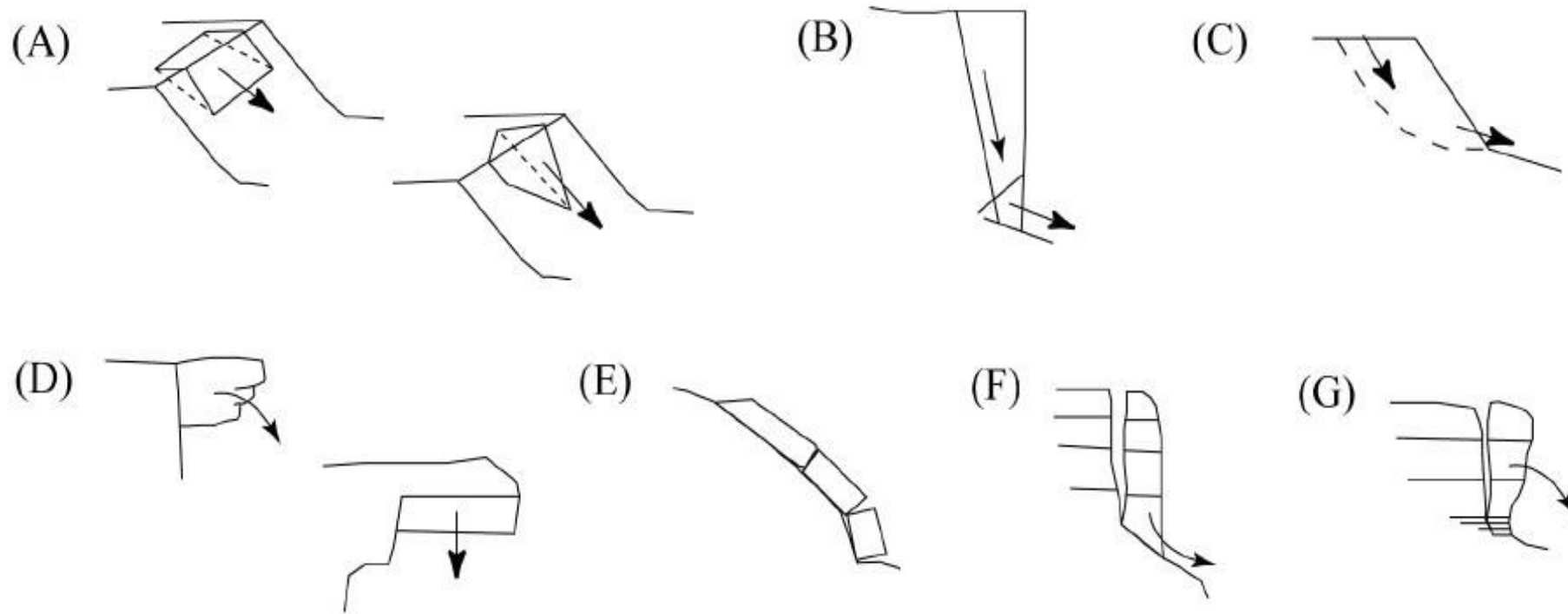
* Autres périls : mouvements de terrain (dont chutes de blocs), séismes, avalanches, submersion marine — non isolés par péril dans les statistiques publiées. Sources : CCR, Bilan Cat Nat 1982-2025 (2026) · France Assureurs, 2024.

Caractériser l'aléa de départ

Volumes mobilisables, occurrence, suivi et incertitudes



- Initiation
 - Dépendant de nombreux paramètres (Géologie,..)
 - Différents mécanismes de départ (glissement plan, dièdre..)
- Propagation
 - Simulation des trajectoires : cinématique + points d'arrêt
 - Interaction avec le milieu environnant (forte dépendance à celui-ci)
- Arrêt
 - Atteinte des enjeux

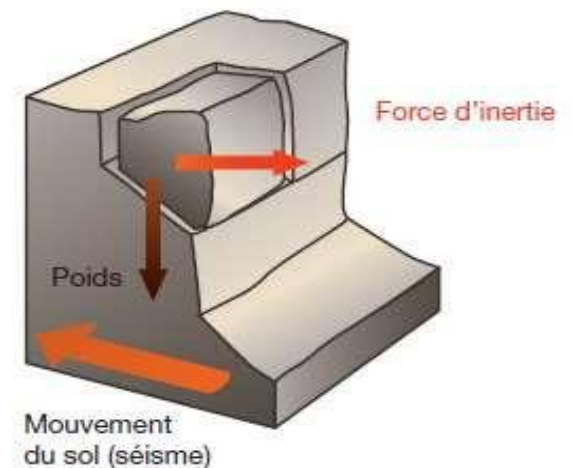
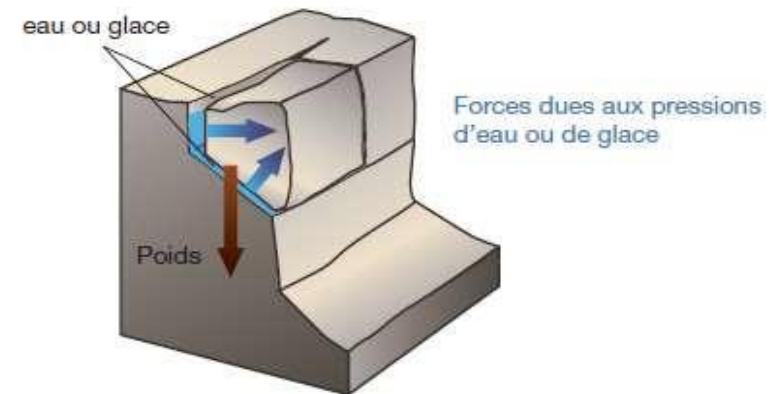


Mécanismes de rupture d'éboulements rocheux :

- (A) glissements plan et dièdre,
- (B) glissement composé,
- (C) glissement rotationnel,
- (D) rupture de surplomb ou de dalle de toit,
- (E) rupture de banc,
- (F) rupture de colonne en pied,
- (G) basculement de colonne.

Causes possibles

- Pluie, eaux souterraines
- Cycles gel-dégel
- Accumulation neigeuse
- Dilatation thermique
- Séisme
- Vibrations/explosions
- Racines
- Animaux
- Feux de forêt
- Erosion en pied (vent, eau)

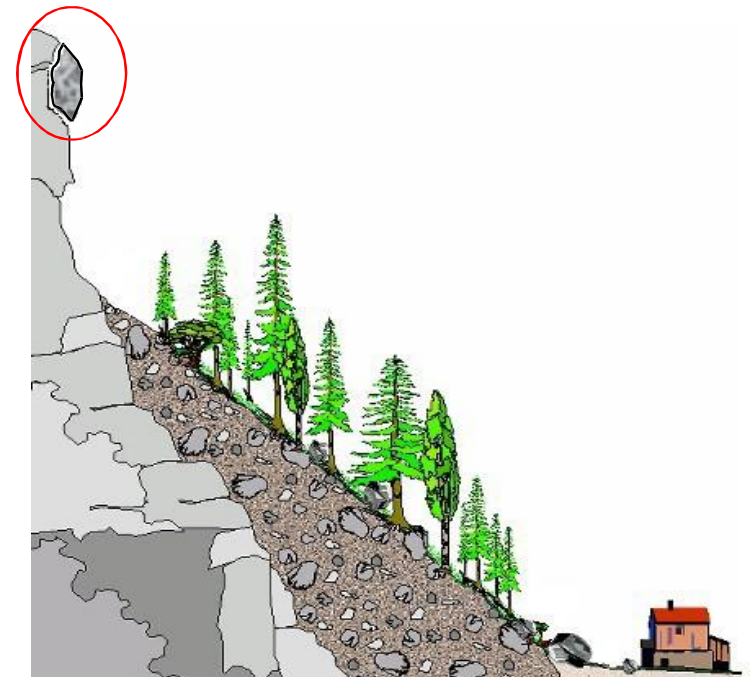


Le changement climatique agit surtout sur les conditions de préparation et les déclencheurs,

APPROCHE DE L'INGENIERIE

Risque = Aléa x Exposition x Vulnérabilité x Coût

- 1 - Estimation du volume mobilisable
 - Volume total
 - Taille et forme à l'arrivée
- 2 - Terme probable d'occurrence
 - Désigne l'urgence à traiter le risque
 - 6 Qualificatifs : 'Imminent' à 'échelle géologique'
- 3 – Propagation (trajectographie)
- 4 – Vulnérabilité de l'enjeu
 - Phénomène soudain et propagation très rapide
 - Nombre et temps de séjour dans les zones exposées



Estimation du volume mobilisable

- Volume total
- Taille et forme à l'arrivée

Probabilité d'occurrence

(Terme probable d'occurrence)

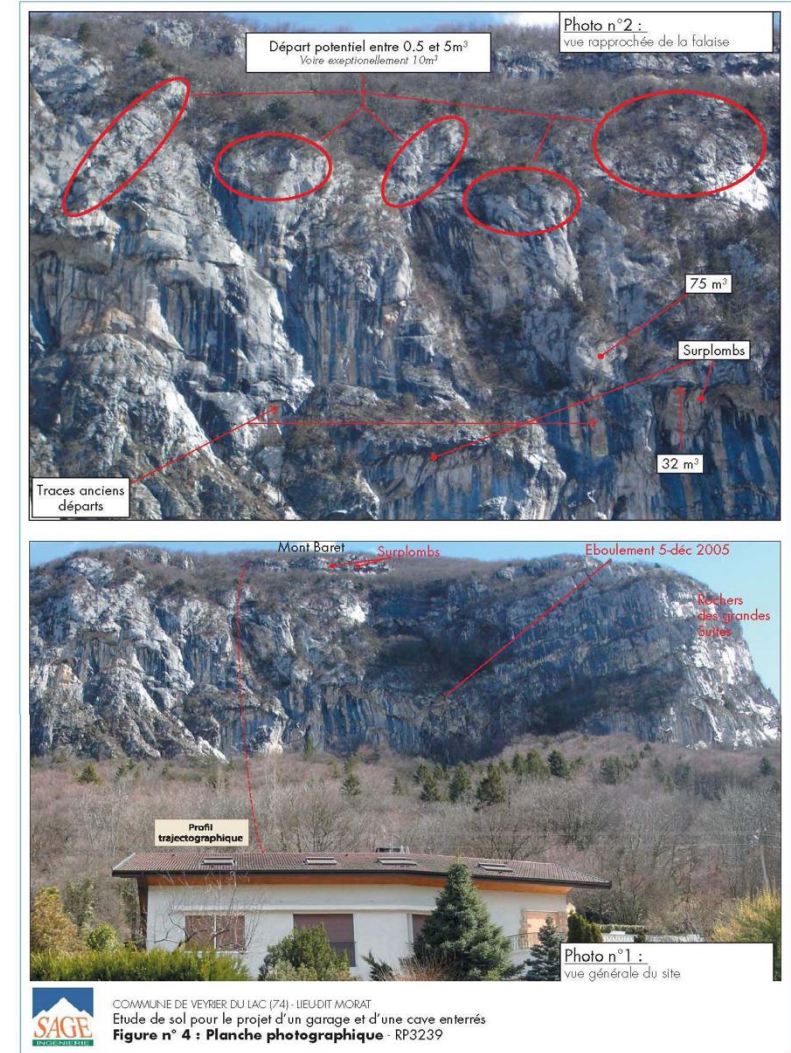
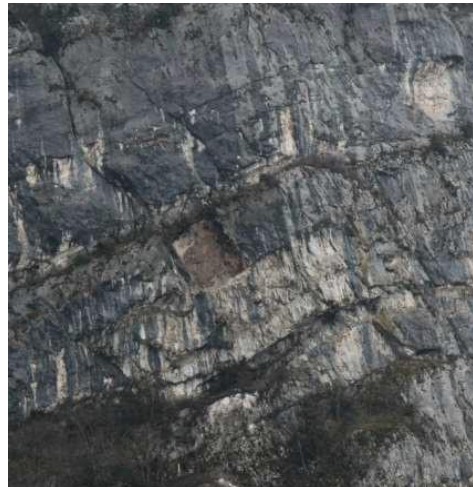
- Désigne l'urgence à traiter le risque
- 6 Qualificatifs : 'Imminent' à 'échelle géologique'

Estimation du volume mobilisable

ALÉA DE DÉPART

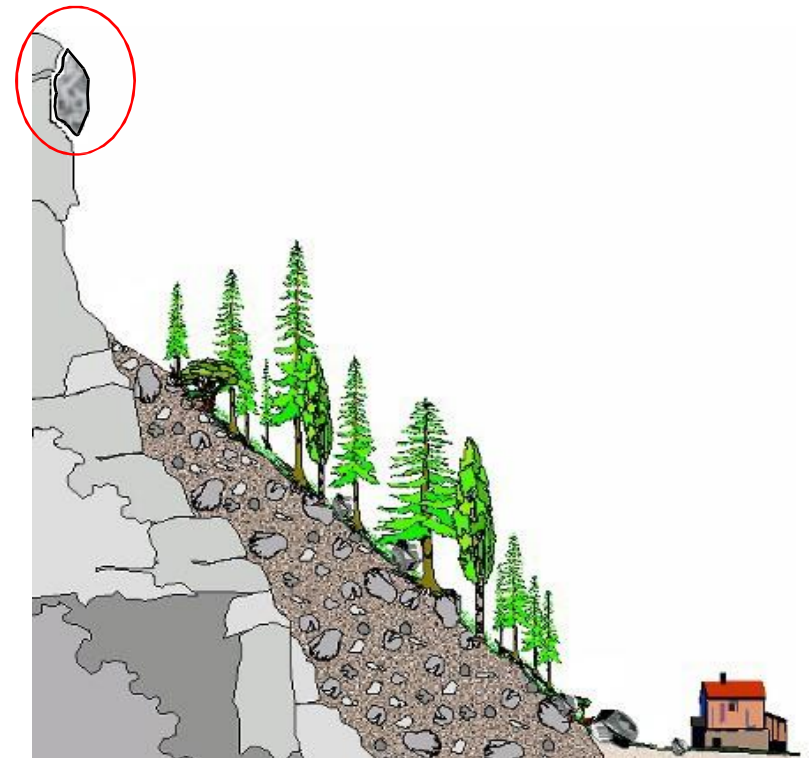
Volumes déterminés par :

- Observation de la paroi (compartiments rocheux, cicatrices)
- Observation des blocs éboulés
- Analyse structurale
- Relevés Lidar



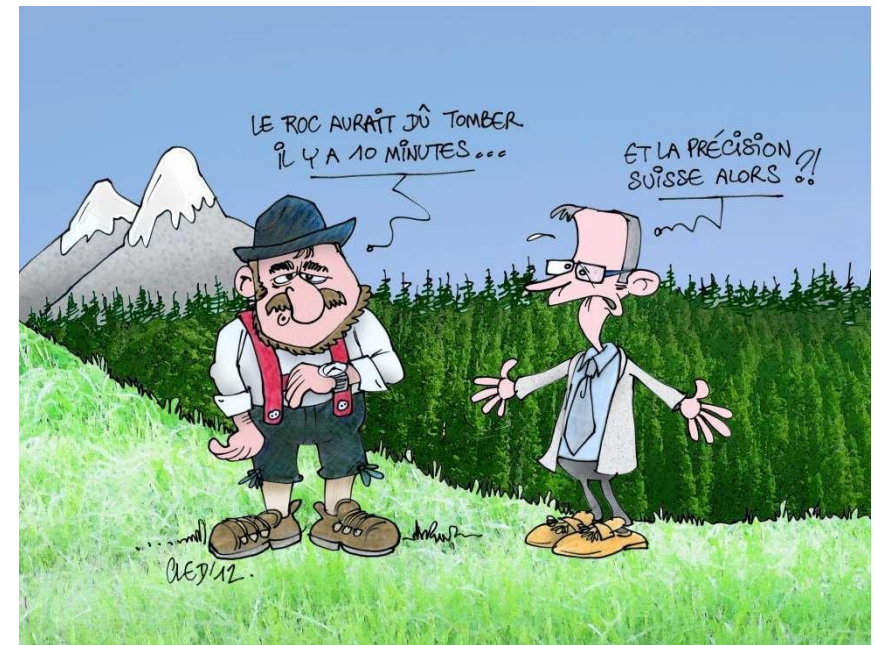
APPROCHE SIMPLE DE L'INGENIERIE

- 1 - Estimation du volume mobilisable
 - Volume total
 - Taille et forme à l'arrivée
- 2 - Terme probable d'occurrence
 - Désigne l'urgence à traiter le risque
 - 6 Qualificatifs : 'Imminent' à 'échelle géologique'
- 3 – Propagation (trajectographie)
- 4 – Vulnérabilité de l'enjeu
 - Phénomène soudain et propagation très rapide : Nombre et temps de séjour dans les zones exposées



PROBABILITÉ D'OCCURRENCE

- Détermine l'urgence à traiter le problème
- Avec instrumentation / mesures sur site avec mvt:
 - assez à très précis
- Sans instrumentation:
 - Très peu précis
 - Approche pragmatique à dire d'expert
 - 6 Qualificatifs : 'Imminent' à 'échelle géologique'



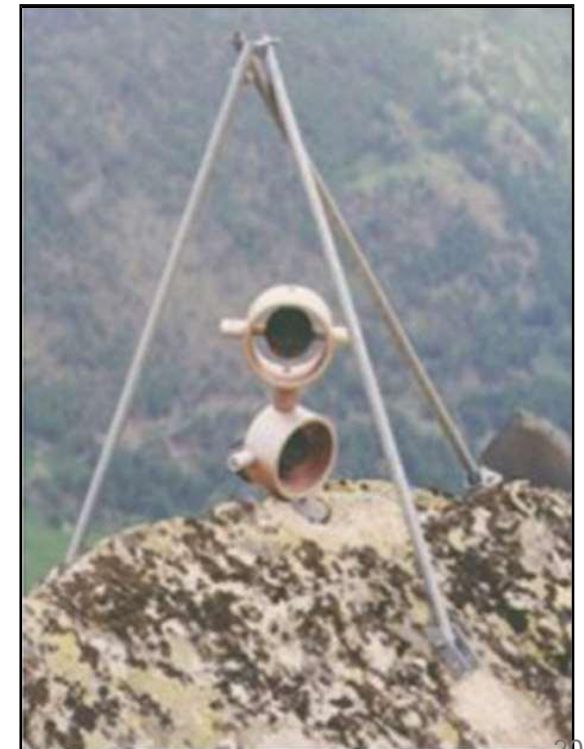
Le volume mobilisable et la probabilité sont des estimations assorties d'incertitudes.
Quelle information manque-t-il pour décider ?

	Spatial data type	Range	Accuracy	Spatial resolution or point density	Time resolution
Airborne or satellite optical imaging	Continuous raster	n.a.	n.a.	~5 x pixel size	Days-years
Airborne laser scanning	XYZ point cloud	Tens of m to kilometers	Tens of cm in xyz (~30 cm at 1 km range)	1 - 100 point.m-2	Days - years
Advanced InSAR	Uneven, discontinuous point distribution	n.a.	~1 mm (line of sight displacement)	pixel size of 1 - 30 m	Months
Terrestrial photogrammetry	Continuous raster	m to km	½ x pixel size (~5 cm at 500m)	Cm (~10 cm spacing at 500 m)	Minutes - years
Distancemeters	Point	5 km max on reflectors	mm (1mm at 1 km range)	Max 1.m-2	Seconds - years
Terrestrial laser scanning	XYZ point cloud	1.5 km max on rock	cm in xyz (~1 cm at 100m)	10 - 10000 point.m-2	Hours - years
GBInSAR	Continuous raster	4 km max on rock	~0.1 mm (line of sight displacement)	pixel size of dm - m	Minutes - years
GNSS	Point	n.a.	~10cm in kinematics / 1 mm horizontal and 1 cm vertical in static mode	Max 1.m-2	Minutes - years
Tiltmeter, crackmeter, extensometer	Point	mm to hundreds of m	0.1 mm - cm	Max 1.m-2	Seconds - years

OCCURRENCE: COMPARTIMENT BIEN IDENTIFIÉ

Pratiques courantes :

- Instrumentation d'un site
- Suivi en temps réel des mouvements
- Déclenchement d'alerte



Suivi de falaise par scan laser terrestre

Utilisé quand un mouvement ou une déformation est suspecté.

Met en évidence les suivants..

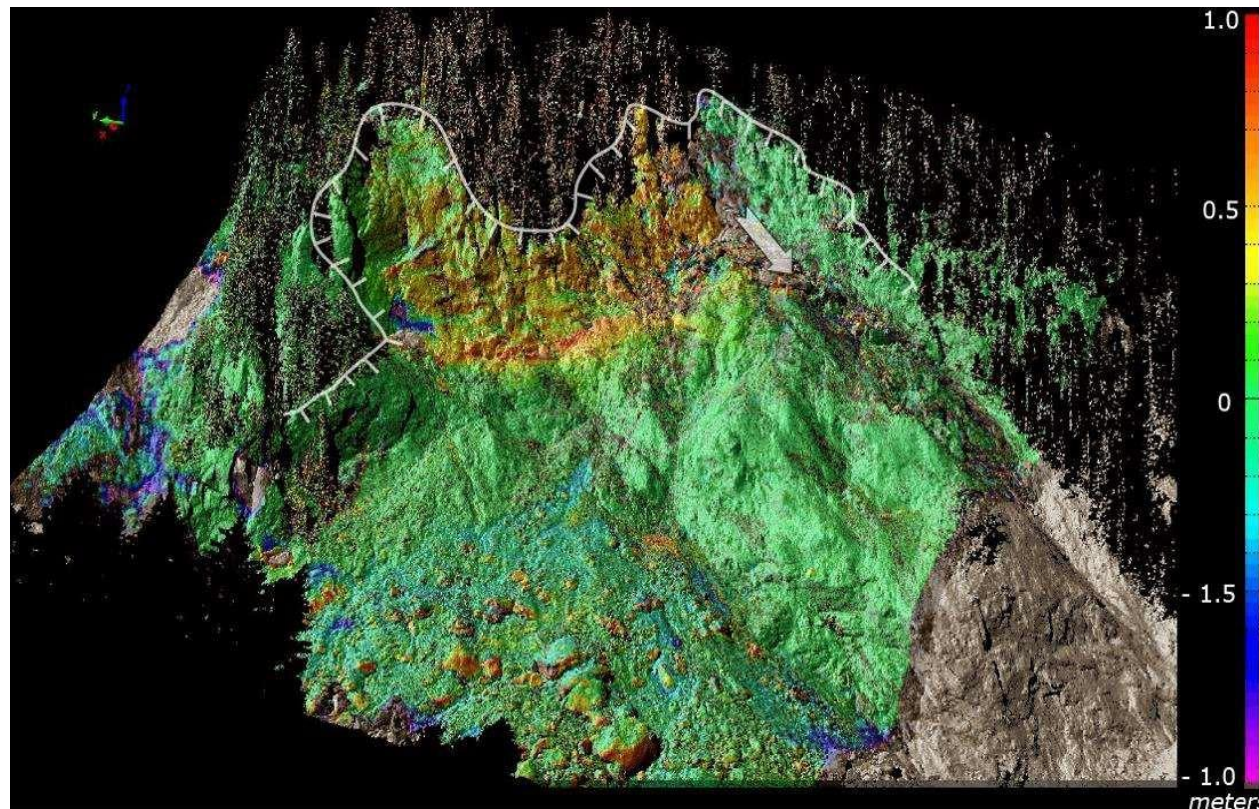
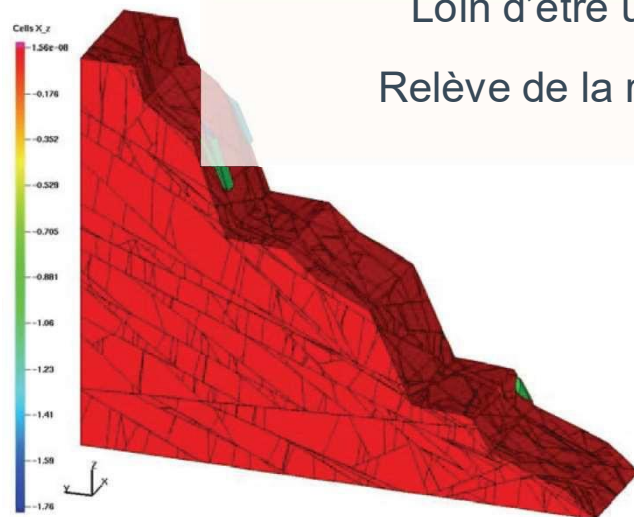


Figure 2.5. Terrestrial laser scanning imaging of displacement of the Val Canaria rockslide. The moving rock face (in yellow) is 40 m high. The displacement was measured between July 2007 and October 2009. The rock face collapsed the day after the second scan

MODÉLISATION DE LA STABILITÉ DES MASSES ROCHEUSES

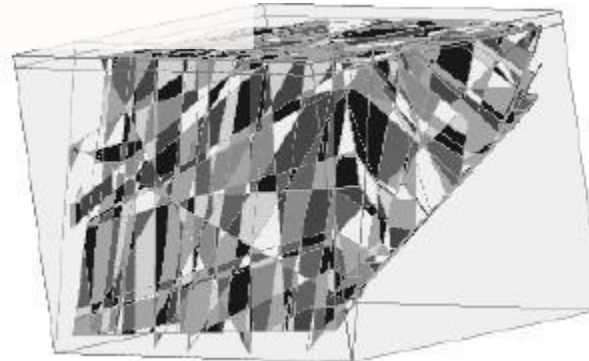
Deux points essentiels:

- Modèle mécanique de joint
- Réseau de fissures

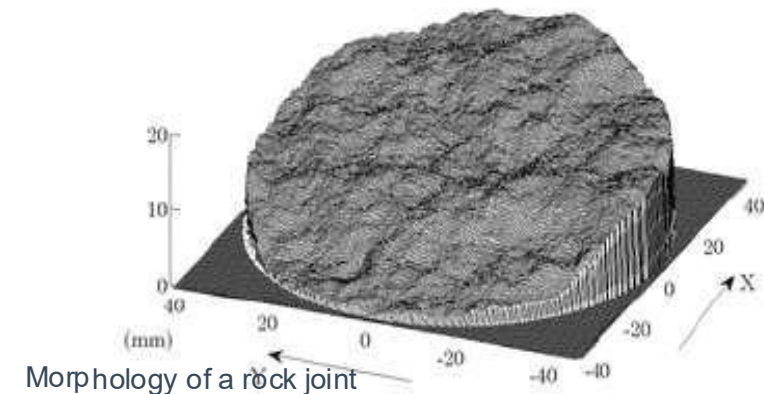


3D model of a rock slope (non-smooth contact dynamics method)

Loin d'être utilisée en ingénierie
Relève de la recherche, ou de l'expertise



Unstable volume of a slope (blocks are defined by statistically distributed discontinuities). RESOBLOCK software

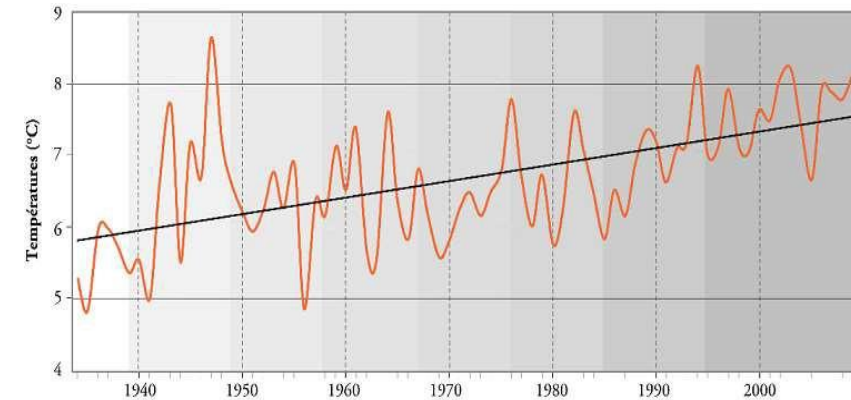


(Merrien-Soukatchoff et al.)

INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

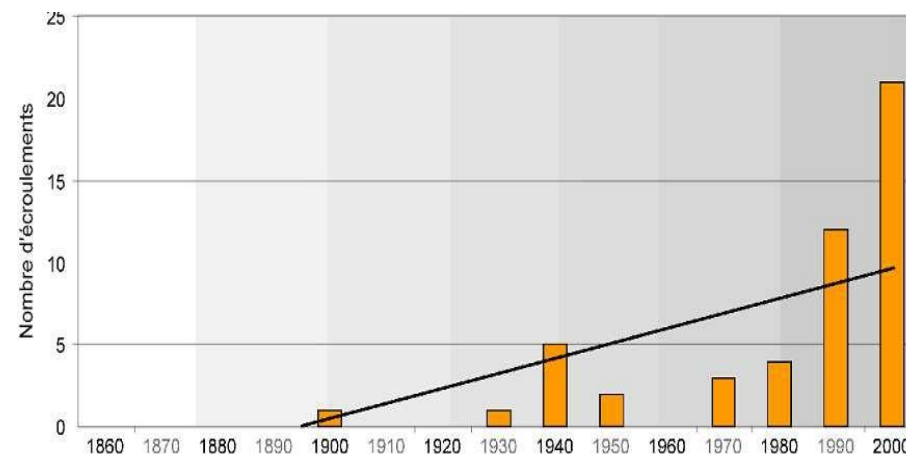
Evolutions attendues:

- Elévation de l'isotherme zéro
- Augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements pluvieux 'extrêmes'



----- Température moyenne annuelle de l'air à Chamonix depuis 1934 : +1,7° !

Nombre d'éboulements, de plus de 500m³ et par décennie, aux Drus et dans les Aiguilles de Chamonix depuis la fin du Petit Âge Glaciaire



INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

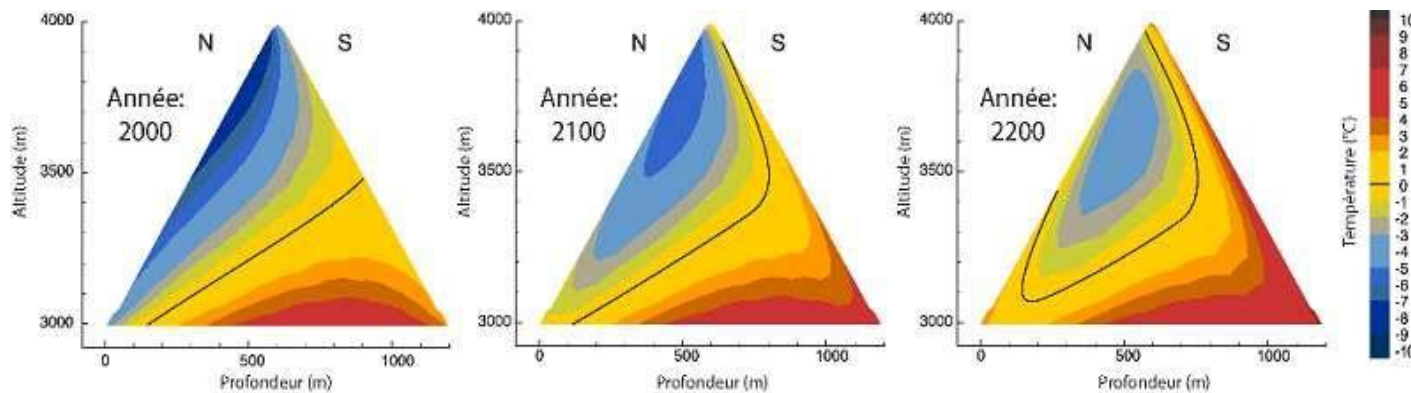
glace encore présente
deux semaines après
l'éboulement



Ecoulements d'eau résultant de la fusion de la glace

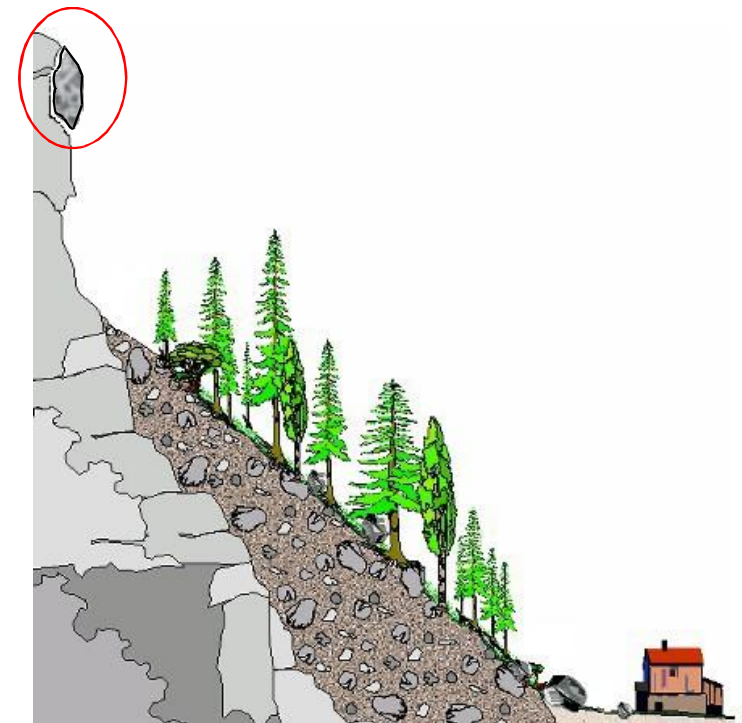
ALÉA DE DÉPART

Eboulement de la Tour des Grandes Jorasses
(massif du Mont Blanc), septembre 2007



Températures dans une arête rocheuse
présentant des faces nord et sud, dans les
conditions actuelles, après un siècle puis deux
siècles de réchauffement par siècle de $+3,5^{\circ}\text{C}$ en
face nord et $+2,5^{\circ}\text{C}$ en face sud (J. Noetzli.).

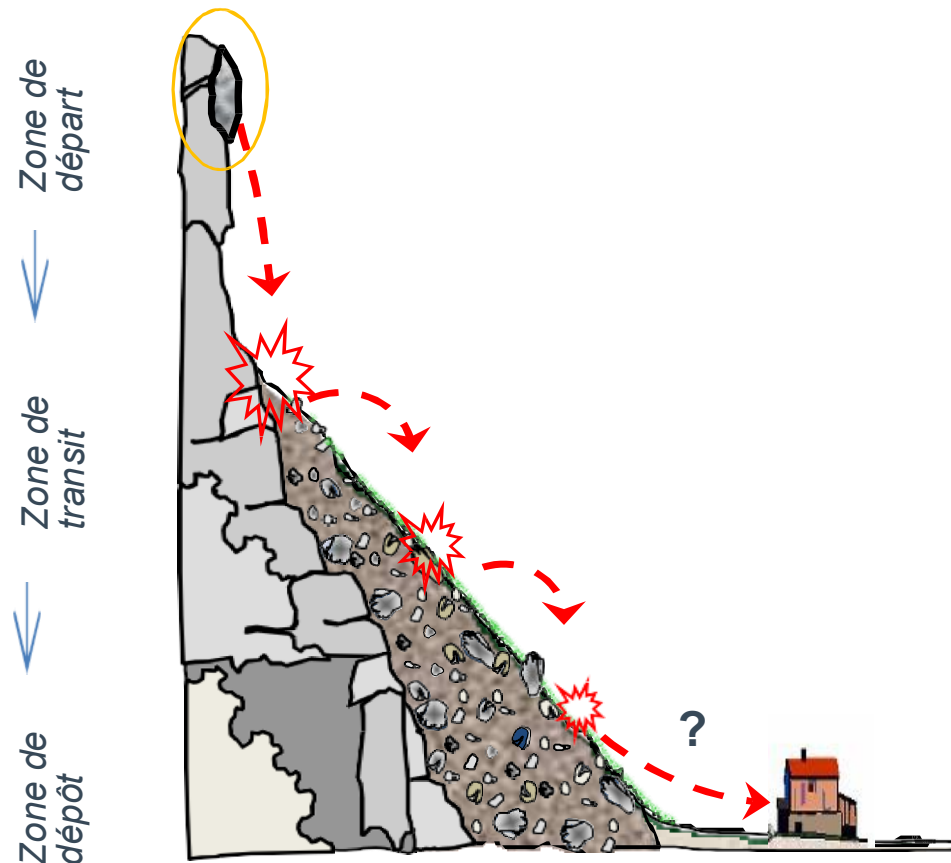
- 1 - Estimation du volume mobilisable
 - Volume total
 - Taille et forme à l'arrivée
- 2 - Terme probable d'occurrence
 - Désigne l'urgence à traiter le risque
 - 6 Qualificatifs : 'Imminent' à 'échelle géologique'
- 3 – Propagation (trajectographie)
- 4 – Vulnérabilité de l'enjeu
 - Phénomène soudain et propagation très rapide : Nombre et temps de séjour dans les zones exposées



Modéliser la propagation

Ligne d'énergie, trajectoires, données et calage





Principales questions

- Point d'arrêt
- Energie cinétique

Finalités

- Zonage de l'aléa
- Définition de la stratégie de protection (ouvrages)

Modèles de propagation

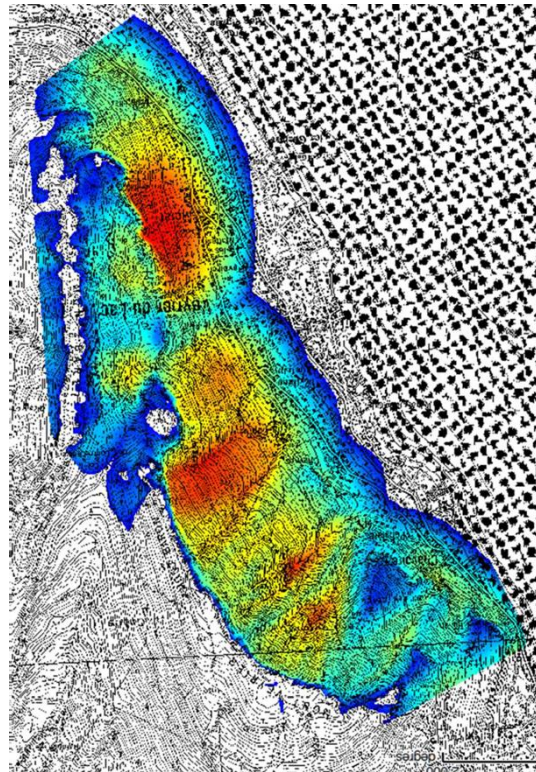
- Ligne d'énergie
- Simulations numériques des trajectoires

Modélisation des éboulements en masse : non abordé

LIGNE D'ÉNERGIE / SIMULATION DES TRAJECTOIRES

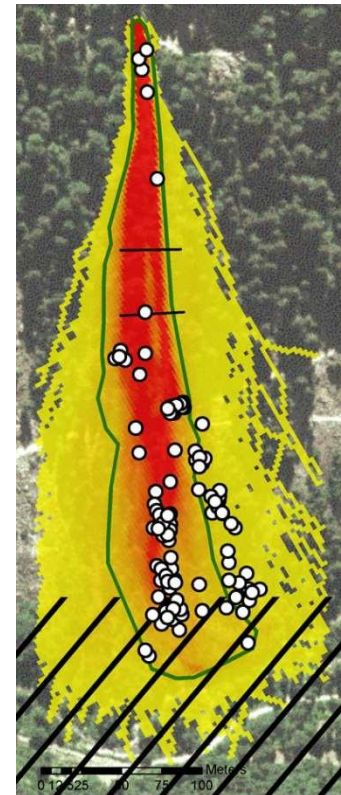
Ligne d'énergie

⇒ identification des zones sensibles à l'échelle 'régionale'



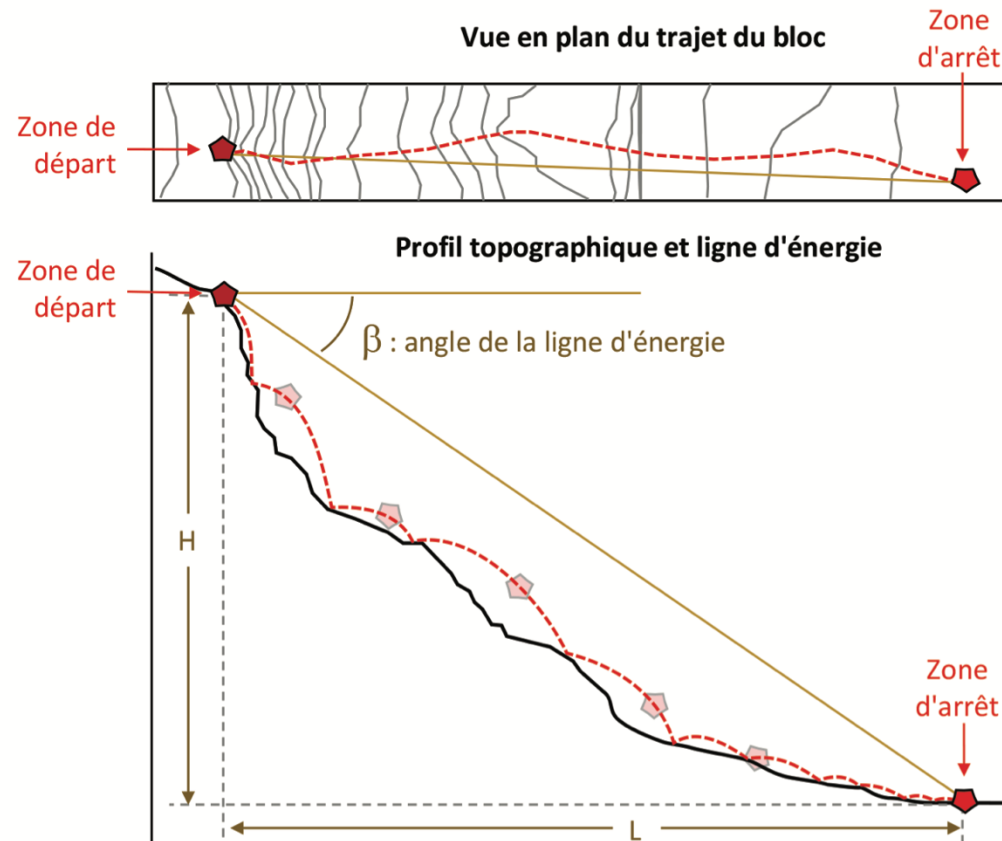
Simulation :

⇒ calcul de l'aléa à l'échelle du site



Une trajectoire est une enveloppe probabiliste, non une courbe exacte.²⁸

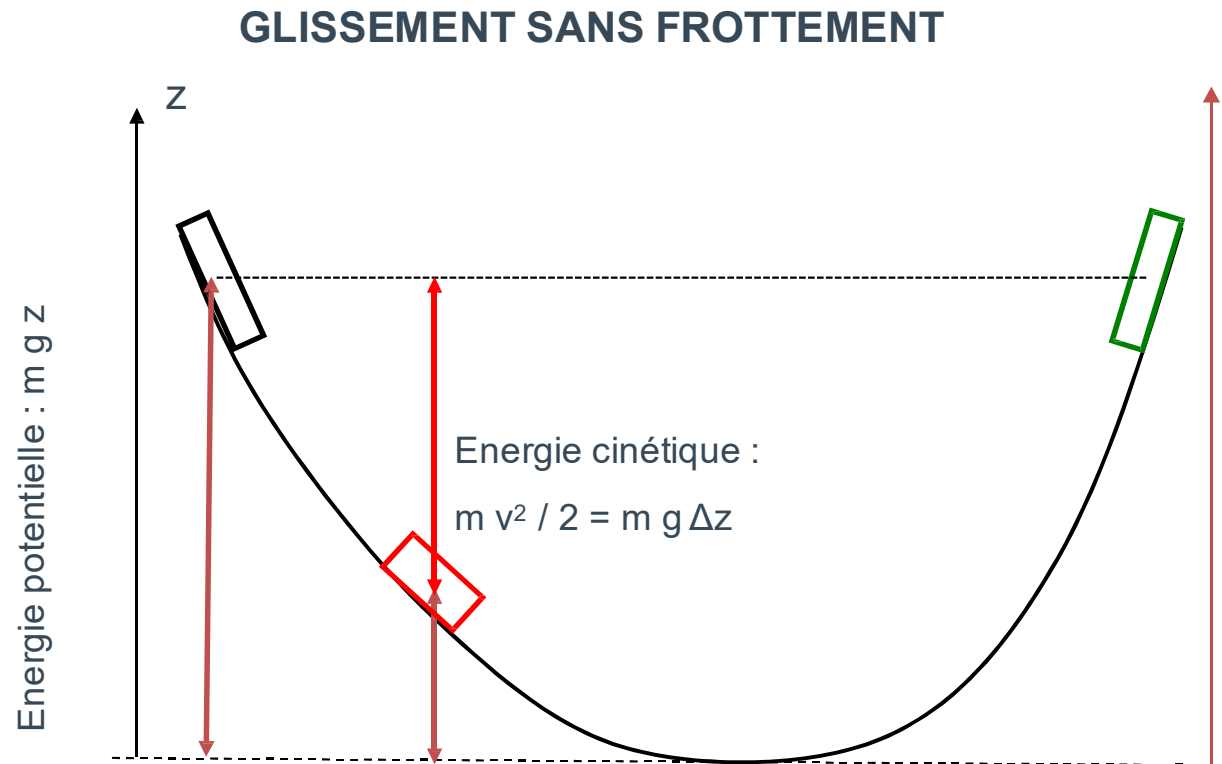
LIGNE D'ÉNERGIE : PRINCIPE



Postulat : la distance et le dénivelé parcourus par un bloc depuis son point de chute initiale sont liés.

Ligne d'énergie : ligne fictive qui relie le point de départ d'un projectile à son point d'arrêt. (incliné de β par rapport à l'horizontale)

LIGNE D'ÉNERGIE : PRINCIPE



LIGNE D'ÉNERGIE : VALEURS TYPIQUES

REX de plusieurs centaines d'éboulements rocheux montre que β correspondant à des chutes de blocs isolés :

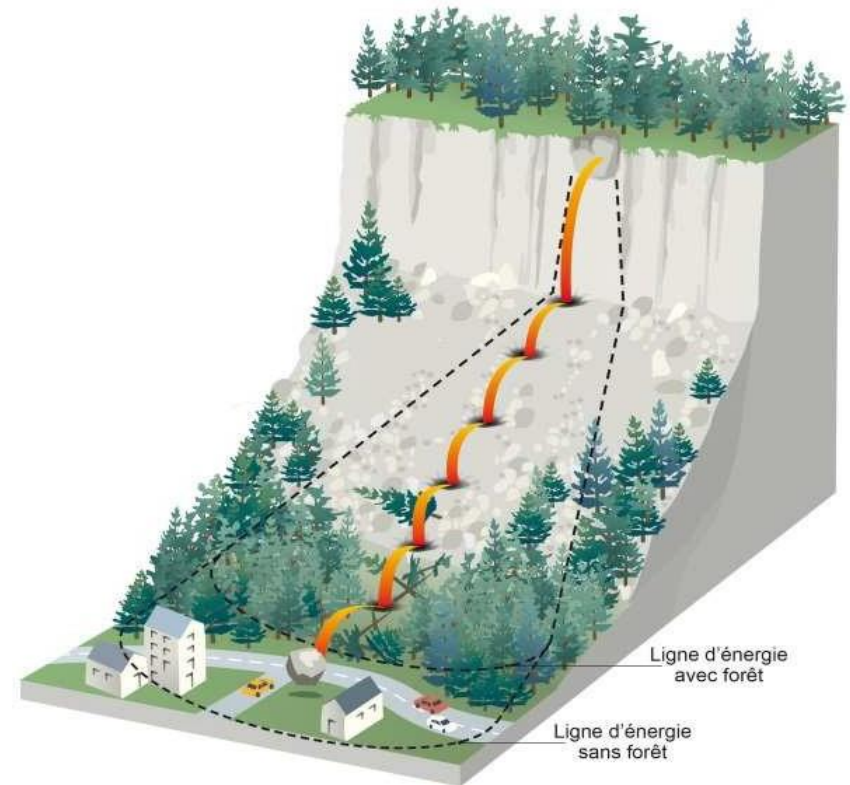
- sont quasi systématiquement supérieurs à 24 - 26°;;
- peuvent dépasser 45°, et atteindre près de 60° dans des contextes morphologiques particuliers tels que des parois rocheuses au droit de zone de replats.

Auteurs	Angle géométrique	
	Min.	Max.
Shreve (1968)	26.6°	38.7°
Hsü (1975)	32.0°	32.0°
Onofri & Candian (1979)	28.8°	41.7°
Grunder (1984)	33.1°	34.4°
Moser (1986)	34.0°	43.0°
Domaas (1985 in Toppe 1987)	33.0°	33.0°
Mac ewen (1989)	31.0°	31.0°
Gerber (1994)	33.5°	38.0°
Meissl (1998)	29.5°	48.5°
Heinimann <i>et al.</i> (1998)	33.5°	38.0°
Focardi & lotti (2001)	27.5°	30.0°
Ayala-carcedo <i>et al.</i> (2001)	29.1°	38.9°
Jaboyedoff & Labouise (2003)	33.0°	33.0°
Jaboyedoff & Labouise (2011)	32.6°	35.6°
Corominas <i>et al.</i> (2003)	27.6°	55.0°
Dorren & Berger (2005, 2006)	31.9°	38.0°
Copons <i>et al.</i> (2009) site a	36.9°	56.3°
Copons <i>et al.</i> (2009) site b	28.8°	42.0°
Hutter <i>et al.</i> (2005) modèle réduit	30.0°	37.0°
Scheidegger (1973)	29.7°	39.7°
Marquinez <i>et al.</i> (2002) cas 1	32.5°	40.9°
Marquinez <i>et al.</i> (2002) cas 2	29.4°	38.5°
Antoniou & Lekkas (2009)	35.0°	35.0°
Deparis <i>et al.</i> (2008)	31.6°	47.2°
Hyndman & Hyndman (2009)	33.0°	33.0°
Berger <i>et al.</i> (2009) sans forêt	27.7°	33.9°
Berger <i>et al.</i> (2009) avec forêt	31.3°	37.9°
BRGM (données MEZAP - 2758 valeurs)	25.0°	379.7°
RTM (données 2011-2013 - 192 cas)	24.7°	58.4°

LIGNE D'ÉNERGIE : Méthode des cônes

L'application en 3D (méthode des cônes) de la méthode de la ligne d'énergie est réalisée en considérant que la propagation se réalise au sein d'un cône de sommet la zone de départ

- de pente = la valeur de la ligne d'énergie
- et d'ouverture un angle dit de « dispersion » variable entre :
 - 10° à 20° pour des versants réglés homogènes
 - près de 30° pour des topographies irrégulières.

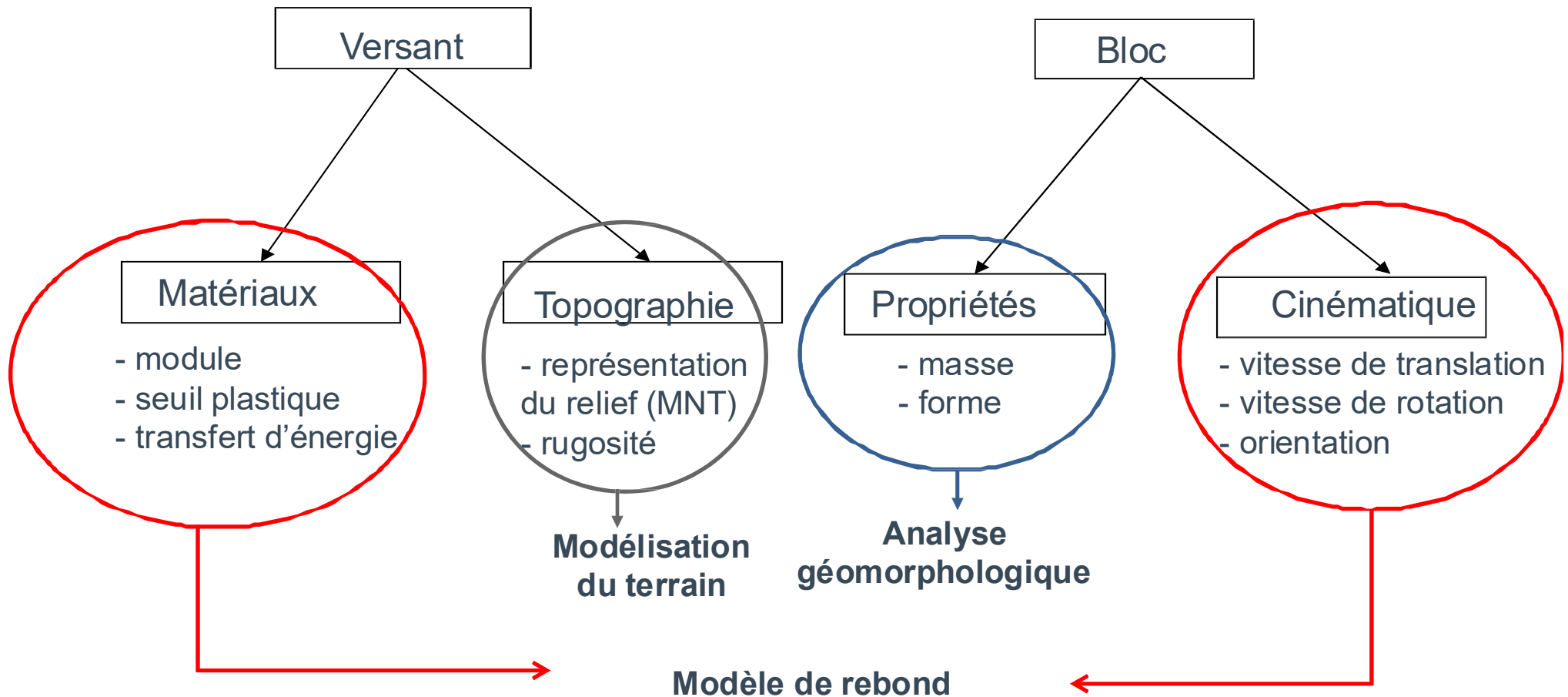


PRINCIPES

- ☐ Zone de départ et volume concerné connus
- ☐ Trajectoire = composition de chute libre + rebond + roulement + glissement
- ☐ Fonction de la topographie, des caractéristiques du sol, du couvert végétal, de la forme du bloc...
- ☐ Peut s'accompagner de fracturation
 - ☐ Extrêmement aléatoire !
- ☐ Outils de simulation numérique:
 - 2D ou 3D
 - Déterministes ou probabilistes
 - 'point matériel' ou forme réelle
 - Grande variété de lois de rebond



PARAMÈTRES INFLUENTS



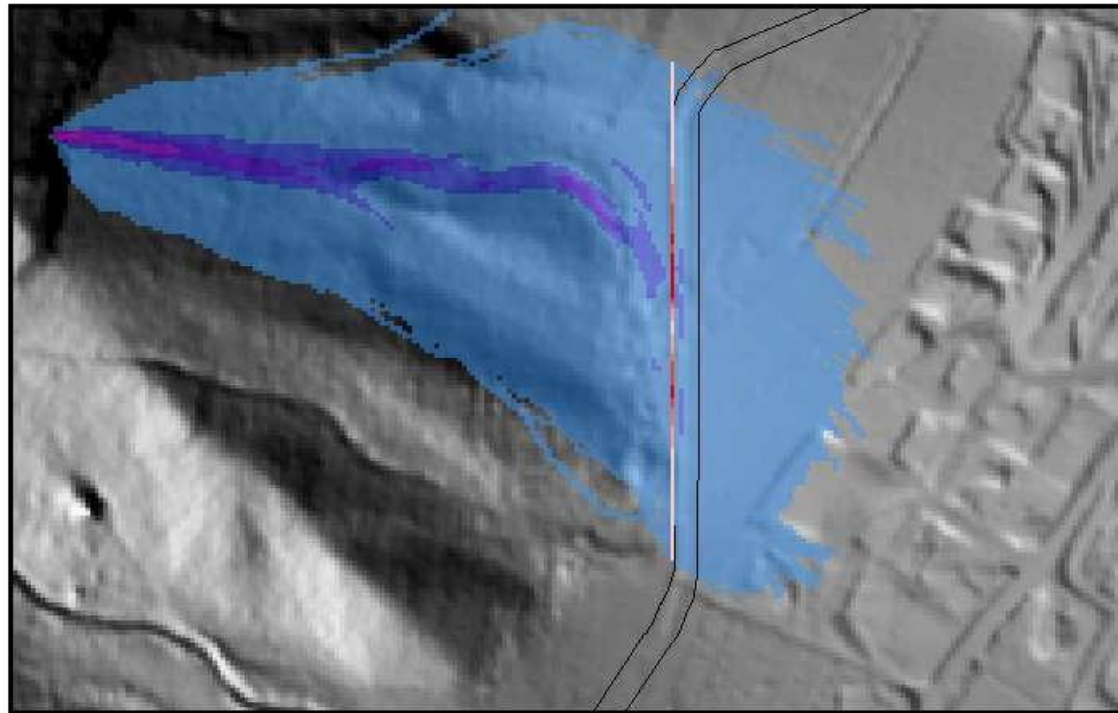
MODÈLES 2D



Mais :

- propagation du bloc suivant un axe prédéfini (ligne de plus grande pente ou à dire d'expert)
- Interpolation entre profils

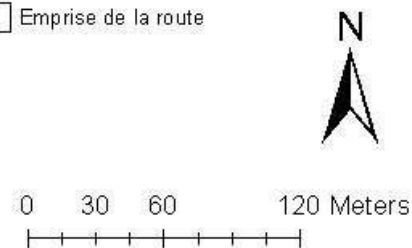
MODÈLES 3D



Fréquence de passage (%) Nombre de passage  Emprise de la route

0 - 0.5
0.5 - 1.1
1 - 2
2 - 3
3 - 4.96

0
0 - 28 000
28 000 - 57 000
57 000 - 100 000
100 000 - 235 000
235 000 - 492 527



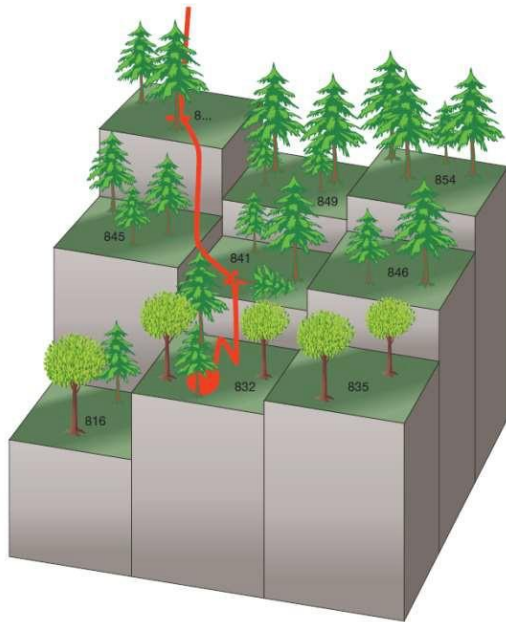
Mais :

- Résolution du MNT !

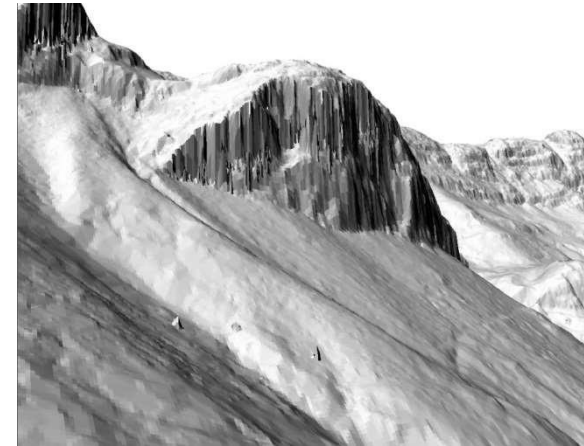
MODÈLES 3D

Représentation du terrain (MNT)

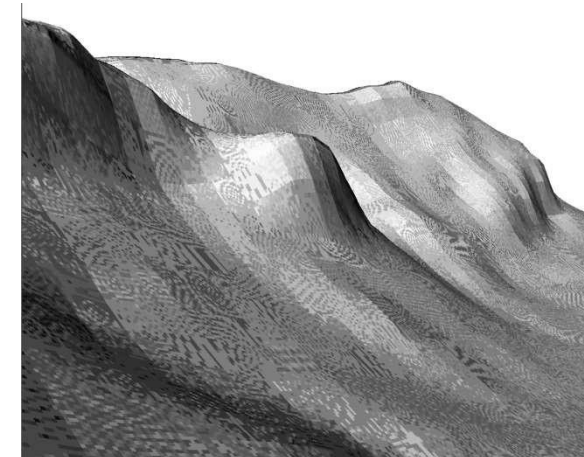
- TIN: représentation du terrain par des triangles
- Raster : représentation du terrain par 'pixels', d'altitude variable



Résolution : 1m



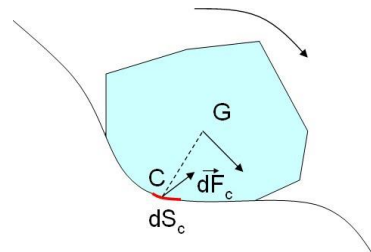
Résolution : 50m



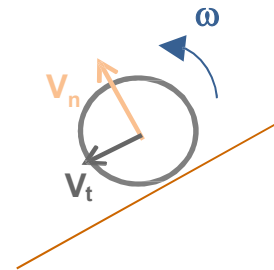
Compromis entre précision de la
représentation et temps de calcul !

Mécanique du rebond

Approche analytique



$$\begin{aligned} \int_{S_c} d\vec{F}_c &= m_b \vec{\gamma}_b \\ \int_{S_c} \vec{CG} \wedge d\vec{F}_c &= \vec{I} \ddot{\xi}_b \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} \vec{V}^{re} = \vec{V}^{in} + \int_{t^{in}}^{t^{re}} m_b \vec{\gamma}_b dt \\ \vec{\Omega}^{re} = \vec{\Omega}^{in} + \int_{t^{in}}^{t^{re}} \vec{I} \ddot{\xi}_b dt \end{cases}$$



Modèles courants (point matériel)

$$V_t^{re} = \underline{R}_t \times V_t^{in} \quad V_n^{re} = -\underline{R}_n \times V_n^{in}$$

$$\begin{bmatrix} V_t^{re} \\ V_n^{re} \\ \omega^{re} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{R}_t & 0 & 0 \\ 0 & \underline{R}_n & 0 \\ / & / & / \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t^{in} \\ V_n^{in} \\ \omega^{in} \end{bmatrix}$$

Valeurs usuelles de R_n et R_t

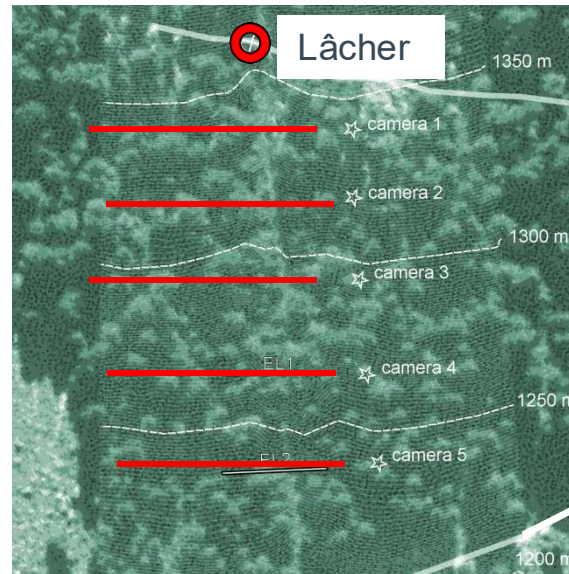
Reference	Value for R_n	Value for R_t	Value for R_E	Value for R_{TE}	Value for R_I	Remarks
Habib 1977	0.75-0.80					Based on experience in Italy
	0.5-0.6					Based on experience in Norway
Piteau & Clayton 1977	0.8-0.9	0.65-0.75				Solid rock
	0.5-0.8	0.45-0.65				Detrital material mixed with large rock boulders
	0.4-0.5	0.35-0.45				Compact detrital material mixed with small boulders
	0.2-0.4	0.2-0.3				Grass covered slopes
Wu 1985	0.2-0.8	0.5-0.75				Rock on rock or wood platform
Heierli 1985	0.95		0.9			Rock
	0.55		0.3			Gravel layer (35 cm)
	0.45		0.2			Gravel layer (70 cm)
	0.45		0.2			debris
Bozzolo & Pamini, 1986				0.7		Rock at a slope angle of 44°
				0.55		Debris at a slope angle of 57°
Descoeudres & Zimmermann 1987					0.4	Vineyard slopes
					0.85	Rock slopes
Hoek 1987	0.53	0.99				Clean hard bedrock
	0.4	0.9				Asphalt roadway
	0.35	0.85				Bedrock outcrops with hard surface, large boulders
	0.32	0.82				Talus cover
	0.32	0.8				Talus cover with vegetation
	0.3	0.8				Soft soil, some vegetation
Urciuoli 1988**	0.05-0.35	0.5-1	0.02-1			Rock block impacting limestone
	~0	0.24				Debris fan



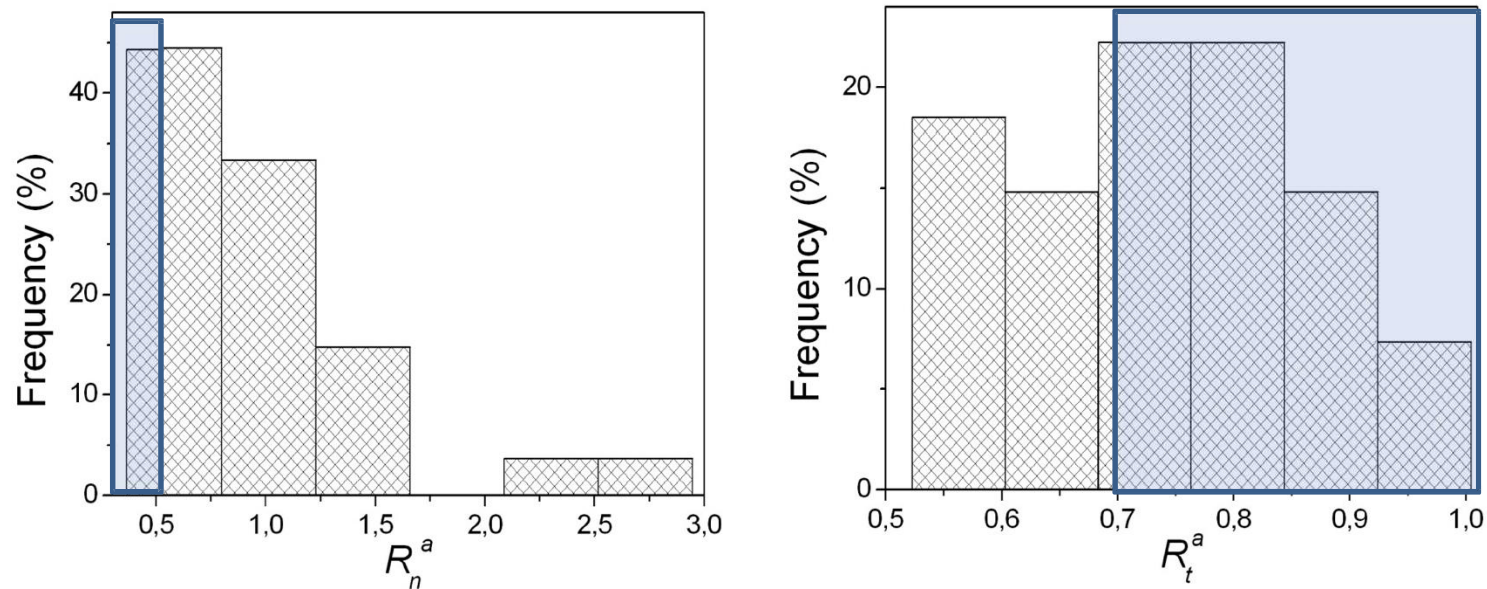
Définitions variables / plages variables / difficile à ajuster

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES COEFFICIENTS

Site expérimental: Vaujany. Pente boisée avec couloir d'avalanche (38°), 100 blocs lâchés, 5 caméras, 30 rebonds



VALIDITÉ DES COEFFICIENTS DE RESTITUTION APPARENTS



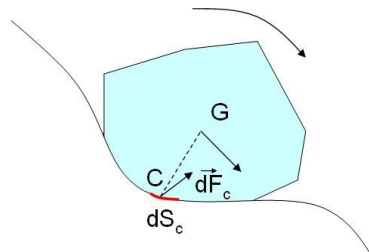
En bleu: plages de valeurs de R_n et R_t issues de la littérature

➡ Fort désaccord !

R_n et R_t ne sont pas intrinsèques au matériau (plasticité) et dépendent fortement des paramètres cinématiques du bloc (vitesse, vitesse de rotation, angle d'incidence!), de sa forme..

Mécanique du rebond

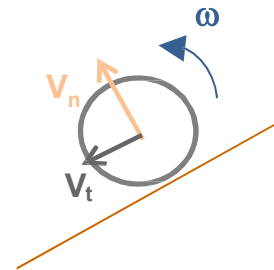
Approche analytique



$$\int_{S_c} d\vec{F}_c = m_b \vec{\gamma}_b$$

$$\int_{S_c} \vec{CG} \wedge d\vec{F}_c = \vec{I} \ddot{\xi}_b$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{V}^{re} = \vec{V}^{in} + \int_{t^{in}}^{t^{re}} m_b \vec{\gamma}_b dt \\ \vec{\Omega}^{re} = \vec{\Omega}^{in} + \int_{t^{in}}^{t^{re}} \vec{I} \ddot{\xi}_b dt \end{array} \right.$$



Modèles courants (point matériel)

$$\vec{v}_n^{re} = -\underline{R}_n \times \vec{v}_n^{in} \quad \vec{v}_t^{re} = \underline{R}_t \times \vec{v}_t^{in}$$

$$\begin{bmatrix} V_t^{re} \\ V_n^{re} \\ \omega^{re} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{R}_t & 0 & 0 \\ 0 & \underline{R}_n & 0 \\ / & / & / \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t^{in} \\ V_n^{in} \\ \omega^{in} \end{bmatrix}$$

Modèles stochastiques (point matériel)

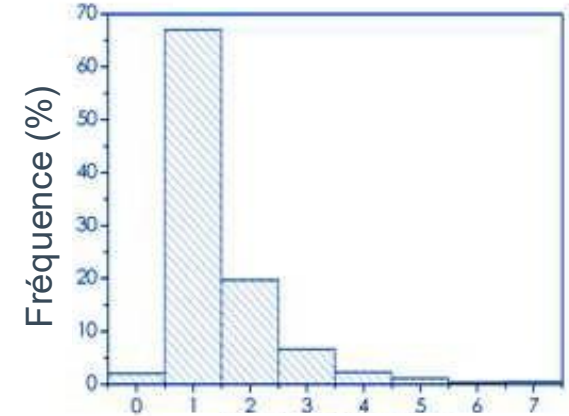
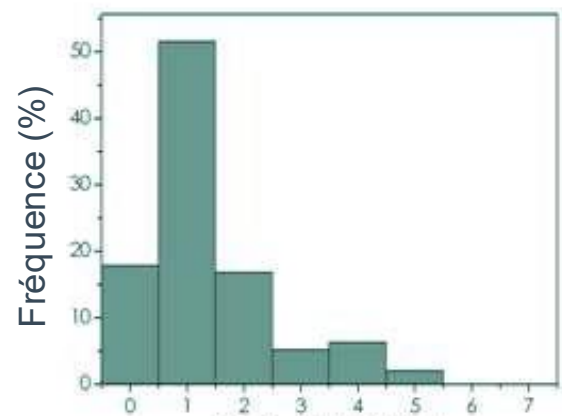
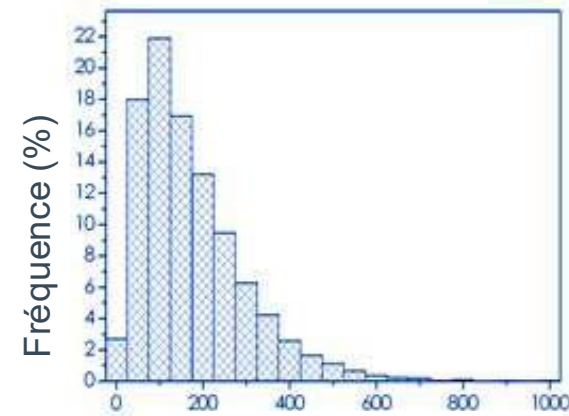
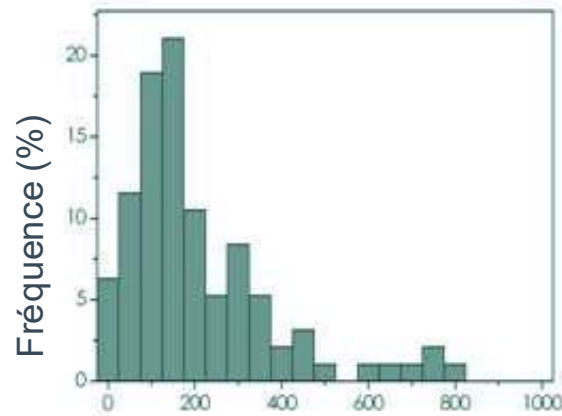
$$\begin{bmatrix} V_{x,r} \\ V_{y,r} \\ R_b \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}(p) & a_{12}(p) & a_{13}(p) \\ a_{21}(p) & a_{22}(p) & a_{23}(p) \\ a_{31}(p) & a_{32}(p) & a_{33}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{x,i} \\ V_{y,i} \\ R_b \omega_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\omega \end{bmatrix}$$

Prise en compte
des couplages
cinématiques !

VALIDATION DU MODÈLE STOCHASTIQUE

Expérience

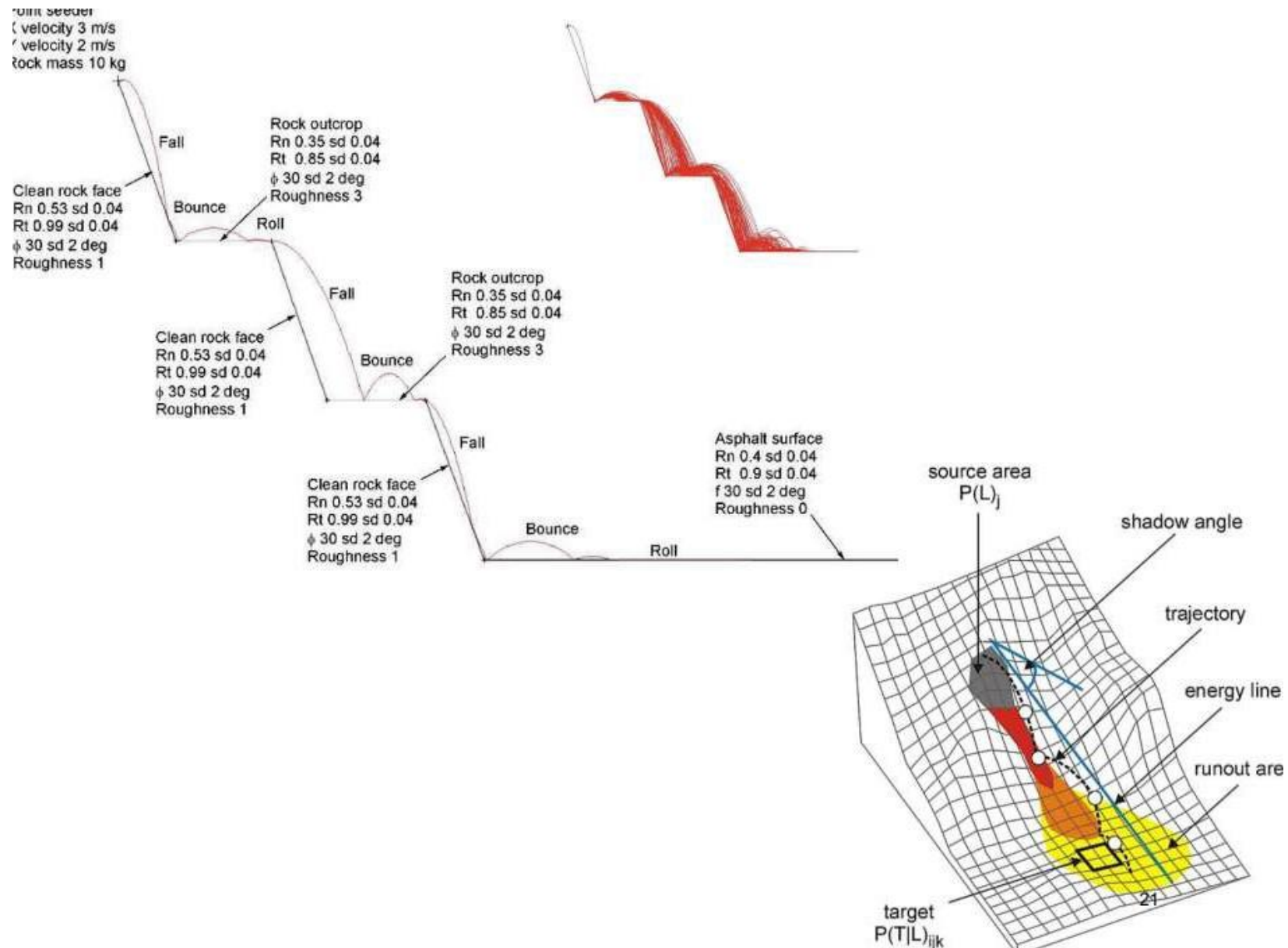
Simulations

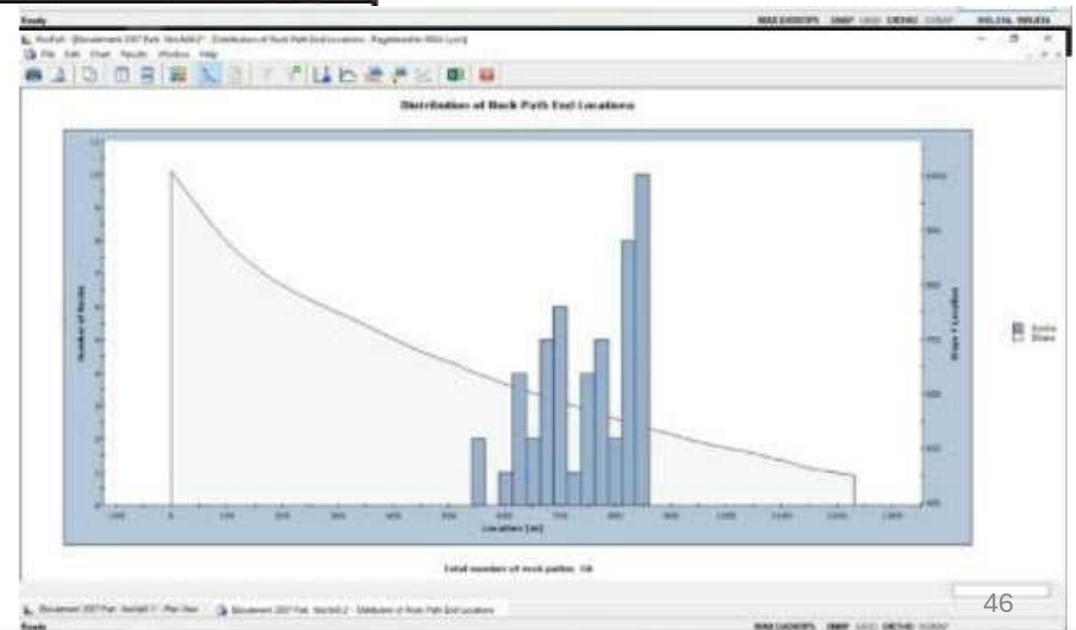
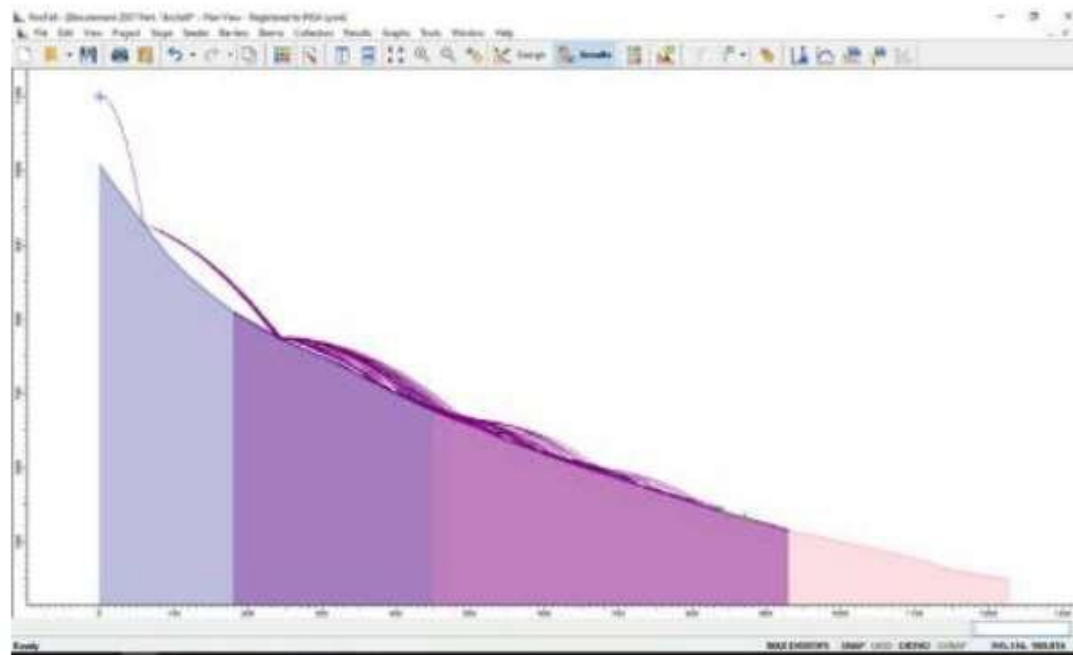


Distributions similaires (différence exp./sim. < 20%)

Projet

- Estimation du volume d'un bloc, avec le logiciel SWedge de Rocscience
- Utilisation des logiciels Rocfall de Rocscience et Propag du CEREMA
- 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 prédimensionnement 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.





EN VUE DU DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES

Données nécessaires au dimensionnement des ouvrages

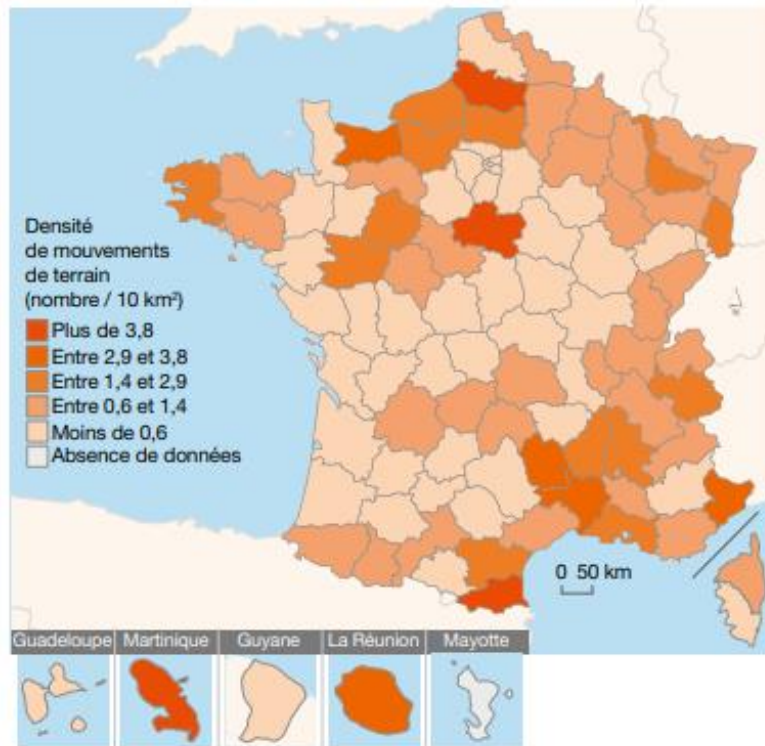
- ✓ Hauteur
- ✓ Energie

Mais... (quelques limitations)

- ✓ Percentile à 95 ou 99%, voir maximum : pertinence suppose un nombre plus important de simulations
- ✓ Simulations 2D : valeurs extrapolées à un linéaire d'ouvrage
- ✓ Simulations 3D : réalisme de la représentation du terrain

Tracer une limite sur une carte...

DENSITÉ DE MOUVEMENTS DE TERRAIN PAR DÉPARTEMENT



Phénomènes naturels concernés : glissements, chute de blocs, éboulements, coulées, effondrements, érosions de berges. Densité calculée sur un total de 65 200 mouvements de terrain enregistrés entre 1900 et 2019. Ce recensement, réalisé hors retrait-gonflement des argiles, est incomplet pour les départements de Normandie. Champ : France, hors Mayotte.

Les effondrements de cavités prédominent (39 %), devant notamment les glissements de terrain (26 %) et les chutes de blocs (23 %).

<https://www.georisques.gouv.fr/consulter-les-dossiers-thematiques/dossier-expert-sur-les-mouvements-de-terrain>

Tracer une limite sur une carte...

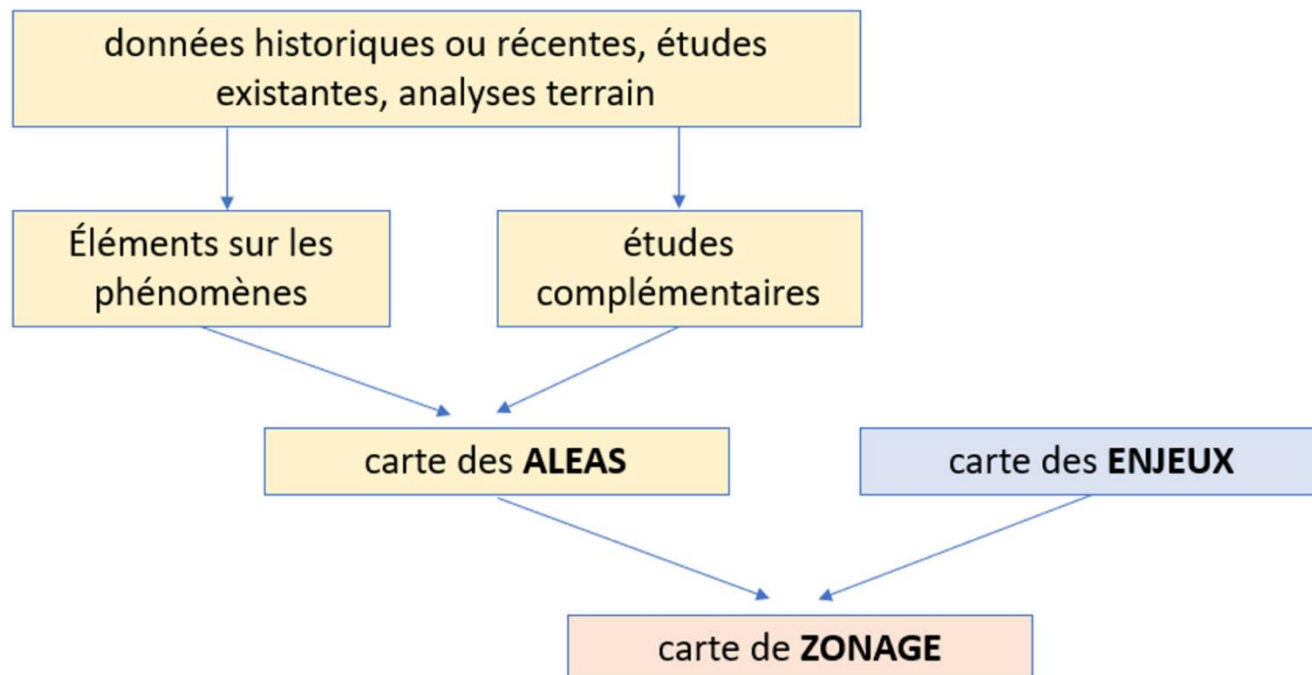


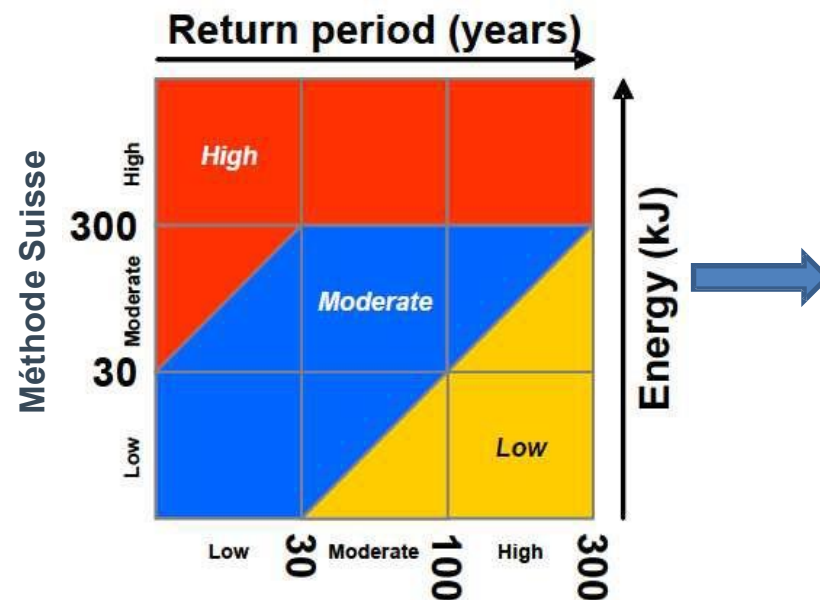
illustration 23 – Définition de la probabilité d'atteinte de l'aléa de référence en un point (en rouge les probabilités associées à la qualification de l'activité et de la propagation)

		Probabilité de propagation					
		Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte	Extrêmement forte
Probabilité de départ (Indice d'activité)	Faible (1 / 100 ans)	10 ⁻²	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²
	Moyen (1 / 10 ans)	10 ⁻¹					
	Fort (1 / an)	1					
		Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte	Très forte

Tracer une limite sur une carte...

Zonage de l'aléa

- Limite l'exposition au risque,
- zonage
- Aménagement du territoire



(LANAT, 2007)

(Labieuse, V. and Abbruzzese, J. , in Ref #2)

PLAN DE PRÉVENTION DES RISQUES

Principes de délimitation et de constructibilité

Aléa	Mesures de prévention	Espaces non urbanisés	Espaces urbanisés	
			Non protégés	Protégés
Majeur	Impossibles techniquement	Inconstructible	Inconstructible	Inconstructible
Fort	Difficiles techniquement ou très coûteuses, dépassant largement le cadre de la parcelle	Inconstructible	Inconstructible	Inconstructible (exceptionnellement constructible sous conditions strictes)
Moyen	Dépassant le cadre de la parcelle cadastrale (généralement à maîtrise d'ouvrage collective) ou coûteuse	Inconstructible	Inconstructible (exceptionnellement constructible sous condition de prise en compte des mesures ou après mise en œuvre de protection et révision du PPR)	Constructible sous conditions d'entretien des ouvrages de protection
Faible	Ne dépassant pas le cadre de la parcelle cadastrale (généralement maîtrise d'ouvrage individuelle) ou d'un coût modéré	Constructible sous condition de prise en compte des mesures de prévention. Inconstructible en cas de danger humain	Constructible sous condition de prise en compte des mesures de prévention	Constructible sous conditions d'entretien des ouvrages de protection

□

⇒ Zones : rouge, orange, bleue

Choisir la stratégie de protection

Évitement, parades actives et maîtrise des conséquences



Différentes parades - Critères de choix

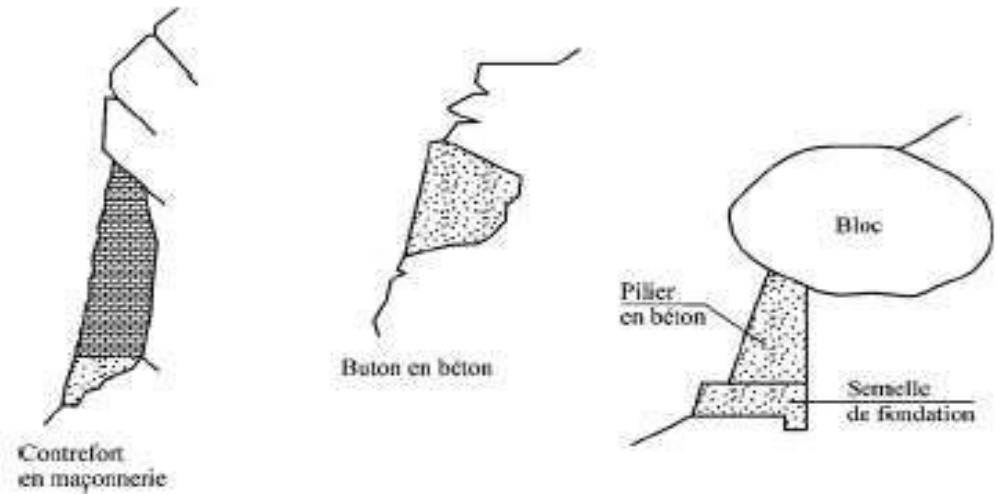
- Parades possibles
 - Purge
 - Maintient en place (*ouvrages actifs*)
 - Maitrise des conséquences (*ouvrages passifs*)
 - Evitement (pour les routes; changer de versant, passer en tunnel)
 - Surveillance et évacuation au besoin
- Critères de choix pour l'aménagement du site (quelques uns)
 - Volumes et énergies en jeu
 - Topographie
 - Accessibilité (tx de construction, entretien)
 - Coût/bénéfice

La mise en œuvre de parades se fait dans le cadre d'une stratégie globale de mitigation, incluant également des actions non structurelles (information, évacuation, contournement...)

Parades actives EXEMPLES



Câblage

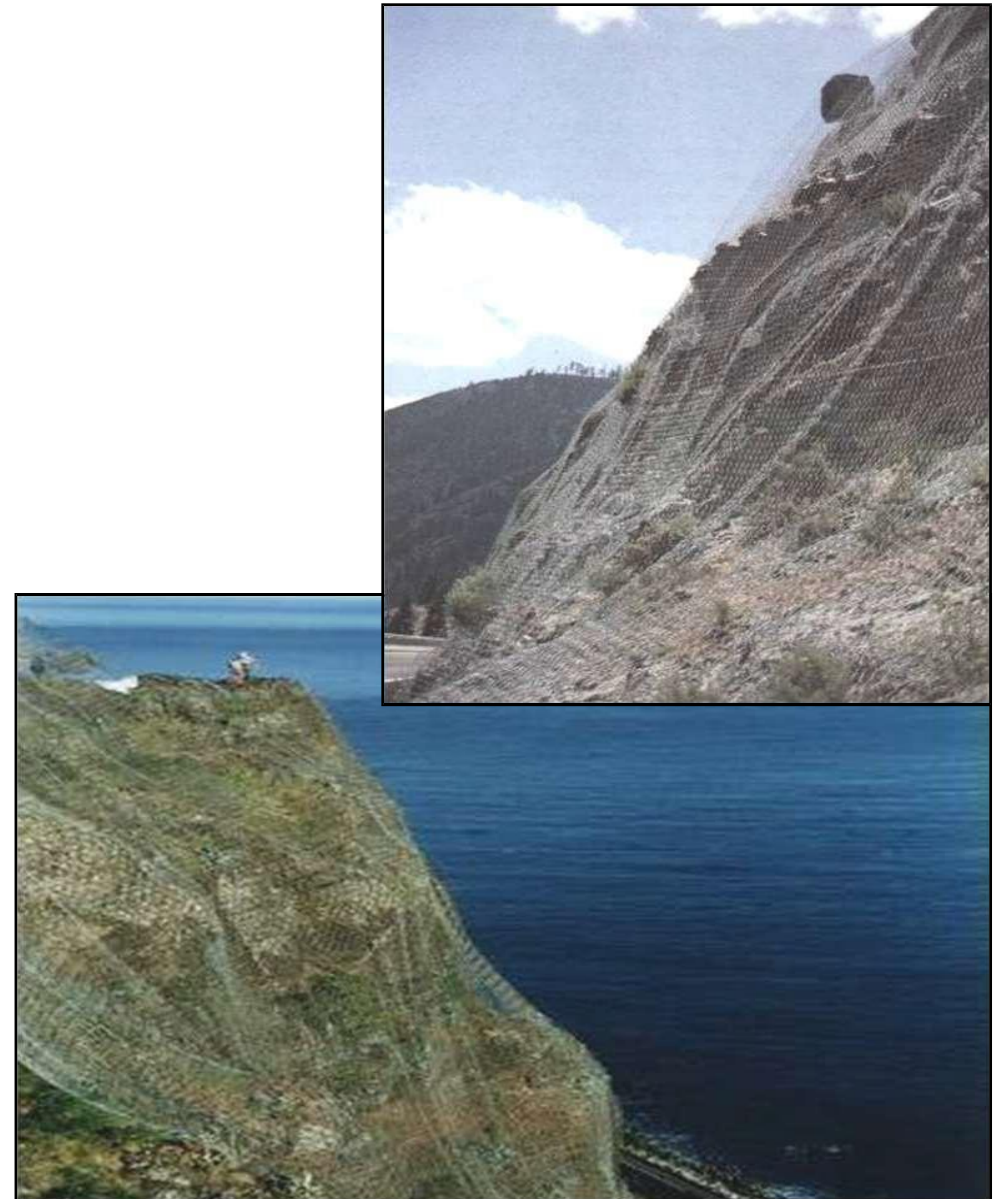


Soutènement

Parades actives EXEMPLES



Béton projeté



Grillage et filet plaqué

Parades actives EXEMPLES

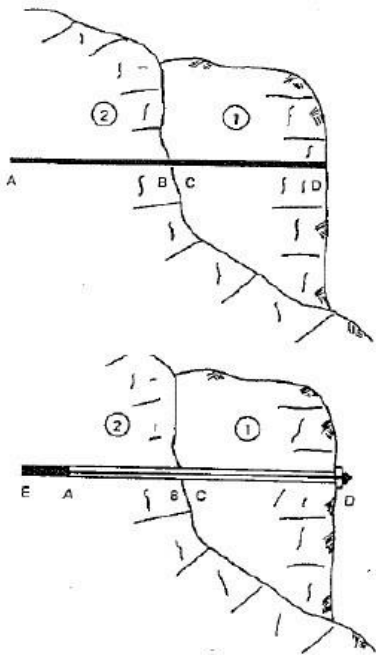


Purge, abattage



Ancrage/clouage

Boulons et tirants

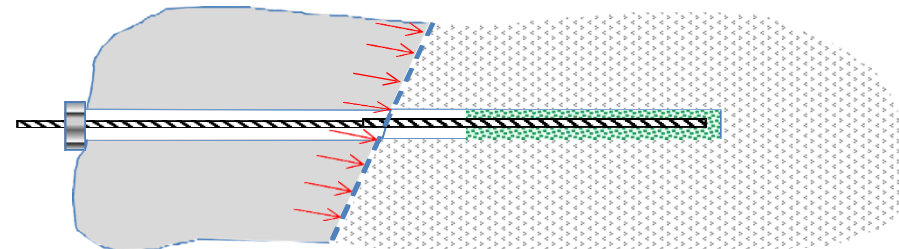


■ Principe de fonctionnement

- Extrémité de la barre ancrée au rocher,
- Passif ou actif (= pré-tension dans la barre)
- Amélioration de la résistance au cisaillement des discontinuités par
 - Mobilisation d'efforts de cisaillement et de traction dans les armatures
 - Augmentation de l'effort normal au plan de cisaillement (si actif)

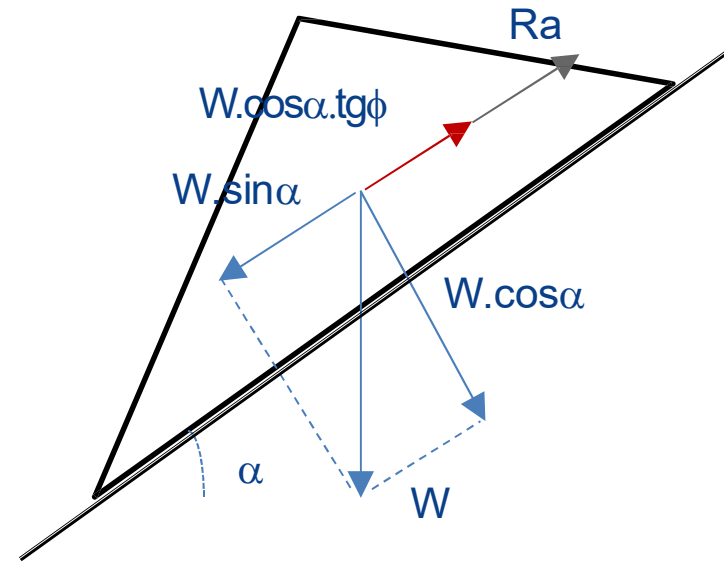
Les hypothèses d'un calcul d'ancrage sont déterminantes.

Il faut vérifier : eau, cohésion, orientation des discontinuités, longueur/scellement, corrosion, transfert de charge et facteur de sécurité



Stabilisation par ancrage

GLISSEMENT PLAN TRAITÉ PAR TIRANT PASSIF



Hypothèses: sec, sans cohésion

Condition de stabilité : $W \cdot \sin \alpha > W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi$ (soit, $\tan \phi / \tan \alpha > 1$)

instabilité (α : inclinaison du plan, ϕ : angle de frottement)

Contribution de l'ancrage: $R_a = C_s \cdot W \cdot \sin \alpha - W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi$

(C_s : coeff. de sécurité)

! Cas très simple / réalité !

Parades passives

Objectif : limiter les conséquences des événements une fois initiés
-> placés à proximité (à l'amont) des zones à protéger

Permanent : ouvrages à proximité des enjeux dont:

- Merlons
- Ecrans
- Déviateurs
- Galeries

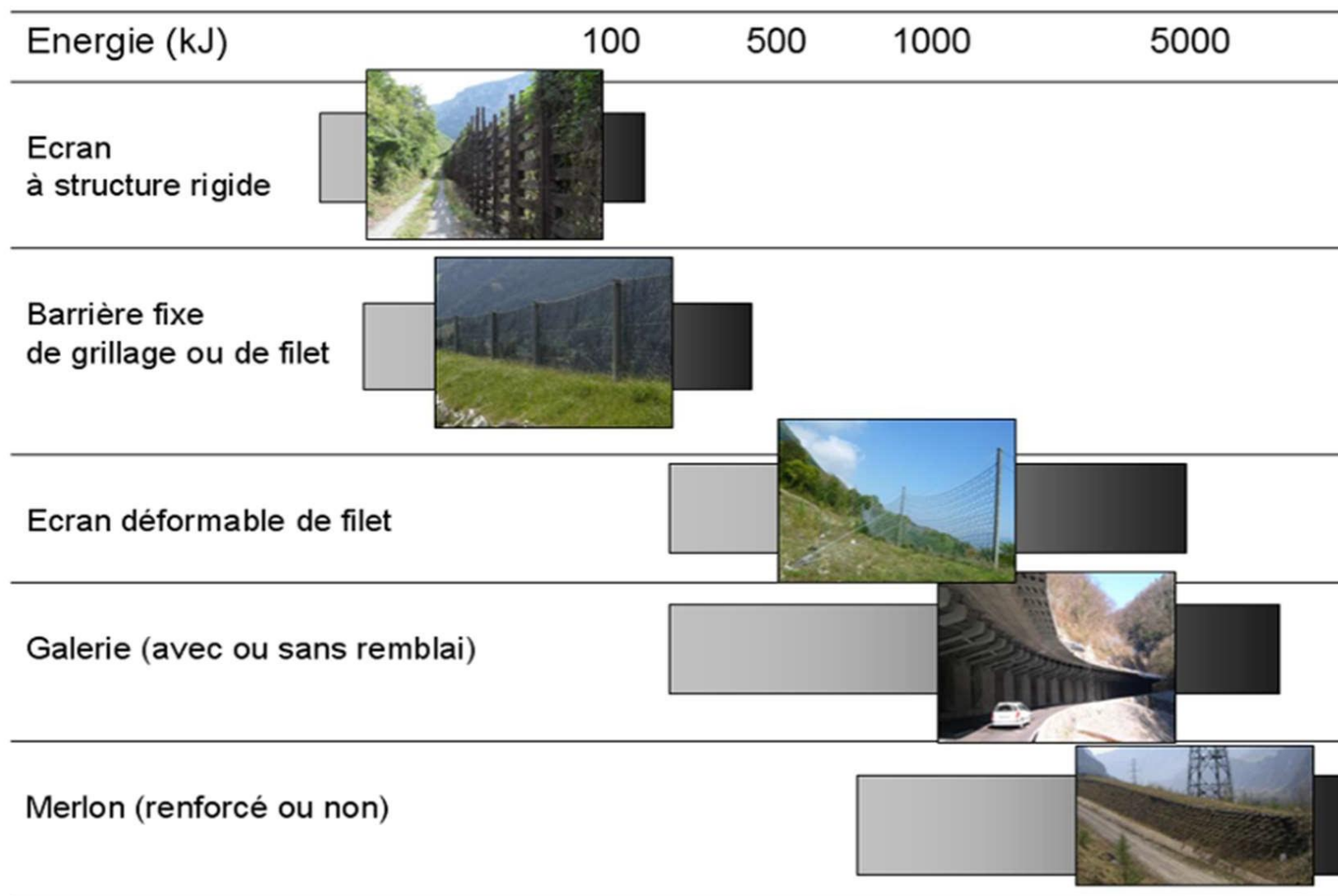
Temporaire : alerter

Dimensionner et maintenir les ouvrages

Merlons, écrans, galeries et rôle de la forêt



CLASSIFICATION PAR GAMMES D'ÉNERGIE



Dimensionnement des ouvrages de protection passive

Dimensionnement 'fonctionnel'

- ✓ Capacité de l'ouvrage à agir sur la trajectoire du bloc
- ✓ Données : énergie cinétique, hauteur de passage du bloc au point d'implantation de l'ouvrage

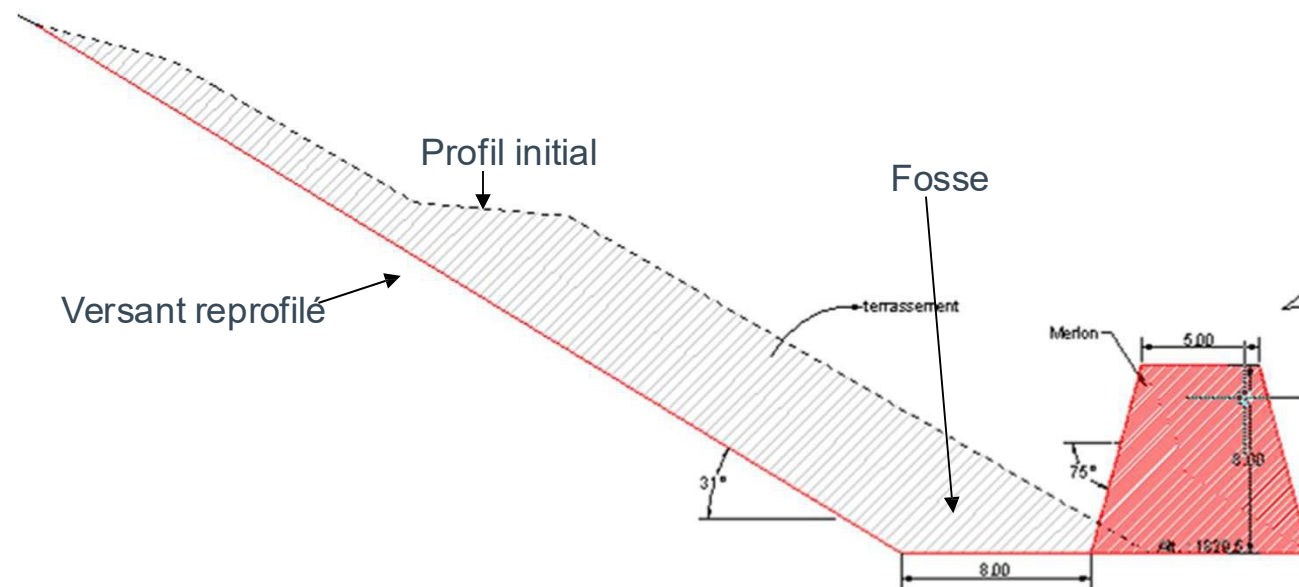
Dimensionnement 'structurel'

- ✓ Capacité de l'ouvrage à supporter les sollicitations statiques et dynamiques
- ✓ Dépend du type de structure, des matériaux employés (géotechnique, génie civil, ...)

Les dimensionnement fonctionnel et structurel sont deux vérifications complémentaires

Merlons

Ouvrages massifs, en élévation, en pied de versant, associés à une fosse, le plus souvent renforcés*



* géotextiles/géogrilles, pneus usagés, gabions suivant procédés pneutex, pneusol, etc..

Merlons EXEMPLES



Dimensions typiques: Hauteur: 2 à 10 m, Longueur: 50 à 800 m, largeur en crête: 1 à 6 m.

Figure originale — constitution d'un dispositif par merlon

Les dispositifs de protection par merlon* sont des ouvrages de protection passive contre l'aléa éboulement rocheux. Ils sont constitués d'un merlon et d'une fosse* (Figure 1). Les merlons sont des structures massives en élévation par rapport au terrain naturel, le plus souvent constituées de matériaux de remblai renforcés* ou non. Ils sont implantés à l'amont des enjeux à protéger et permettent d'intercepter et d'arrêter ou dévier des masses rocheuses dévalant la pente, en un ou une succession d'évènements.

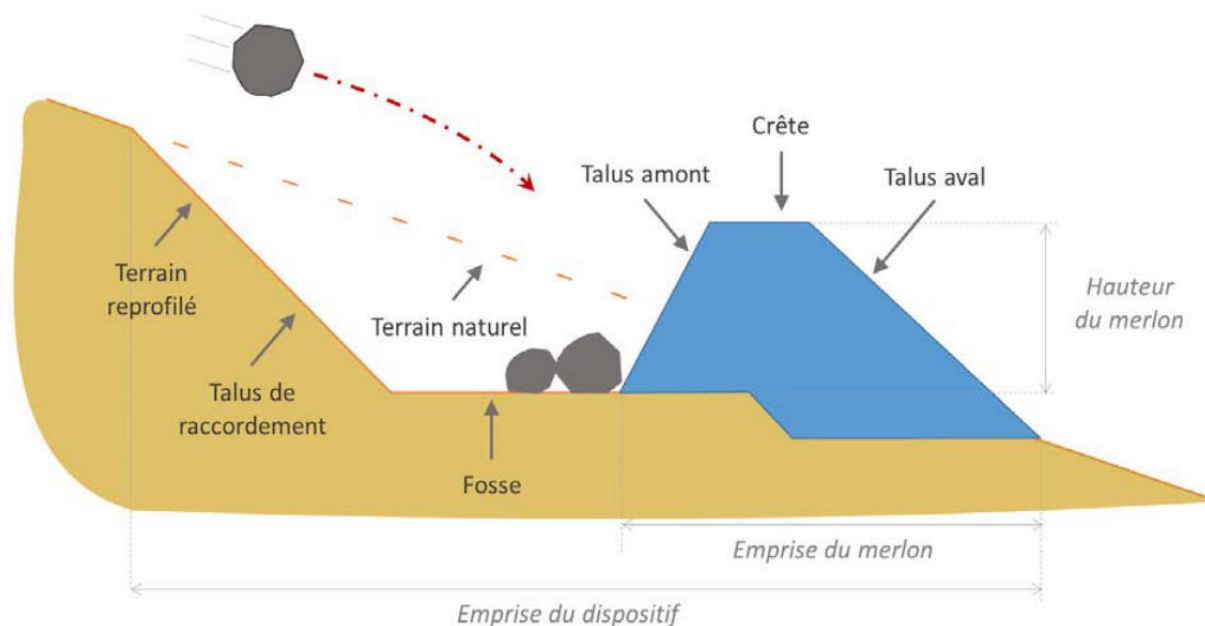
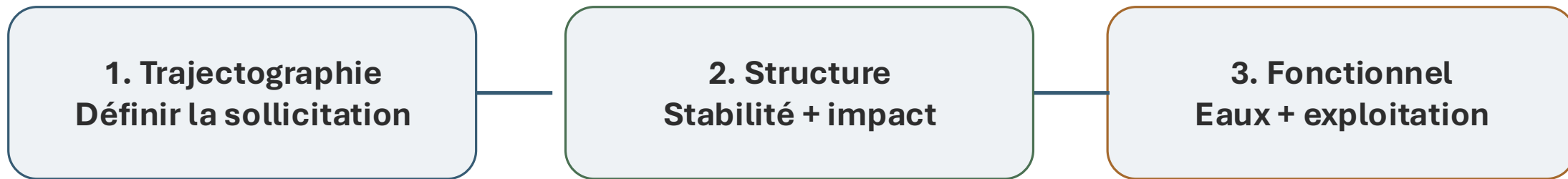


Figure 1 : Croquis type de dispositif de protection par merlon pare-blocs.
Voir le glossaire en page 54 pour les définitions de ces termes (Source : Stéphane LAMBERT - INRAE)

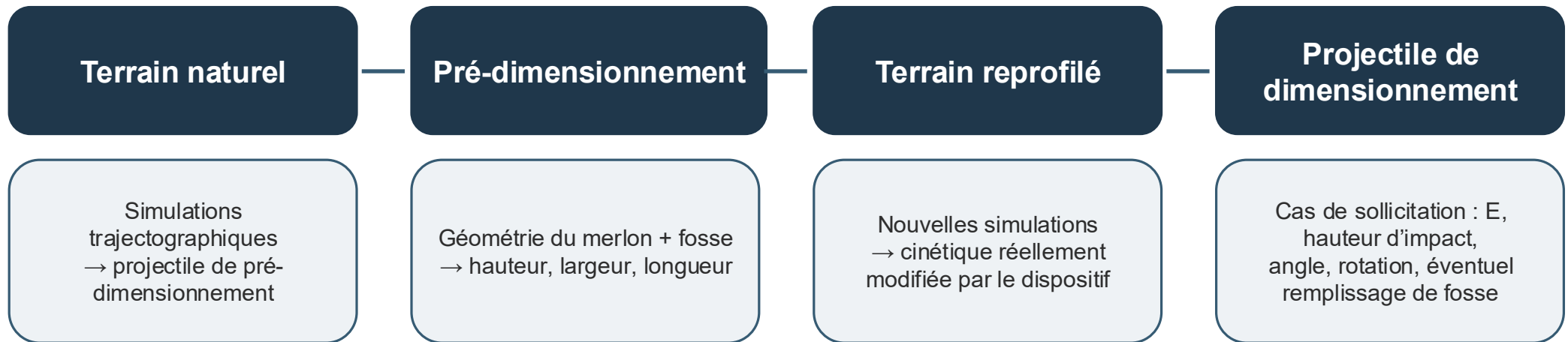
Merlons pare-blocs : synthèse de la démarche C2ROP

Conception, dimensionnement et focus sur l'approche pseudo-statique



- Démarche générique et souple proposée par C2ROP/Cerema.
- Les trois volets sont traités simultanément dans un processus itératif.
- Point de vigilance : le guide 2020 ne fixe pas une méthode française unique pour l'impact dynamique ni de coefficients partiels consensuels.

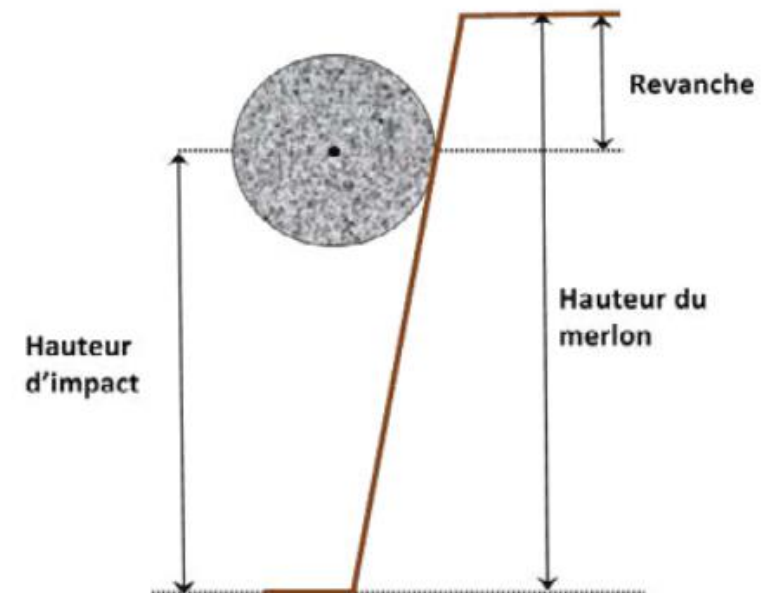
1 - Du scénario de chute au projectile de dimensionnement



Ordre d'importance des paramètres cinétiques : ① énergie/vitesse ② hauteur d'impact ③ angle d'incidence ④ vitesse de rotation

2 - Dimensionnement trajectographique et géométrique

- Hauteur : la hauteur du merlon est construite à partir de la hauteur de passage + une revanche.
- Dans la démarche C2ROP, la revanche minimale en phase de conception géométrique est au moins égale au rayon de la sphère équivalente au projectile de pré-dimensionnement.
- La revanche a un double rôle : géométrique (éviter le franchissement) et mécanique (conserver de la masse au-dessus de l'impact).
- Longueur : elle doit être suffisante vis-à-vis de la dispersion latérale des trajectoires.
- Le dimensionnement final doit être vérifié sur les projectiles de dimensionnement issus des simulations sur terrain reprofilé.



3 - Dimensionnement structurel : trois questions distinctes

Hors impact

- stabilité générale
- stabilité externe
- stabilité interne / mixte
- séisme si pertinent
- hydrogéologie défavorable

Sous impact

- action dynamique localisée
- déplacements / déformations
- stabilité post-impact
- revanche après déformation
- fondation si efforts transmis

Après impact

- projectile arrêté
- pas de danger aval
- niveau d'endommagement acceptable
- réparabilité compatible avec le niveau de protection

4 - Les cinq familles d'approches sous impact

Type 1	Prescriptive / expertise	Pas de calcul spécifique de stabilité sous impact.	Cas anciens ; exceptionnellement, énergie modérée et surdimensionnement démontré.
Type 2	Pénétration	Comparer pénétration du bloc et largeurs disponibles.	Approche analytique ; Wyllie (2014).
Type 3	Pseudo-statique	Remplacer l'impact dynamique par une force équivalente appliquée sur une surface.	Stabilité géotechnique classique sous poids propre + action équivalente.
Type 4	Dissipation d'énergie	Évaluer l'énergie dissipée par le volume de merlon mobilisé.	Déplacement requis $\leq$ déplacement/endommagement acceptable.
Type 5	Numérique dynamique	MEF / MDF / MED.	Grande déformation ; calibration et validation expérimentale indispensables.

5 - Focus : méthode pseudo-statique (type 3)

Ce que dit réellement C2ROP - et ce qu'il ne dit pas

- Principe : transformer la sollicitation dynamique d'impact en une action statique équivalente F_{eq} .
- Définir une surface d'application de F_{eq} sur le talus amont / la zone d'impact.
- Combiner F_{eq} avec les actions de gravité et les autres actions pertinentes.
- Vérifier la stabilité avec les méthodes classiques de géotechnique.
- C2ROP ne fournit pas une expression française unique de F_{eq} : l'action équivalente doit être estimée à partir d'une expression analytique issue de la littérature.
- Les expressions disponibles donnent des résultats très dispersés ; C2ROP déconseille donc de retenir une méthode analytique isolée.

Modèle « pseudo-statique » = modèle de calcul statique ; ce n'est pas une reproduction fidèle de la dynamique locale de l'impact.

6 - Comment construire F_{eq} ? Deux écritures physiques utiles

Approche impulsionnelle

$$F_{eq} \cdot \Delta t \approx m \cdot \Delta v \\ \rightarrow F_{eq} \approx m \cdot \Delta v / \Delta t$$

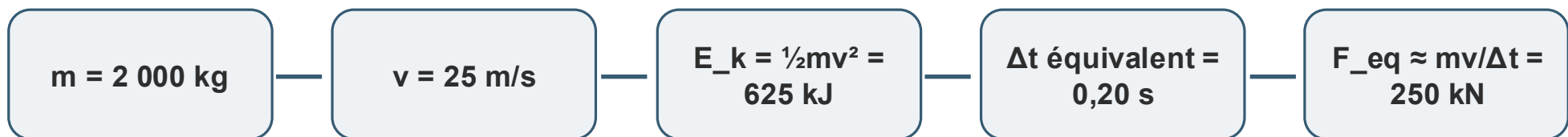
Approche énergétique

$$F_{eq} \cdot \delta \approx E_{impact} \\ \rightarrow F_{eq} \approx E_{impact} / \delta$$

- Δt = durée d'impact équivalente ; δ = déplacement de la zone/masse mobilisée dans le modèle équivalent.
- Ces relations sont des schématisations de mécanique ; elles ne constituent pas, à elles seules, une « formule C2ROP ».
- Le choix de Δt ou δ est déterminant : il doit être cohérent avec le modèle d'impact retenu et la littérature/les essais disponibles.
- Une fois F_{eq} définie, sa position et sa surface d'application doivent être explicitées avant la vérification géotechnique.

7 - Exemple pédagogique de calcul pseudo-statique

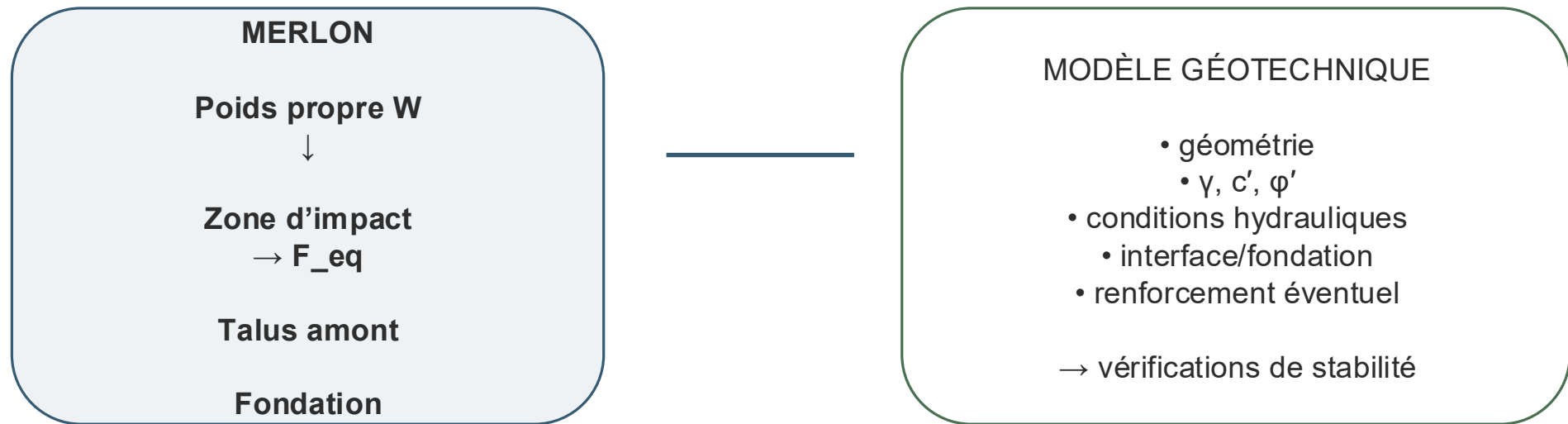
Exemple volontairement simplifié : il illustre la logique, pas une méthode réglementaire



- 1. La trajectographie fournit m , v et la hauteur/position d'impact.
- 2. L'énergie cinétique est une grandeur de caractérisation : ici 625 kJ.
- 3. Pour illustrer une conversion impulsionnelle, on suppose $\Delta t = 0,20 \text{ s} \rightarrow F_{eq} = 250 \text{ kN}$.
- 4. Cette force est ensuite appliquée sur une zone définie du talus et combinée aux actions gravitaires.
- 5. On vérifie alors glissement, renversement/rotation, stabilité globale ou autre mécanisme pertinent selon la géométrie et le modèle géotechnique.

Attention : la valeur $\Delta t = 0,20 \text{ s}$ est ici une hypothèse pédagogique ; elle ne doit pas être présentée comme une valeur C2ROP.

8 - Passage au calcul géotechnique



- La vérification sous impact est distincte de la stabilité hors impact, même si les outils géotechniques sont similaires.
- C2ROP demande de vérifier que les déplacements se stabilisent et restent compatibles avec l'endommagement acceptable.
- Si l'impact induit des contraintes importantes en sous-face, une vérification de la fondation peut devenir nécessaire.

- Pour le type 3 (pseudo-statique), le guide précise : force équivalente estimée par une expression analytique de la littérature + surface d'application définie + vérification géotechnique classique sous ce chargement et les actions de gravité.
- Le guide ne prescrit ni une expression française unique de la force équivalente, ni des coefficients partiels ou combinaisons d'actions consensuels.

9 - Pourquoi C2ROP déconseille une approche analytique unique ?

- Les expressions analytiques disponibles proviennent de conditions expérimentales et de modèles très différents.
- Pour un même cas d'étude, le guide rapporte une dispersion pouvant atteindre un facteur 4 entre les forces d'impact estimées par différentes méthodes.
- Le comportement réel dépend notamment de la pénétration, de la déformation, du compactage, du frottement, de la géométrie et du renforcement.
- C2ROP recommande donc, lorsque pertinent, de croiser plusieurs approches et de retenir les résultats les plus défavorables.
- Les modèles numériques sont plus riches mais exigent calibration des matériaux, maîtrise des grandes déformations et validation par essais.

Conclusion : la pseudo-statique est un outil d'ingénierie utile, mais pas une « méthode française normalisée de dimensionnement de l'impact ».

10 — Critère empirique C2ROP à connaître

Outil de contrôle rapide, pas outil de dimensionnement

Domaine de validité indicatif

$E_k < 4\,500 \text{ kJ}$
impact $\approx$ mi-hauteur
 $H \approx 3 \text{ à } 4 \text{ m}$

Merlon renforcé

$E_k < 250 A$
 $A = \text{aire de la coupe verticale}$

Merlon non renforcé

$E_k < 125 A$

- E_k en kJ ; A en m^2 .
- Au-delà du seuil, la stabilité peut être questionnée.
- Le guide précise que ce critère sert à attirer l'attention sur un éventuel sous-dimensionnement et n'est pas proposé comme outil de dimensionnement stricto sensu.

11 - Synthèse

TRAJECTOGRAPHIE

STRUCTURE

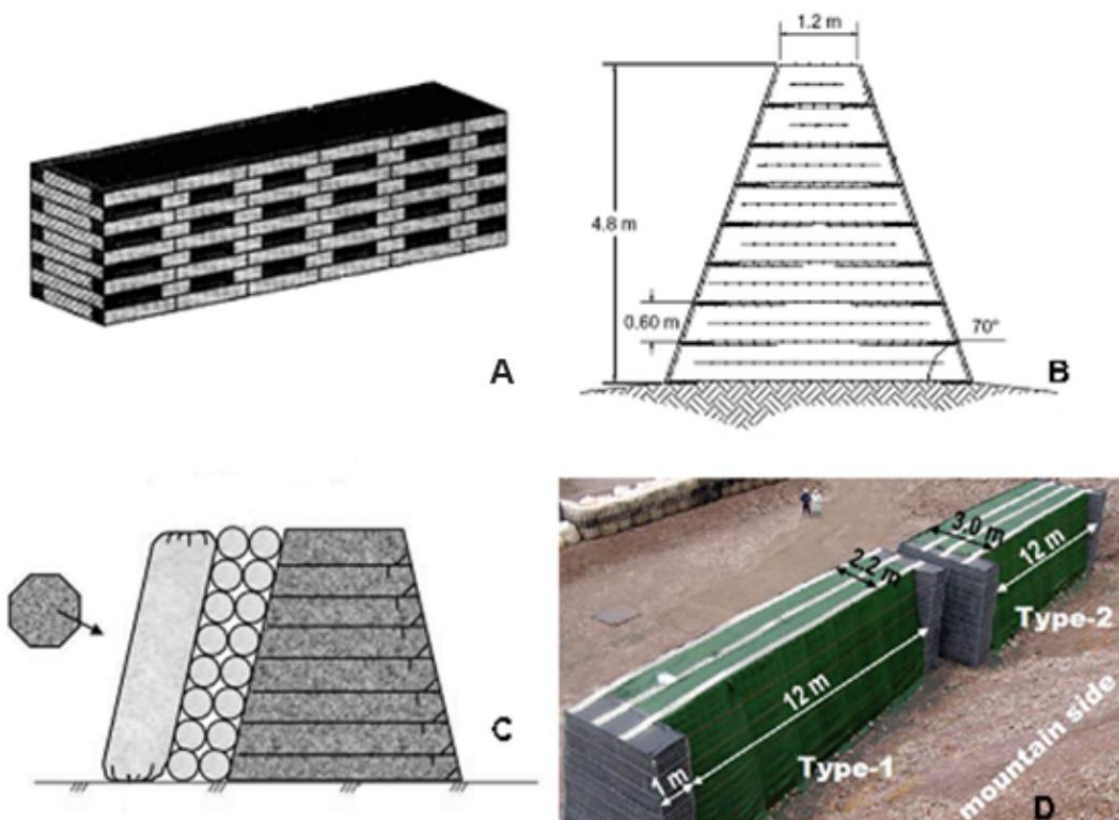
FONCTIONNEL

- Le merlon est dimensionné à partir de projectiles issus de simulations sur terrain reprofilé.
- Hors impact : on retrouve les méthodes classiques de la géotechnique.
- Sous impact : plusieurs familles d'approches existent ; C2ROP ne fixe pas une formule unique.
- La méthode pseudo-statique transforme l'impact en force équivalente, puis applique les outils classiques de stabilité.
- La force équivalente dépend du modèle retenu (impulsion, énergie, pénétration, durée/déplacement équivalent) et doit être justifiée.
- Le critère final n'est pas « merlon intact », mais « projectile arrêté + pas de danger aval + endommagement acceptable ».

À retenir : le guide C2ROP 2020 est un référentiel de démarche, pas une norme de calcul complète de l'impact.

Figure originale - essais d'impact en vraie grandeur

Les approches sous impact s'appuient notamment sur des expérimentations grandeur réelle.



Merlon expérimental après impact par un projectile de 65 000 kg, avec une énergie cinétique de 500 kJ.

Figure originale — logigramme C2ROP de conception et dimensionnement

Figure 13 du guide : elle synthétise la logique itérative entre données initiales, conception, résultats intermédiaires et trois volets de dimensionnement.

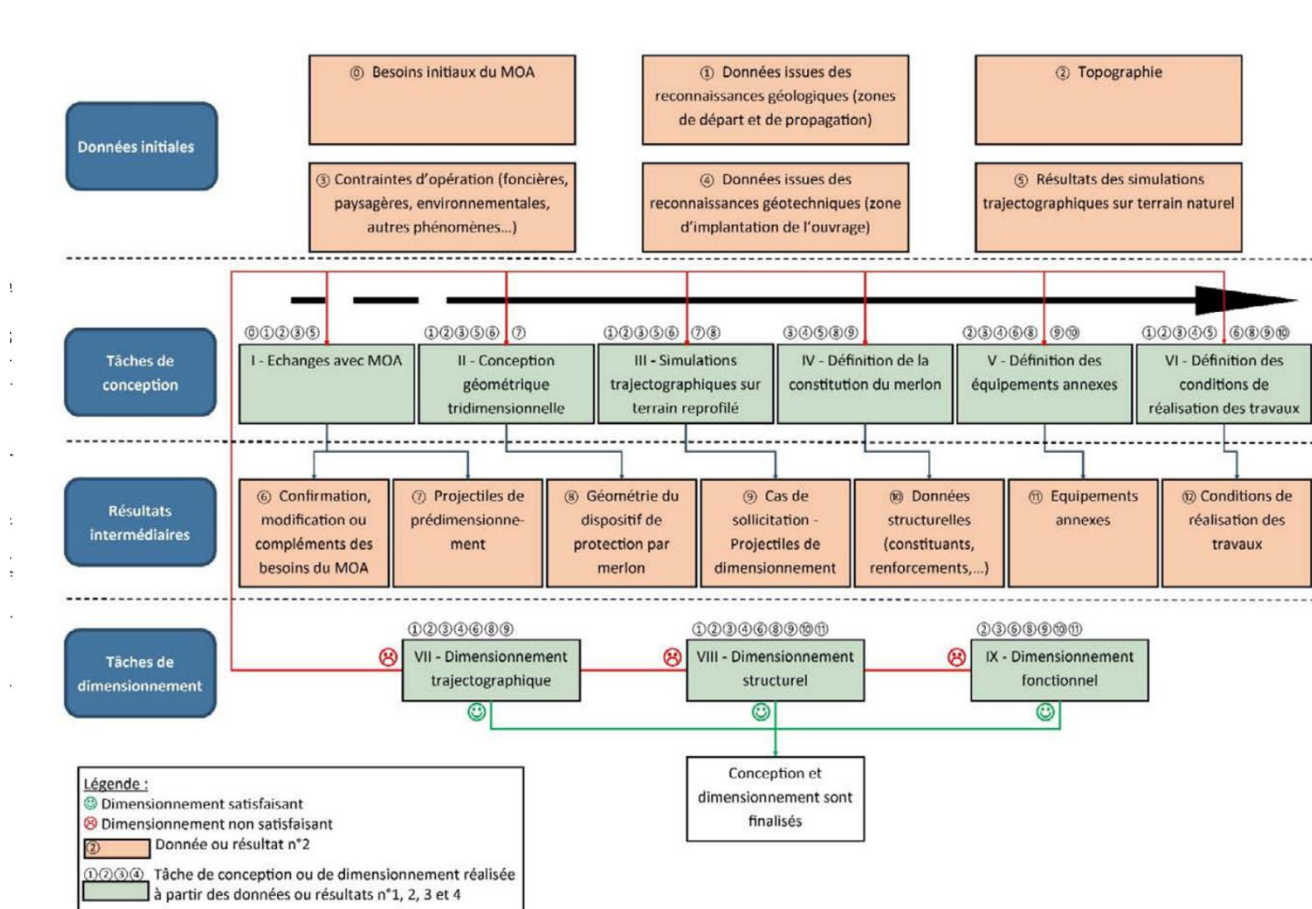


Figure originale — gestion des eaux et drainage

Volet fonctionnel : la transparence hydraulique et le drainage font partie de la conception.

Pour assurer le débroussaillage, le curage ou les réparations potentielles, les conditions d'accès à l'ouvrage doivent être précisées en phase conception :

- piste utilisable par engins mécaniques ;
- absence de piste et accès par moyen de levage, pelle araignée ;
- accès avec ligne de vie et moyens de progression ;
- etc.

La conception géométrique doit tenir compte des attentes en termes d'insertion paysagère (visibilité de l'ouvrage, ...), d'intégration environnementale (passage de faune, etc.) et d'écologie.



DIFFÉRENTS TYPES D'ÉCRANS

Ecrans à structure rigide
($E < 100$ kJ)



Barrières de grillage ou de filet
($E < 500$ kJ)



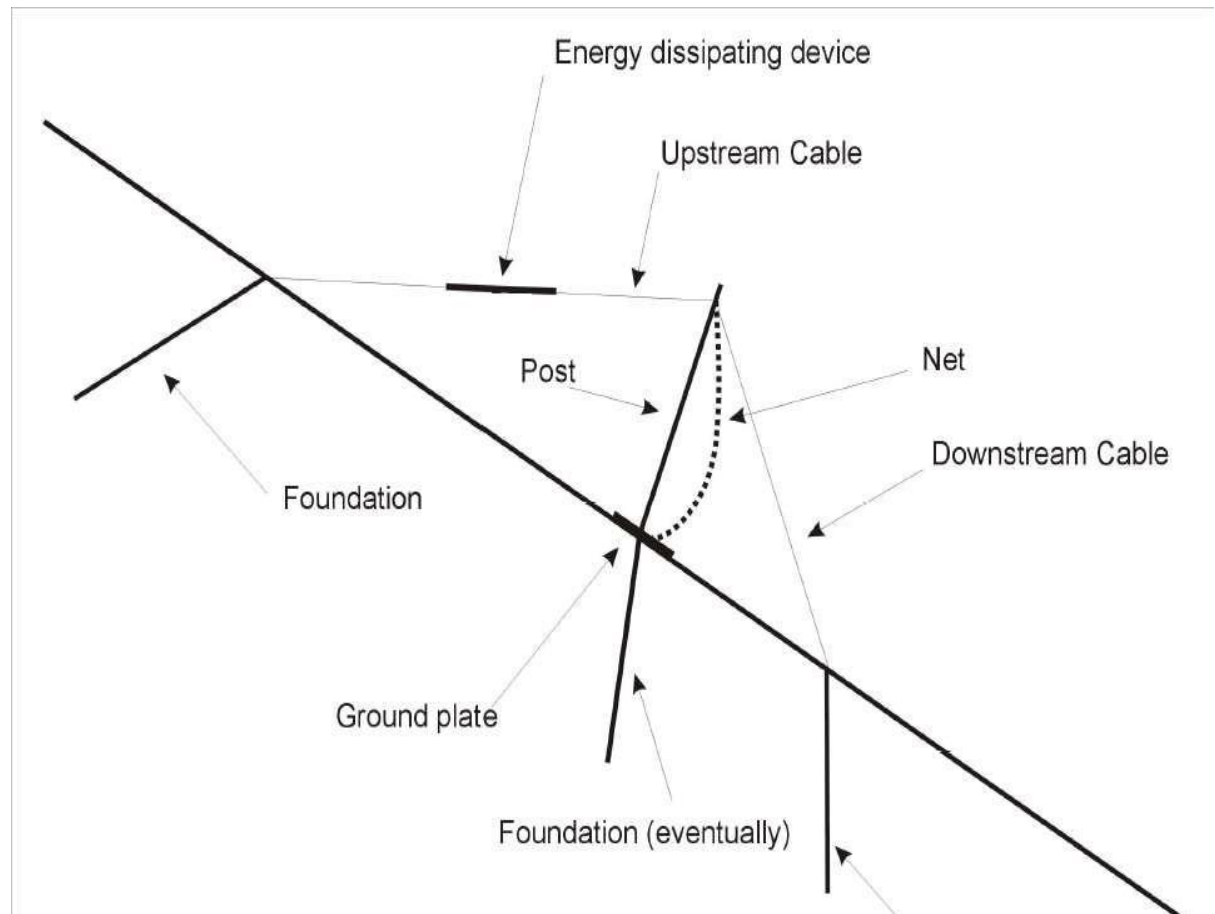
Ecran déformable de filet



Ecrans déformables de filets

Capacité jusqu'à 5000kJ

Utilisation de freins : dissipent l'énergie Nécessitent un suivi



Un écran est un système :
filet, freins, ancrages, fondations, hauteur résiduelle et
déformation sont interdépendants.

Les ouvrages passifs

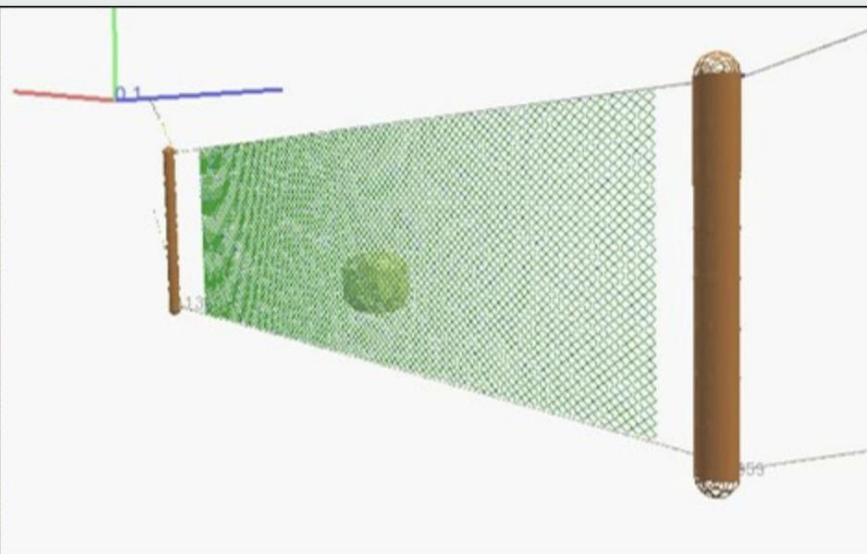
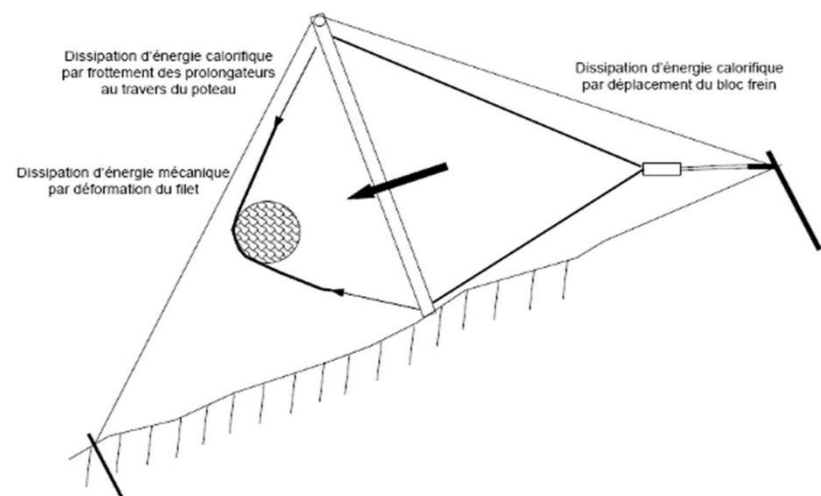
OUVRAGES DE PROTECTION

Ecrans déformables de filets VARIANTES



Ecrans déformables de filets PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT (EXEMPLE)

□ Conception Générale – Vue latérale (lors d'un impact)



Filet pare-blocs ancré sur les arbres : ouvrage expérimental et modèle numérique. Collaboration INRAE / NGE Fondations

Ecrans déformables de filets

FREINS

Fonctions:

- Limiter les efforts dans la structure (ancrages)
- Dissiper de l'énergie

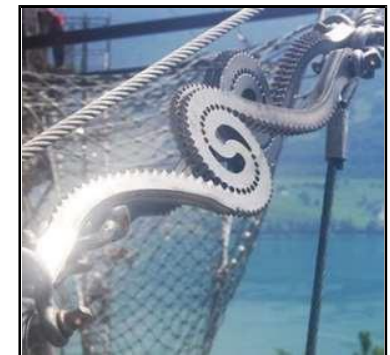
Différents types

- Freins à câble 'linéaire'
- Freins à câble sinueux
- Freins fendeurs de tube (droit ou circulaire)
- ...

Contraintes

- Entraînent une déformation de l'écran
- Nécessite un contrôle régulier

Ecrans déformables de filets EXEMPLES DE FREINS



Dimensionnement des filets

Dimensionnement 'fonctionnel'

A partir de la hauteur de passage (+ revanche et réserve de hauteur)

Dimensionnement 'structurel'

- A partir de la hauteur de passage et de l'énergie cinétique
- Pas de réel dimensionnement (par BE)
- Ouvrages respectant des critères de classes, suivant EOTA

EOTA, EAD 340059-00-0106 — Falling rock protection kits

https://www.eota.eu/download?file=/2014/14-34-0059/ead%20for%20ojeu/ead%20340059-00-0106_ojeu2018.pdf

Classification des écrans de filet

EAD



Marquage CE

Essais grandeur réelle impartiaux, à deux niveaux d'énergie

- SEL : énergie de service
- MEL : énergie maximale

9 classes de filets

Table 2 – Falling rock protection kit categories

Energy absorption categories	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SEL (kJ)	-	85	170	330	500	660	1000	1500	> 1500
MEL (kJ) with MEL $\geq 3 \times$ SEL	100	250	500	1000	1500	2000	3000	4500	> 4500

Classification des écrans de filet

EOTA

Marquage CE



Essais grandeur réelle impartiaux, à deux niveaux d'énergie

- SEL : énergie de service
- MEL : énergie maximale

9 classes de filets

Classification selon le niveau d'énergie	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SEL	-	85	170	330	500	660	1 000	1 500	> 1 500
MEL	100	250	500	1 000	1 500	2 000	3 000	4 500	> 4 500

Classes des kits de protection contre les chutes de blocs rocheux

2.2. Quelques caractéristiques d'un produit « écran de filet pare-blocs » : définition

Niveau d'énergie de service ou SEL (Service Energy Level) : énergie cinétique maximale du bloc ayant impacté deux fois successivement l'écran avec une réduction limitée de sa hauteur et sans dommage structurel.

Niveau d'énergie maximal ou MEL (Maximum Energy Level) : énergie maximale de capacité d'arrêt de l'écran.

Hauteur : distance minimale entre le câble longitudinal porteur supérieur et la ligne de jonction entre les bases des montants, mesurée orthogonalement à la pente située à l'aval avant toute sollicitation (Figure 2).

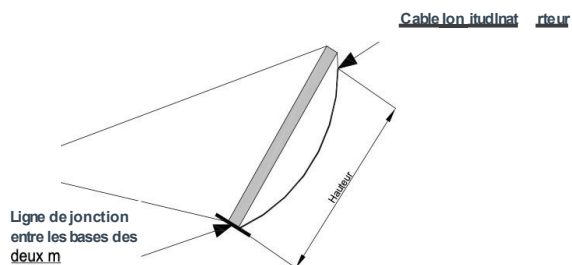


Figure 2. Hauteur.

Hauteur résiduelle : distance minimale entre le câble longitudinal porteur inférieur et le câble longitudinal porteur supérieur, mesurée orthogonalement à la pente située à l'aval suite à l'impact, sans enlèvement du bloc impactant (Figure 3).

Longueur du module : distance minimale d'espacement entre les montants (Figure 3).

Allongement : longueur de déformation vers l'aval de la nappe de l'écran, mesurée parallèlement à la pente située à l'aval, lors d'une sollicitation de l'écran (Figure 3).

Effacement latéral : différence maximale de distance entre le montant et la nappe de filet dans le module latéral suite à un essai d'impact, sans enlever le bloc (Figure 3).

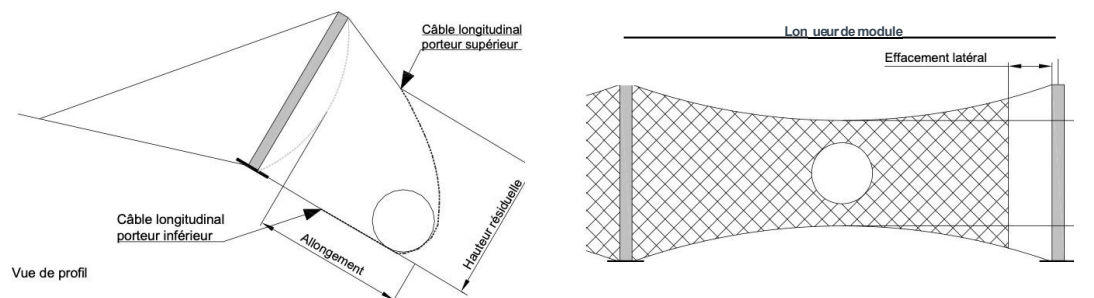


Figure 3. Hauteur résiduelle, longueur du module, allongement, effacement latéral.

Essais sur écrans de filets

ETAG 27 (remplacé depuis par EAD 340059-00-0106)

2 essais SEL + 1 essai MEL

Validé si

- Hauteur* résiduelle du filet $> 7\%$ de la hauteur initiale et pas de rupture d'éléments après SEL1
- Bloc arrêté et n'a pas touché le sol avant que l'allongement maximal du filet ait été atteint lors du SEL 2 et lors du MEL

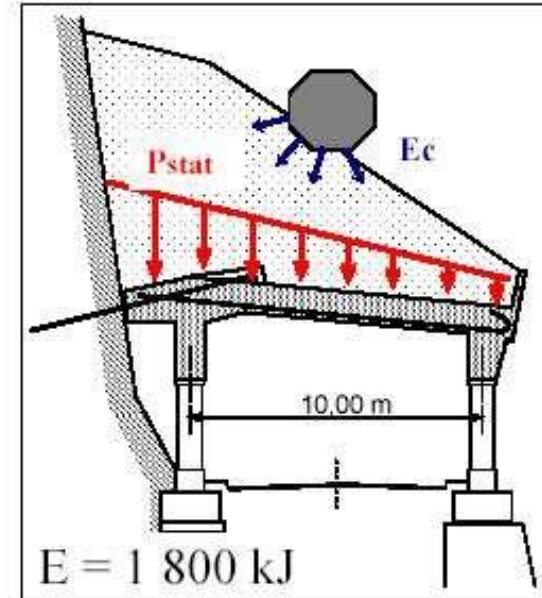
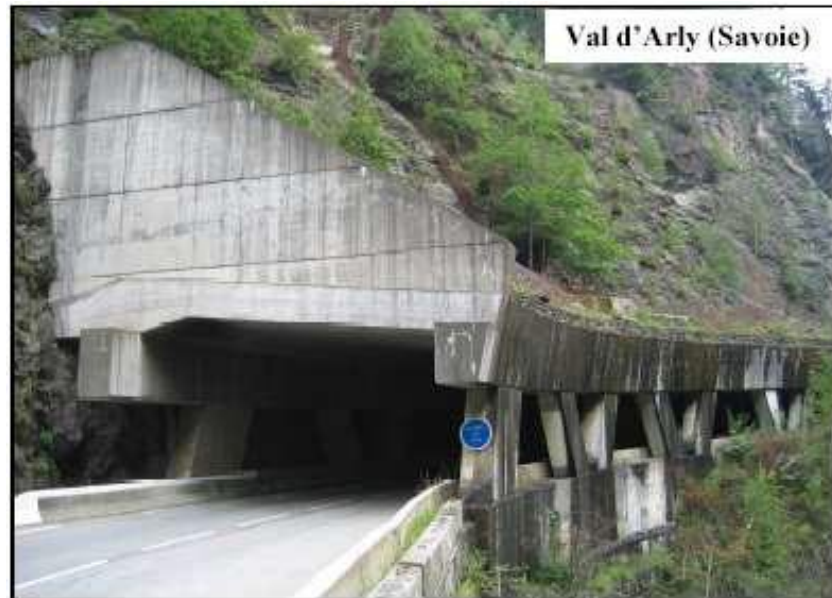


* Dimension suivant l'orthogonale à la pente=hauteur « efficace » du filet

Modélisation numérique : voir par exemple thèse de Jibril COULIBALY (<https://theses.hal.science/tel-01734991/>)

Voir résultat du projet C2ROP (et C2ROP2)

Galerie



- Dissipation de l'énergie d'impact du bloc dans le remblai
- Dimensionnement de la dalle basé sur une approche statique
- Poids propre de l'ouvrage $\Rightarrow$ fondations !
- Remblai difficilement accessible $\Rightarrow$ maintenance !

Les galeries déplacent et dissipent l'énergie ; elles ne dispensent pas d'une stratégie de maintenance.

Dimensionnement des galeries

METHODE SUISSE/1

- Principe : on estime la force d'impact du bloc sur le remblai en fct des caractéristiques du bloc et du matériau granulaire, pour en déduire l'action à prendre en compte au niveau de la dalle, et l'épaisseur minimale du remblai
- Force sur la couche de matériaux granulaire donnée par:

$$F_k = 2,8 * e^{-0,5} * r^{0,7} * M_{E,k}^{0,4} * \tan \varphi_k * \left(\frac{m_k * v_k^2}{2} \right)^{0,6}$$

Où :

- Concernant le bloc : m_k , r , v_k respectivement sa masse du bloc (en T), le rayon de la sphère équivalente (en m), sa vitesse lors de l'impact (en m/s)
- Concernant le matériau de couverture : e , $M_{E,k}$ et f_k respectivement, son épaisseur (en m), son module statique de compressibilité (en kN /m²) et son angle de frottement interne (en °).

Dimensionnement des galeries

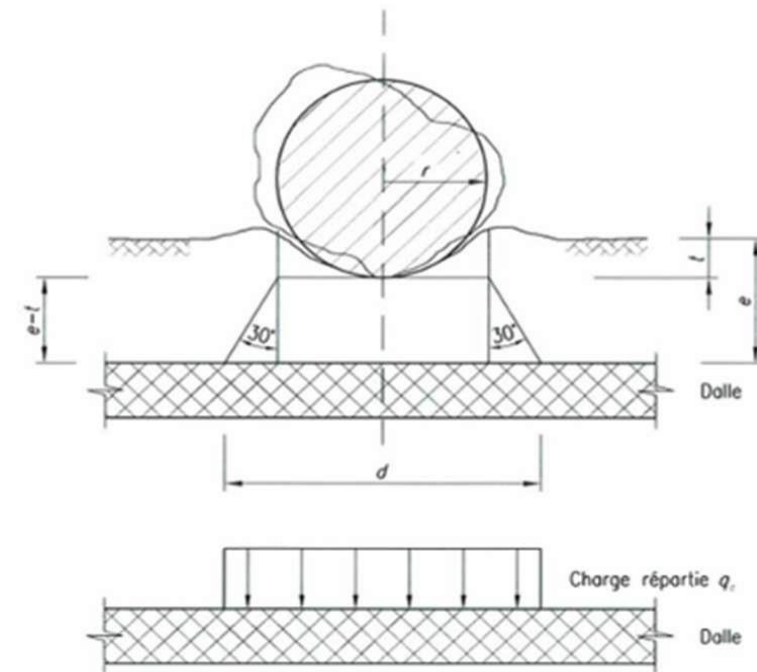
METHODE SUISSE/2

- Epaisseur du remblai, $e > \max\{0,5\text{m}; 2*t; t+6*D_{\max}\}$
avec $D_{\max}$ le rayon max. du matériau de couverture, et t la pénétration du bloc donnée par:

$$t = \left(\frac{m_k \cdot v_k^2}{F_K} \right)$$

- Charge sur la dalle:
 - équivalente à une force pseudo-statique de valeur $C \cdot F_k$,
 - $C = 0,4$ si la structure est ductile et $1,2$ si la structure est fragile
 - considérée uniformément répartie, sur une surface donnée par:

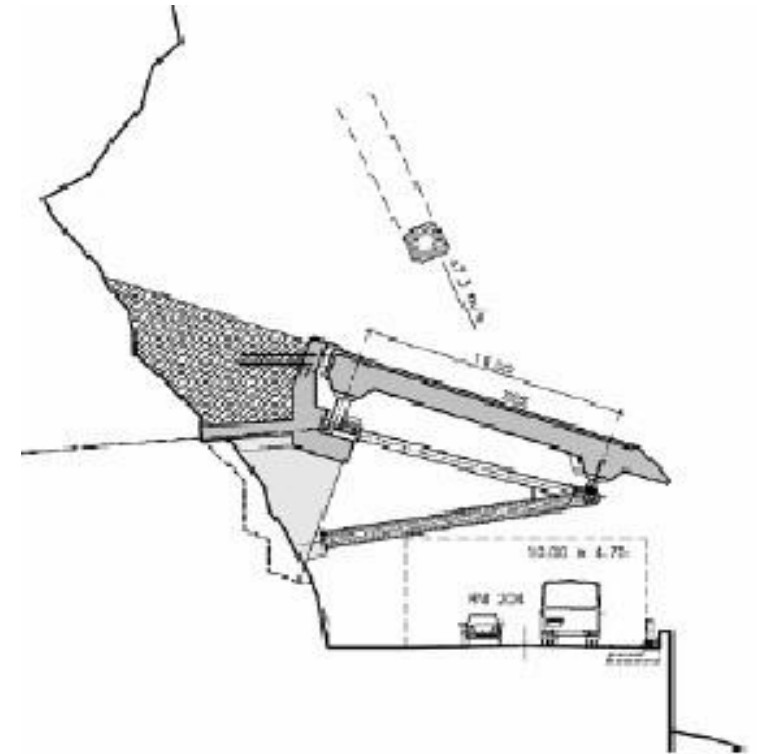
$$S = \pi \cdot \left(r + \frac{e-t}{\sqrt{3}} \right)^2$$



Galleries structurellement dissipantes



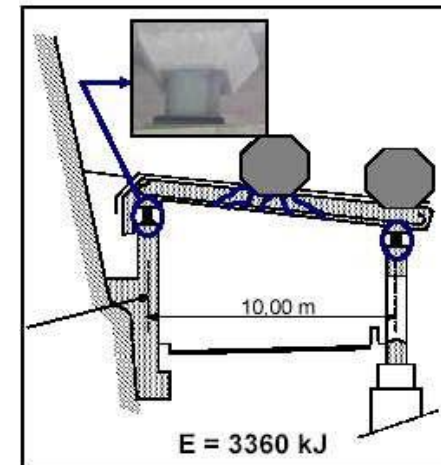
Galerie à dalle 'inversée', capacité 16 MJ. Champagny en Vanoise



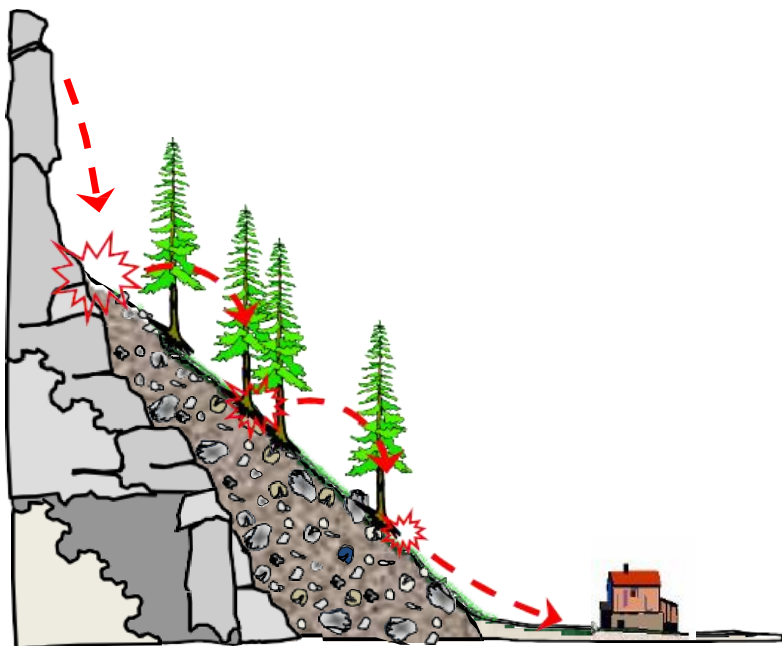
- Objectif : Allègement de la structure (descente de charge)
- Principe : dissipation d'énergie par plastification d'éléments de structure (béton, armature, appuis fusibles)
- Caractéristique principale: pas de matériau amortissant

Galeries structurellement dissipantes

- Réduction de 30% de l'épaisseur de la dalle
- Dalle accessible/entretien
- Dimensionnement de la dalle sous des sollicitations dynamiques



Forêt et aléa rocheux ACTRICE ET TÉMOIN



Vous pouvez prendre connaissance de:

**« Les Solutions fondées sur la Nature
pour les risques gravitaires et
incendie en France » (réf. en Annexe)**



Forêt et aléa rocheux

FONCTION PROTECTION

Vérification expérimentale

	Site 1 (sans forêt) (n=100)	Site 2 (avec forêt) (n=102)	
Vitesse de translation moy [m/s]	15.4	11.7	- 24%
Vitesse de translation max [m/s]	28.9	23.9	- 21%
Blocs arrêtés au niveau de la piste [%]	26	79	- 53%
Hauteur de passage max. [m]	8	2	- 75%

Simulations trajectographiques

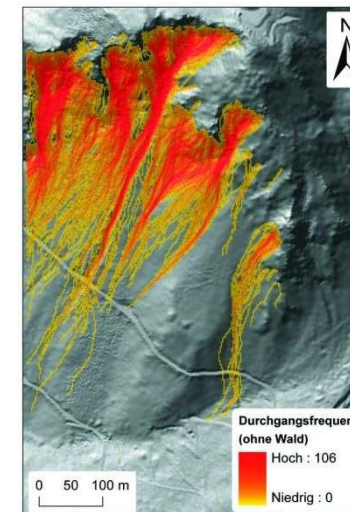


Ligne d'énergie + 4° avec forêt !

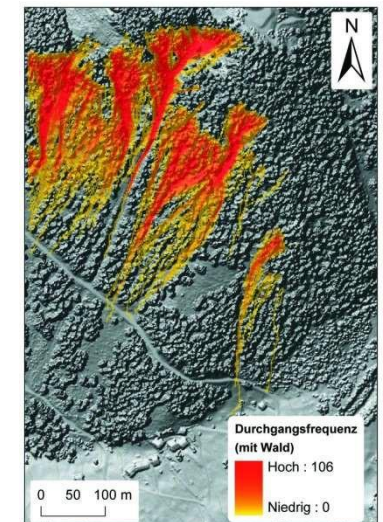
La forêt est une protection complémentaire, variable dans l'espace et le temps.

Elle doit être caractérisée, gérée et suivie ; elle ne doit pas être traitée comme une « barrière garantie ».

Sans forêt



Avec forêt



ANNEXES



Annexe - Sources

Diapositive 4 — « Risque.... Pas de panique »

- SDES, Chiffres clés des risques naturels, éd. 2023 — Risque rocheux et chutes de blocs
[↳ statistiques.developpement-durable.gouv.fr](https://statistiques.developpement-durable.gouv.fr)
- Eckert N. et al. (2020), Revue Française de Géotechnique — base événementielle du risque rocheux dans les Alpes françaises
[↳ geotechnique-journal.org](https://geotechnique-journal.org)
- RTBF — Deux morts après une chute de pierres en Haute-Savoie (août 2025)
[↳ rtbf.be](https://rtbf.be)
- CCR — Les catastrophes naturelles en France, bilan 1982-2025 (rapport complet, 2026)
[↳ ccr.fr](https://ccr.fr)
- CCR — Leaflet Bilan Cat Nat 1982-2024 (scénario Mont Granier, 800 M€)
[↳ ccr.fr](https://ccr.fr)
- France Assureurs — L'assurance des événements naturels en 2024
[↳ franceassureurs.fr](https://franceassureurs.fr)
- ASA/SVV — La Suisse est bien couverte dans le domaine des dommages naturels
[↳ svv.ch](https://svv.ch)

Diapositive 5 — Éboulement de Freney (2023)

- France Bleu/ICI — Après 19 mois, la ligne ferroviaire rouvre entre Modane et Saint-Michel-de-Maurienne
[↳ francebleu.fr](https://francebleu.fr)
- France Bleu/ICI — Réouverture annoncée pour mars 2025 : 13 millions d'euros de travaux
[↳ francebleu.fr](https://francebleu.fr)
- Wikipédia — Roche Fleurie
[↳ fr.wikipedia.org](https://fr.wikipedia.org)
- franceinfo — Après l'éboulement en Maurienne, l'A43 reste fermée, trafic ferroviaire interrompu
[↳ franceinfo.fr](https://franceinfo.fr)
- Europe1 — Éboulement en Savoie : quelles conséquences économiques ?
[↳ europe1.fr](https://europe1.fr)
- Mesinfos / Journal du Bâtiment et des TP — Des millions d'euros de travaux pour SNCF Réseau
[↳ mesinfos.fr](https://mesinfos.fr)

Annexe - Sources

- Zonage des risques en France:

Guide technique “Aléa rocheux - Méthode MEZAP”

<https://www.calameo.com/read/00571912188ce611ae02c>

<https://www.georisques.gouv.fr/consulter-les-dossiers-thematiques/dossier-expert-sur-les-mouvements-de-terrain>

<https://www.mementodumaire.net/dispositions-generales-2/amenagement-durable-du-territoire/dga2-la-traduction-des-aleas-en-zonage-reglementaire/>

Mouvements de terrain

<https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/base-de-donnees-mouvements-de-terrain>

Les Solutions fondées sur la Nature pour les risques gravitaires et incendie en France

<https://uicn.fr/wp-content/uploads/2023/03/sfn-foret-web.pdf>

Dimensionnement des merlons:

- C2ROP — Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et l’exploitation des dispositifs de protection par merlons pare-blocs, Cerema, 2020, 50 p. (ISBN 978-2-37180-481-4).

- Sections particulièrement utiles : §2.2 « Comportement sous impact » (pp. 11–17) ; §3.4 « Conception et dimensionnement » (pp. 27–38).

- Le guide indique explicitement que le détail du dimensionnement sous sollicitation dynamique (actions, combinaisons, coefficients) doit encore être amélioré.

- Pour la méthode pseudo-statique : §2.2.2.1, type 3, p. 15 ; §3.4.4.2.3, pp. 37–38.

- Référence web :

<https://doc.cerema.fr/digitalCollection/DigitalCollectionAttachmentDownloadHandler.ashx?documentId=19473&parentDocumentId=17422&skipCopyright=true&skipWatermark=true>