
Mécanique des Roches - GEO 3

Stabilité des massifs rocheux

Les parades

Différents 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 roulement
 - 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 »)

Aléas et risques

APPLICATION A L'ALÉA ROCHEUX

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Exposition} \times \text{Vulnérabilité} \times \text{Coût}$$

« conséquences » (économique, personnes)

$$\text{Aléa} = \text{Probabilité d'occurrence} \times \text{Intensité}$$

=énergie cinétique du bloc

$$\text{Probabilité d'occurrence} = P(\text{départ}) \times P(\text{atteinte})$$

période de retour « distance de propagation »

Risque....

PAS DE PANIQUE

Taux de mortalité :

<i>Nature</i>	<i>Taux</i>
<i>(a) risque naturel :</i>	
– foudre	0,2
– crue	0,5
– avalanche	0,5 – 4
<i>(b) risque domestique :</i>	
– noyade	10–16
– overdose (drogue)	50–60
– suicide	100
– accident de la circulation	130–150
– accident domestique	110–330
– grippe	300–400
– tabac	3 000–5 000
<i>(c) risque sportif :</i>	
– football	60
– ski	410
– alpinisme	600
– plongée	1 260
– nautisme	8 000

Coût pour les assurances

(Suisse 1993-2002) :

<i>Nature</i>	<i>Montant total (M€)</i>	<i>Part relative (%)</i>
tempête	588	41,5
grêle	362	25,6
inondation	373	26,4
avalanche	65	4,6
chute de pierre	28	2,0

France métropolitaine : 2 décès / an

Risque : l'enjeu économique

UN EXEMPLE DANS UN CONTEXTE DE RÉSEAU

Événement: Mars 2006, éboulement de quelques blocs sur la voie ferrée de Moûtiers (qq m³)

Conséquences : 25 000 personnes bloquées en gares
70 trains bloqués (TER, TGV, Thalys, Eurostar)

Coûts: Direct 1,34 m€, Indirects 5,4M€

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

Chute de bloc atteignent des réseaux
desservant des territoires enclavés !

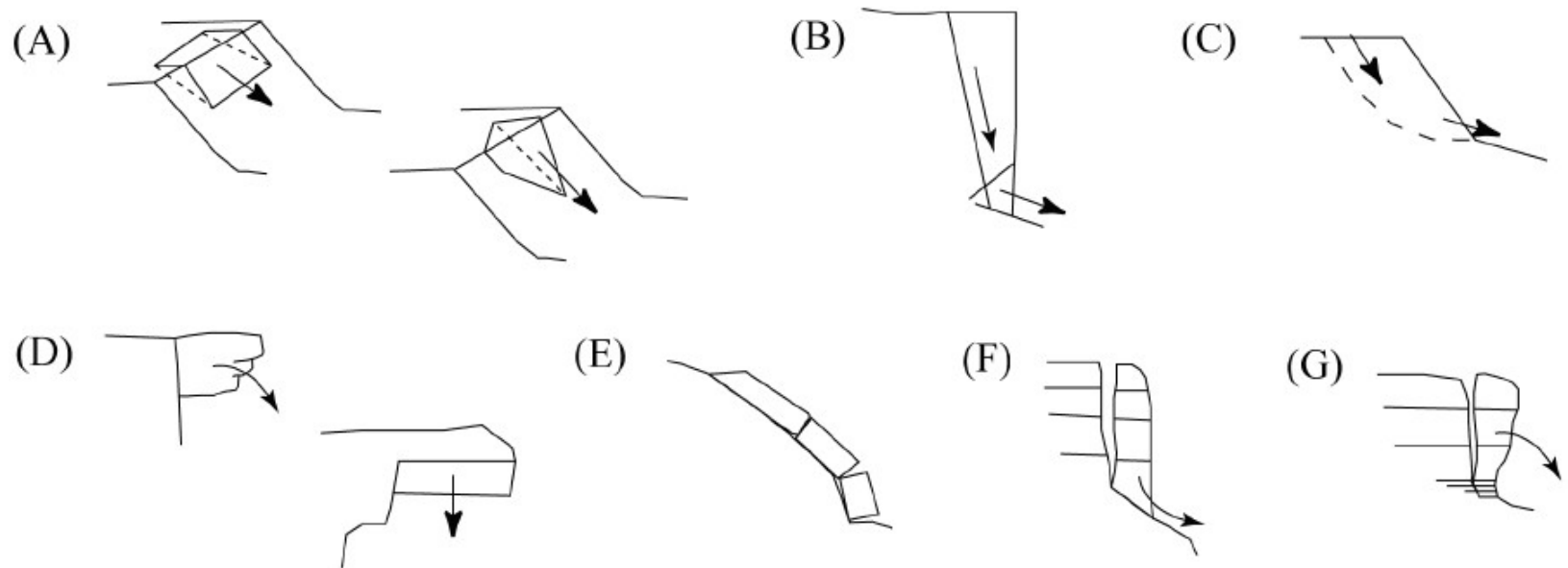
Les 3 grandes phases

- **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

Initiation : facteurs de prédisposition

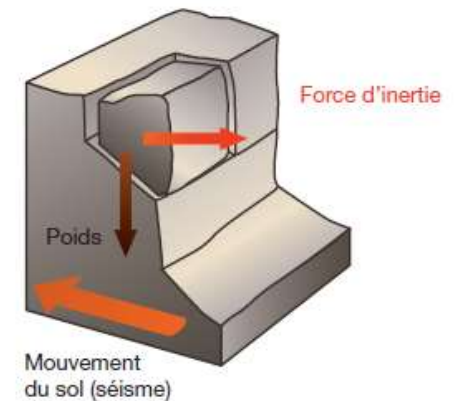
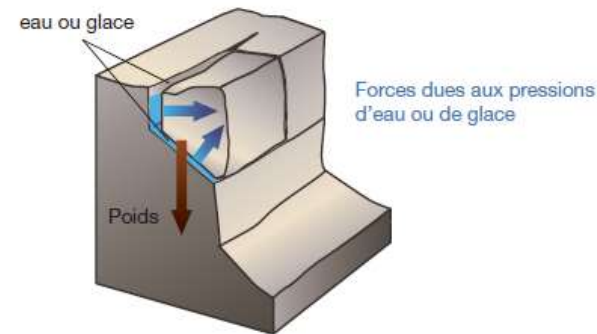


Mécanismes de rupture d'éboulements rocheux : (A) glissements plan et dièdre, (B) glissement composé, (C) glissement rotationnel, (D) rupture de surplomb ou de dalle de toit, (E) rupture de banc, (F) rupture de colonne en pied, (G) basculement de colonne.

Initiation : Facteurs dégradants/aggravants/declenchants

Causes possibles

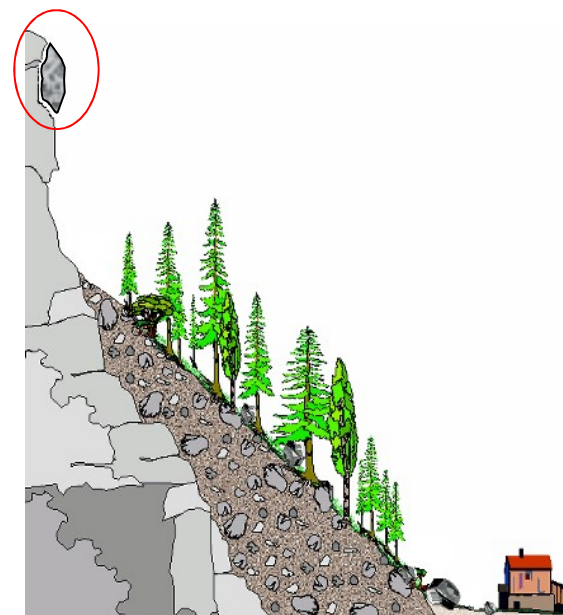
- Pluie, eaux souterraines
- Cycles gel-dégel
- Accumulation neigeuse
- Dilatation thermique
- Séisme
- Vibrations/explosions
- Racines
- Animaux
- Feux de forêt
- Erosion en pied (vent, eau)



Evaluation du risque

APPROCHE 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



Aléa de départ

Estimation du volume mobilisable

- Volume total
- Taille et forme à l'arrivée

Probabilité d'occurrence

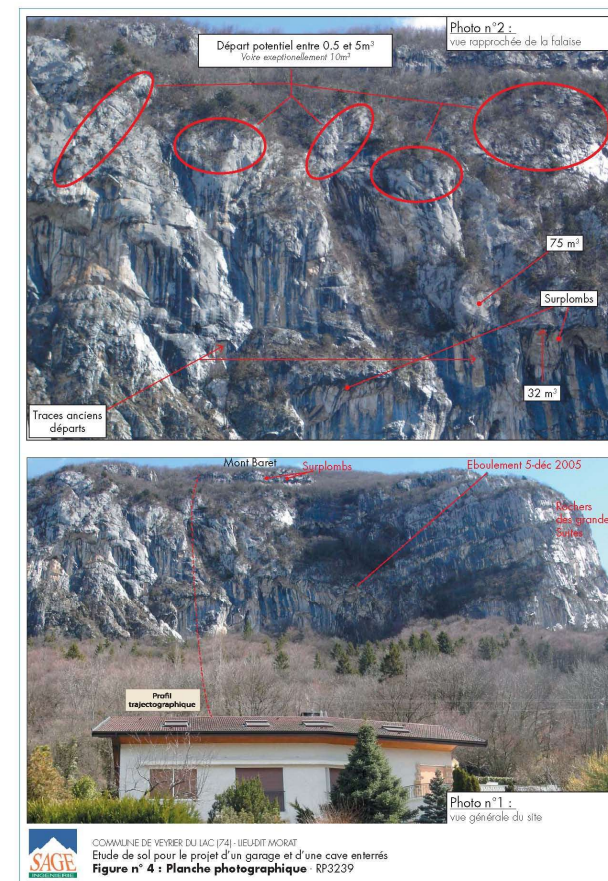
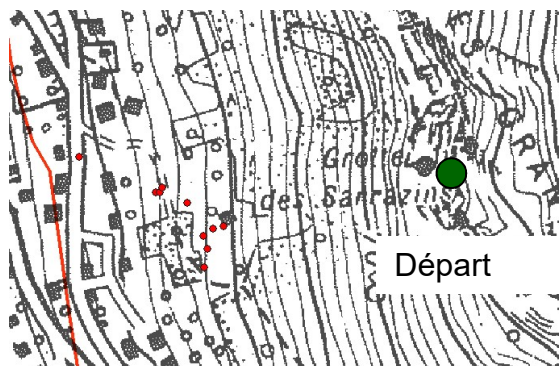
(Terme probable d'occurrence)

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

Estimation du volume mobilisable

Volumes déterminés par :

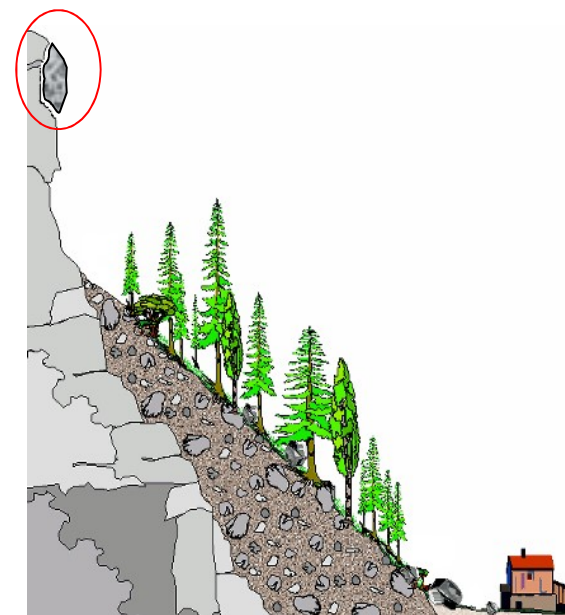
- Observation de la paroi (compartiments rocheux, cicatrices)
- Observation des blocs éboulés
- Analyse structurale
- Relevés Lidar



Evaluation du risque

APPROCHE SIMPLE DE L'INGENIERIE

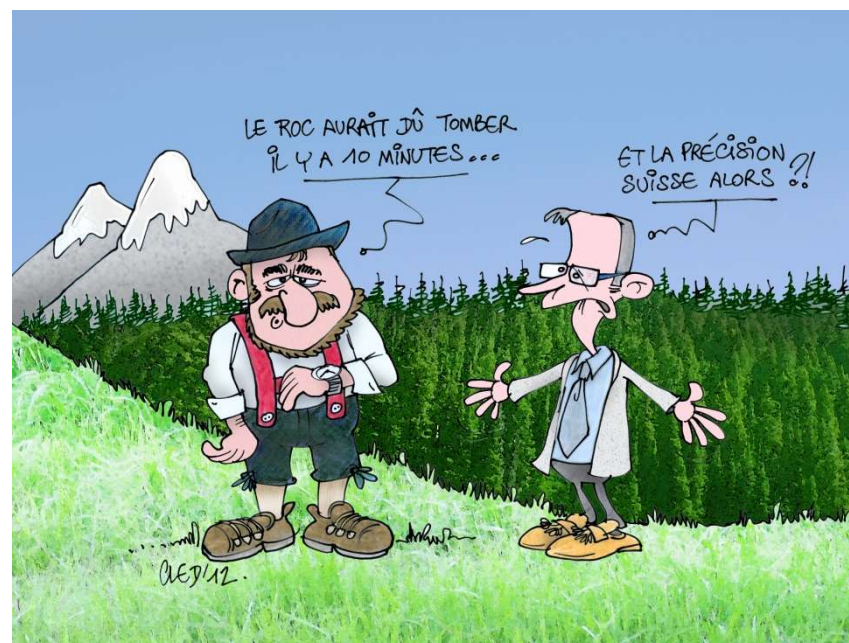
- 1 - Estimation du volume mobilisable
 - Volume total
 - Taille et forme à l'arrivée
- 2 - Terme probable d'occurrence
 - Désigne l'urgence à traiter le risque
 - 6 Qualificatifs : 'Imminent' à 'échelle géologique'
- 3 – Propagation (trajectographie)
- 4 – Vulnérabilité de l'enjeu
 - Phénomène soudain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



Estimation de l'aléa de départ

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'



Aléa de départ

COMPARATIF DES TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION

	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

Estimation de l'aléa de départ

OCCURRENCE: COMPARTIMENT BIEN IDENTIFIÉ

Pratiques courantes :

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



Estimation de l'aléa de départ

Suivi de falaise par scan laser terrestre

Utilisé quand un mouvement ou une déformation est suspecté. Met en évidence les suivants..

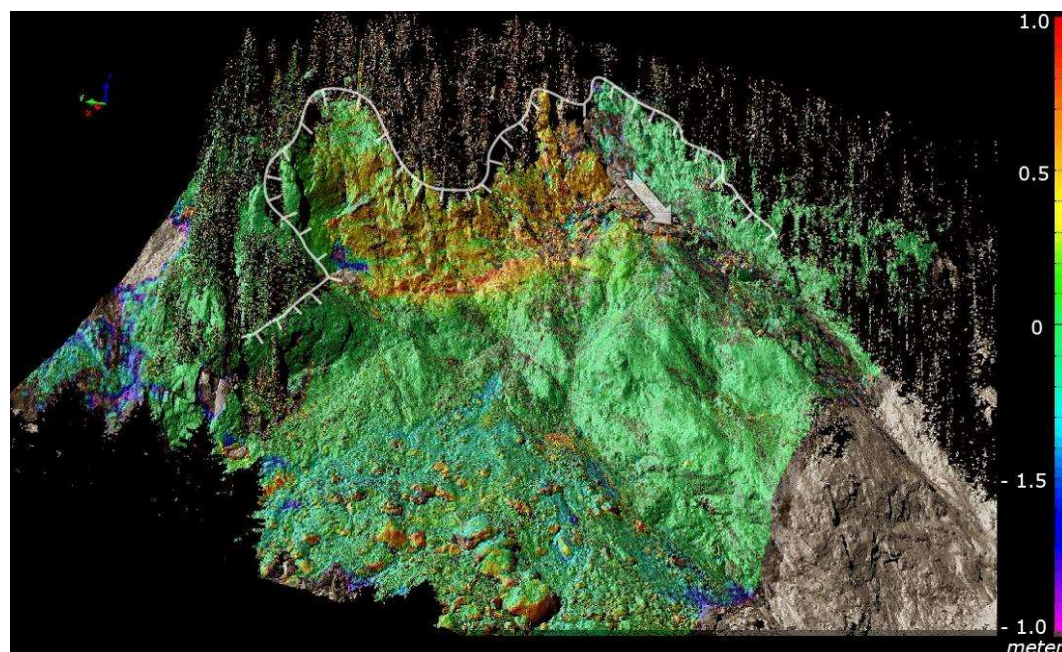


Figure 2.5. *Terrestrial laser scanning imaging of displacement of the Val Canaria rockslide. The moving rock face (in yellow) is 40 m high. The displacement was measured between July 2007 and October 2009. The rock face collapsed the day after the second scan*

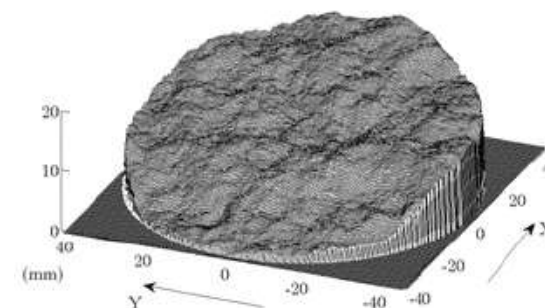
(Derron, M.-H. et al.)

Estimation de l'aléa de départ

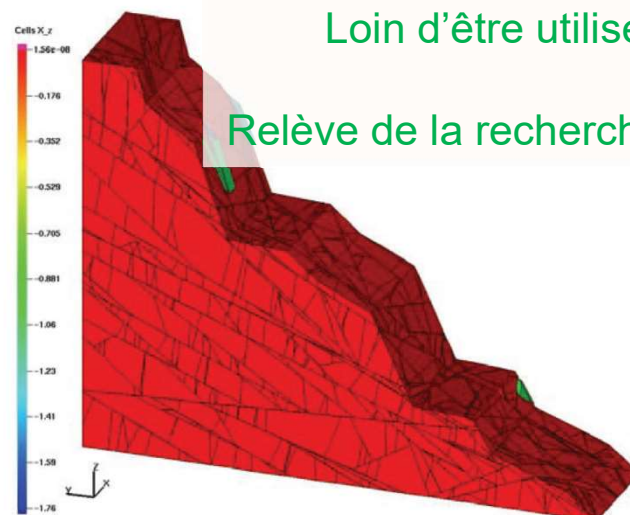
MODÉLISATION DE LA STABILITÉ DES MASSES ROCHEUSES

Deux points essentiels:

- Modèle mécanique de joint
- Réseau de fissures



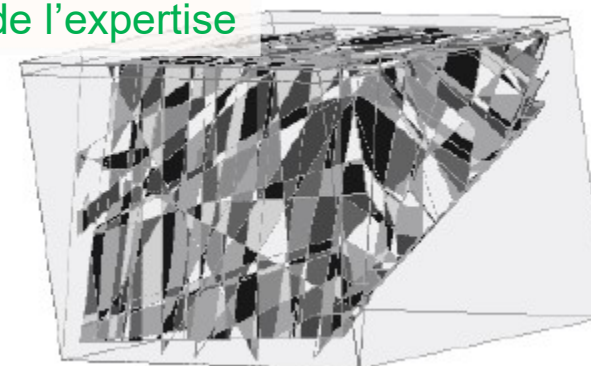
Morphology of a rock joint



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

Loin d'être utilisé en ingénierie

Relève de la recherche, ou de l'expertise



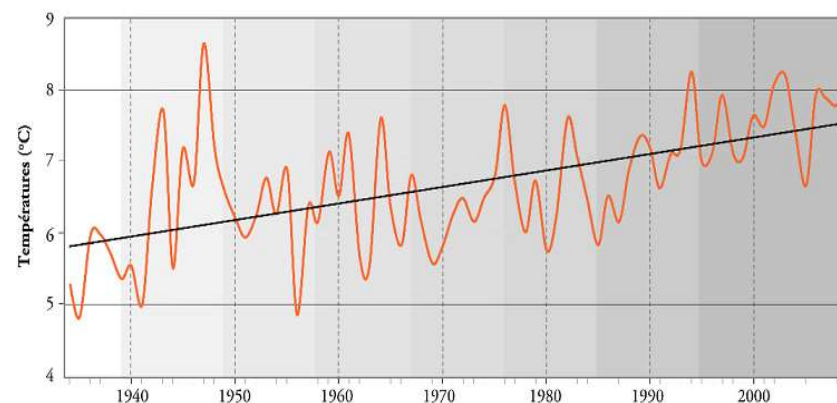
Unstable volume of a slope (blocks are defined by statistically distributed discontinuities). RESOBLOCK software

Aléa de départ

INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

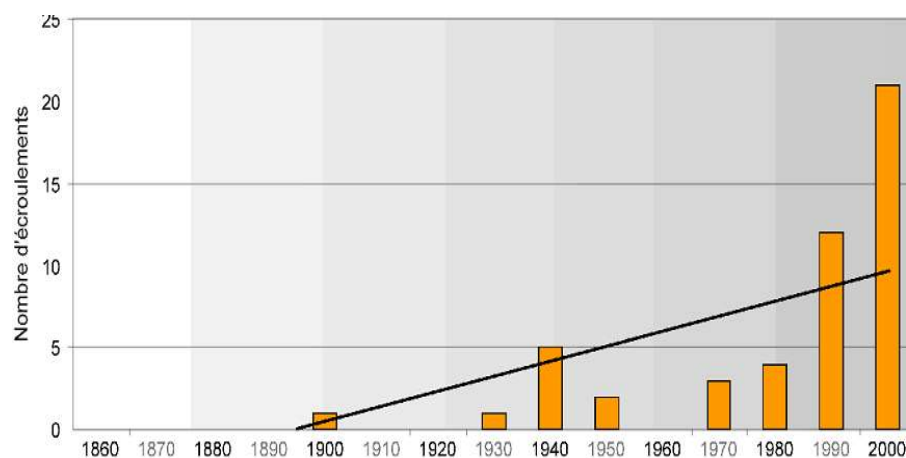
Evolutions attendues:

- Elévation de l'isotherme zéro
- Augmentation de la fréquence et de l'intensité des évènements 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



(Ravanel, L. & Deline, P.; Université de Savoie)

Aléa de départ

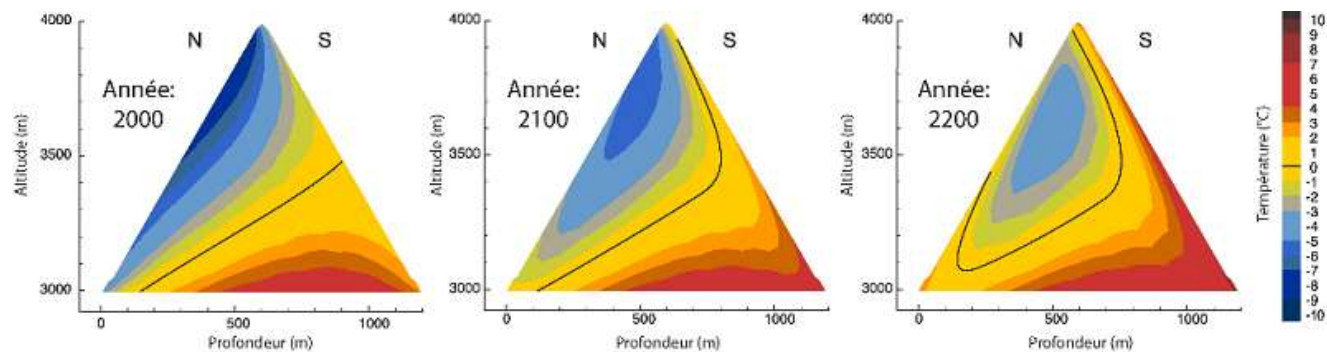
INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

glace encore présente
deux semaines après
l'éboulement



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,).

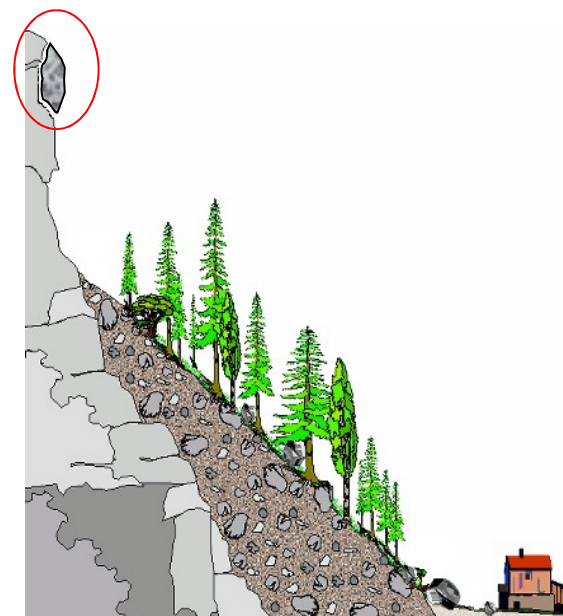


(Ravanel, L. & Deline, P.; Université de Savoie)

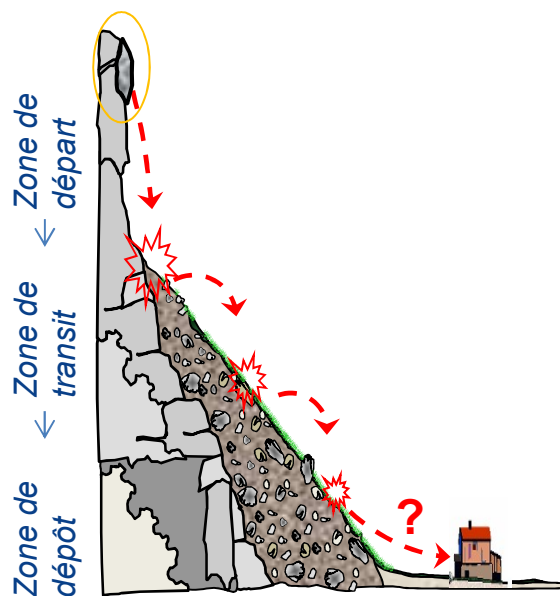
Evaluation du risque

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



Aléa de propagation / Trajectoire d'un bloc



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

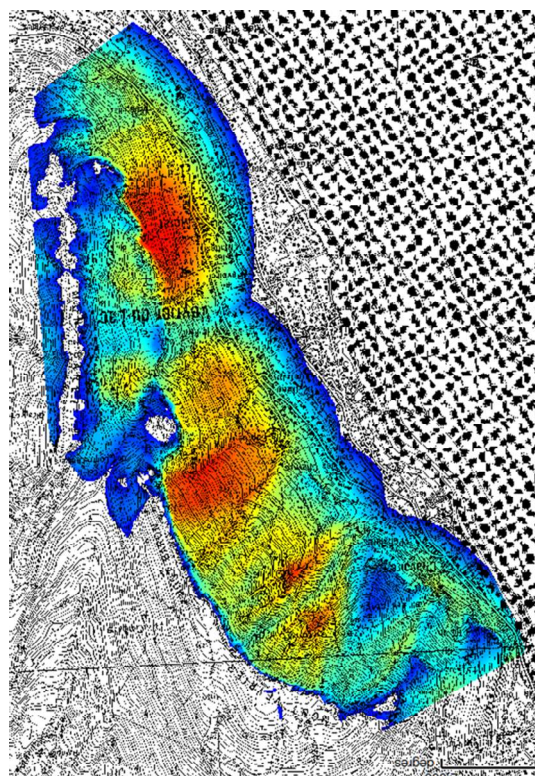
Modélisation des éboulements en masse : non abordé

Aléa de propagation

LIGNE D'ÉNERGIE / SIMULATION DES TRAJECTOIRES

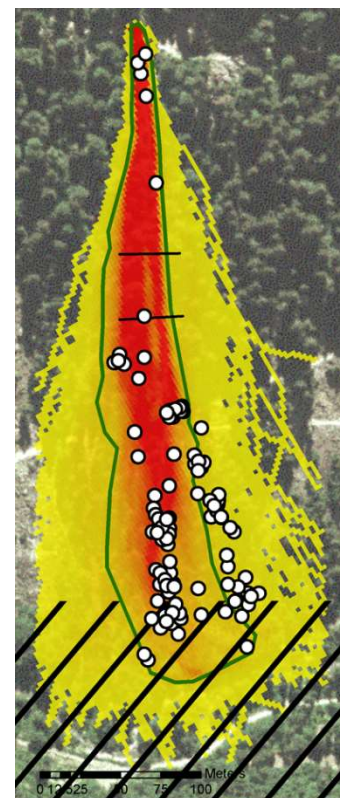
Ligne d'énergie

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



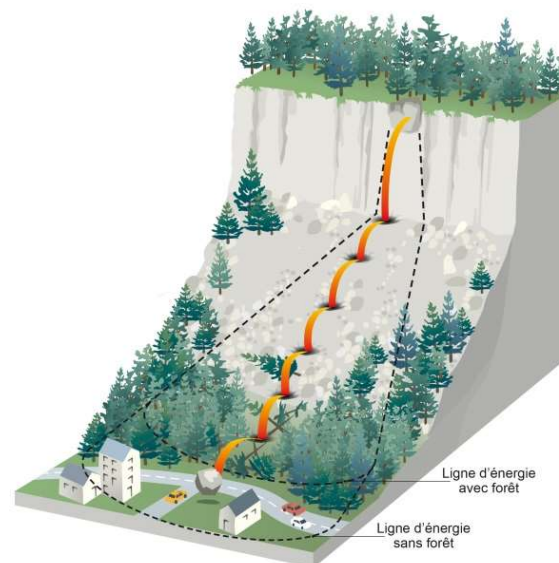
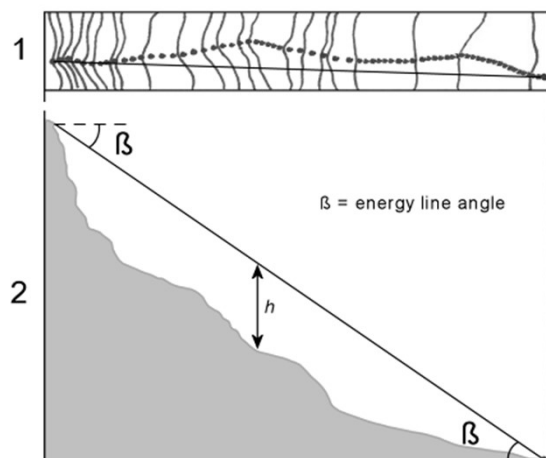
Simulation :

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



Aléa de propagation - Ligne d'énergie

PRINCIPE



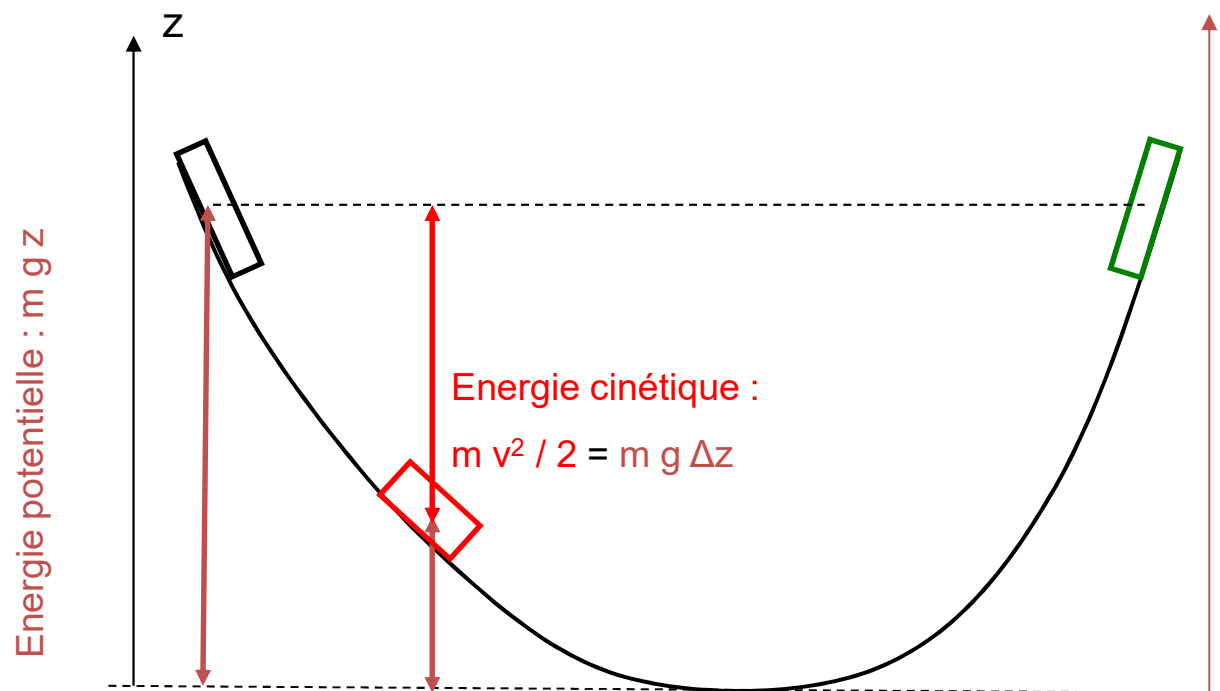
Postulat : la distance et le dénivelé parcourus par un bloc depuis son point de chute initiale sont liés.

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)

Aléa de propagation - Ligne d'énergie

PRINCIPE

GLISSEMENT SANS FROTTEMENT



(source : D. Hantz)

Aléa de propagation - Ligne d'énergie

PRINCIPE

Valeurs typiques de β : 32° à 38°.

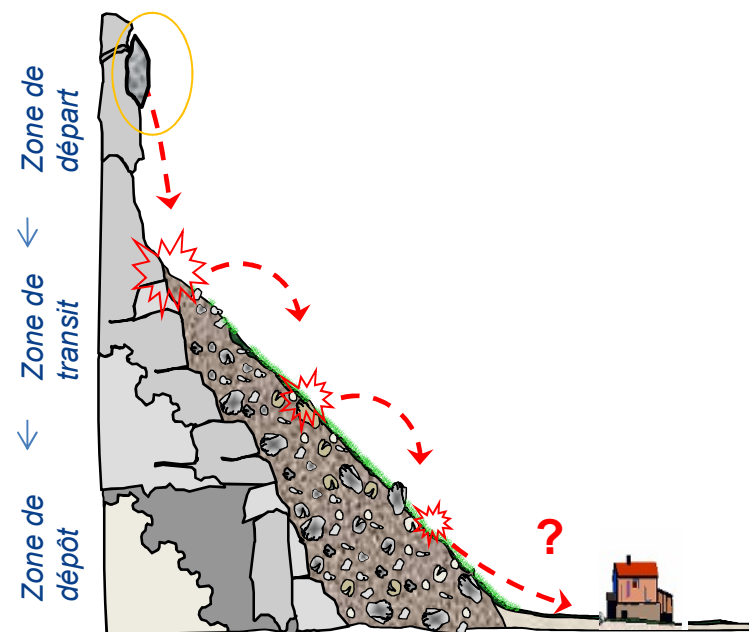
Détermination empirique.

Auteurs	Valeur de l'angle de la ligne d'énergie
Hsü, 1975	31°
Moser, 1986	33°- 42°
Meissl, 1986	33° - 35°
Grunder, 1984	32.6°- 33.4°
Onofri et Candian, 1979	28.34°- 40.73°
Domaas, 1985	32°
Gerber, 1994	33°- 37°

Aléa de propagation - Etude trajectographique

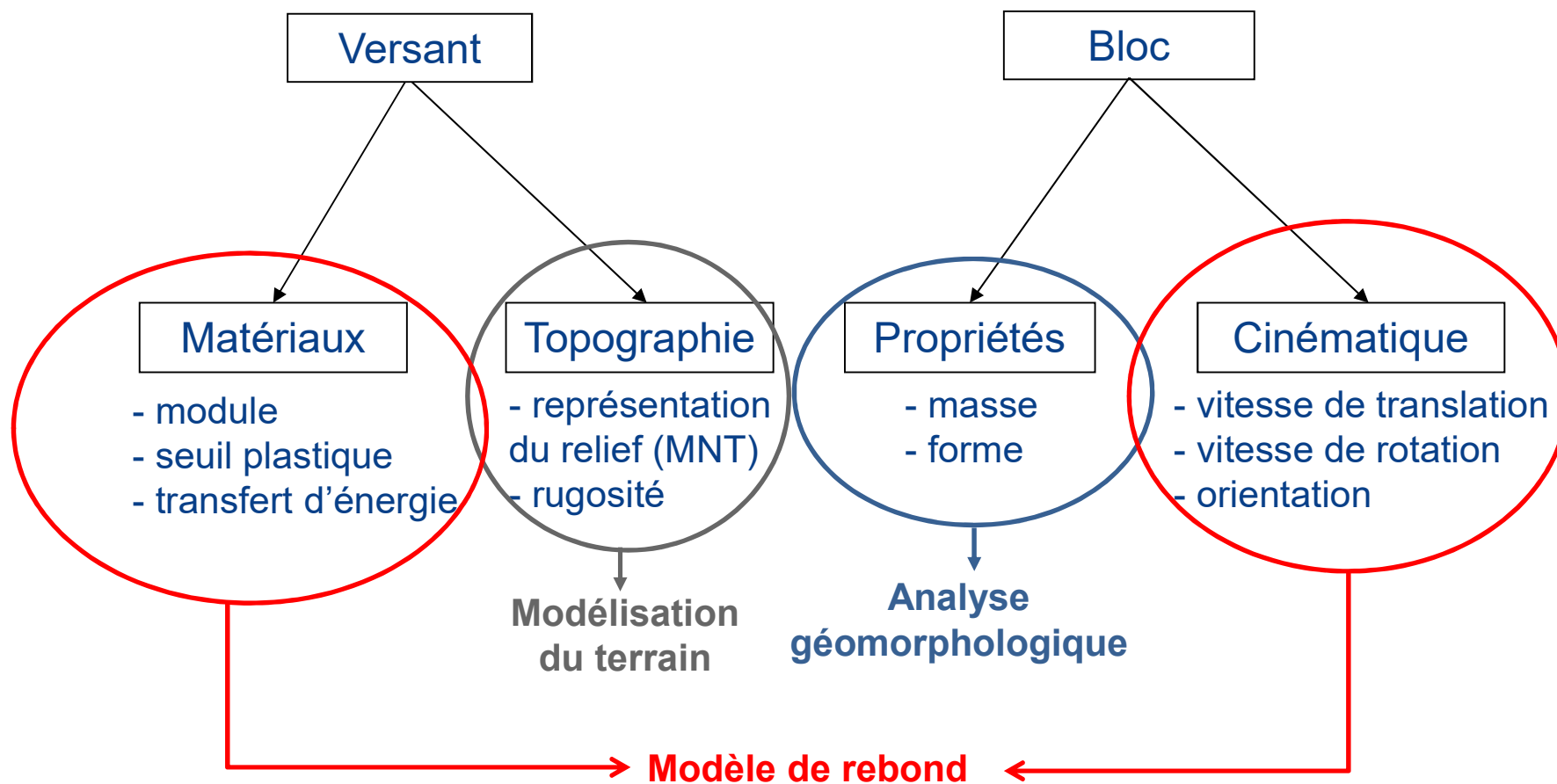
PRINCIPES

- ❑ 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



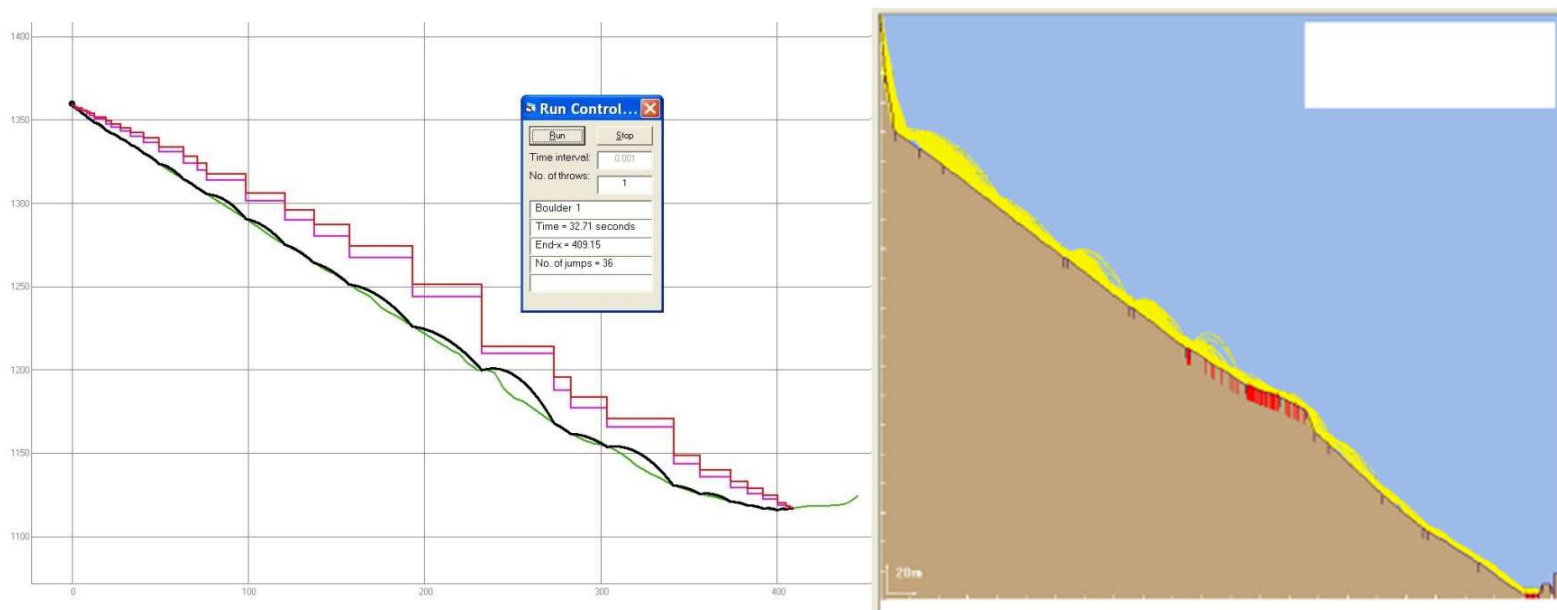
Aléa de propagation - Etude trajectographique

PARAMÈTRES INFLUENTS



Aléa de propagation - Etude trajectographique

MODÈLES 2D

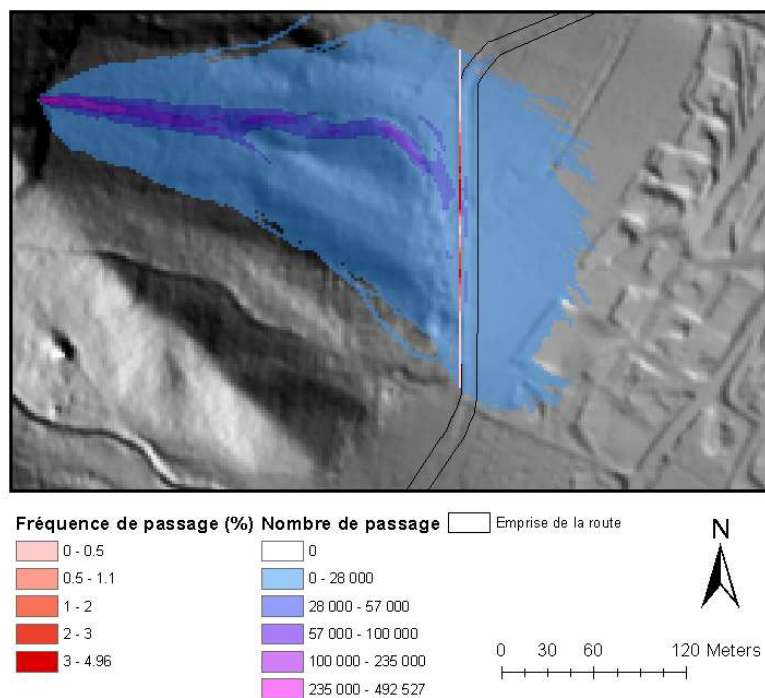


Mais :

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

Aléa de propagation - Etude trajectographique

MODÈLES 3D



Mais :
- Résolution du MNT !

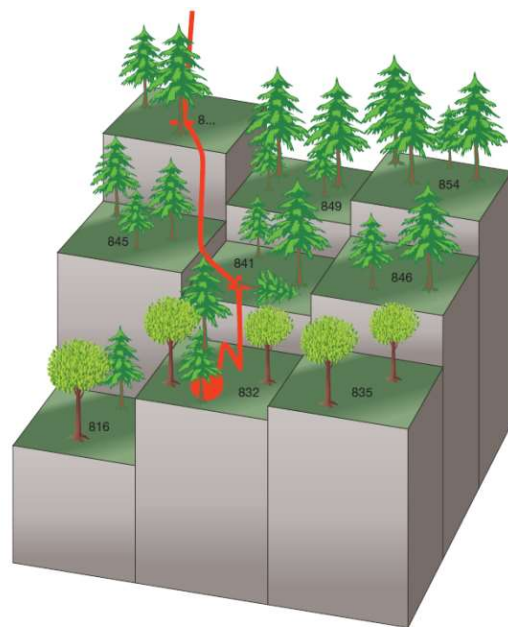
MNT: Modèle Numérique de Terrain (représentation spatiale de l'altitude).

Aléa de propagation - Etude trajectographique

MODÈLES 3D

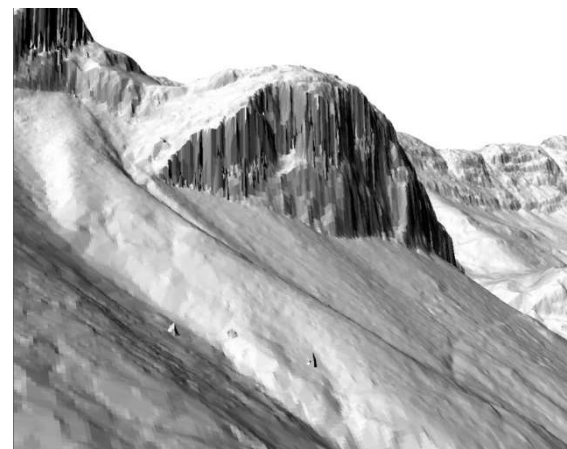
Représentation du terrain (MNT)

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

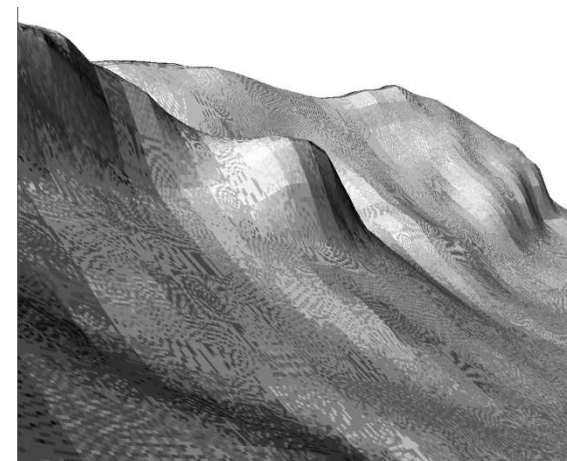


Compromis entre précision de la représentation et temps de calcul !

Résolution : 1m

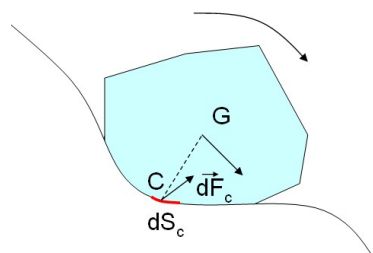


Résolution : 50m



Mécanique du rebond

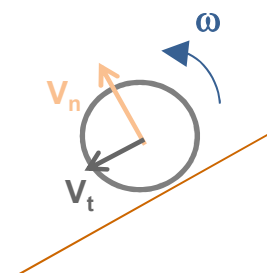
Approche analytique



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

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

$$\rightarrow \begin{cases} \vec{V}^{re} = \vec{V}^{in} + \int_{t^{in}}^{t^{re}} m_b \vec{\gamma}_b dt \\ \vec{\Omega}^{re} = \vec{\Omega}^{in} + \int_{t^{in}}^{t^{re}} \vec{I} \vec{\xi}_b dt \end{cases}$$



Modèles courants (point matériel)

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

$$\begin{bmatrix} V_t^{re} \\ V_n^{re} \\ \omega^{re} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_t & 0 & 0 \\ 0 & R_n & 0 \\ / & / & / \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t^{in} \\ V_n^{in} \\ \omega^{in} \end{bmatrix}$$

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°
Descoedres & 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

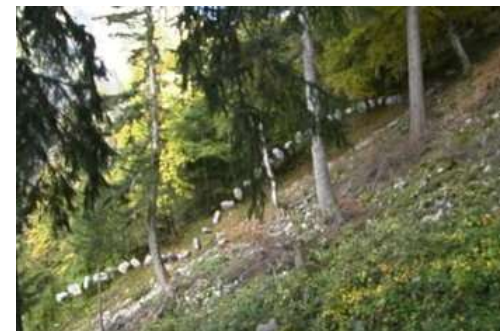
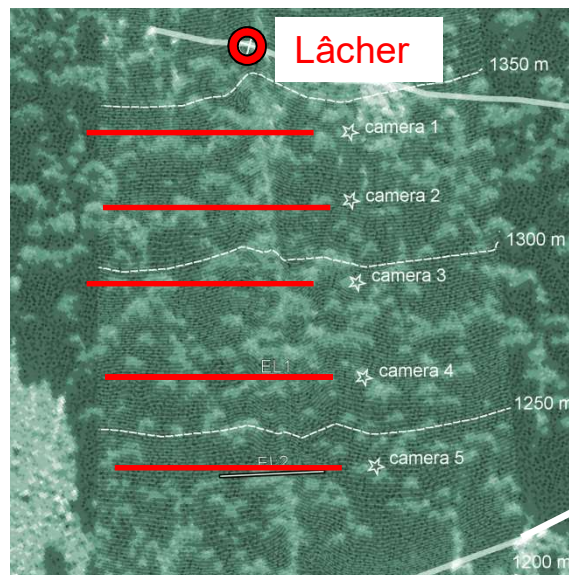


Définitions variables / plages variables / difficile à ajuster

Aléa de propagation - Etude trajectographique

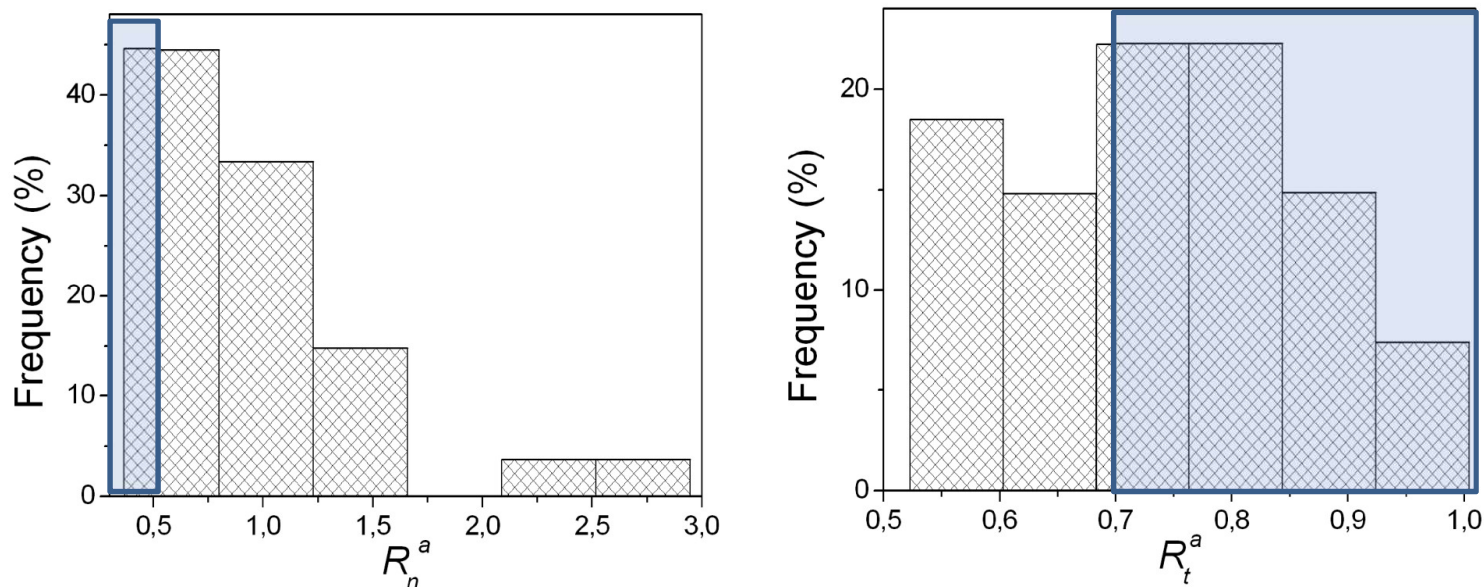
DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES COEFFICIENTS

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



Aléa de propagation - Etude trajectographique

VALIDITÉ DES COEFFICIENTS DE RESTITUTION APPARENTS



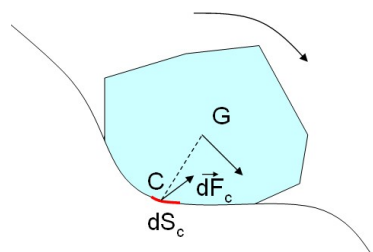
En bleu: plages de valeurs de R_n et R_t issues de la littérature

➔ 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

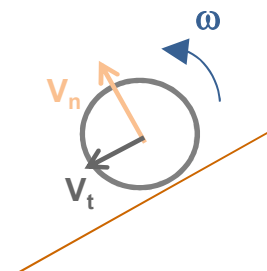
Approche analytique



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

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

$$\rightarrow \begin{cases} \vec{V}^{re} = \vec{V}^{in} + \int_{t^{in}}^{t^{re}} m_b \vec{\gamma}_b dt \\ \vec{\Omega}^{re} = \vec{\Omega}^{in} + \int_{t^{in}}^{t^{re}} \vec{I} \vec{\xi}_b dt \end{cases}$$



Modèles courants (point matériel)

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

$$\begin{bmatrix} V_t^{re} \\ V_n^{re} \\ \omega^{re} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_t & 0 & 0 \\ 0 & R_n & 0 \\ / & / & / \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t^{in} \\ V_n^{in} \\ \omega^{in} \end{bmatrix}$$

Modèles stochastiques (point matériel)

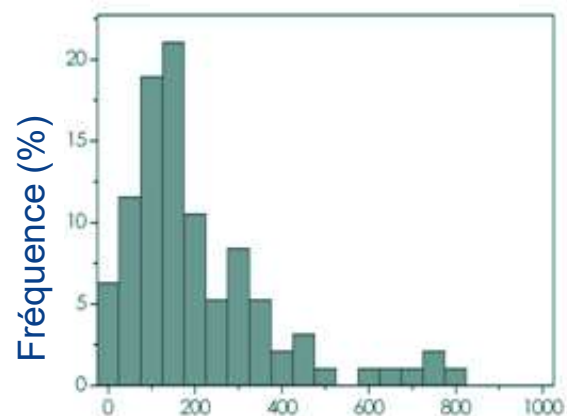
$$\begin{bmatrix} V_{x,r} \\ V_{y,r} \\ R_b \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}(p) & a_{12}(p) & a_{13}(p) \\ a_{21}(p) & a_{22}(p) & a_{23}(p) \\ a_{31}(p) & a_{32}(p) & a_{33}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{x,i} \\ V_{y,i} \\ R_b \omega_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y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

Prise en compte
des couplages
cinématiques !

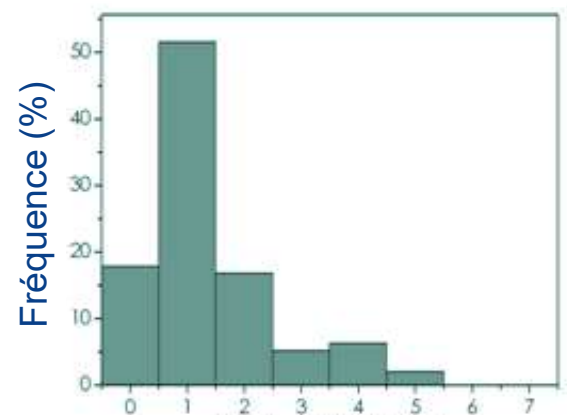
Aléa de propagation - Etude trajectographique

VALIDATION DU MODÈLE STOCHASTIQUE

Expérience

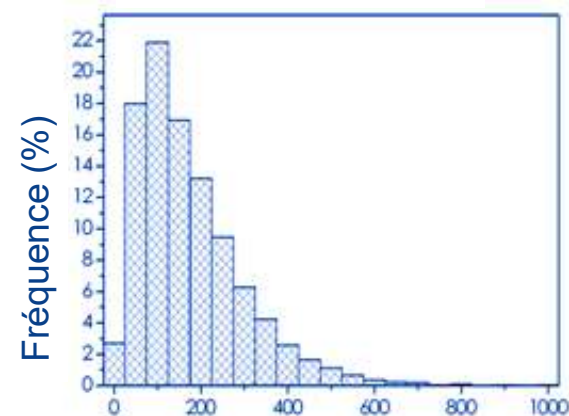


$E_{c_{max}}$ camera 4 (m/s)

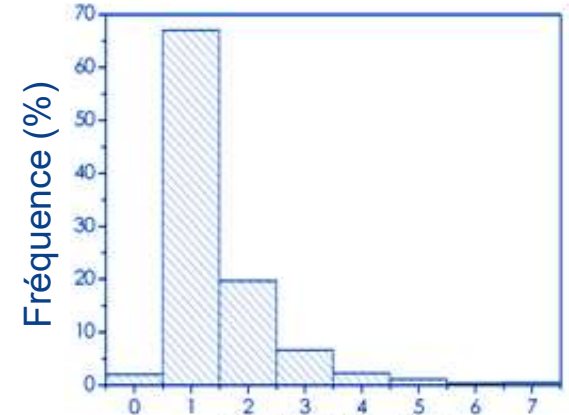


H_{max} camera 4 (m)

Simulations



$E_{c_{max}}$ camera 4 (m/s)



H_{max} camera 4 (m)



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

Simulation trajectographique : TD

Estimation du volume d'un bloc, avec le logiciel SWedge de Rocscience

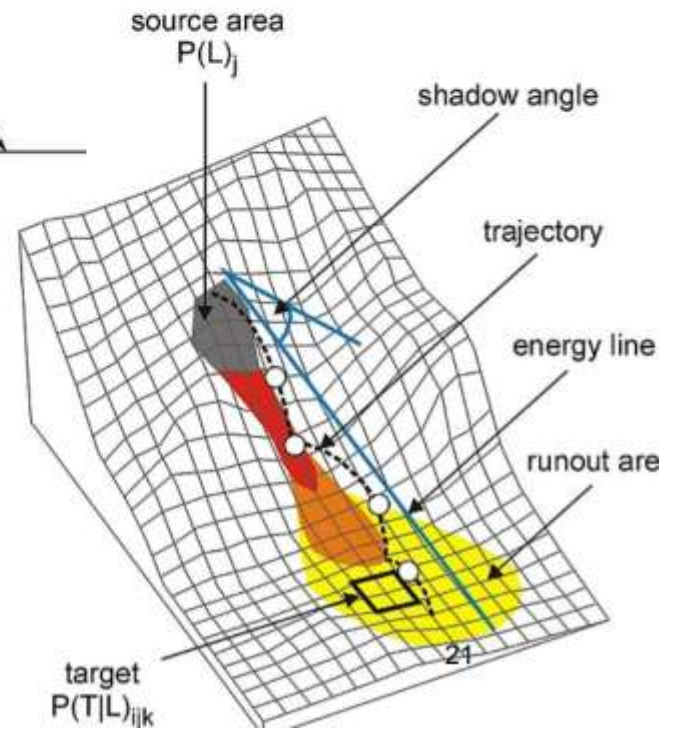
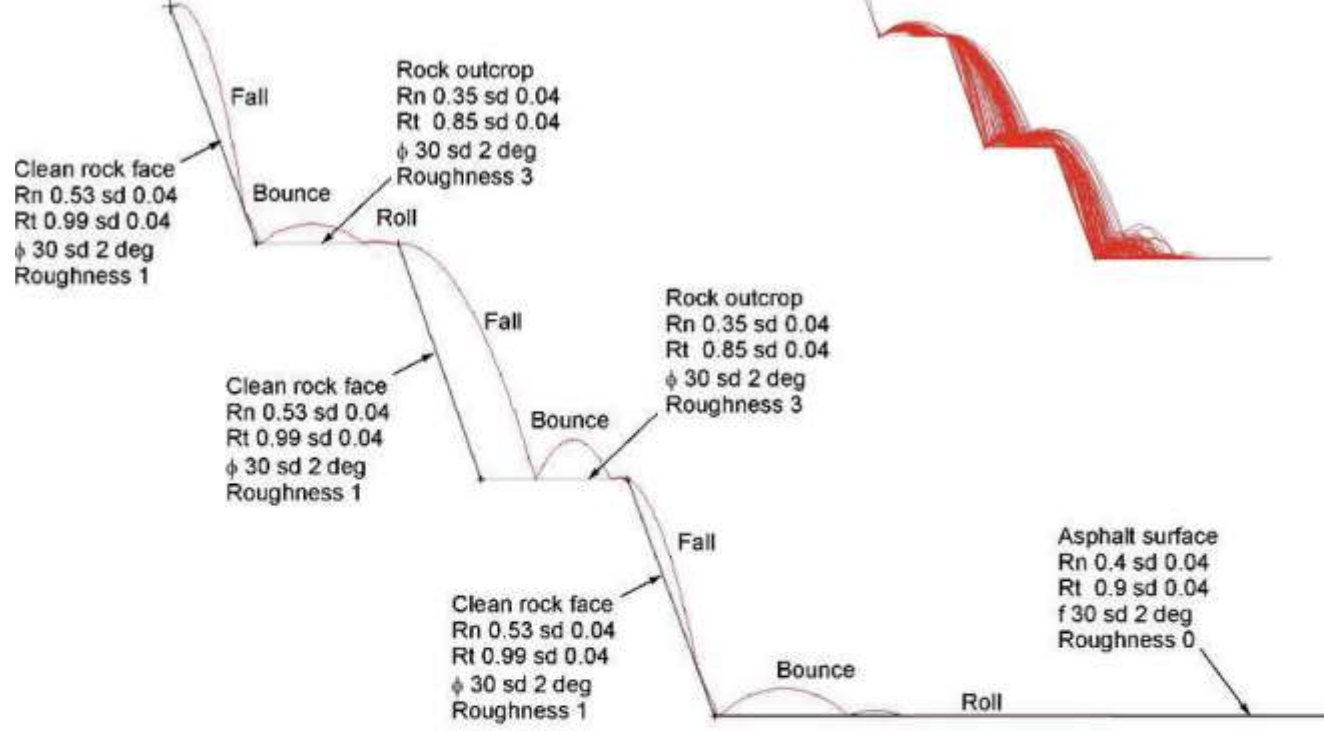
Utilisation des logiciels Rocfall de Rocscience et Propag du CEREMA

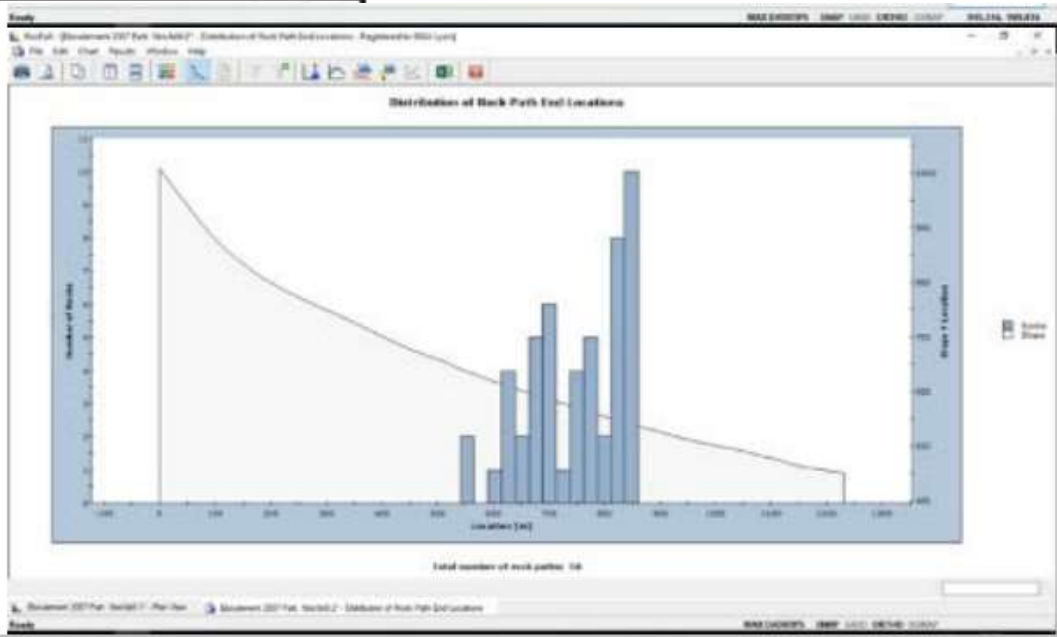
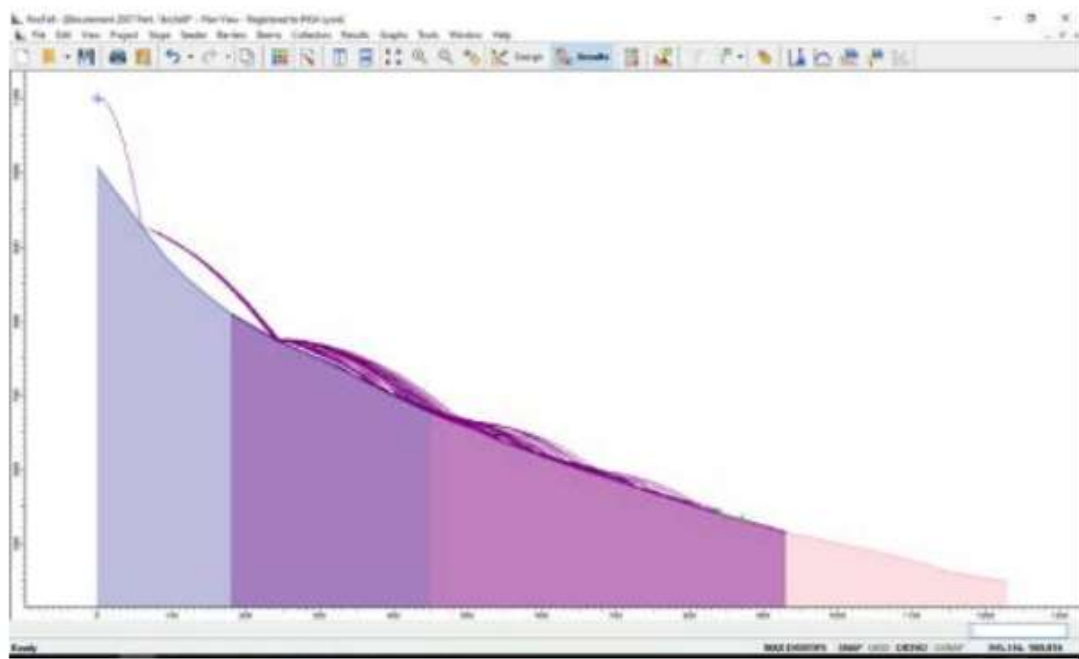
.
Un écran virtuel peut être dressé à différents endroits clés du site. Il permet de collecter les informations nécessaires à la qualification des aléas de propagation et aux pré dimensionnement des éventuelles protections :

- 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.

unit seeder
 velocity 3 m/s
 velocity 2 m/s
 rock mass 10 kg





Etude trajectographique

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

Zonage de l'aléa

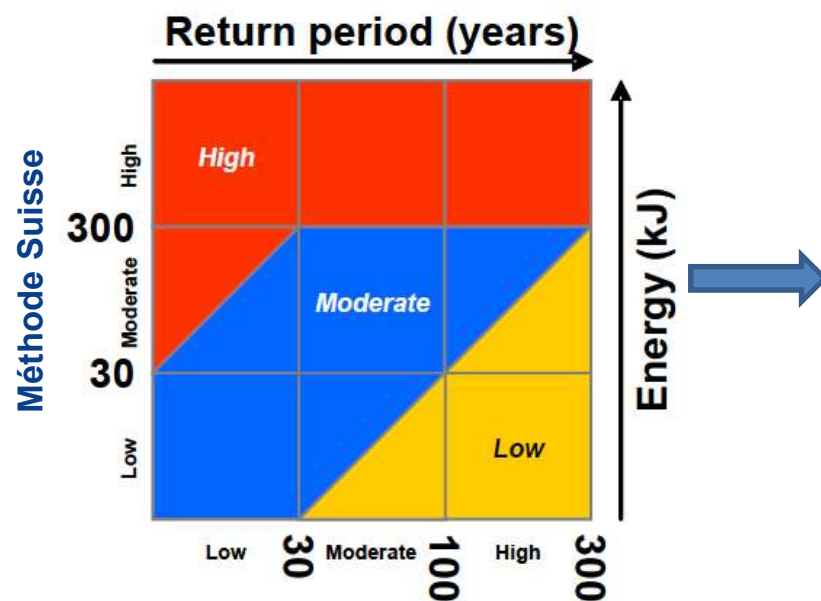
Tracer une limite sur une carte...

Zonage de l'aléa

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



(PLANAT, 2007)



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

Zonage de l'aléa, en France

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

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

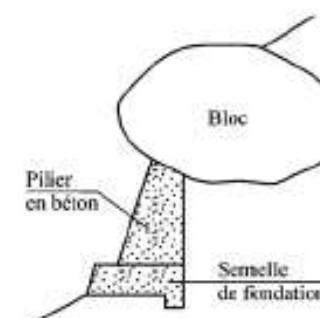
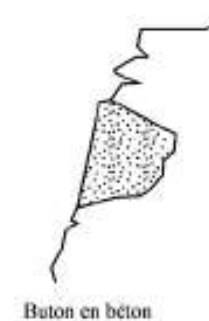
La mise en œuvre de parades se fait dans le cadre d'une stratégie globale de mitigation, incluant également des actions non structurelles (information, évacuation, contournement...)

Parades actives

EXEMPLES



Câblage



Soutènement

Parades actives

EXEMPLES



Béton projeté



Grillage et filet plaqué

Parades actives

EXEMPLES



Purge, abattage

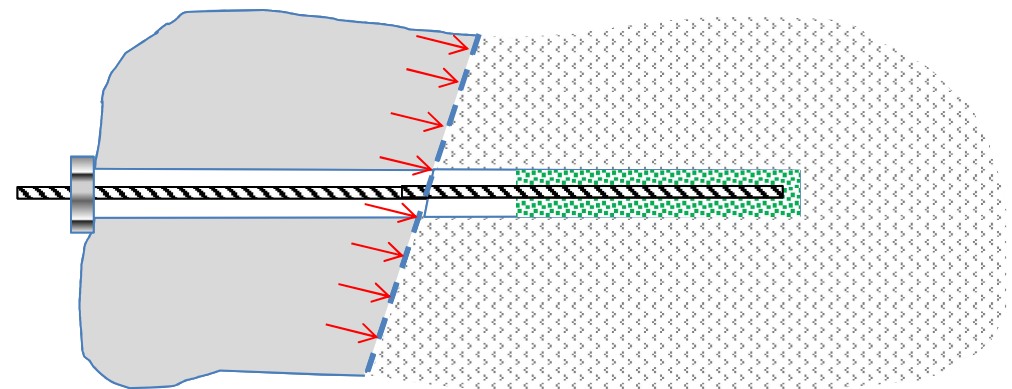
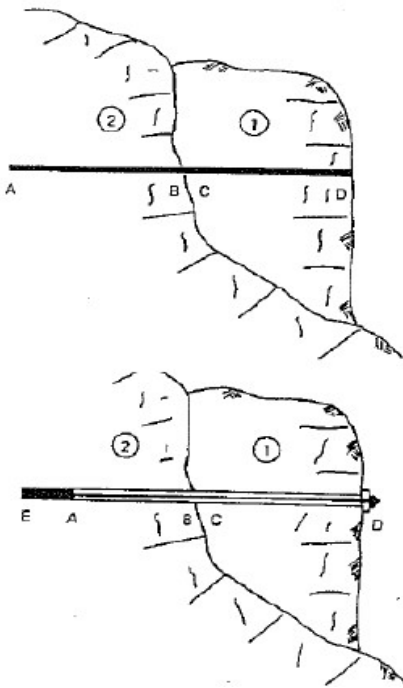


Ancrage/clouage

Boulons et tirants

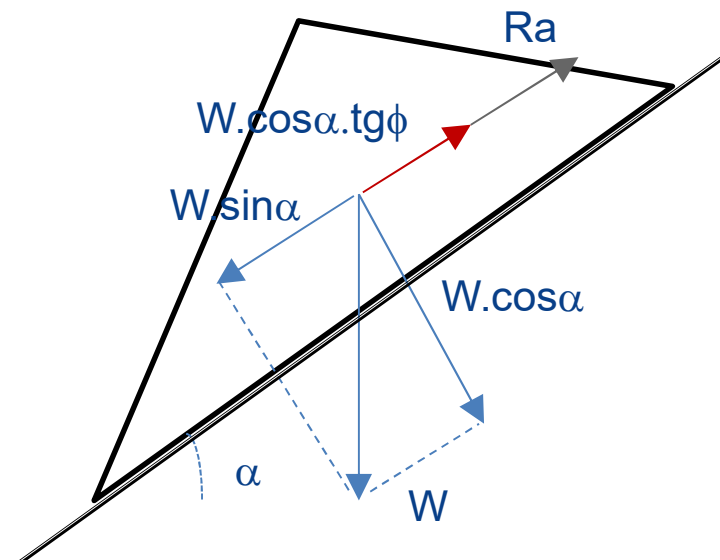
■ Principe de fonctionnement

- 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)



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, $\tan \phi / \tan \alpha > 1$)

(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 évènements une fois initiés
→ placés à proximité (à l'amont) des zones à protéger

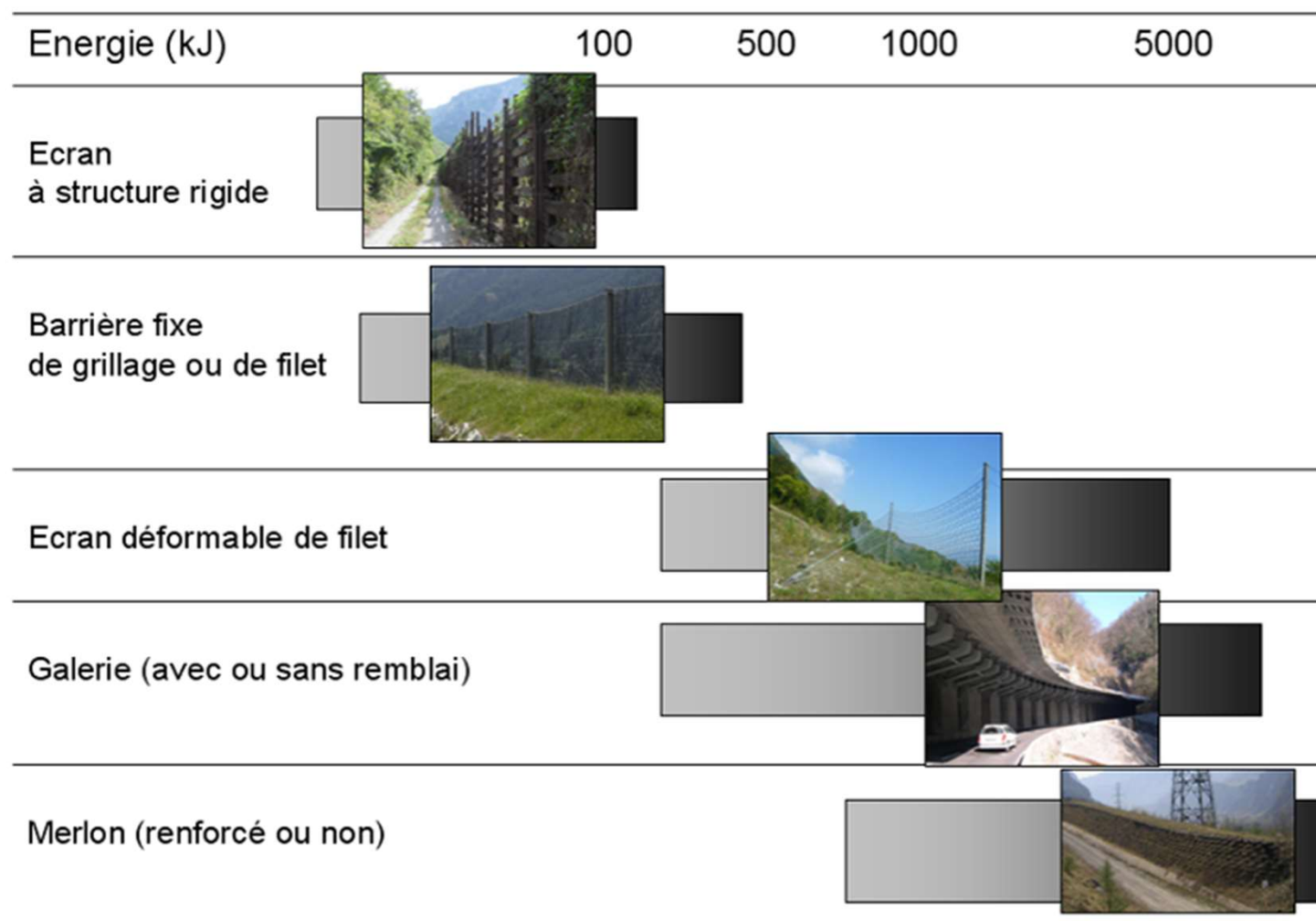
Permanent : ouvrages à proximité des enjeux dont:

- Merlons
- Ecrans
- Déviateurs
- Galeries

Temporaire : alerter

Les ouvrages passifs

CLASSIFICATION PAR GAMMES D'ÉNERGIE



Dimensionnement des ouvrages de protection passive

Dimensionnement 'fonctionnel'

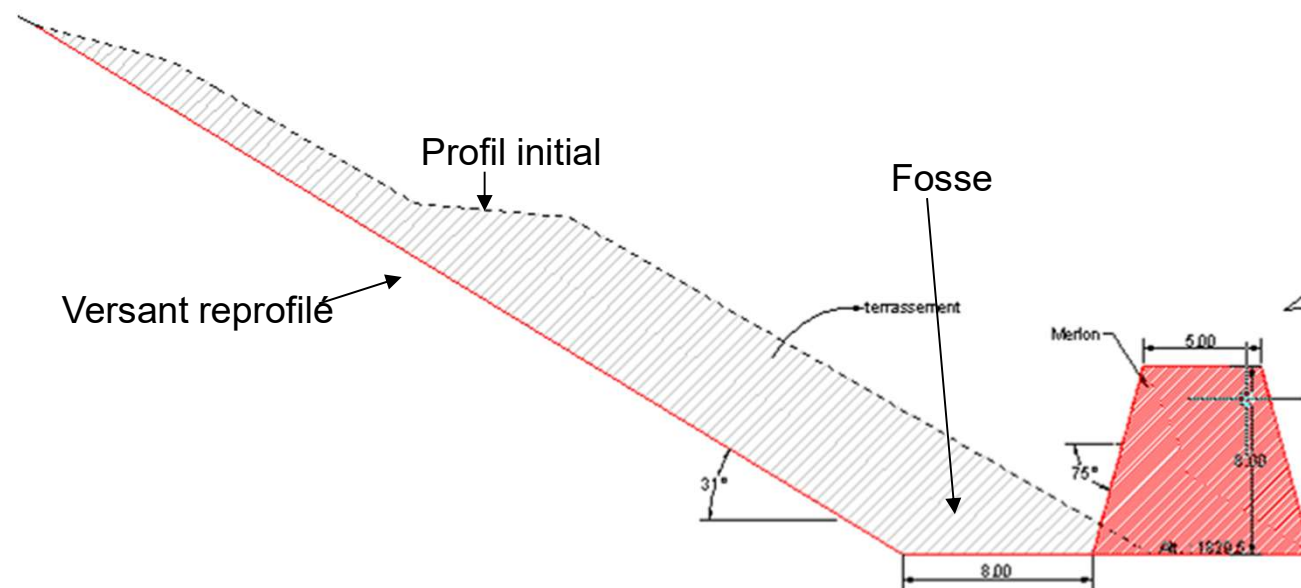
- ✓ Capacité de l'ouvrage à agir sur la trajectoire du bloc
- ✓ Données : énergie cinétique, hauteur de passage du bloc au point d'implantation de l'ouvrage

Dimensionnement 'structurel'

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

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.

Méthodes analytiques de dimensionnement des merlons sous impact

Équivalent pseudo-statique: La stabilité de l'ouvrage est évaluée en considérant un équivalent pseudo-statique au chargement dynamique en combinaison avec la gravité.

Critère de pénétration: consiste à estimer la pénétration du bloc dans le merlon, valeur que l'on multiplie par 2 ou 3 pour obtenir l'épaisseur minimale du merlon.

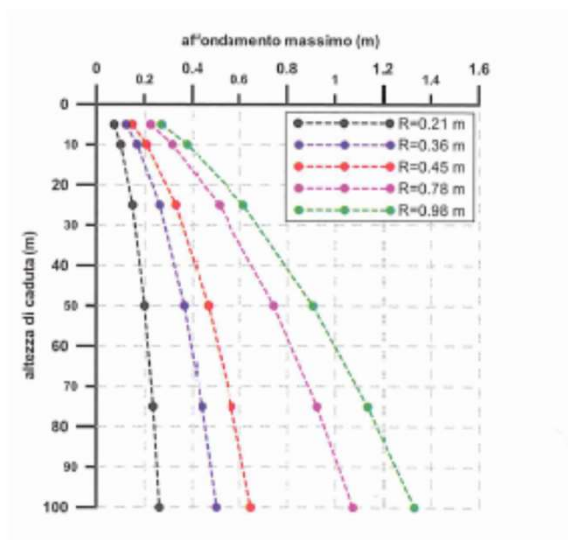
Balance énergétique: l'ouvrage est réputé stable si l'énergie cinétique de translation du bloc est inférieure à l'énergie dissipée dans le merlon suivant différents mécanismes: frottement le long des plans de glissement, compactage des matériaux.

Méthodes analytiques de dimensionnement

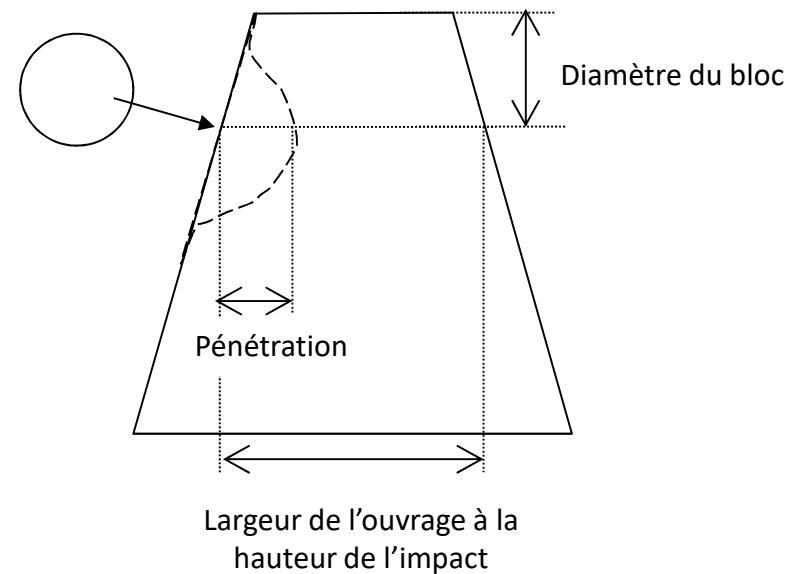
CRITÈRE DE PÉNÉTRATION

Principe:

- pénétration fonction du rayon et de la vitesse du bloc (relation issue d'essais)
- Critère : pénétration < 1/3 de la largeur de l'ouvrage à 1 diamètre de bloc de la crête



La pénétration peut être donnée
par $0,0315 \cdot R_b \cdot V$



Méthodes analytiques de dimensionnement

EQUIVALENT PSEUDO-STATIQUE

Principe:

- La force appliquée sur l'ouvrage est estimée d'après une expression de la littérature.
- Cette force statique est appliquée sur l'ouvrage, en combinaison avec les forces gravitaires.

2 exemples d'expression pour obtenir la force maximale:

$$F = 1,765 * R^{0,2} * M_E^{0,4} * (W * H)^{0,6} \quad \text{ou} \quad F = \sqrt{\frac{32 * G * R * (W * H)}{\pi^2 * (1 - \nu)}}$$

Avec :

- M_E , G et ν : le module à la plaque (kN/m²), le module de cisaillement dynamique et le coefficient de poisson du sol,
- R , W et H le rayon, le poids (kN) et la hauteur de chute du bloc (m),

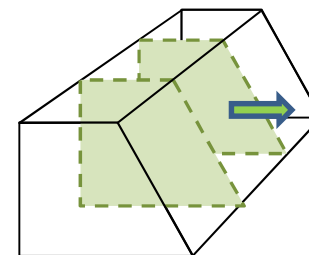
Mais : relations établies pour des contextes très différents !

Méthodes analytiques de dimensionnement

BALANCE ÉNERGÉTIQUE

Etapes:

- On définit le tronçon d'ouvrage sollicité lors de l'impact
(ex: volume compris entre la base du merlon et deux plans verticaux parallèles, distants du diamètre du bloc)



- On décrit les mécanismes dissipateurs (frottement, compactage)
 - Si frottement seul, considérer que 80% de l'énergie est dissipée par compactage
 - Critère de Mohr-Coulomb pour le frottement
- On vérifie que l'énergie dissipée lors du déplacement du tronçon sur une distance donnée est supérieure à l'énergie du bloc incident.
 - Déplacement du tronçon: 1/3 de la largeur de l'ouvrage
 - Composante verticale de la vitesse du bloc négligée

Les écrans

DIFFÉRENTS TYPES

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



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



Ecran déformable de filet

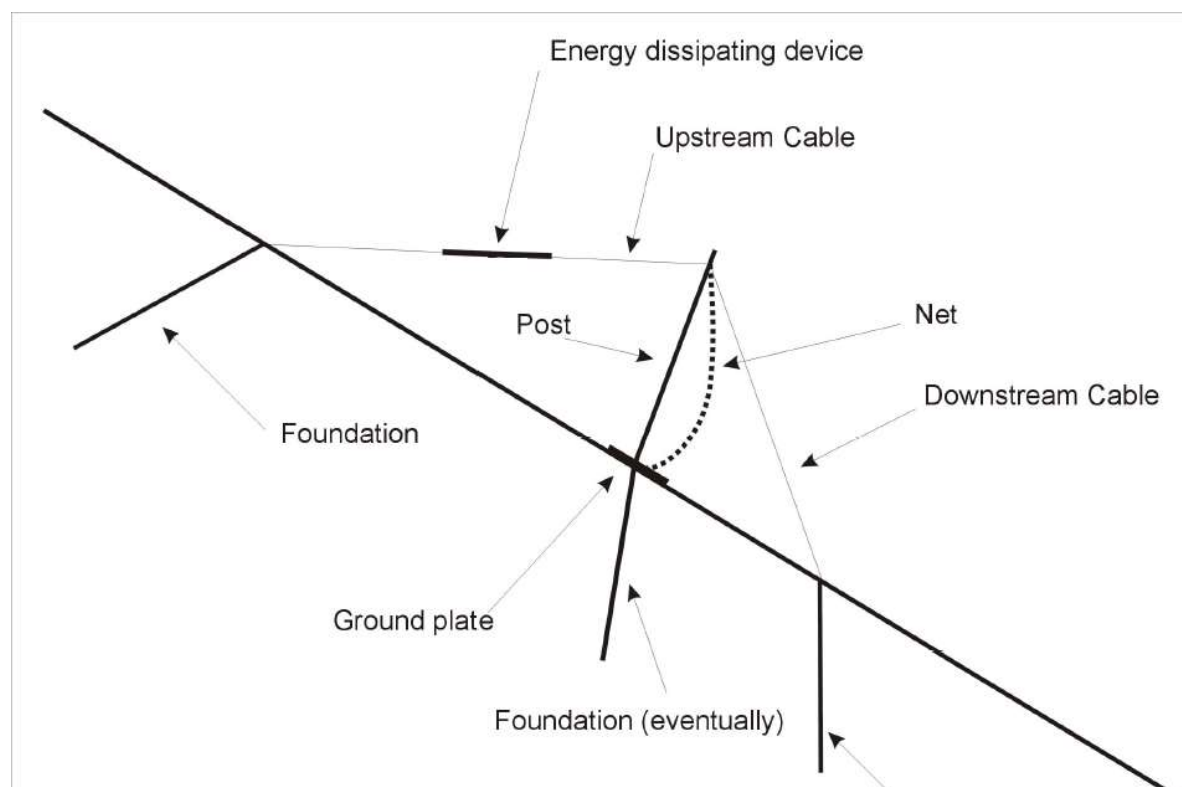


Ecrans déformables de filets

Capacité jusqu'à 5000kJ

Utilisation de freins : dissipent l'énergie

Nécessitent un suivi



Ecrans déformables de filets

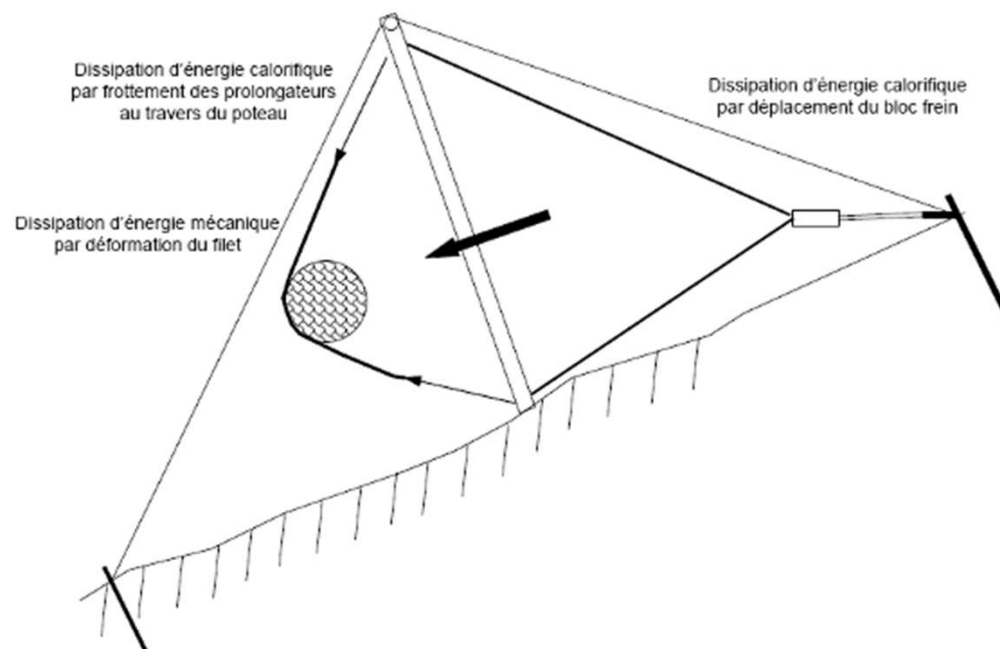
VARIANTES



Ecrans déformables de filets

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT (EXEMPLE)

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



Ecrans déformables de filets

FREINS

Fonctions:

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

Différents types

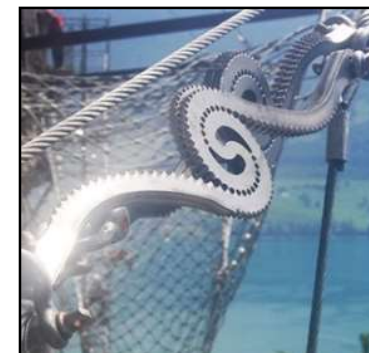
- Freins à câble 'linéaire'
- Freins à câble sinueux
- Freins fendeurs de tube (droit ou circulaire)
- ...

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 ETAG 27

Classification des écrans de filet

ETAG 27



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

Essais sur écrans de filets

ETAG 27

2 essais SEL + 1 essai MEL

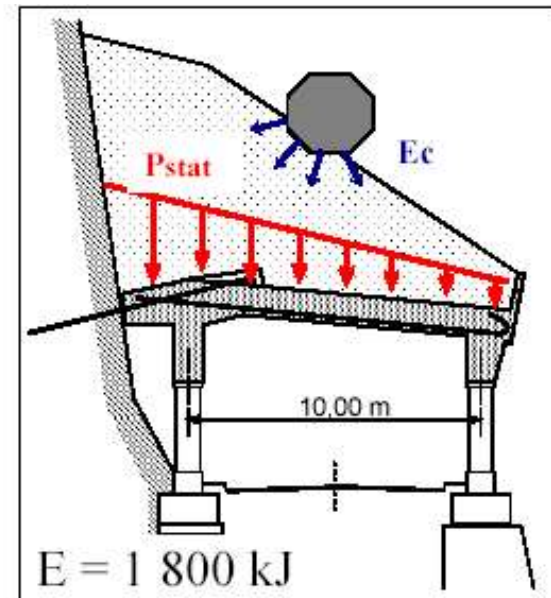
Validé si

- Hauteur* résiduelle du filet $> 70\%$ de la hauteur initiale et pas de rupture d'éléments après SEL 1
- Bloc arrêté et n'a pas touché le sol avant que l'allongement maximal du filet n'ait été atteint lors du SEL 2 et lors du MEL



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

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 !

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, $e > \max\{0,5m; 2*t; t+6*D_{\max}\}$

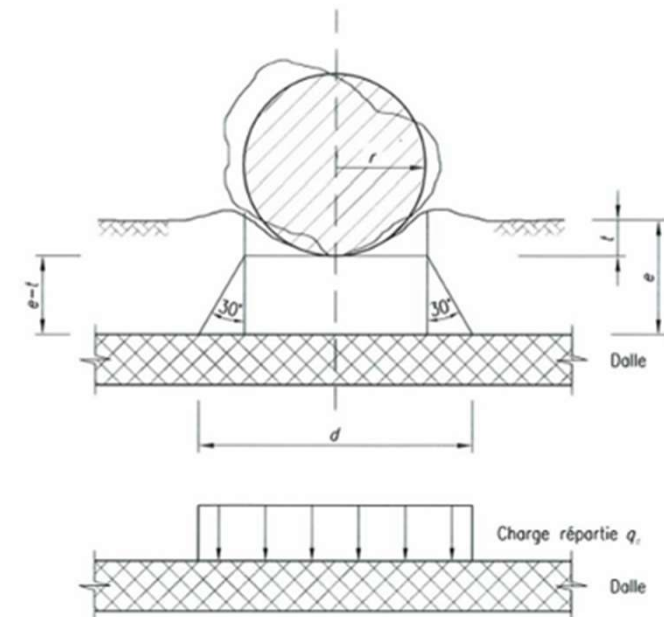
avec D_{\max} le rayon max. du matériau de couverture, et t la pénétration du bloc donnée par:

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

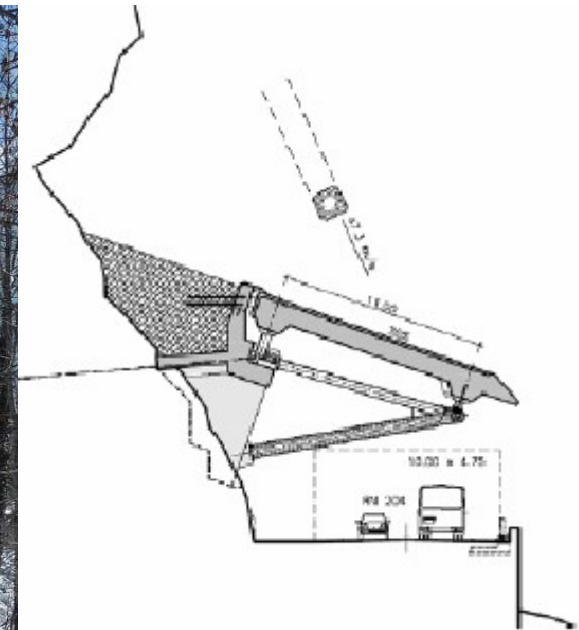
- Charge sur la dalle:

- 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:

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



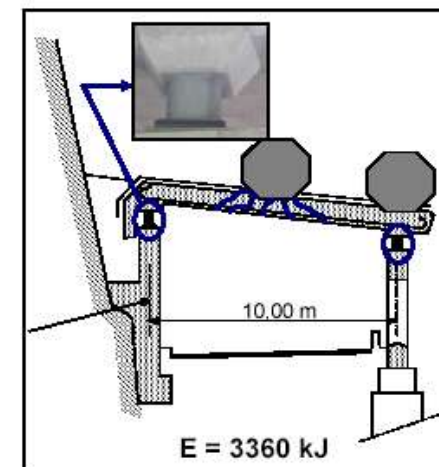
Galeries structurellement dissipantes



- 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

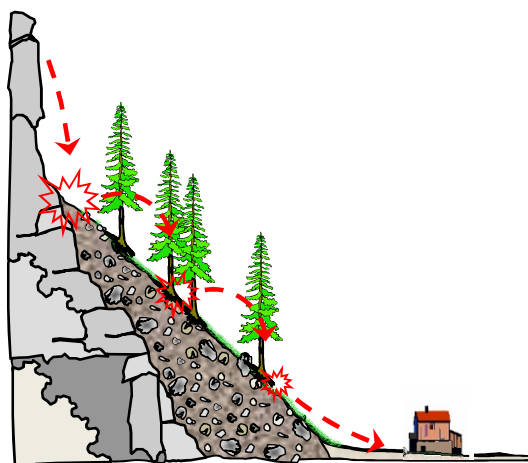
Galeries structurellement dissipantes

- 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



Forêt et aléa rocheux

FONCTION PROTECTION

Vérification expérimentale

Vitesse de translation moy [m/s]

Vitesse de translation max [m/s]

Blocs arrêtés au niveau de la piste [%]

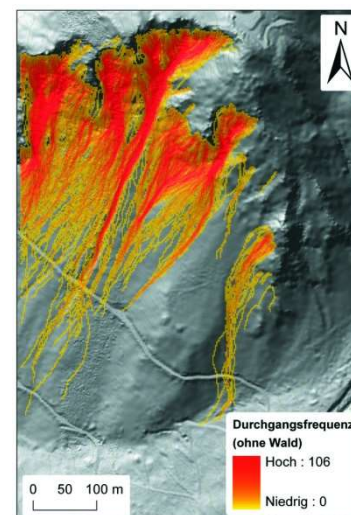
Hauteur de passage max. [m]

	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 !

Sans forêt



Avec forêt

