

Gestion de l'incertitude et de l'ignorance dans l'évaluation de la probabilité de déclenchement des éboulements rocheux

Didier Hantz, *ISTerre, Polytech, Université Joseph Fourier (Grenoble 1)*

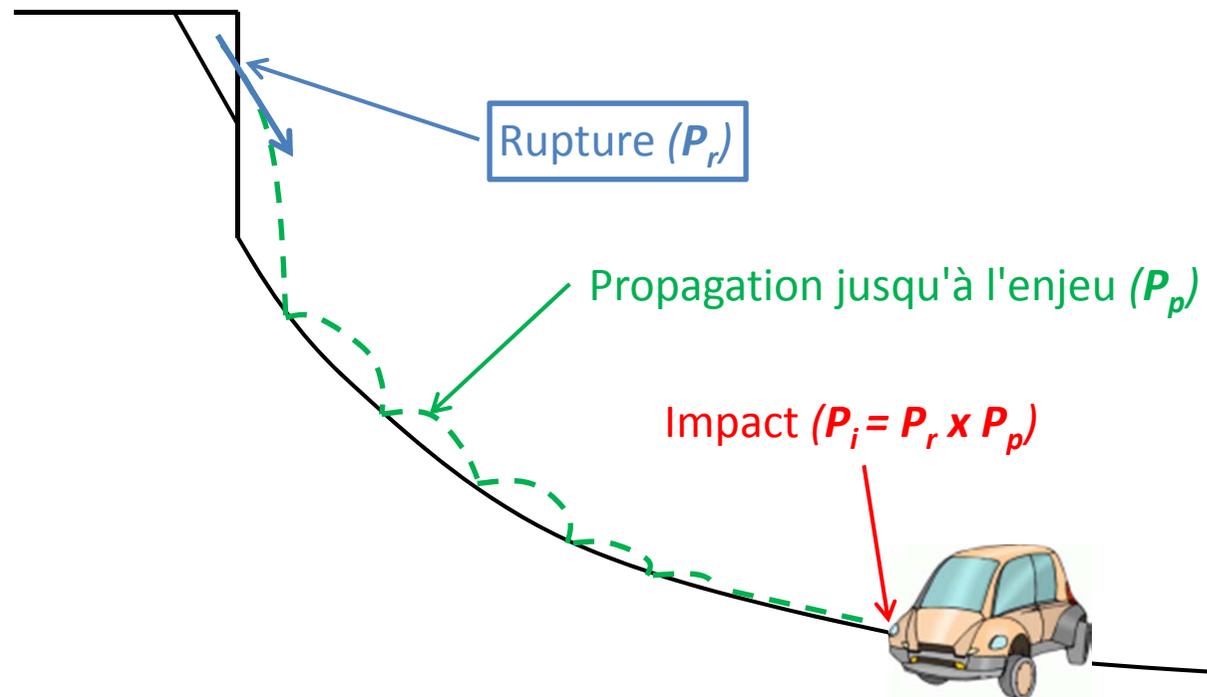


L'ALEA EBOULEMENT ROCHEUX

Définition de l'aléa : évènement incertain pouvant conduire à des conséquences indésirables

Description d'un aléa mouvement de terrain : localisation ; volume de la masse potentiellement instable ; type de mouvement ; vitesse du mouvement ; **probabilité d'occurrence** dans une période donnée

Cas des éboulements



CRITERE D'ACCEPTABILITE DU RISQUE

Risque humain individuel (probabilité annuelle de décès)

Pour des risques naturels ou industriels, une probabilité annuelle de décès de 10^{-6} est considérée comme acceptable dans la plupart des pays (Leroy et al., 2005)

• *En Suisse, un critère de contrôle a été fixé à 10^{-5} par an, pour les usagers empruntant régulièrement une route soumise à des risques gravitaires (OFROU, 2009)*

Qualification du risque (recommandée par le JTC-1) :

- $>10^{-3}$ /an : risque très fort
- 10^{-4} à 10^{-3} /an : risque fort
- 10^{-5} à 10^{-4} /an : risque modéré
- 10^{-6} à 10^{-5} /an : risque faible
- $< 10^{-6}$ /an : risque très faible

En France, il n'existe actuellement aucun critère quantitatif pour les mouvements de terrain.

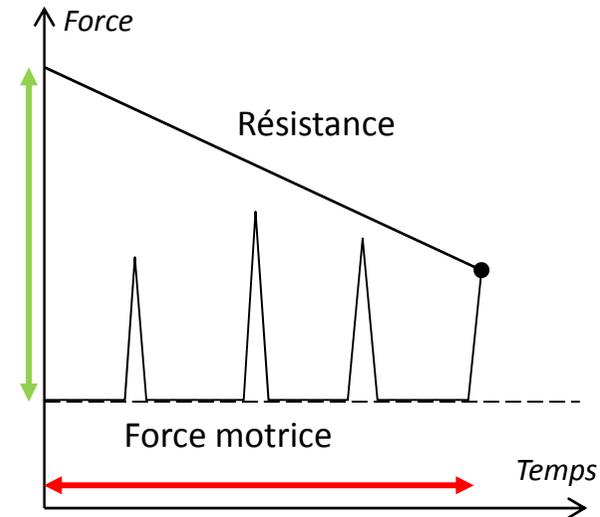
Risque matériel

Analyse coût-bénéfice

PREVISION DE LA RUPTURE

Stabilité actuelle

- Des méthodes d'analyse existent (équilibre limite, éléments finis, éléments discrets, ...)
- Elles ne sont pas applicables à cause des incertitudes sur la géométrie et les paramètres mécaniques
- Perspectives d'amélioration : méthodes géophysiques



Evolution de la stabilité

Mauvaise connaissance des processus conduisant à la rupture

- Diminution de la résistance du matériau rocheux
- Croissance des joints (gel, racines, dissolution, ...)
- Modifications géométriques de la surface (érosion, excavation, dépôt, ...)
- Déformation lente de la croûte terrestre
- Forces d'inertie (séismes, tirs de mine)
- Contraintes thermiques
- etc...

EVALUATION QUALITATIVE DE LA PROBABILITE DE RUPTURE (Dire d'expert)

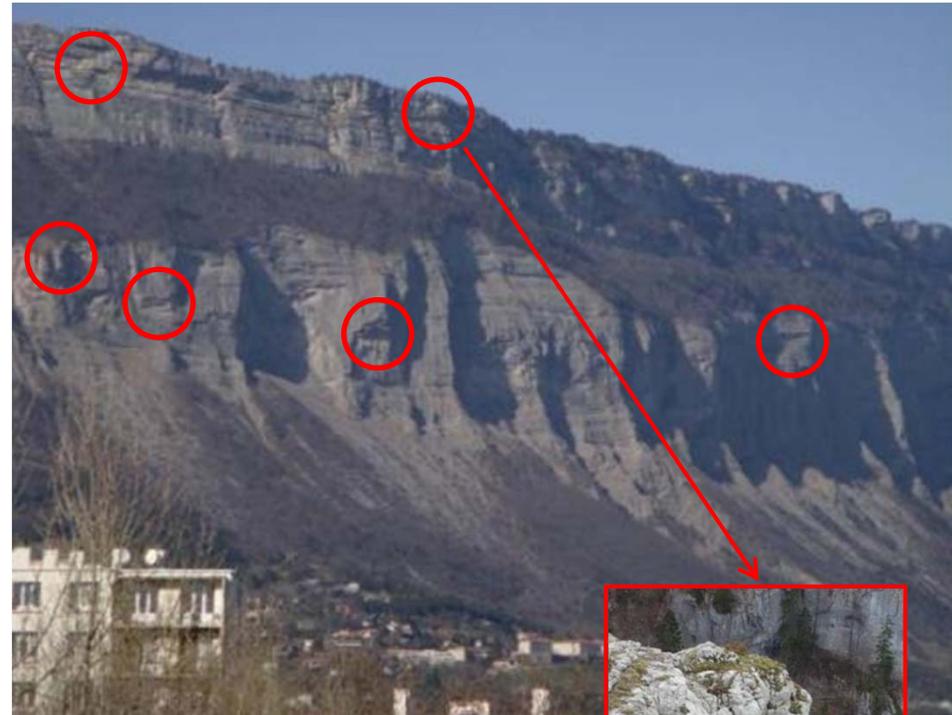
Exemple d'une qualification en 3 niveaux

- probabilité forte : $p_1 = 0,9$
- probabilité moyenne : $p_2 = 0,5$
- probabilité faible : $p_3 = 0,1$

Espérance du nombre d'éboulements
dans la période considérée :

$$E(N) = \sum n_i p_i$$

avec n_i : nombre d'éboulements de
probabilité p_i



Pour rendre plus objective ce type d'évaluation, nous proposons

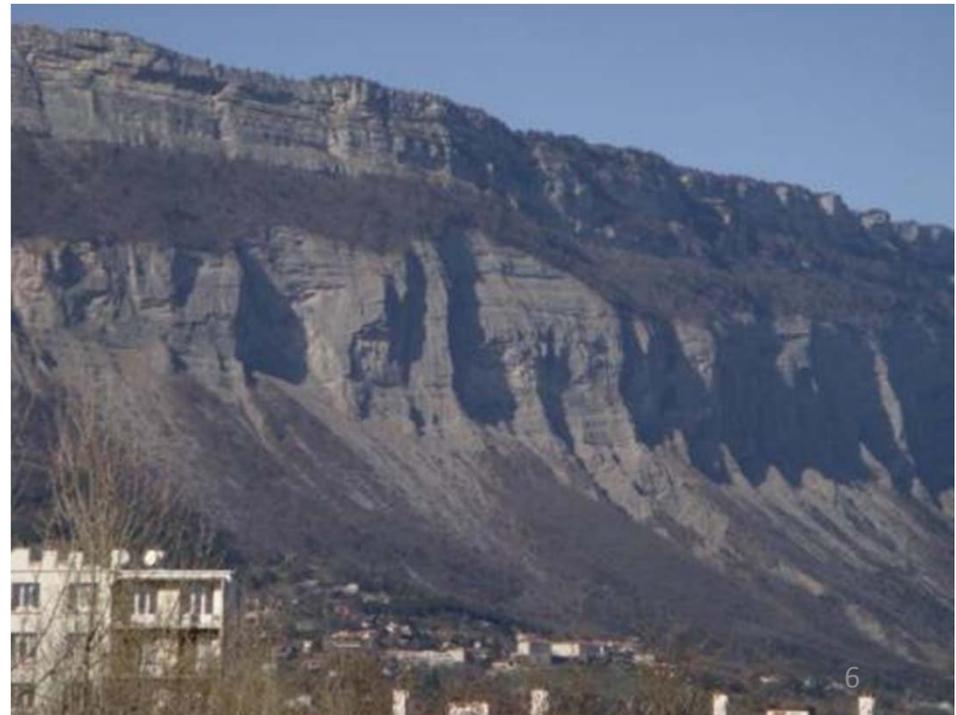
- une confrontation avec la fréquence historique observée
- un ajustement éventuel pour que l'évaluation soit cohérente avec le comportement observé de la falaise

FREQUENCE D'ÉBOULEMENT

Pour une falaise suffisamment homogène, on peut définir une fréquence spatio-temporelle d'éboulement (nombre de chutes par m² et par an) par une approche géomorphologique.

Cette fréquence peut être déterminée

- par observation systématique des éboulements (inventaire)
- par modélisation cinématique du recul de la falaise et datation de la surface rocheuse (cosmonucléides)



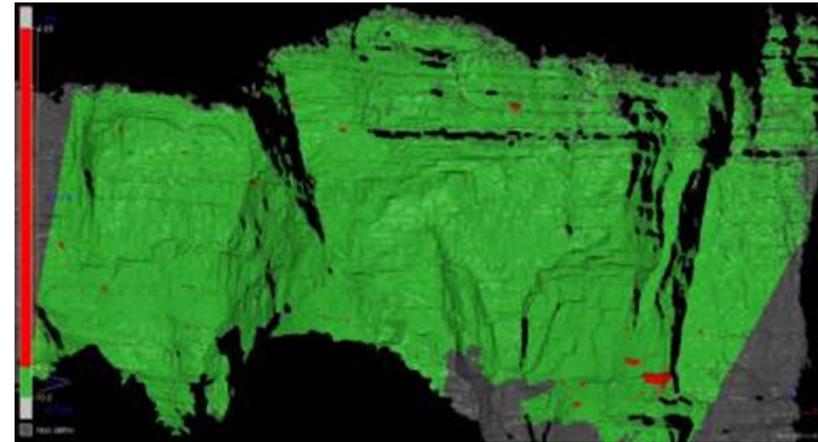
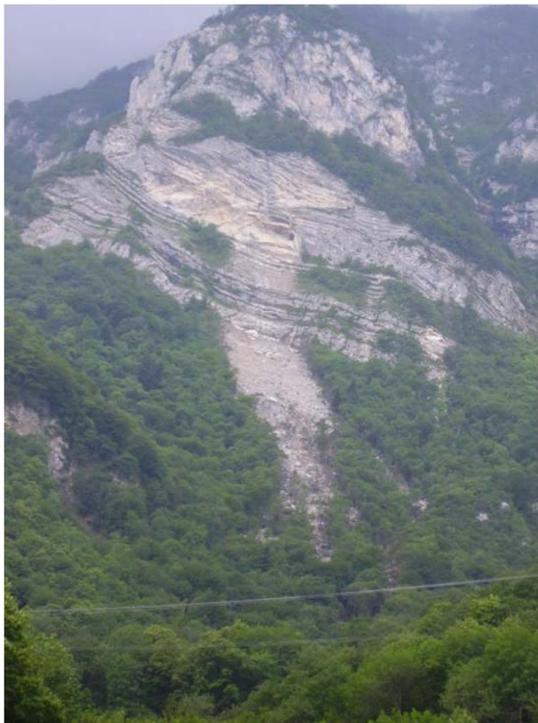
OBSERVATION SYSTEMATIQUE DES EBOULEMENTS

Petits volumes (fréquence élevée)

Relevé annuel de la morphologie de la falaise (lidar ou photogrammétrie)

Volumes moyens (fréquence moyenne)

Inventaire historique sur quelques décennies ou siècles (services RTM, parc nationaux, ...)

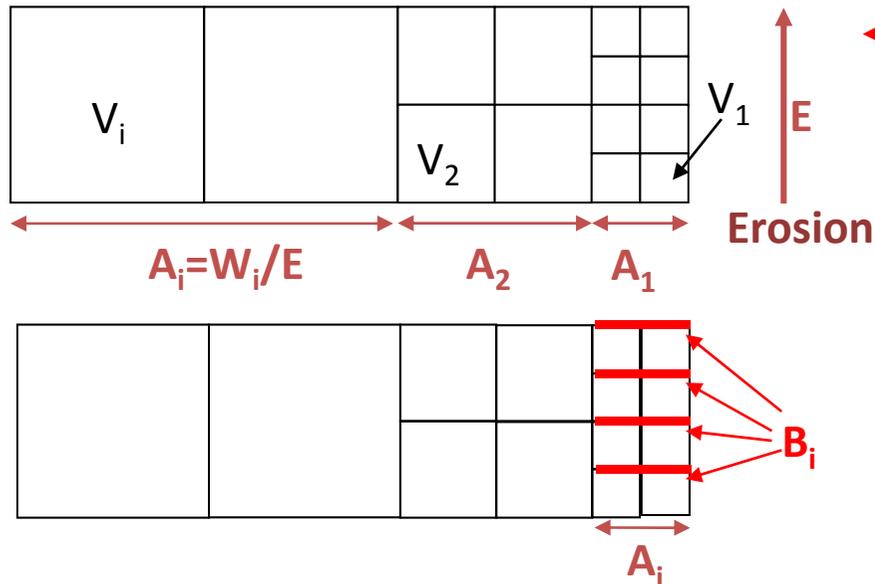
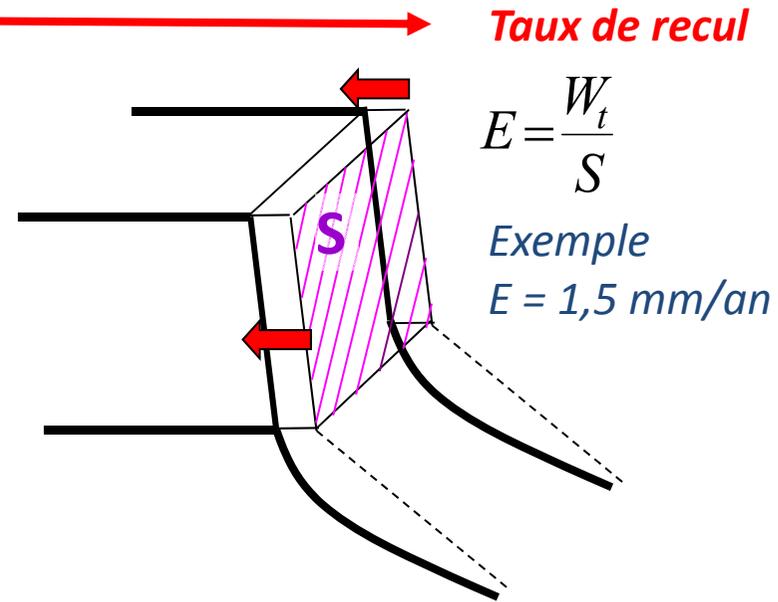
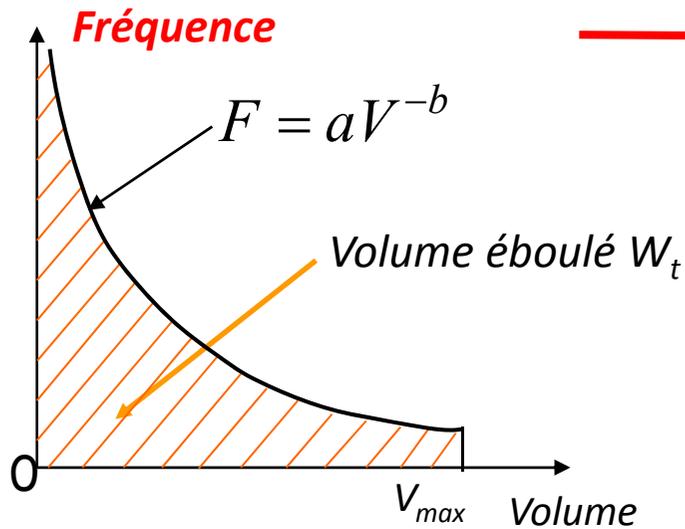


Gros volumes (fréquence faible)

Recherche des dépôts d'éboulement et datation



MODELISATION CINEMATIQUE DU REcul DES FALAISES



Age moyen de la falaise

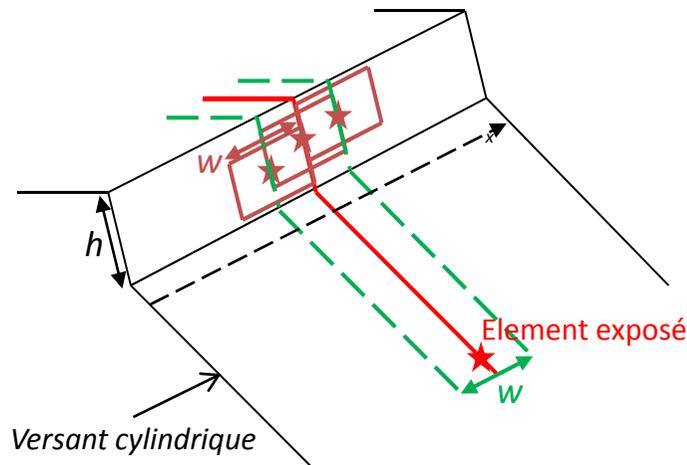
B_i : surface totale de cicatrice de la classe V_i apparaissant en 1 siècle

Durée de vie moyenne d'une cicatrice (et d'un compartiment) = A_i / B_i

Exemple

Age moyen calculé: 5,5 ka, datations: 8 ka

ESTIMATION DU RISQUE POUR UN ALEA DIFFUS



Fréquence temporelle des chutes affectant un profil pour des volumes entre V_{\min} et V_{\max}

$$F_f = \frac{3abhk^{\frac{1}{3}}}{(3b-1)} \left(V_{\min}^{\frac{1}{3}-b} - V_{\max}^{\frac{1}{3}-b} \right)$$

k : coefficient de forme des compartiments

$$V = kw^3$$

Exemple : application à la falaise du Saint-Eynard

Fréquence d'impact (par an) avec une énergie cinétique supérieure à **0.025 kJ**, pour un enjeu de largeur **0,5 m**, situé au pied de la falaise supérieure (**150 m** de hauteur.) $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$:

$$F = 2,3 \times 10^{-2}$$

Risque individuel

Probabilité annuelle de décès dû à un éboulement pour une personne qui passe 1 h par an sur le sentier:

$$P = 2.6 \times 10^{-6}$$

MODELISATION DE LA RUPTURE A LONG TERME (SIECLES)

- Des modèles ont été proposés pour décrire certains processus (fluage tertiaire, dissolution, ...) mais aucune prévision n'a pu être confrontée à un cas réel d'évolution de la stabilité, car la durée des phénomènes modélisés est de l'ordre du millier d'années.
- On ne peut pas attendre plusieurs siècles, mais on peut étudier l'évolution passée de compartiments qui chutent aujourd'hui, en reconstituant leur histoire (**analyse en retour historique**).
- Pour cela il faut connaître la **durée de vie** des compartiments, que l'on peut déterminer par datation de la surface rocheuse (cosmonucléides)



MODELISATION DE LA RUPTURE A LONG TERME (SIECLES)

Exemple de la loi de Shaw

$$t_r = t_1 \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-b}$$

τ : contrainte appliquée

τ_0 : résistance à court terme

t_1 : t_r pour $\tau = \tau_0$

b : paramètre rhéologique inconnu

Le paramètre rhéologique b peut être déterminé :
par analyse en retour historique d'éboulements passés (connaissant la
durée de vie t_r des compartiments)

Dans le cadre de la caractérisation d'un aléa diffus, le paramètre
rhéologique peut être ajusté pour que le nombre d'éboulements prévus
dans la période considérée soit compatible avec le comportement
historique de la falaise.

CONCLUSION

Le développement et la validation de **modèles d'évolution de la stabilité** nécessitent une connaissance des phénomènes sur le long terme, qui ne peut être acquise que par une **approche géomorphologique**

Approche géomécanique

- *modélisation de la structure du massif et de sa stabilité actuelle*
- *modélisation des processus d'évolution*

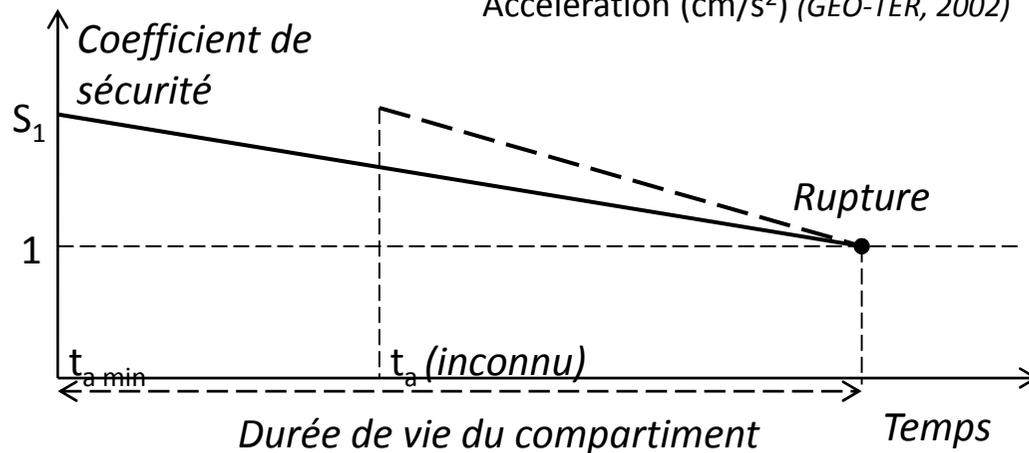
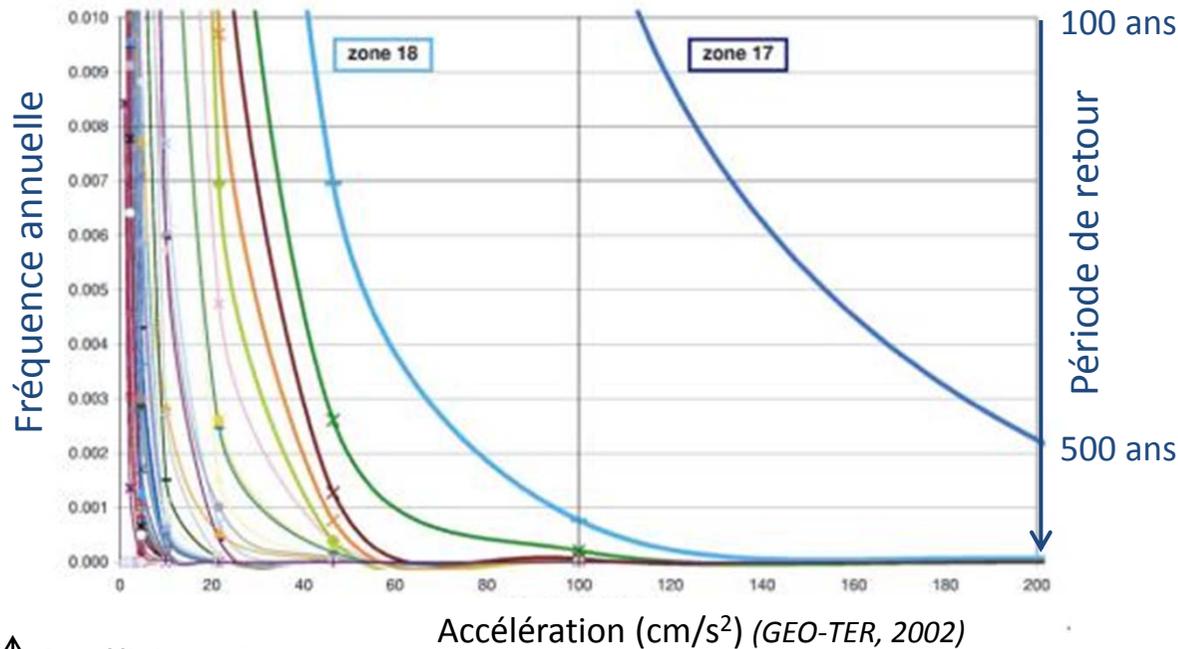
Approche géomorphologique

- *Age des compartiments éboulés (et historique des sollicitations sismiques)*
- *Fréquences d'éboulement à l'échelle d'un versant*



MODELISATION DE LA RUPTURE A LONG TERME (SIECLES) Reconstitution de l'historique des sollicitations sismiques

Fréquence de l'accélération sismique pour la ville de Grenoble



t_a : moment (inconnu) où le compartiment rocheux a subi l'accélération maximale A_m
 $t_{a \min}$: valeur minimale de t_a donné par l'âge du compartiment
 S_1 : valeur du coefficient de sécurité lors de l'accélération maximale subie

COUPLAGE DES APPROCHES GÉOMÉCANIQUE ET HISTORIQUE

Dans l'hypothèse simple d'une décroissance linéaire du coefficient de sécurité, le temps avant rupture est donné par :

$$t_r = \frac{S - 1}{d} \quad \text{avec}$$

S : valeur actuelle du coefficient de sécurité
d : paramètre "rhéologique"

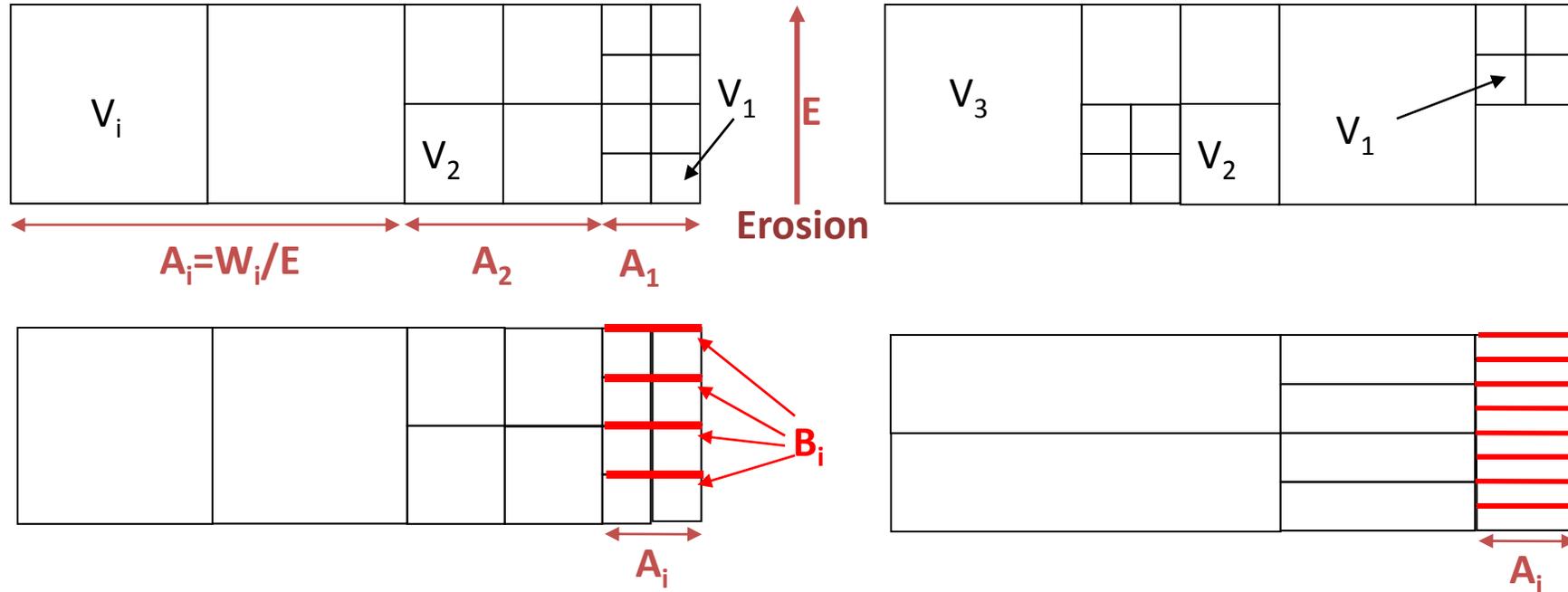
Le paramètre rhéologique peut être déterminé :
par analyse en retour historique d'éboulements passés (connaissant la durée du vie des compartiments)

Dans le cadre de la caractérisation d'un aléa diffus, le paramètre rhéologique peut être ajusté pour que le nombre d'éboulements prévus dans la période considérée soit compatible avec le comportement historique de la falaise.

3. EVALUATION DE L'ALEA - 3.4. Approche historique

Relation fréquence d'éboulements – âge moyen de la falaise

Vue de dessus des compartiments qui s'éboulent en 1 siècle (modèles simplifiés)

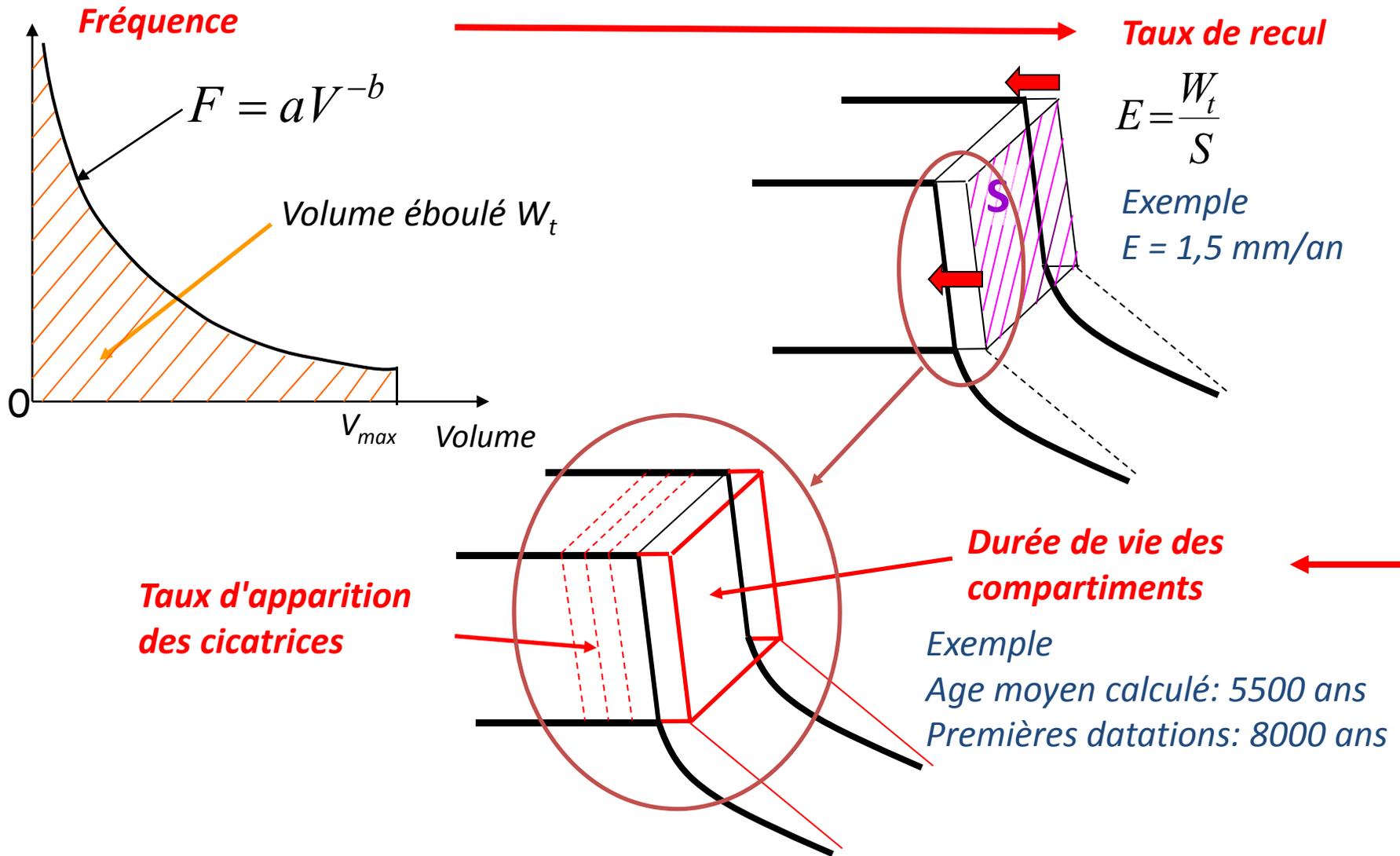


B_i : surface totale de cicatrice de la classe V_i apparaissant en 1 siècle
(base de données ou corrélation surface-volume des éboulements)

Taux de renouvellement de la surface A_i (par siècle) = B_i / A_i

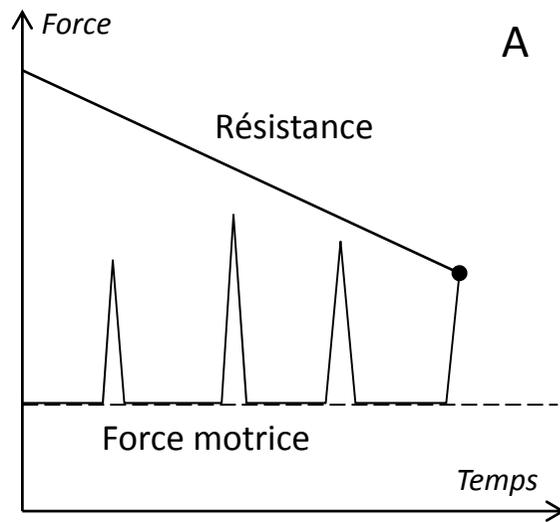
Durée de vie moyenne d'une cicatrice (et d'un compartiment) = A_i / B_i

PARCOURS – RECHERCHE - Travaux effectués
Approche géomorphologique (échelle du versant)

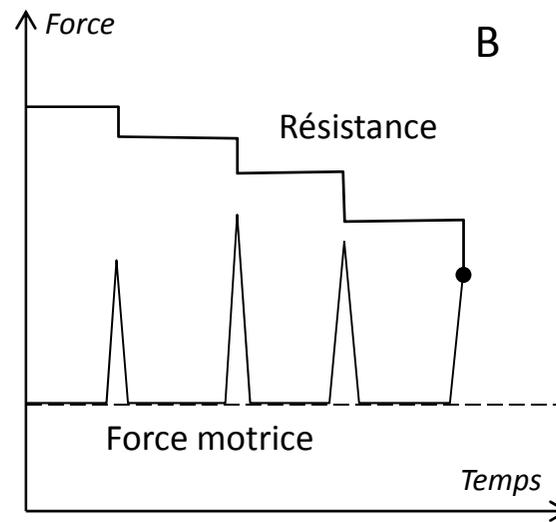


(Hantz et Frayssines, 2009 ; Delunel et al., 2010 ; Recorbet et al., 2010 ; Hantz, 2011)

Evolution temporelle de la résistance et de la force motrice



L'augmentation de la force motrice constitue le facteur déclenchant, mais pas un facteur dégradant



L'augmentation de la force motrice constitue le facteur déclenchant, mais aussi un facteur dégradant