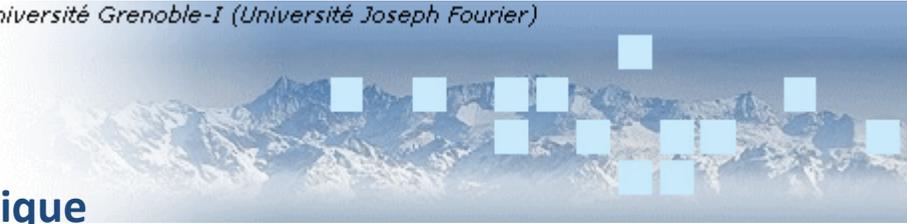




**POLYTECH**  
**GRENOBLE**  
Département Géotechnique

*Ecole polytechnique de l'université Grenoble-I (Université Joseph Fourier)*



# RISQUE MOUVEMENTS DE TERRAIN

D. HANTZ

Septembre 2012

# RISQUE MOUVEMENTS DE TERRAIN

## Plan du cours

1. INTRODUCTION
2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES
3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE
4. CALCUL ET EVALUATION DU RISQUE
5. EVALUATION DE L'ALEA – APPROCHE HGP
6. EVALUATION DE L'ALEA A COURT TERME

# RISQUE MOUVEMENTS DE TERRAIN

## Bibliographie

Plans de prévention des risques naturels (PPR). Risques de mouvements de terrain. Guide méthodologique (1999).  
[http://catalogue.prim.net/145\\_plans-de-prevention-des-risques-naturels-ppr-risques-de-mouvements-de-terrain-guide-methodologique.html](http://catalogue.prim.net/145_plans-de-prevention-des-risques-naturels-ppr-risques-de-mouvements-de-terrain-guide-methodologique.html)

Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux (2004). Effendiantz, L., Guillemin, P., Rochet, L., Pauly, J-C., Payany, M. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.

Géomécanique des instabilités rocheuses (2010). Traité MIM - Mécanique et ingénierie des matériaux, Lavoisier.

Guide méthodologique pour la reconnaissance des aléas d'éboulement (2006)  
D. Jongmans, J. Deparis (Université J . Fourier, Grenoble) ; T. Villemin (Université de Savoie) ; A. Mathy (SAGE-ADRGT) ; L. Effendiantz (CETE Lyon)  
[http://www.risknat.org/projets/rdt/camus/guidemethodo\\_final.pdf](http://www.risknat.org/projets/rdt/camus/guidemethodo_final.pdf)

Les risques naturels en montagne( 1996). L. Besson. Artès-Publiaip, 438 pages.  
Les risques naturels : de la connaissance pratique à la gestion administrative (2005). L. Besson. Editions Techni.Cités, Voiron, collection dossier d'expert technique, ref 442, 610 p.  
Bibliothèque Polytech

Landslides, Investigation and Mitigation (1996). Turner & Schuster (eds.), Transportation Research Board Special Report, vol. 247, National Academy Press, Washington, DC.

# 1. INTRODUCTION

## Notion de mouvement de terrain

En pratique, le terme de « **mouvement de terrain** » est réservé aux mouvements dus essentiellement à la **gravité (mouvements gravitaires)** et ne s'applique pas aux mouvements d'origine tectonique (séismes, mouvement des plaques lithosphériques, phénomènes volcaniques).

On distingue 2 familles de mouvements gravitaires :

- Les mouvements dus aux vides souterrains (effondrements, affaissements, tassements)
- Les mouvements dus à la pente (glissements, basculements, éboulements, écoulements), appelés mouvements de pente ou mouvements de versant.

# 1. INTRODUCTION

## Notion de risque naturel

- Risque dû à des phénomènes essentiellement **naturels** (mouvements de terrain naturels, phénomènes hydro-météo), par opposition aux risques dus à l'intervention de l'homme sur le milieu naturel (excavation par exemple) ou à ceux liés à l'activité industrielle, domestique, sportive, etc...
- Les mouvements de terrain naturels sont généralement le résultat d'une dégradation progressive de la stabilité, dont les processus sont mal connus, ou d'un événement naturel imprévisible à long terme (pluie, séisme). Ils apparaissent donc comme **aléatoires** dans l'espace et dans le temps, et leur prévision est nécessairement probabiliste.
- Au contraire, les mouvements provoqués par des **travaux** d'excavation ne sont généralement pas considérés comme aléatoires, mais doivent être prévus et contrôlés par l'ingénieur, malgré les incertitudes inhérentes au milieu naturel. Cependant, lorsque les travaux sont anciens et inconnus (cas des anciennes carrières souterraines), le problème est traité comme un risque naturel.

# 1. INTRODUCTION

## Définition de l'aléa

(selon le *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes*  
(Fell et al., 2005, 2008))

### **Aléa (Hazard)**

*Ancienne définition (Fell et al., 2005)*

**Probabilité** d'occurrence d'un **phénomène** donné (mouvement de terrain, séisme, ...), dans une **zone** donnée, dans une **période** donnée.

Mais le terme désignait parfois le phénomène lui-même.

*Nouvelle définition (Fell et al., 2008)*

**Condition** (ou circonstance) susceptible de provoquer des dommages.

La description (ou caractérisation) de l'aléa mouvement de pente doit inclure la **localisation**, le **volume** (ou la surface), la **classification**, la **vitesse** du mouvement potentiel et sa **probabilité d'occurrence** dans une période de temps donnée.

# 1. INTRODUCTION

## de l'aléa au risque

(selon le *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes*  
(Fell et al., 2005, 2008))

### **Domage (Damage)**

Pertes causées par un phénomène donné, exprimées en nombre de **victimes** (pour les personnes) ou en **valeur** (pour les biens ou l'activité économique).

**Risque = Probabilité d'occurrence x Domage potentiel**  
(Risk)

**Domage potentiel = valeur du bien (ou nombre de personnes) x vulnérabilité**

La **vulnérabilité** représente le taux de perte (ou d'invalidité) résultant de la réalisation de l'aléa.

*Remarque : dans le langage courant, le risque désigne souvent un évènement (indésirable) susceptible de se produire, alors que dans le langage scientifique, il s'exprime en termes de combinaison des conséquences d'un évènement et de sa vraisemblance (ou probabilité).*

# 1. INTRODUCTION

## **Echelle spatiale**

L'aléa et le risque peuvent être évalués à différentes échelles spatiales :

- à l'échelle d'un territoire (notamment à l'échelle des communes à travers les Plans de Prévention des Risques Naturels)
- à l'échelle d'un aménagement particulier (voie de communication, ouvrage, ...)
- ponctuellement lorsqu'une menace apparaît (une fissure apparaît dans une pente, par exemple).

# 1. INTRODUCTION

## Echelle temporelle

A une échelle de temps géologique (**millions d'années**), la probabilité d'occurrence des mouvements de terrain est souvent proche de 1 (les reliefs ont une durée de vie limitée du fait de l'érosion)

Dans un contexte d'aménagement du territoire, la période considérée est généralement le **siècle** (prévision à **long terme**)

Dans le cas de mouvements très probables à long terme ou d'accélération de mouvements existants, des délais plus courts doivent être considérés (prévision à **court terme**)

*Remarque : évaluer la probabilité d'occurrence d'un phénomène dans une période donnée, revient à prévoir la date d'occurrence de manière probabiliste.*

# 1. INTRODUCTION

## Méthodologie de l'évaluation et de la gestion du risque mouvements de terrain

- Détection et caractérisation des phénomènes (type, intensité, extension spatiale, facteurs déclenchants)
  - Evaluation de la probabilité d'occurrence ou de la fréquence
  - Analyse des conséquences : identification et caractérisation des éléments exposés (valeur, vulnérabilité)
  - Estimation du risque (vies humaines ou valeur)
  - Acceptation ou non du risque
  - Réduction éventuelle du risque (surveillance, stabilisation, protection, interdiction, déplacement)
- Etude d'aléa*
- Etude de risque*
- Plan de prévention  
étude géotechnique*

*d'après Fell et al., 2008 (Engineering Geology, 102, 85-98)*

# 1. INTRODUCTION

## Différence entre une étude d'aléa et une étude d'ouvrage

### Etude d'aléa

Objectif : estimer la **probabilité** d'occurrence d'un phénomène dans un délai donné ; fournir une **information objective**.

Lorsque la dimension temporelle ne peut pas être prise en compte, on évalue la **susceptibilité** du site au mouvement.

### Etude d'ouvrage

Objectif : **éviter** qu'un phénomène se produise dans une pente naturelle ou artificielle (existante ou projetée) ou s'en **protéger** ; le géotechnicien utilise souvent une approche **déterministe**, en adoptant, pour gérer l'incertitude, des hypothèses **pessimistes**.

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

2.1 Type de mouvement

2.2 Détection

2.3 Extension spatiale

2.4 Notion d'intensité

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### **Description du type de mouvement**

*(d'après Cruden et Varnes, 1996)*

**Mécanisme (éboulement, basculement, glissement, écoulement)**

**Matériau (roche en place, débris, sol)**

Teneur en eau (sec, humide, saturé)

Etat (potentiel, actif, réactivé, suspendu, inactif)

Vitesse (actif ou potentiel)

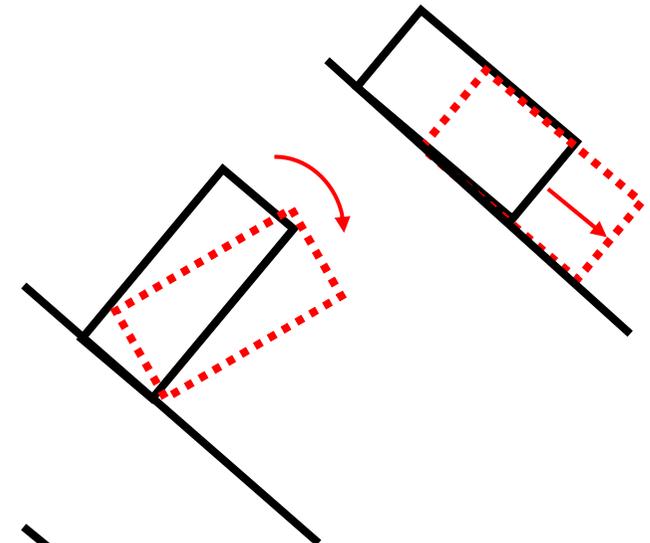
*Exemples :*

*Glissement de sol, humide, actif, lent*

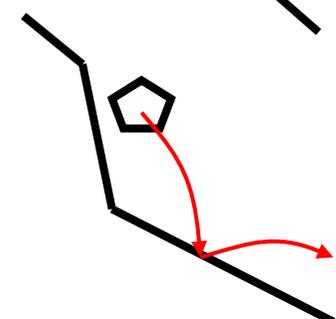
*Eboulement rocheux, sec, potentiel, extrêmement rapide*

# MECANISMES DE MOUVEMENTS DE VERSANT (LANDSLIDES)

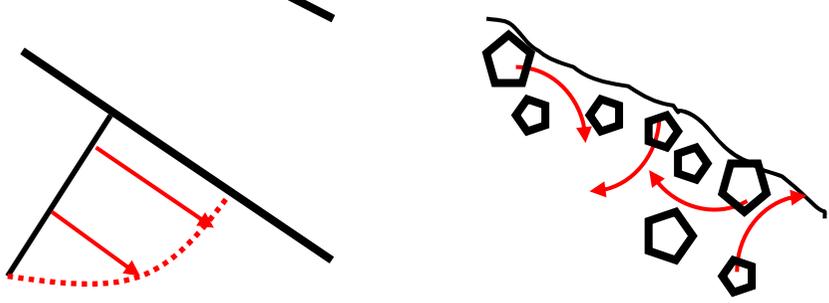
**Glissement**  
(Slide)



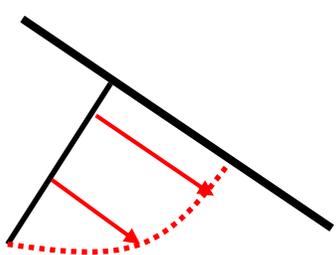
**Basculement**  
(Topple)



**Chute**  
(Fall)



**Ecoulement**  
(Flow)



**Mouvements composites**

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### •Description de la vitesse (Cruden et Varnes, 1996)

Description	Vitesse (mm/s)	Vitesse typique
extrêmement rapide	$> 5 \cdot 10^3$	$> 5 \text{ m/s}$ $> 18 \text{ km/h}$
très rapide	$> 5 \cdot 10^1$	$> 3 \text{ m/mn}$
rapide	$> 5 \cdot 10^{-1}$	$> 1,8 \text{ m/h}$
modéré	$> 5 \cdot 10^{-3}$	$> 13 \text{ m/mois}$
lent	$> 5 \cdot 10^{-5}$	$> 1,6 \text{ m/an}$
très lent	$> 5 \cdot 10^{-7}$	$> 16 \text{ mm/an}$
extrêmement lent	$< 5 \cdot 10^{-7}$	$< 16 \text{ mm/an}$

D'un point de vue opérationnel, le guide méthodologique des PPR distingue les **mouvements lents** pour lesquels la déformation est progressive et sans accélération brutale et les **mouvements rapides**.

En dessous de **1 m/s**, la fuite est possible et le mouvement ne provoque généralement pas de victime directe.

- **Brutalité du phénomène**
- **Signes précurseurs pouvant être détectés**

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Description de l'état du mouvement

- Mouvements futurs de masses rocheuses ou de sol, non encore affectées par ces mouvements (mouvements **potentiels**)
- Masses rocheuses ou de sol déjà en mouvement (mouvements **actifs**) ou susceptibles de se remettre en mouvement (mouvements **dormants**)

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES DETECTION

*Où des mouvements de terrain risquent-ils de **se produire** ou de **se poursuivre** (détection) et quels mouvements (caractérisation) ?*

- Mouvements actifs, dormants ou potentiels
- Aléas localisés ou diffus

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Principe de la détection

#### Détection de mouvements déjà actifs

*On cherche les indices de mouvement (fissures d'extension, gonflement du sol, bourrelets, arbres penchés, ...)*



## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Principe de la détection

#### Détection de mouvements déjà actifs

*On cherche les indices de mouvement (fissures d'extension, gonflement du sol, bourrelets, arbres penchés, ...)*



#### Détection de mouvements potentiels

*On cherche les configurations favorables aux mouvements*

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Aléas **localisés** et **diffus**

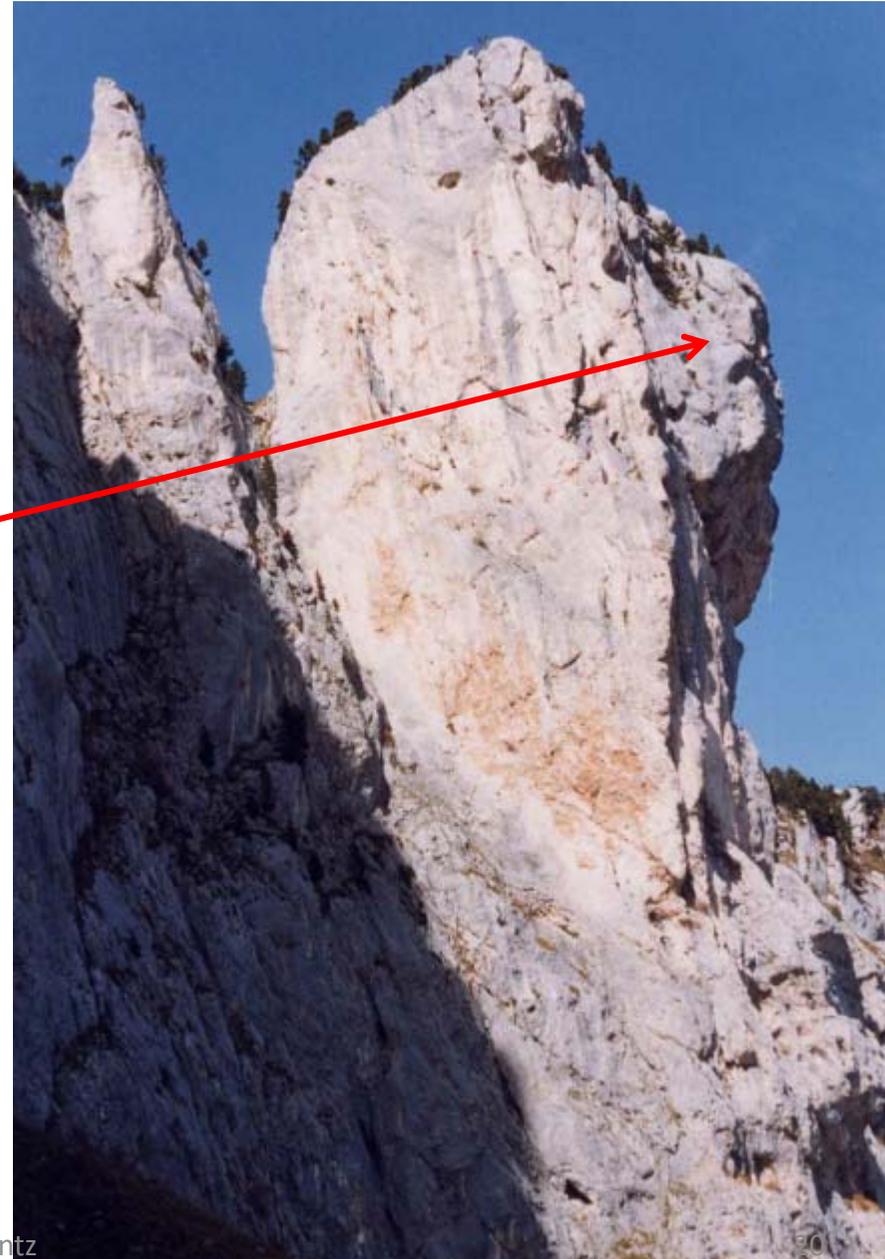
#### **Aléa localisé**

La masse potentiellement instable est localisée (en x, y, z) et ses limites sont connues, au moins en surface. Son volume peut être estimé.

*Exemple*

#### **Probabilité de rupture :**

Probabilité que **le compartiment identifié** chute dans un délai donné



## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Aléas localisés et diffus

#### Aléa diffus

Des mouvements d'un **type donné** (éboulements d'une classe de volume donnée) peuvent se produire dans une **zone donnée**, mais on ne connaît pas leur localisation exacte.

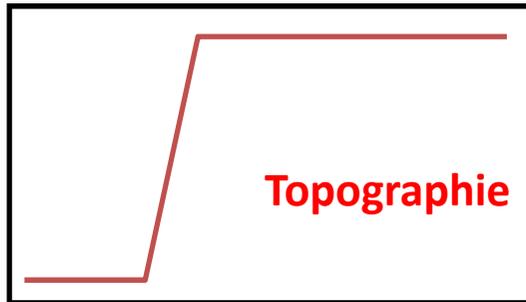


## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

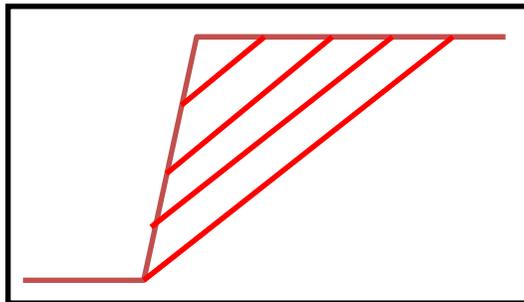
### Principe de la détection des mouvements potentiels dans les massifs rocheux



+



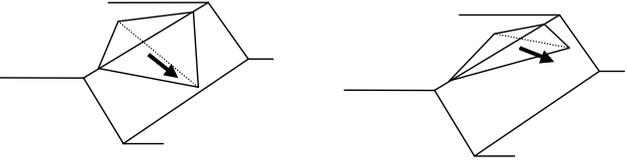
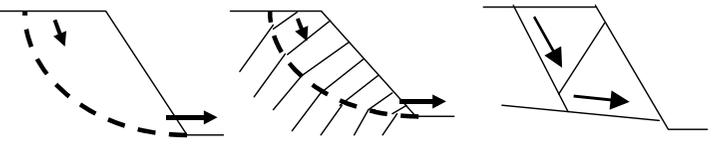
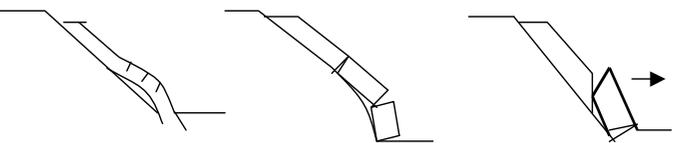
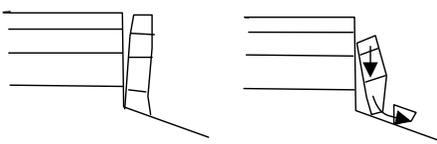
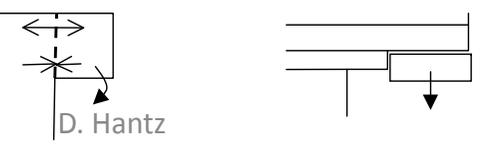
=



## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

**DETECTION**

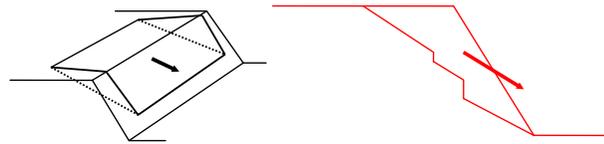
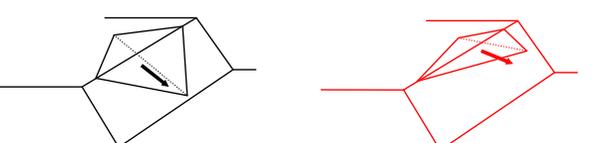
Recherche des configurations potentiellement instables

Configuration	Mécanisme
	Glissement sur un plan
	Glissement sur 1 ou 2 plans
	Glissement rotationnel ou composé
	Rupture de banc
	Effondrement de colonne
	Basculement de colonne ou de blocs
 D. Hantz	Rupture de surplomb

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

**WHERE ?**

**DETECTION OF  
POTENTIAL  
INSTABILITIES**

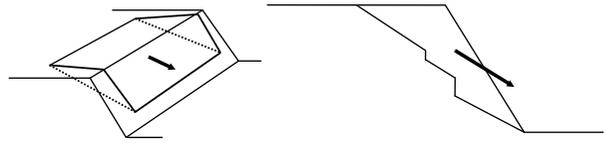
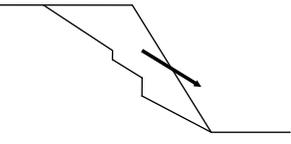
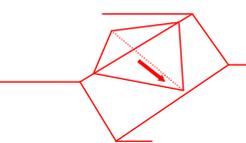
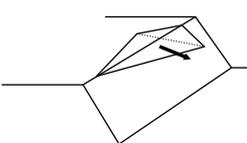
Configuration	Mechanism
	<b>Plane slide</b>
	Wedge or <b>plane slide</b>



## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

**WHERE ?**



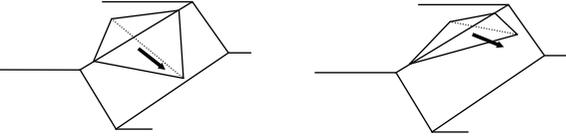
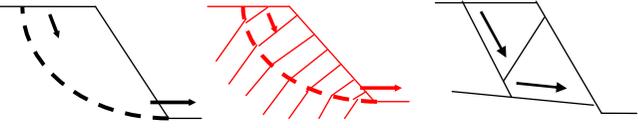
Configuration		Mechanism
		Plane slide
		<b>Wedge or plane slide</b>



## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

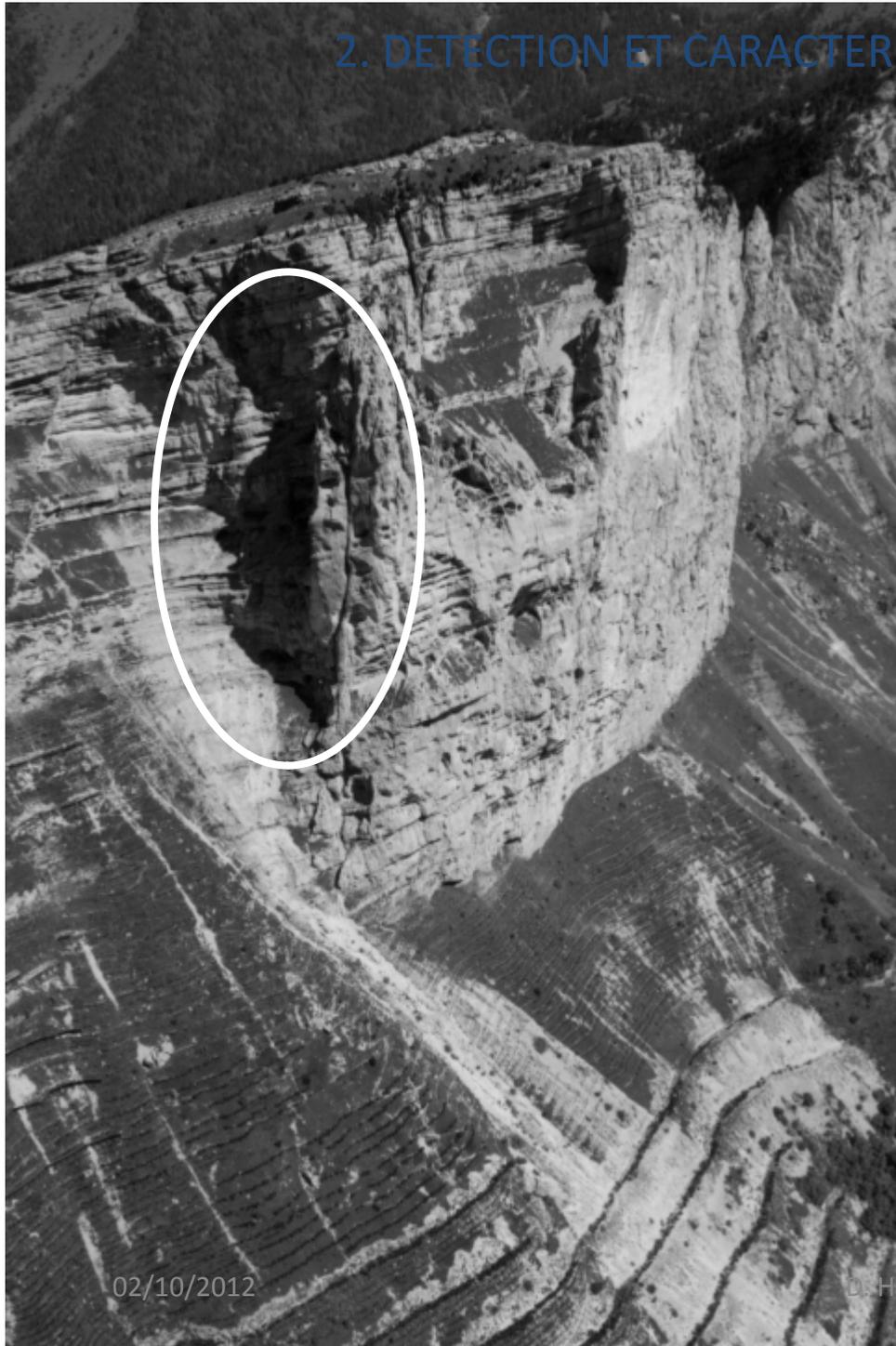
**WHERE ?**

### DETECTION OF POTENTIAL INSTABILITIES

Configuration		Mechanism
		Plane slide
		Wedge or plane slide
		<b>Rotational</b> or multiblock slide



## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES



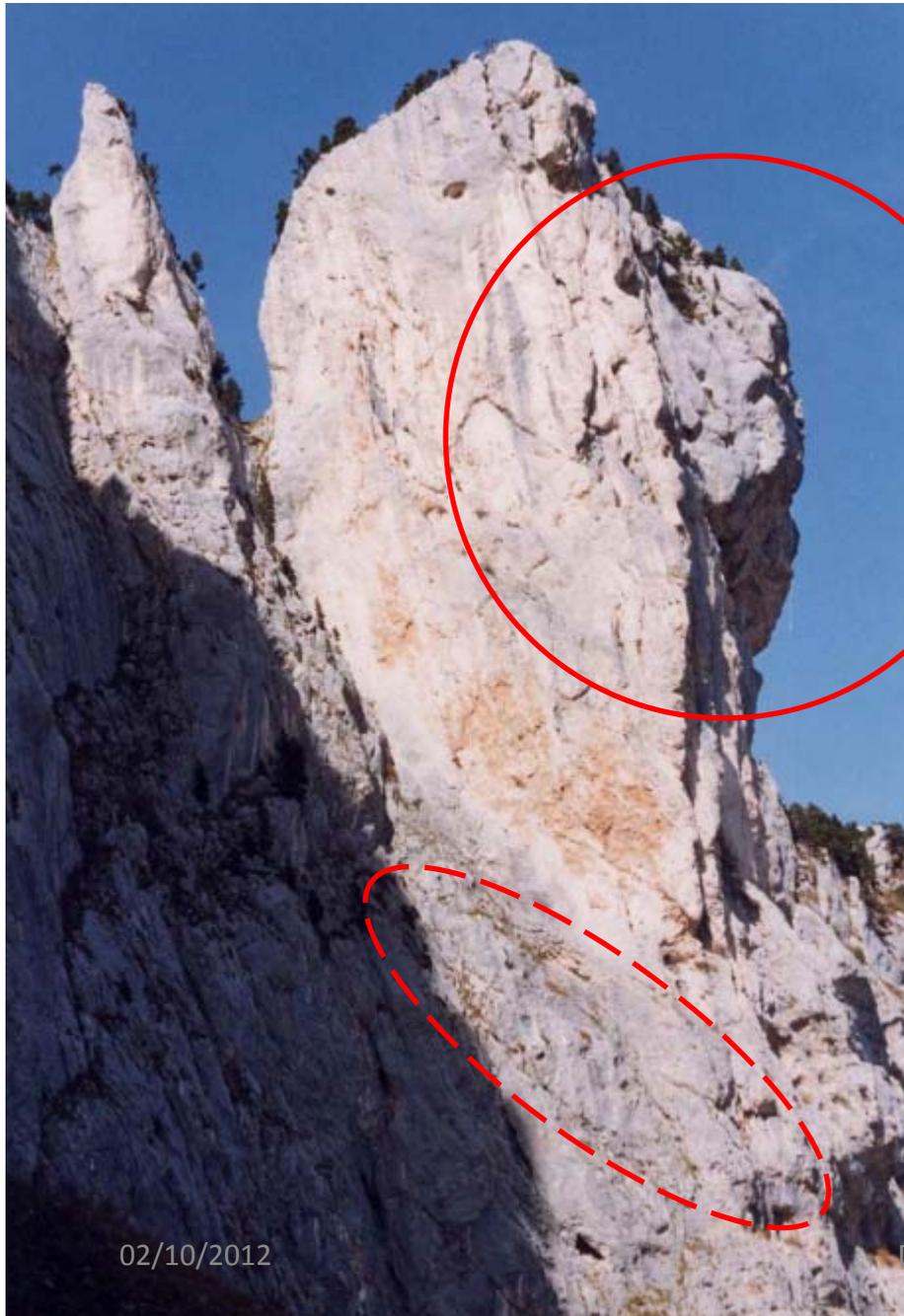
02/10/2012

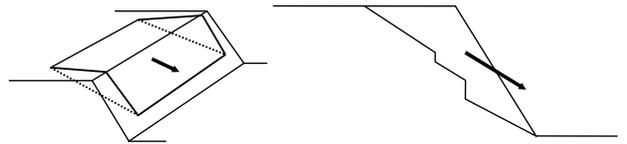
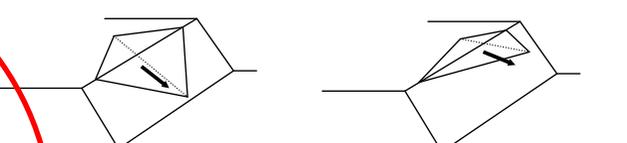
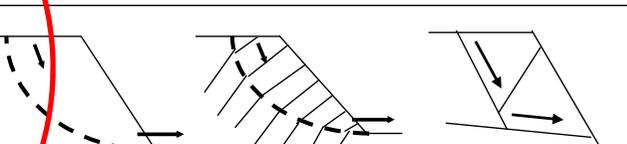
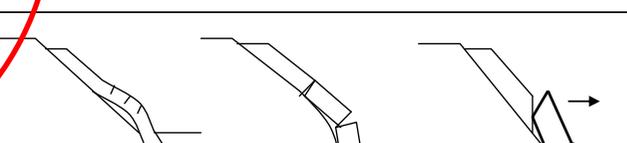
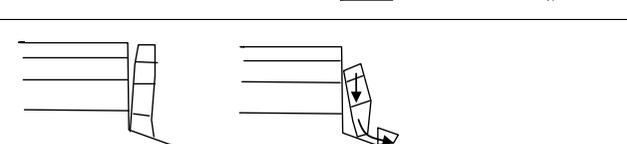
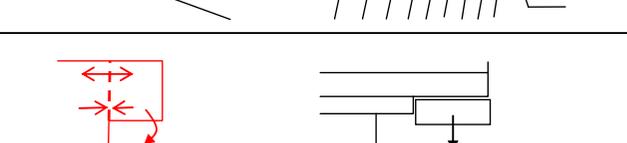
D. Hantz

Configuration	Mechanism
	Plane slide
	Wedge or plane slide
	Rotational or multiblock slide
	Slab failure
	<b>Column collapse</b>
	<b>Column or block toppling</b>
	Overhang failure

27

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES



Configuration	Mechanism
	Plane slide
	Wedge or plane slide
	Rotational or multiblock slide
	Slab failure
	Column collapse
	Column or block toppling
	<b>Overhang failure</b>

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Principe de la détection des mouvements potentiels dans les sols

Dans le cas des sols, l'observation permet de détecter les mouvements actifs, mais pas les mouvements potentiels, car les surfaces de glissement ne sont généralement pas pré-existantes.

Différentes approches sont possibles :

- Approche **empirique** (basée sur l'expérience)
- Approche **statistique** (basée sur l'analyse statistique des facteurs favorables aux mouvements)
- Approche **mécanique** (basée sur un calcul de coefficient de sécurité, utilisable seulement pour des études ponctuelles)

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Détection des zones susceptibles de glissement de sol par analyse statistique

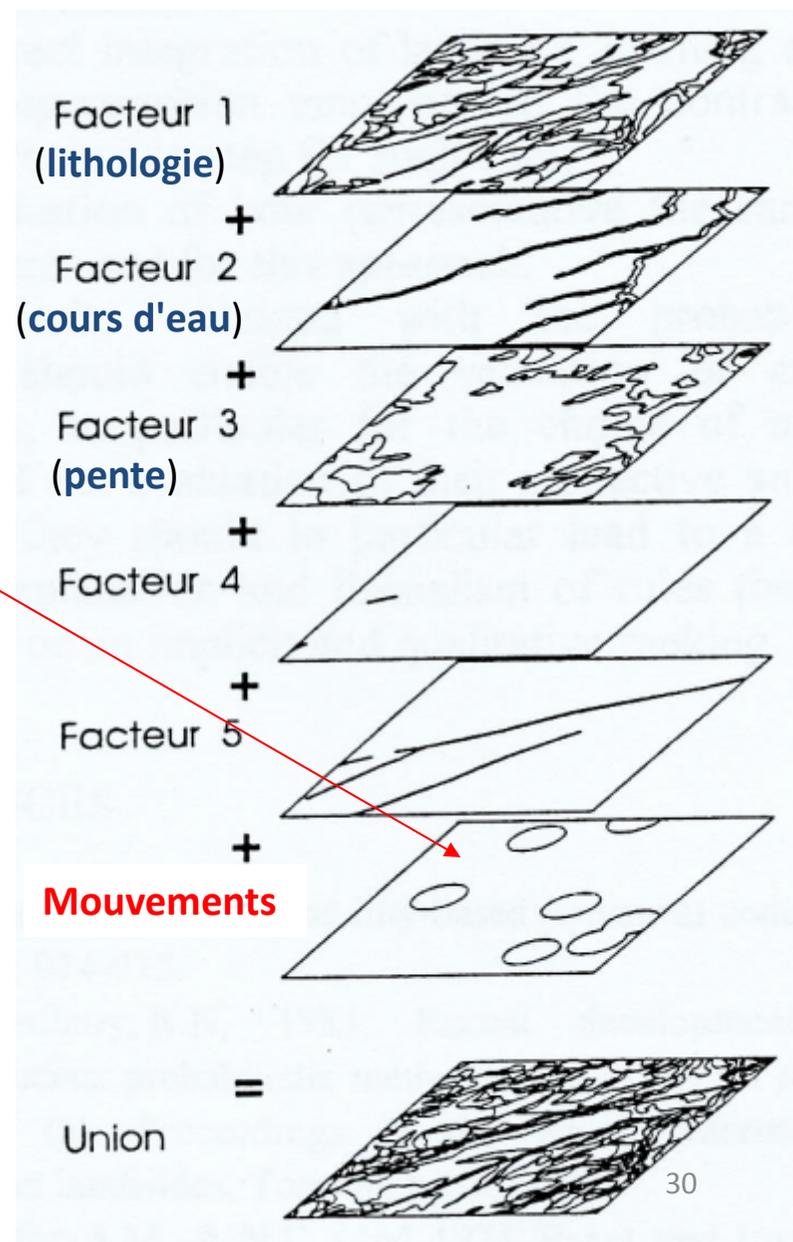
Le principe de l'analyse statistique est de rechercher, pour une zone donnée, les **facteurs favorables** à un certain type de mouvement de terrain

Il faut disposer d'un inventaire exhaustif des mouvements dans un secteur test

On calcule, pour chaque combinaison de facteurs, le **pourcentage de la surface affecté par des mouvements** (indice de **susceptibilité**)

*Exemple :*

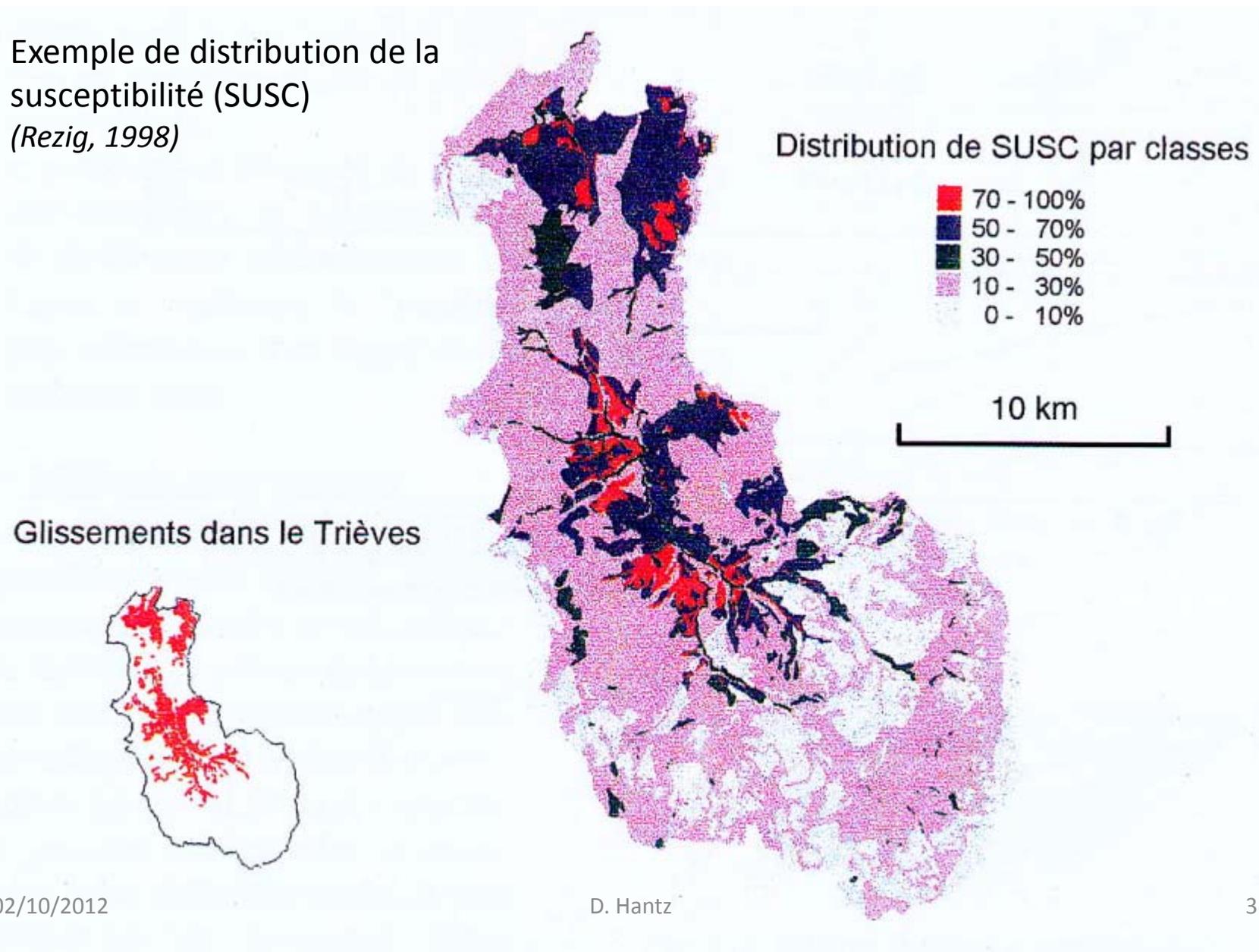
*Pour la combinaison (argile, proximité de cours d'eau, pente de 10 à 20°), 80% de la surface est en glissement.*



## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Détection des zones susceptibles de glissement de sol par analyse statistique

Exemple de distribution de la  
susceptibilité (SUSC)  
(Rezig, 1998)



## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

Méthode sommaire de détection des aléas diffus proposée pour l'Himalaya

### Exemple de détermination de la **susceptibilité** (Gupta et Anbalagan, 1997)

- Cartographie de type préliminaire, à l'échelle 1/50 000.
- Types de phénomènes considérés : glissements, dans des massifs rocheux plus ou moins altérés, de type plan ou dièdre.
- Six facteurs sont notés :
  - lithologie (note maxi : 2,0),
  - relation entre orientations des discontinuités et du versant (note maxi : 2,0),
  - valeur de la pente (note maxi : 2,0),
  - relief, dénivelée locale (note maxi : 1,0),
  - conditions hydrogéologiques (note maxi : 1,0),
  - degré de couverture du sol par la végétation (note maxi : 2,0).
- La somme totale S est calculée sur chaque facette (partie de versant homogène en direction et pente). Les degrés d'aléa sont les suivants :

$S \leq 3,5$	très faible aléa
$3,5 < S \leq 5,0$	faible aléa
$5,0 < S \leq 6,0$	aléa modéré
$6,0 < S \leq 7,5$	aléa fort
$7,5 < S$	aléa très fort

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Extension spatiale

- Extension en surface (morphologie, topographie)
- Extension en profondeur (sondages, géophysique)
- Volume
- Propagation de la masse en mouvement (prévision de la trajectoire)
  - Dans le cas d'un déplacements important, on distingue la **zone de départ** et la **zone d'épandage**

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Notion d'intensité

**Intensité du phénomène** : importance, potentialité de victimes (gravité, danger), de dommages aux biens (capacité destructrice, agressivité), indépendante de l'occupation actuelle de la zone considérée.

Pas de définition précise universelle (comme l'intensité pour les séismes)

En France, on recommande d'évaluer l'intensité en fonction du coût des mesures nécessaires pour se prémunir du phénomène (mesures de prévention ou parades) et, si nécessaire, d'évaluer la gravité au plan humain (danger) (*guide méthodologique PPR Mouvements de terrain, 1999*).

En Suisse, l'intensité est évaluée en fonction des effets dommageables possibles sur une zone d'habitation (*Recommandations OFAT/OFEE/OFEFP 1997*)

Eboulements : fonction de l'énergie

Glissements : fonction de la vitesse

Coulée boueuse : fonction de la hauteur

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Notion d'intensité

Exemple de définition de l'intensité (Suisse)

<b>Intensité</b>	<b>Type de dommage attendu</b>	<b>Critère d'évaluation</b>
Forte	Hommes et animaux en danger à l'intérieur des bâtiments ; dégâts considérables aux bâtiments allant jusqu'à leur destruction	Eboulement : $E > 300$ kJ Glissement : forts mouvements différentiels ou déplacement $> 1$ m par évènement Glissement superficiel : $V > 0,1$ m/j Coulée : épaisseur $> 2$ m
Moyenne	Hommes et animaux en danger à l'extérieur des bâtiments ; dégâts aux bâtiments	Eboulement : $30 < E < 300$ kJ Glissement : $V > 2$ cm/an Coulée : épaisseur de 0,5 à 2 m
Faible	Hommes et animaux peu menacés (sauf en cas de chute de blocs) ; dégâts aux bâtiments	Eboulement : $E < 30$ kJ Glissement : $V \leq 2$ cm/an Coulée : épaisseur $< 0,5$ m

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Notion d'intensité

Exemple de définition de l'intensité vis à vis des vies humaines  
(Comité Français de Géologie de l'Ingénieur)

<b>Intensité (ou gravité)</b>	<b>Préjudices humains</b>	<b>Exemples de phénomènes (à titre indicatif)</b>
Très faible	Pas d'accident ou accident très improbable	Retrait par dessiccation, affaissement minier, fluage, glissement lent (< 1m/h)
Moyenne	Accident isolé	Glissement important à paroxysme rapide (>10 m/h), chutes de pierres isolées
Forte	Quelques victimes	Chute de blocs, lave torrentielle, fontis
Majeure	Quelques dizaines de victimes ou plus	Eboulement en masse, lave torrentielle majeure, effondrement généralisé de carrière

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Notion d'intensité

Exemple de définition de l'intensité vis à vis des constructions  
(Comité Français de Géologie de l'Ingénieur)

<b>Intensité (ou agressivité)</b>	<b>Type de dommage attendu</b>	<b>Exemples de phénomènes (à titre indicatif)</b>
Faible	Gros oeuvre très peu touché	Chute de pierre, glissement pelliculaire, affaissement de faible amplitude
Moyenne	Gros oeuvre atteint, mais réparation possible : fissuration modérée par exemple	Glissement d'ampleur limitée, affaissement de grande amplitude, effondrement ponctuel de faible diamètre, chute de blocs
Forte	Gros oeuvre fortement touché (voire destruction totale), rendant inutilisable la construction ; réparation très coûteuse ou impossible	Eboulement rocheux, glissement de grande ampleur, effondrement généralisé de carrière, etc.

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE OU DE LA FREQUENCE DE RUPTURE

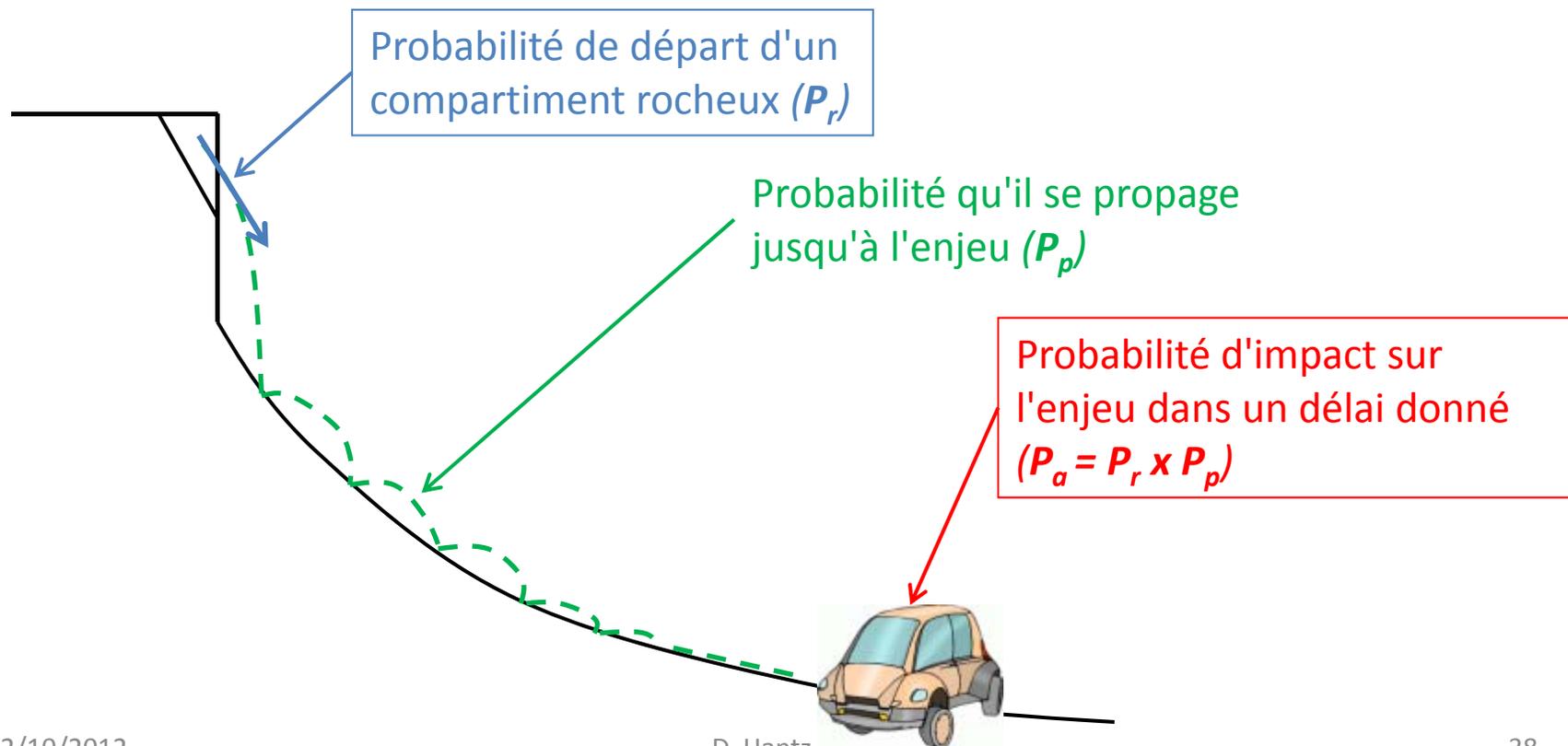
#### Départ du mouvement

Probabilité de rupture d'une masse potentiellement instable (aléa localisé)

Fréquence de rupture dans une zone donnée (aléa diffus)

#### Impact sur un élément à risque

Probabilité d'impact en un point donné d'un versant, ou sur un élément à risque (individu, bâtiment, section de route, ...)



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

**Probabilité d'occurrence d'un phénomène dans un délai donné  
ou  
prévision probabiliste de sa date d'occurrence**

#### **3.1. Approche mécanique**

3.1.1. Analyse de la stabilité actuelle

3.1.2. Evolution de la stabilité

3.1.3. Prévision de la rupture à court terme

3.1.4. Modélisation de la propagation

#### **3.2. Jugement qualitatif d'expert**

#### **3.3. Approche historique**

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

##### **Mouvements potentiels ou dormants :**

Coefficient de sécurité  $F > 1$

Evolution future de  $F$  ? (probabilité que  $F$  devienne inférieur à 1)

##### **Mouvements actifs :**

Probabilité d'occurrence = 1

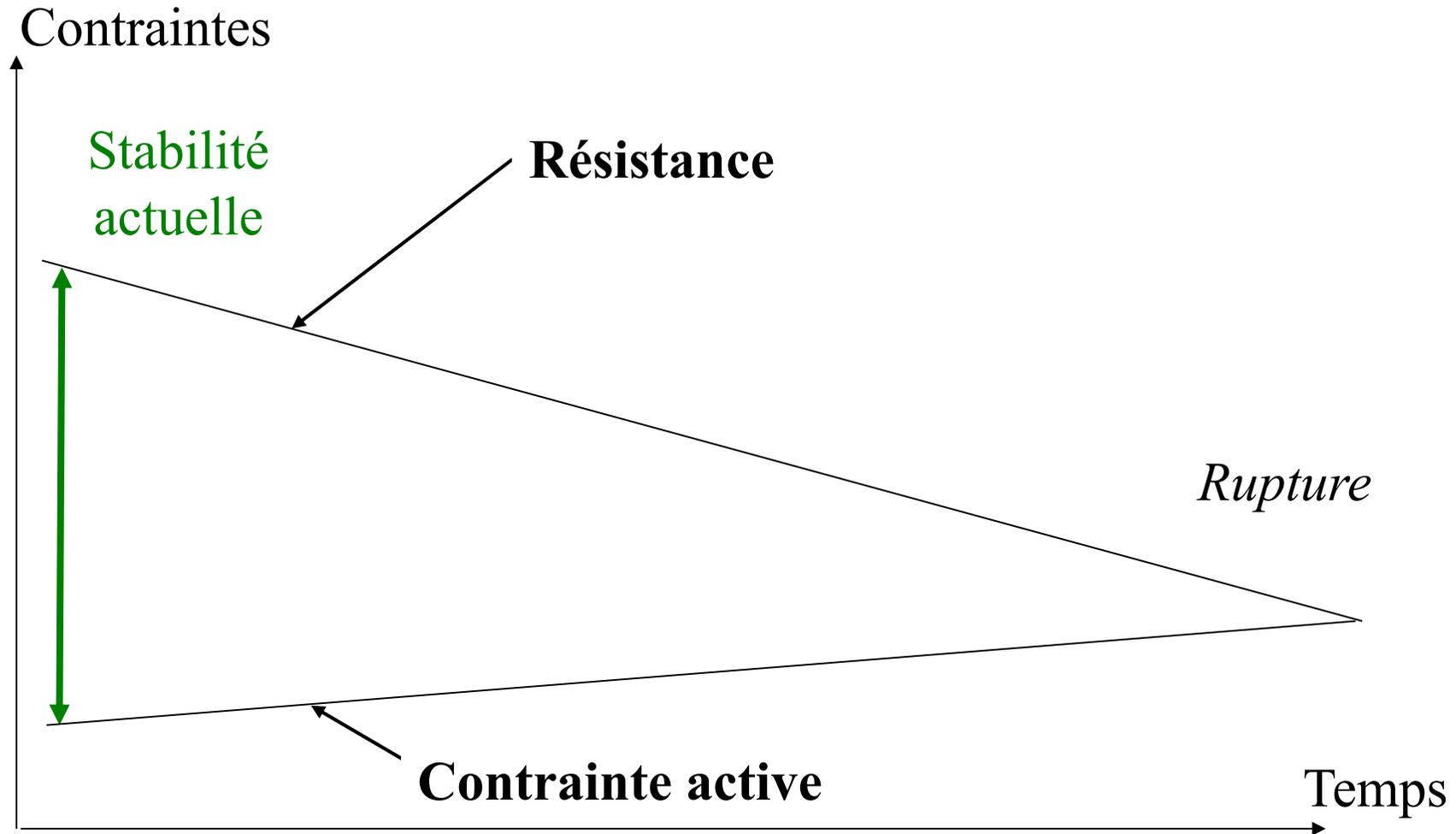
$F < 1$  (au moins temporairement)

Probabilité d'accélération du mouvement et d'évolution vers un autre type de mouvement ?

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

## SCHEMATISATION DES PROCESSUS CONDUISANT A L'INSTABILITE



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

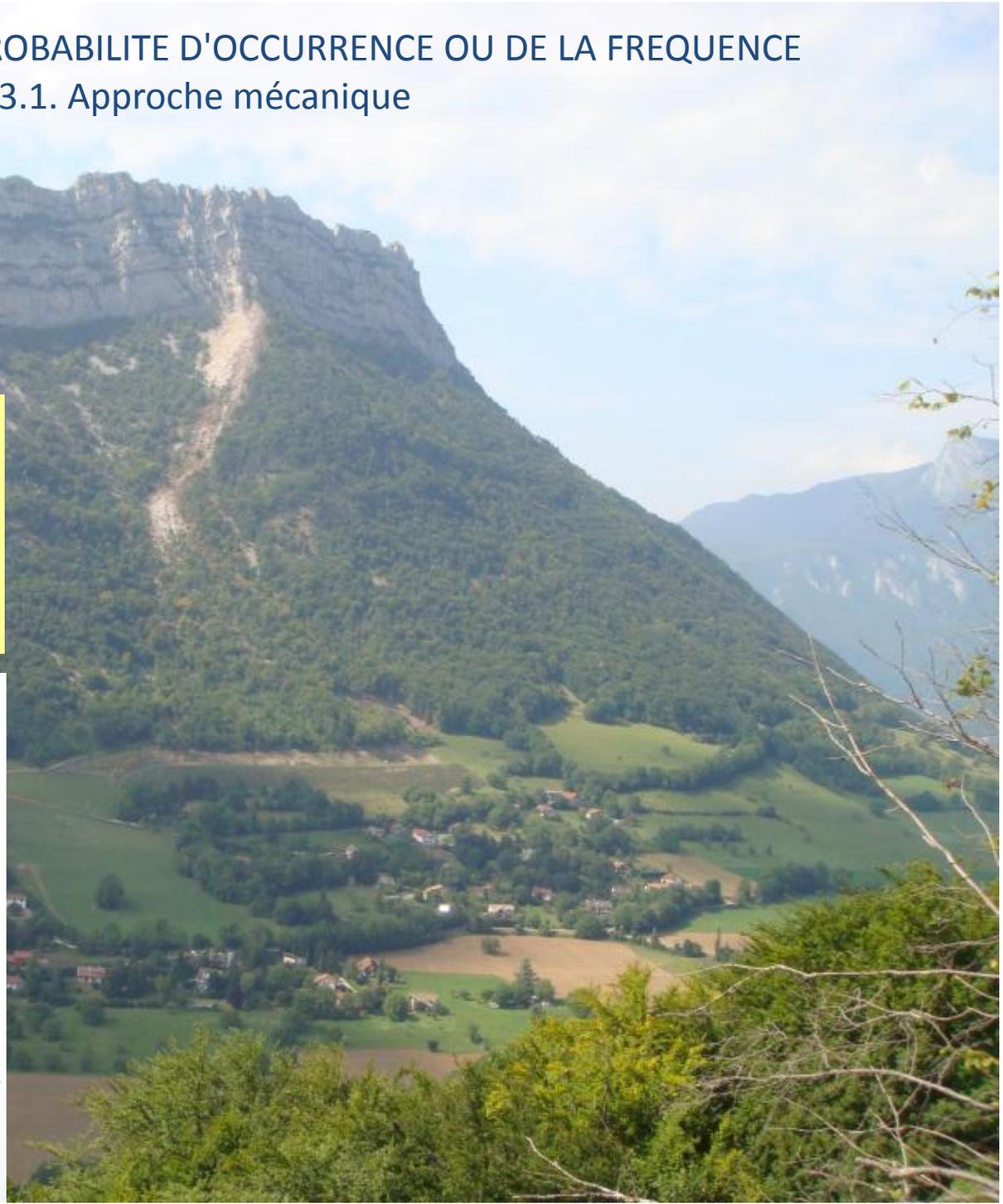
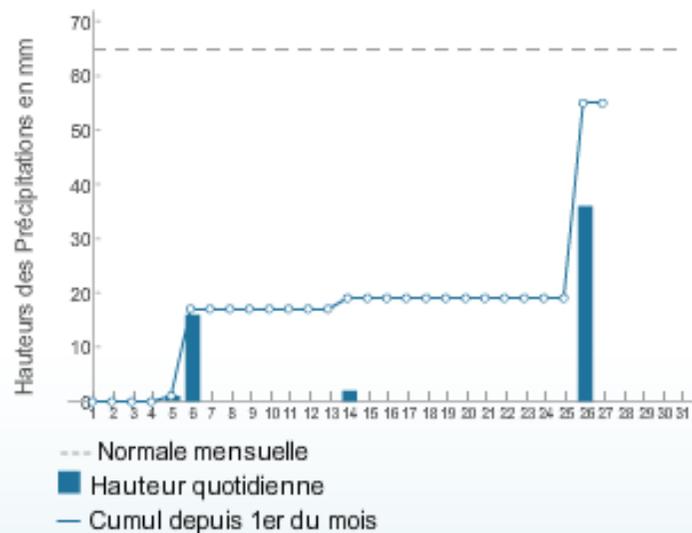
#### 3.1. Approche mécanique

##### **Exemple**

Eboulement au Néron  
le 14/08/11 (1500 m<sup>3</sup>)

Aboutissement d'un processus  
lent de dégradation de la stabilité

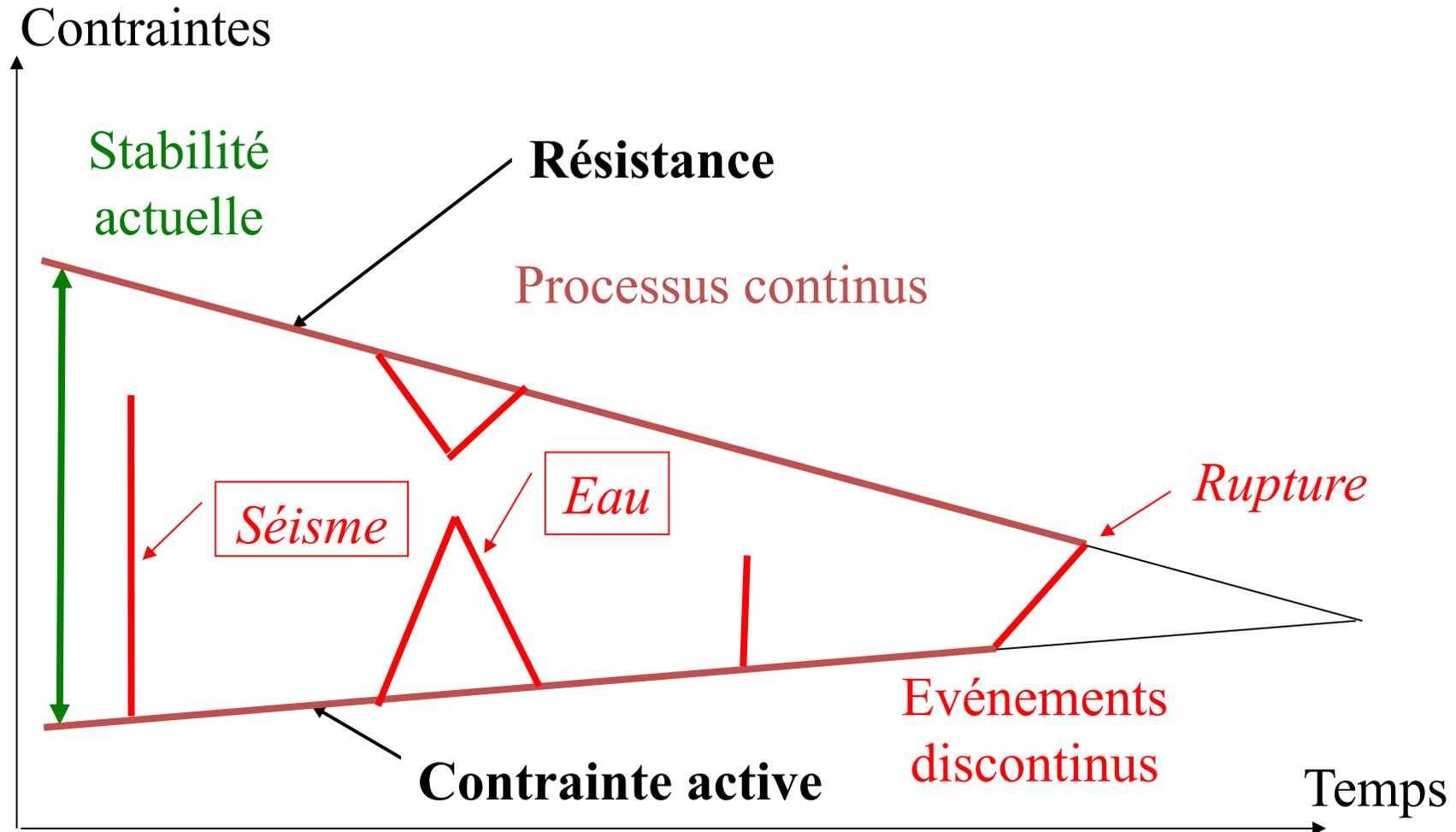
Grenoble-St Geoirs, août 2011



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

## SCHEMATISATION DES PROCESSUS CONDUISANT A L'INSTABILITE



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique



**Exemple** : Glissement de La Salle en Beaumont (Isère)  
Nuit du 8 au 9 janvier 1994 (1,3 hm<sup>3</sup>), 9 maisons détruites, 4 victimes  
Facteur déclenchant : pluie de fréquence millénaire

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

##### **Exemple**

Glissement de l'Harmalière (Sinard, Isère)

le 16/03/1981

Facteur déclenchant : fonte rapide du manteau neigeux (40 cm), pluie.

Le glissement (sur 50 hm<sup>2</sup>), s'est produit en 24h.

Forêt détruite.



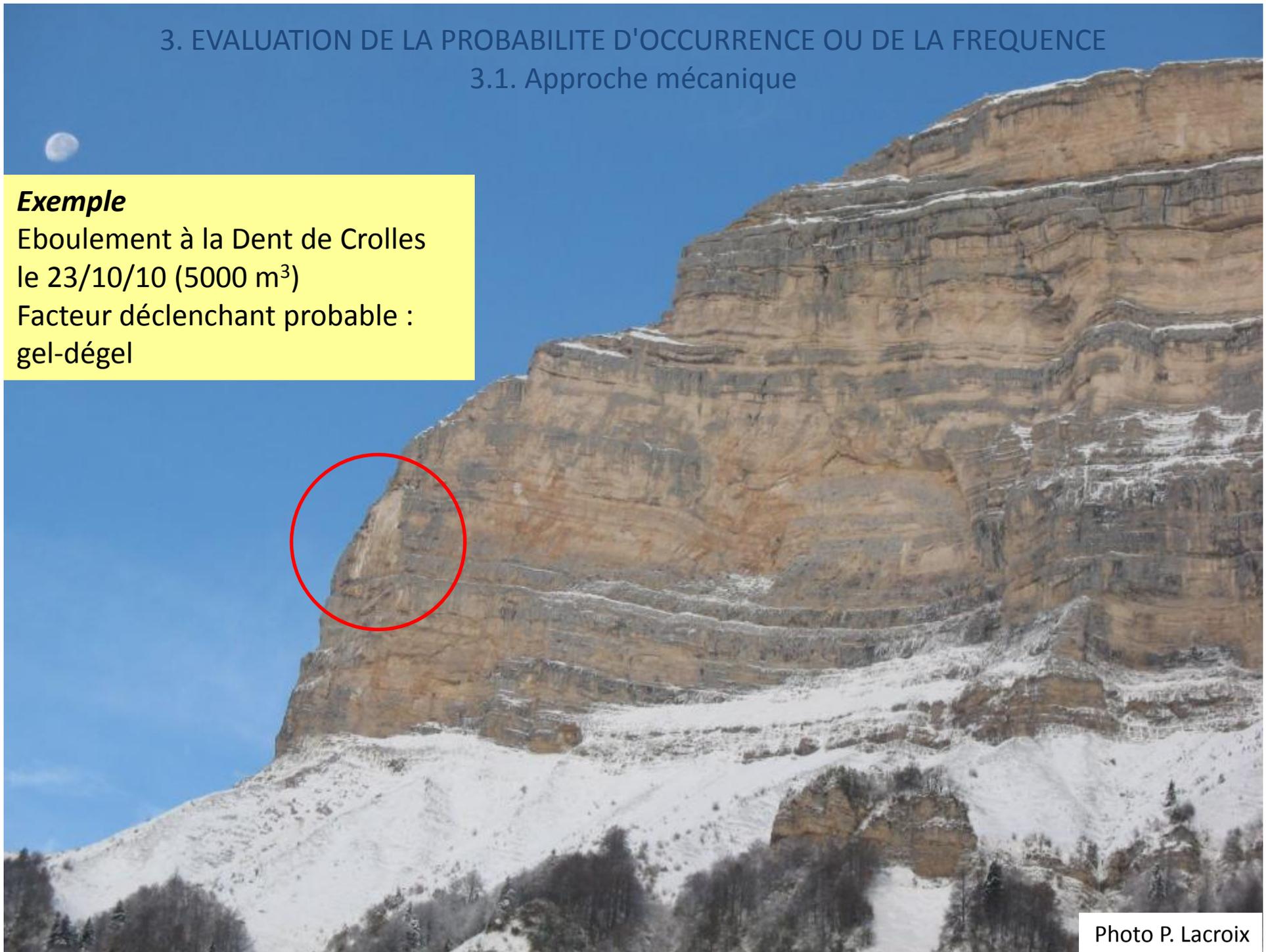
### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

##### **Exemple**

Eboulement à la Dent de Crolles  
le 23/10/10 (5000 m<sup>3</sup>)

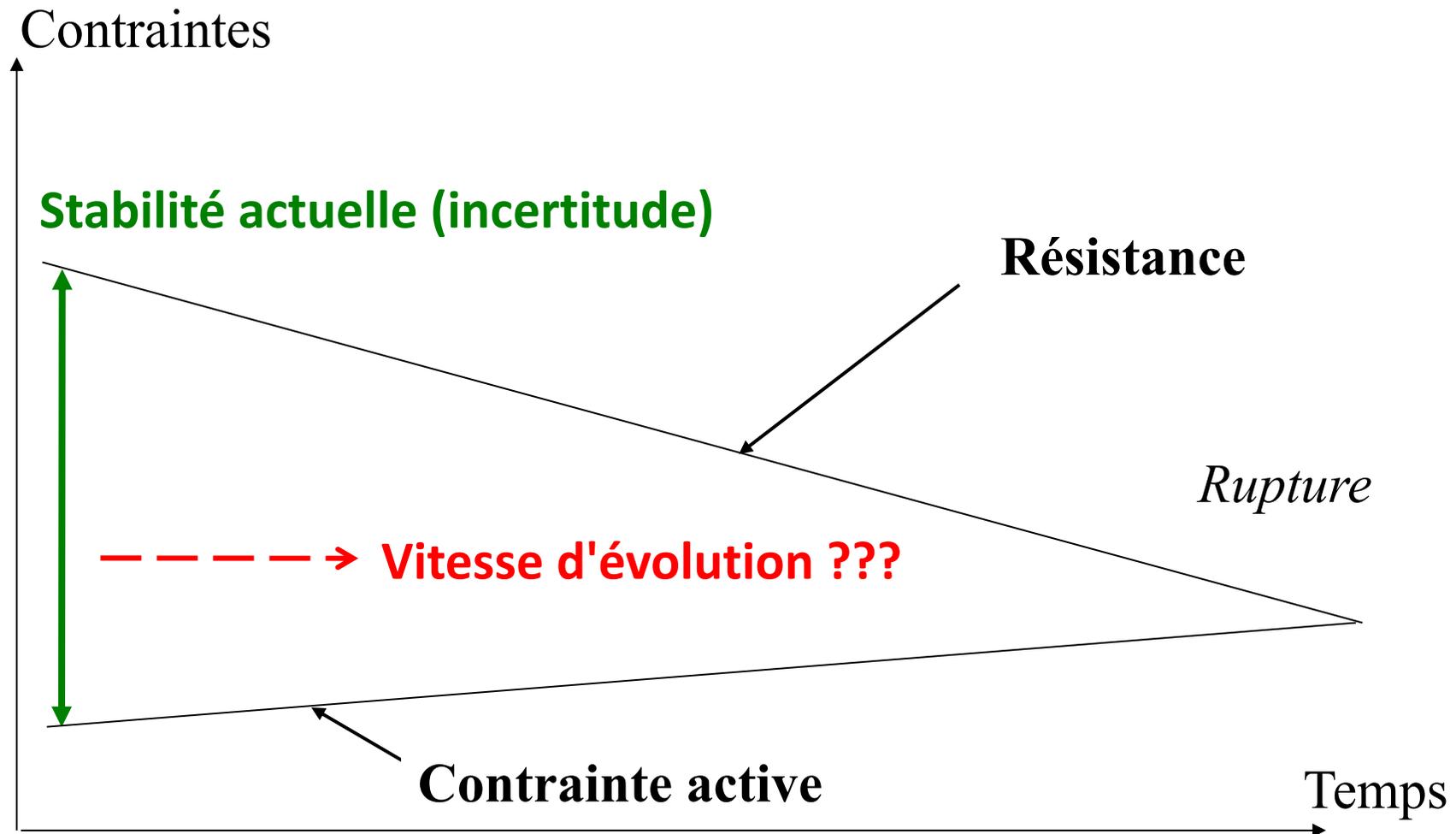
Facteur déclenchant probable :  
gel-dégel



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

## SCHEMATISATION DES PROCESSUS CONDUISANT A L'INSTABILITE

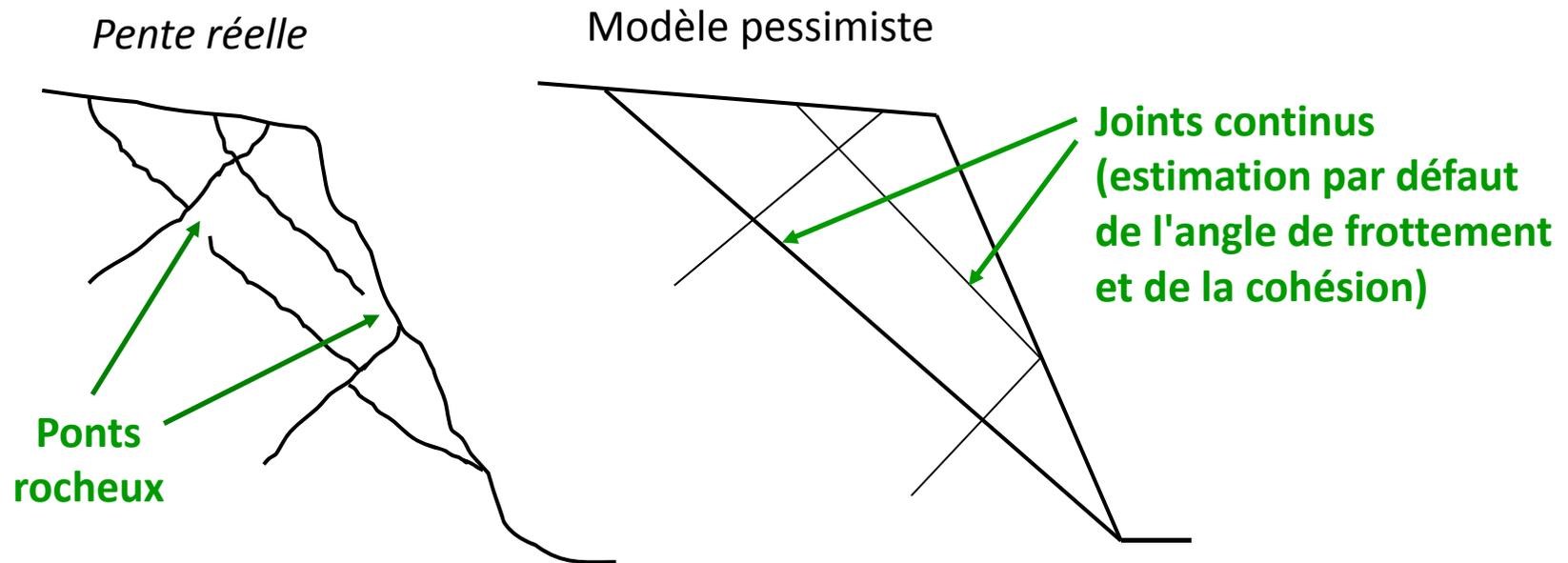


### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

##### 3.1.1. Analyse de la stabilité actuelle

#### Démarche utilisée dans les études d'ouvrage

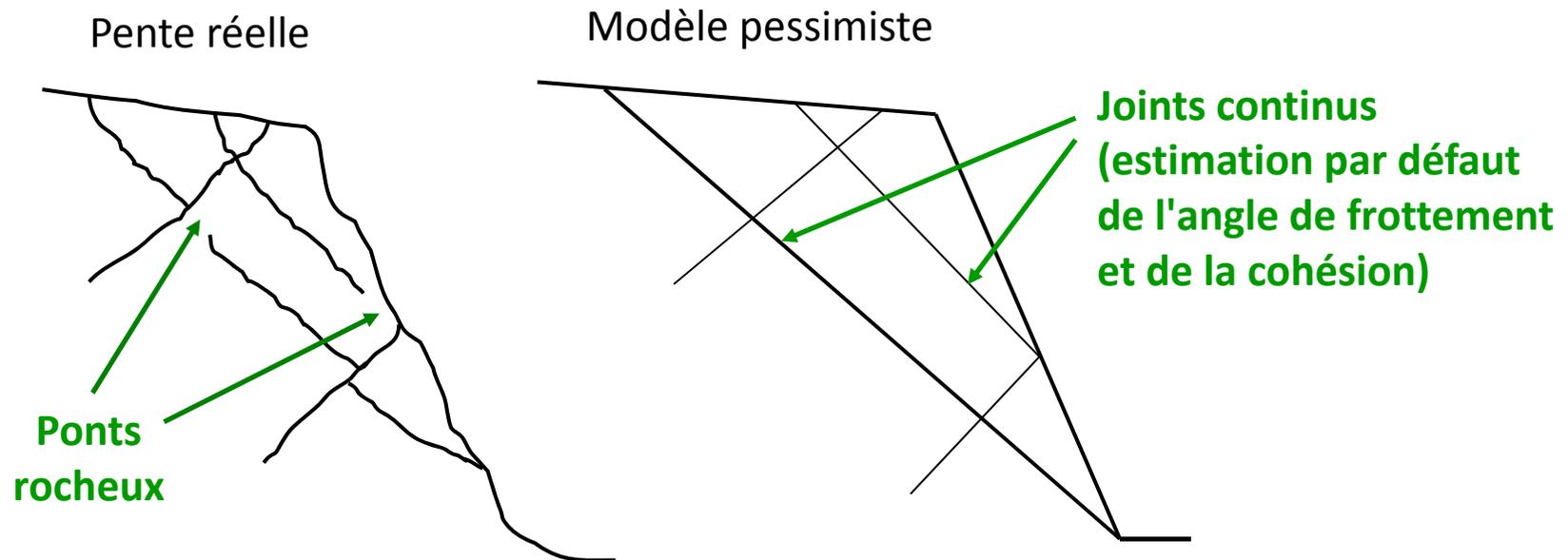


### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

##### 3.1.1. Analyse de la stabilité actuelle

#### Démarche utilisée dans les études d'ouvrage

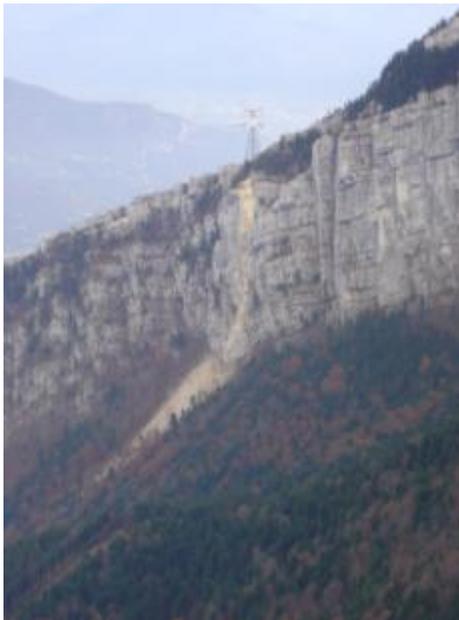


L'application de cette démarche pessimiste à l'évaluation de pentes existantes stables peut conduire à des résultats aberrants

- Nécessité de prendre en compte les ponts rocheux
- Reconnaissance (méthodes géophysiques)
  - Analyse de stabilité tenant compte des ponts rocheux

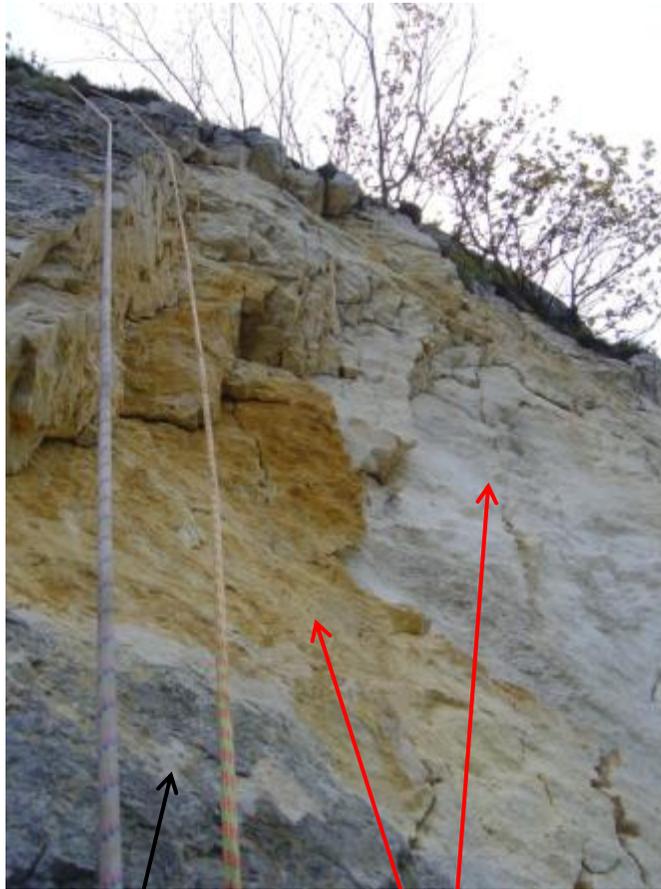
### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE - 3.1. Approche mécanique

***Analyse en retour  
de ruptures dans des  
falaises calcaires  
Importance des ponts  
rocheux***



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE - 3.1. Approche mécanique

#### *Observation de cicatrices de rupture dans des falaises calcaires*



Patine  
(grise)

Cicatrice (claire  
ou rouille)



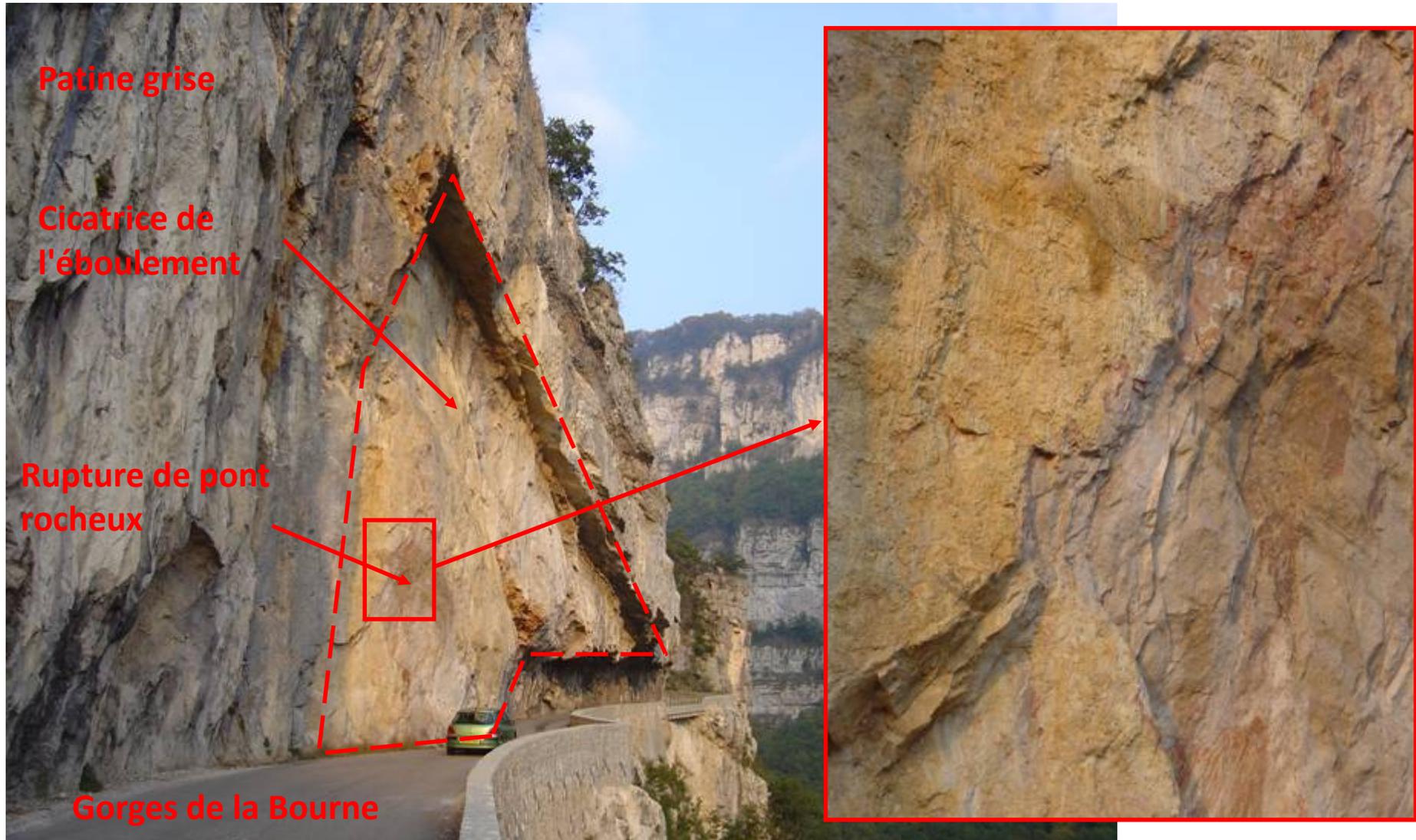
Pont rocheux



Concrétions

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE - 3.1. Approche mécanique

#### *Analyse en retour de 9 ruptures dans des falaises calcaires (Frayssines et Hantz, 2009)*



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

##### 3.1.1. Analyse de la stabilité actuelle

#### *Analyse en retour de 9 ruptures dans des falaises calcaires*

#### Cas d'un pont rocheux dans un plan de glissement

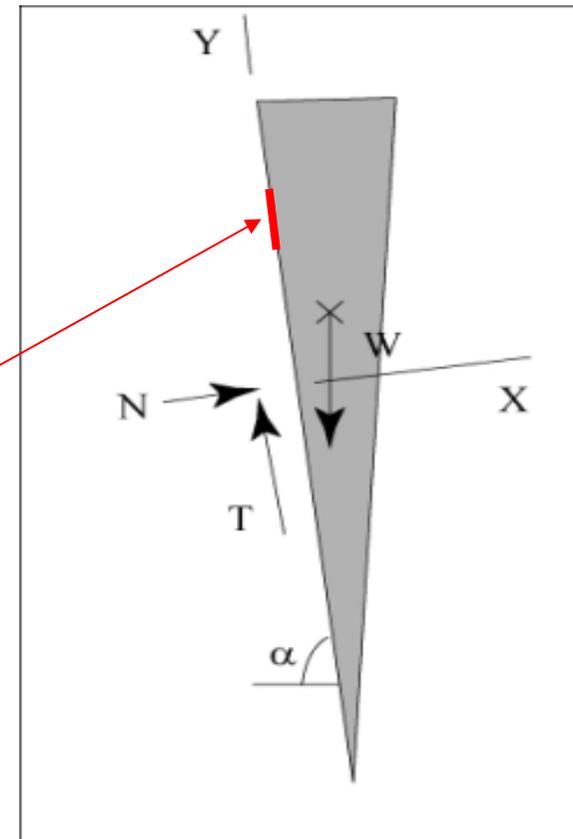
#### Méthode de l'équilibre limite

$$W \cos \alpha \tan \phi + \underline{cS} = W \sin \alpha$$

$\Phi$  : angles de frottement du plan de glissement et du pont rocheux (supposés identiques)

$S$  : surface du pont rocheux mesurée sur la cicatrice

La cohésion  $c$  du pont rocheux est donnée par l'équation d'équilibre

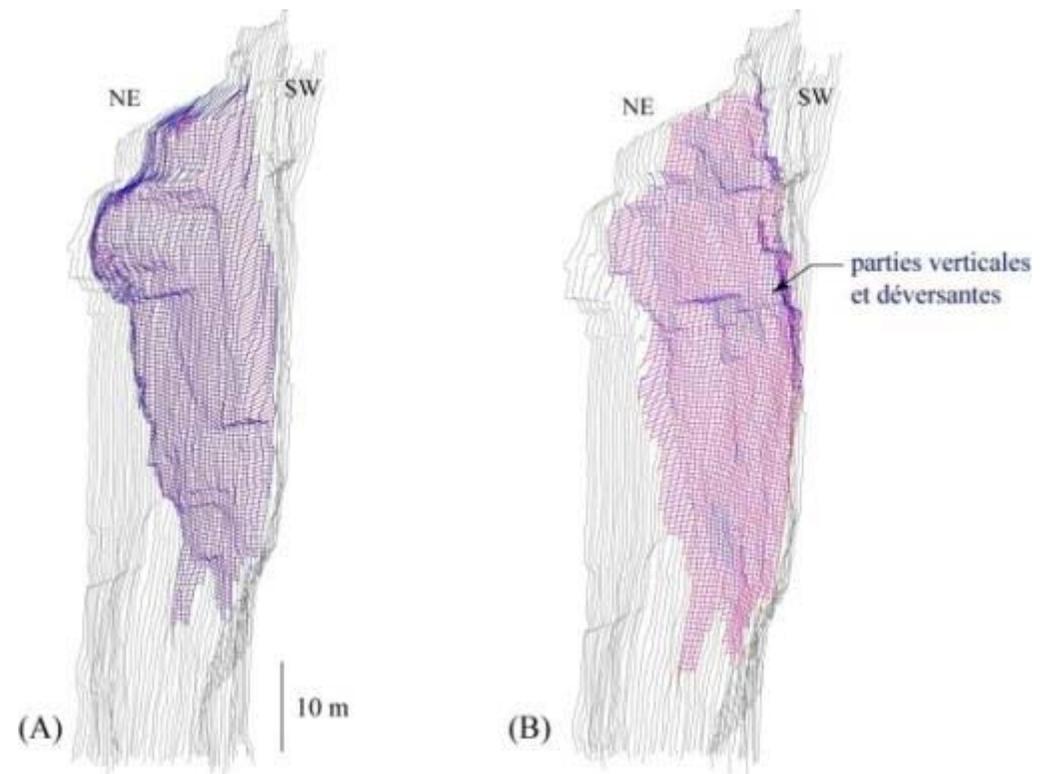
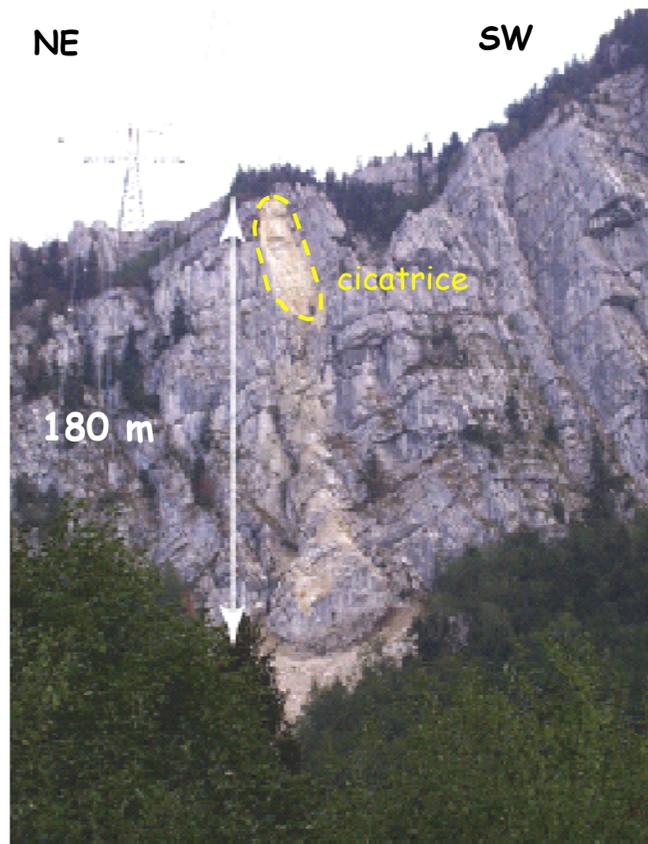


### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE - 3.1. Approche mécanique

#### *Analyse en retour de l'éboulement de la Dent du Loup (Surface de rupture en escalier)*

#### Méthode des éléments distincts (code UDEC)

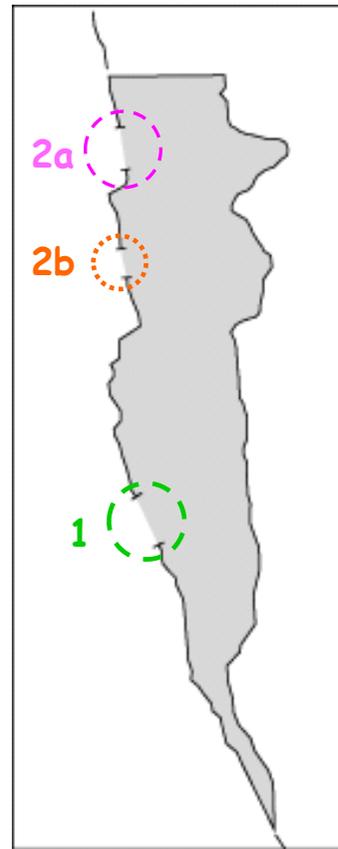
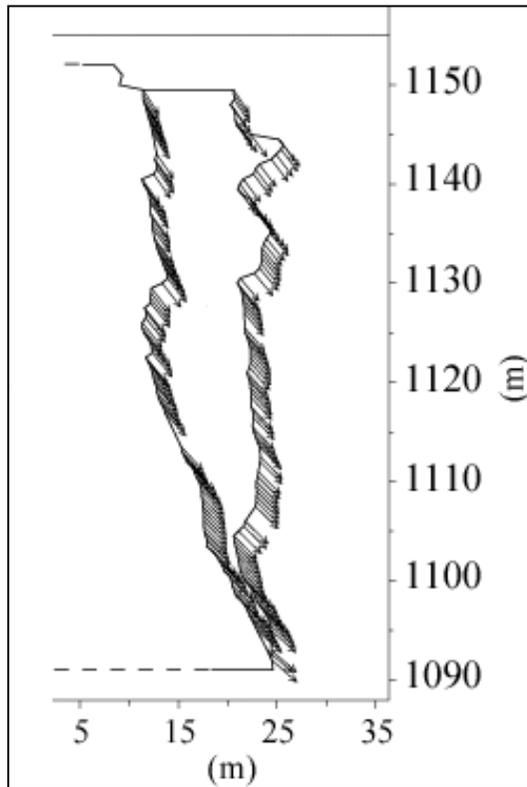
Géométrie de la falaise avant et après l'éboulement  
(photogrammétrie héliportée)



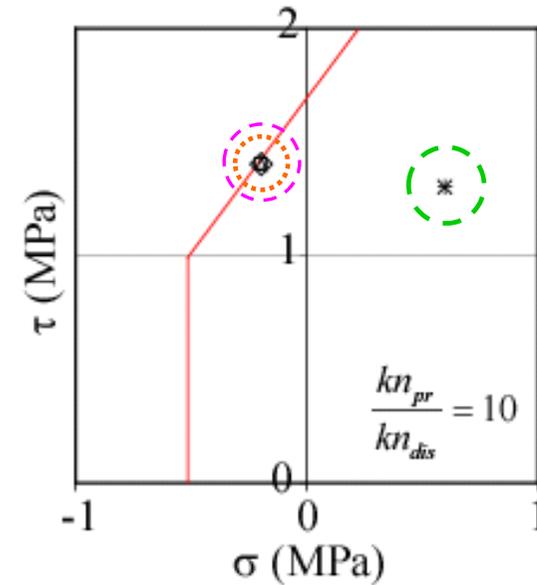
### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE - 3.1. Approche mécanique

#### *Analyse en retour de l'éboulement de la Dent du Loup (Surface de rupture en escalier)*

#### Méthode des éléments distincts (code UDEC)



Caractéristiques des ponts rocheux expliquant la rupture dans un modèle 2D



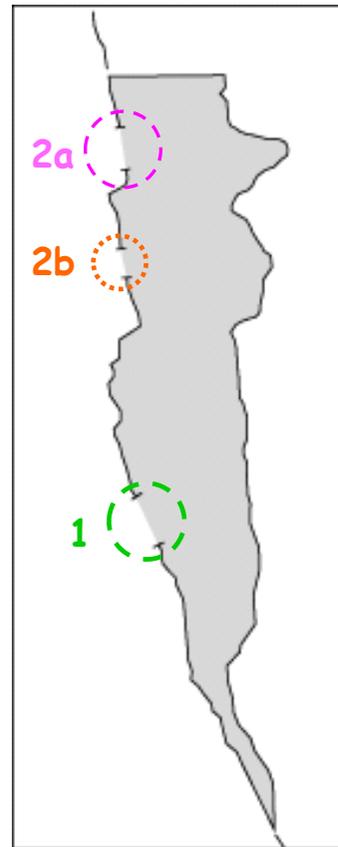
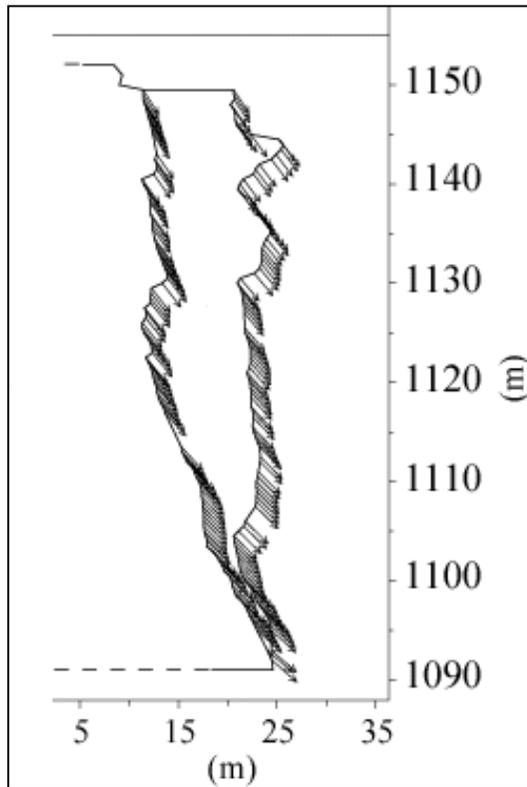
$$\Phi_{pr} = 54^\circ ; \Phi_{joint} = 30^\circ ; c_{joint} = 0$$

Mécanisme : glissement

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE - 3.1. Approche mécanique

#### *Analyse en retour de l'éboulement de la Dent du Loup (Surface de rupture en escalier)*

#### Méthode des éléments distincts (code UDEC)



Cohésion des ponts rocheux expliquant la rupture dans la réalité (3D)

$K_{pr}/K_{sr}$	1	10	100	1000
$C_{pr}$ (MPa)	11,8	12,5	16,8	17,6

$$\Phi_{pr} = 54^\circ ; \Phi_{joint} = 30^\circ ; c_{joint} = 0$$

Mécanisme : glissement

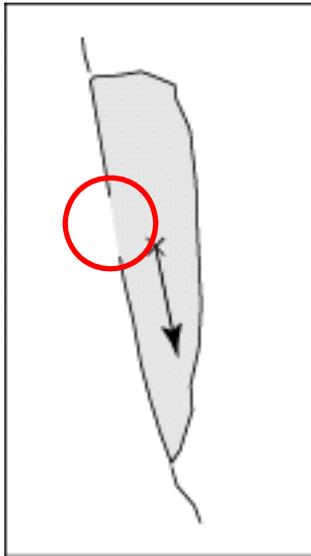
### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

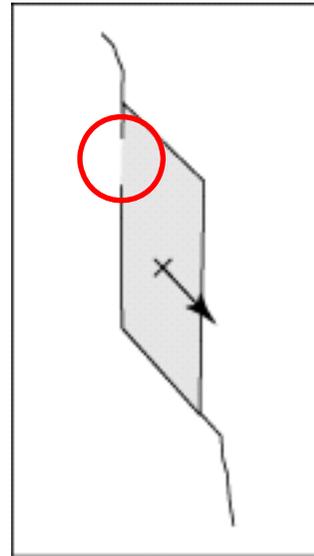
##### 3.1.1. Analyse de la stabilité actuelle

### *Analyse en retour de 9 ruptures dans des falaises calcaires*

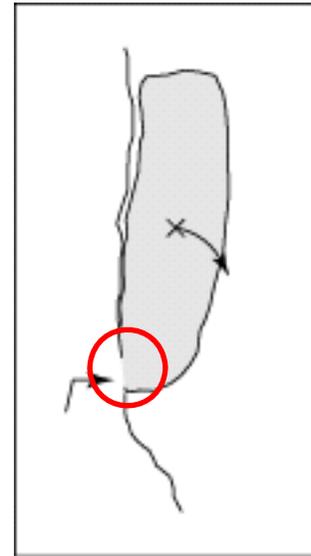
#### *Configurations analysées*



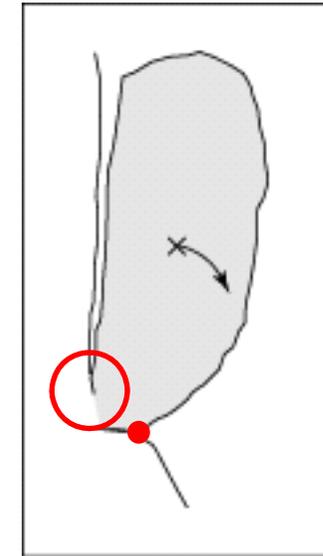
**3 glissements  
isostatiques**



**3 glissements  
hyperstatiques**



**2 basculements  
isostatiques**



**1 basculement  
hyperstatique**

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

##### 3.1.1. Analyse de la stabilité actuelle

#### ***Conclusions de l'analyse en retour de 9 ruptures dans des falaises calcaires***

La stabilité des compartiments avant rupture ne peut s'expliquer sans prise en compte des ponts rocheux

L'utilisation d'un modèle pessimiste sans ponts rocheux conduit à une évaluation irréaliste de la stabilité

Les ruptures peuvent être modélisées en considérant une cohésion des ponts rocheux 2 à 3 fois plus faible que la cohésion de la roche issue des essais de laboratoire

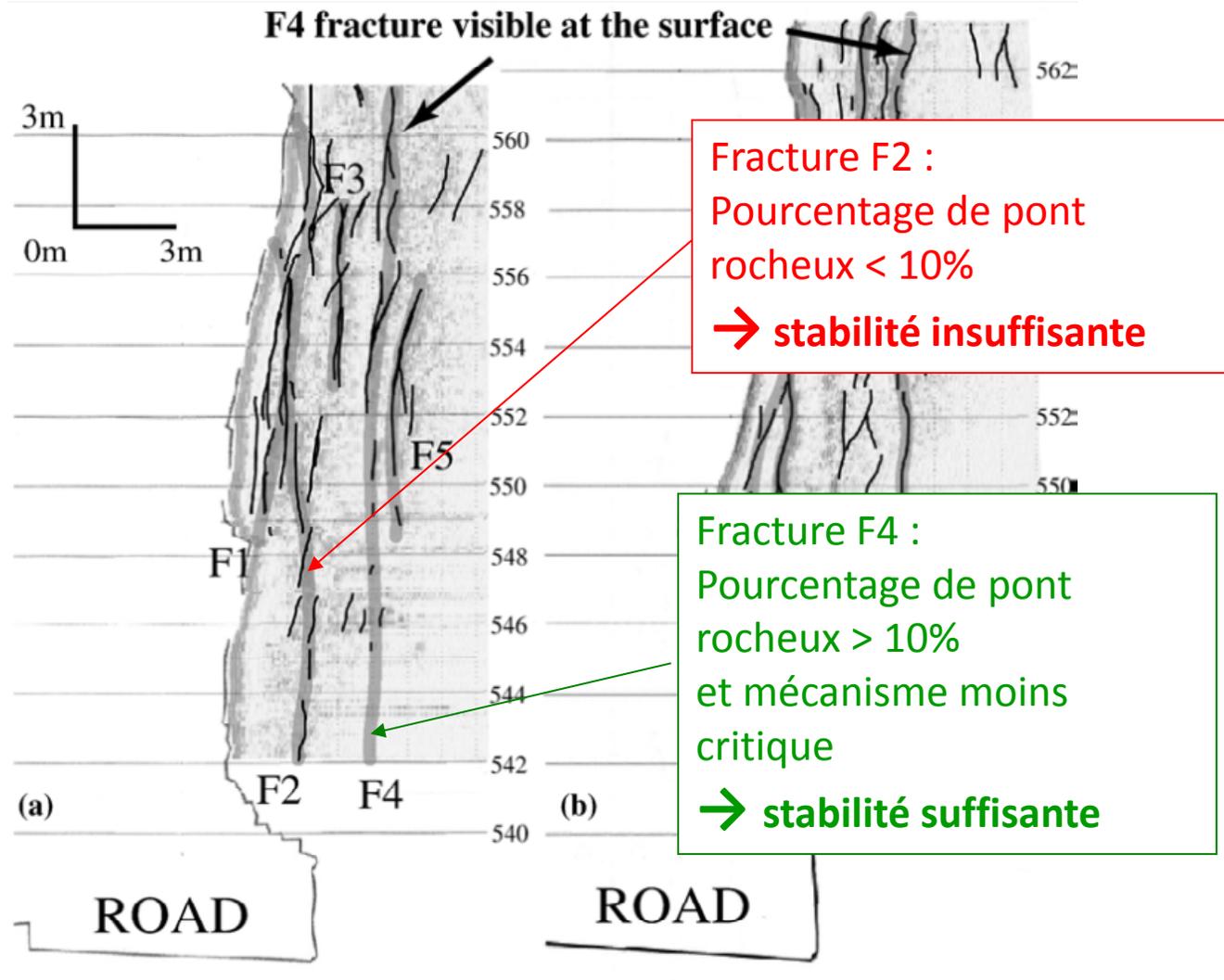
La principale limitation à l'utilisation de l'analyse mécanique dans l'évaluation de l'aléa est due à la mauvaise connaissance des ponts rocheux

→ Reconnaissance par prospection géophysique

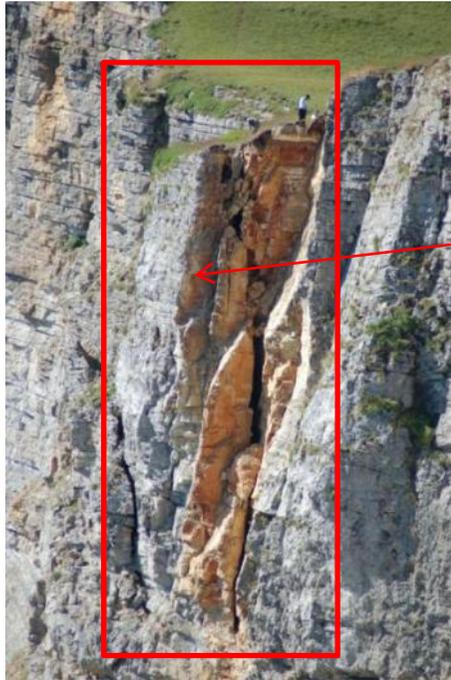
### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE - 3.1. Approche mécanique

#### *Reconnaissance des ponts rocheux par géoradar*

(Deparis et al., 2007)

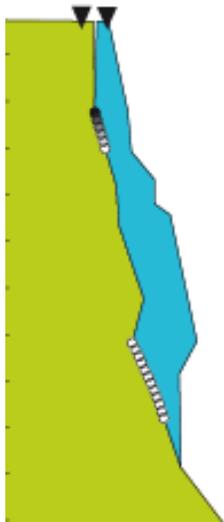
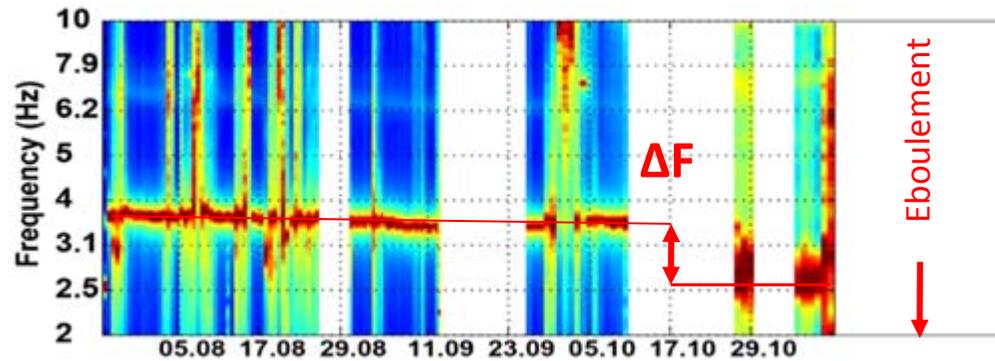


### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE - 3.1. Approche mécanique



#### *Modélisation de la stabilité actuelle*

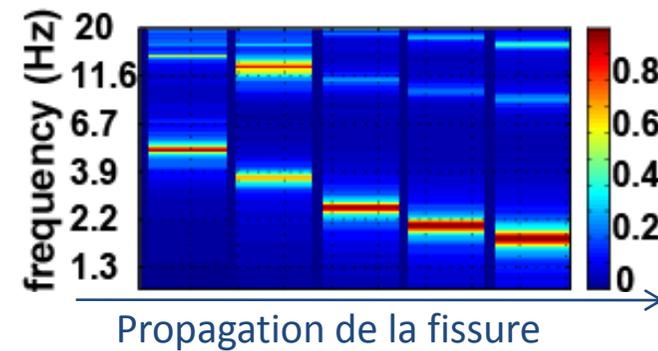
Colonne de Chamousset (Lévy et al. 2010)



*Simulation des fréquences propres  
connaissant la structure*



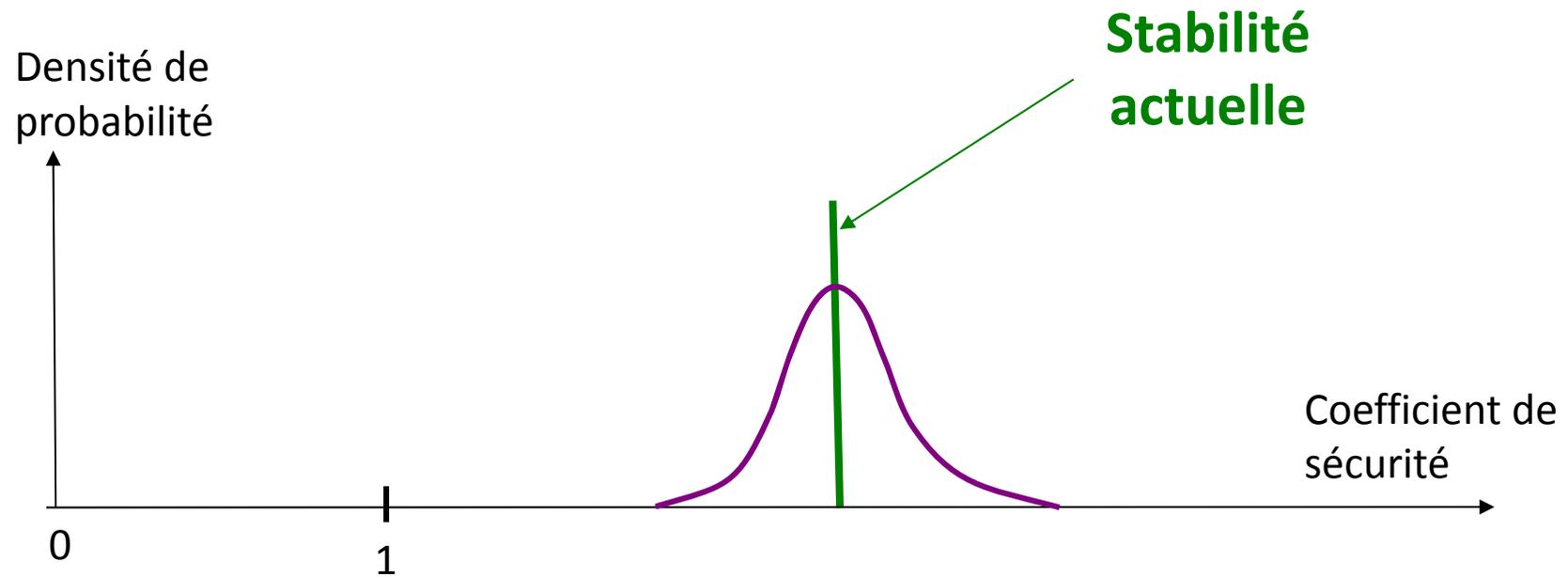
*Informations sur la structure  
à partir des fréquences propres mesurées  
(contrainte sur les modèles géomécaniques)*



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

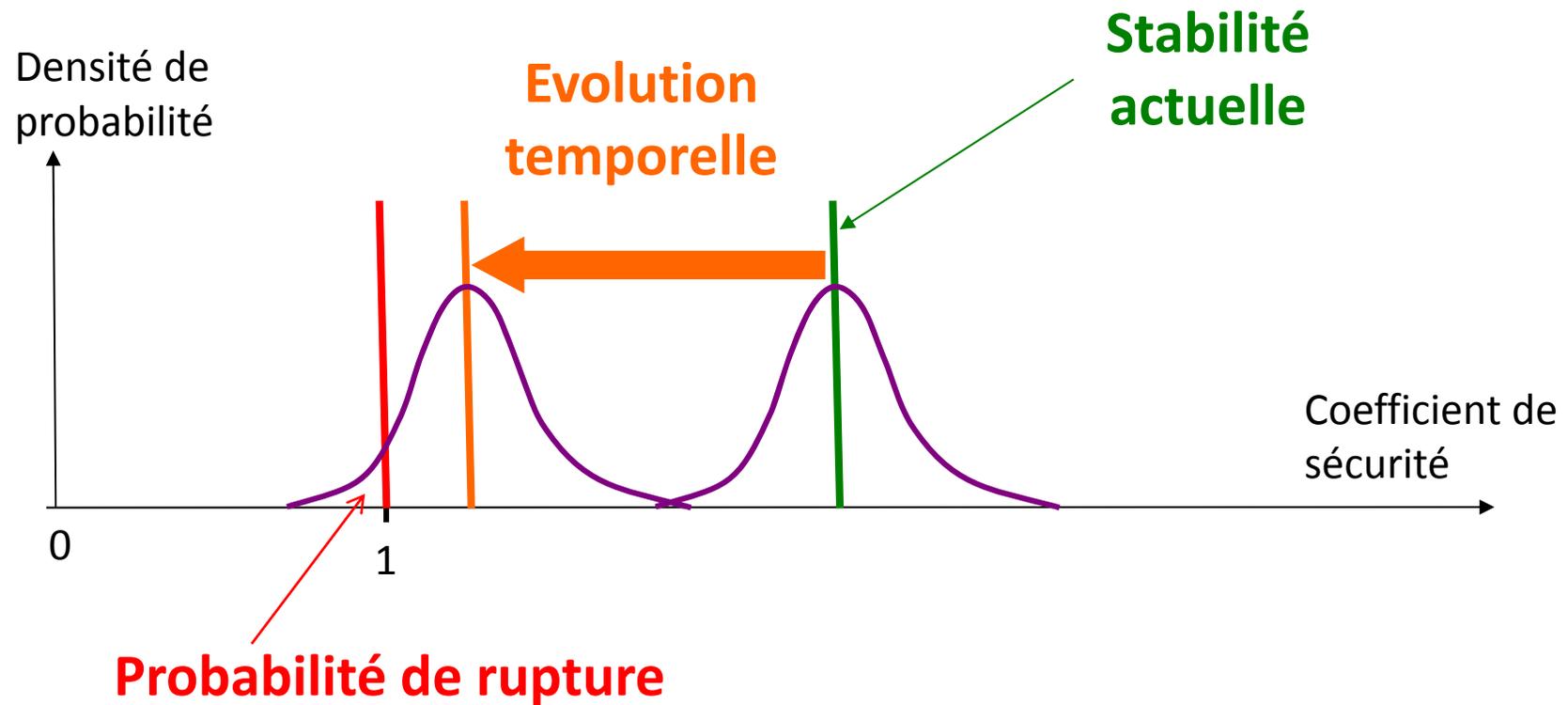
##### 3.1.1. Analyse de la stabilité actuelle



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

#### 3.1.2. Evolution de la stabilité



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

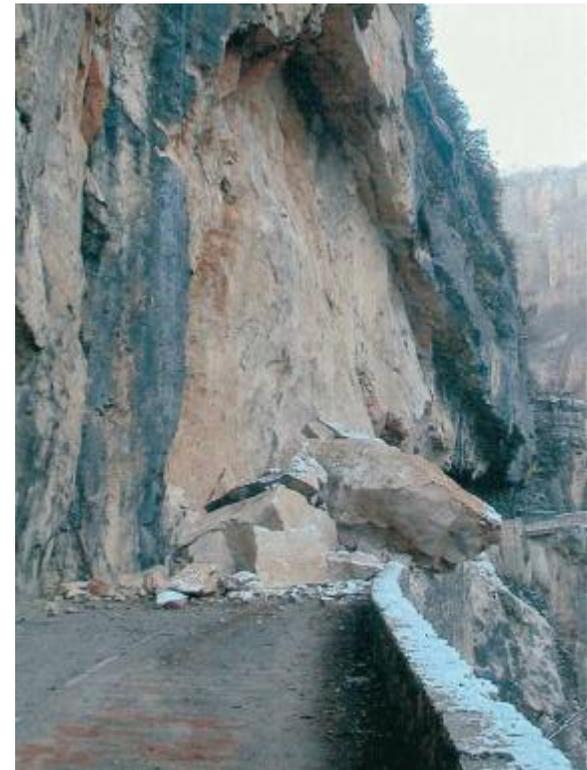
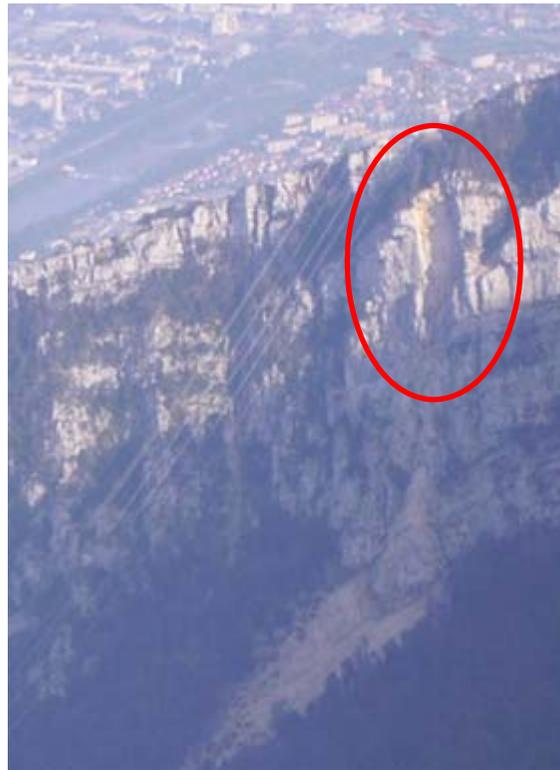
#### 3.1.2. Evolution de la stabilité

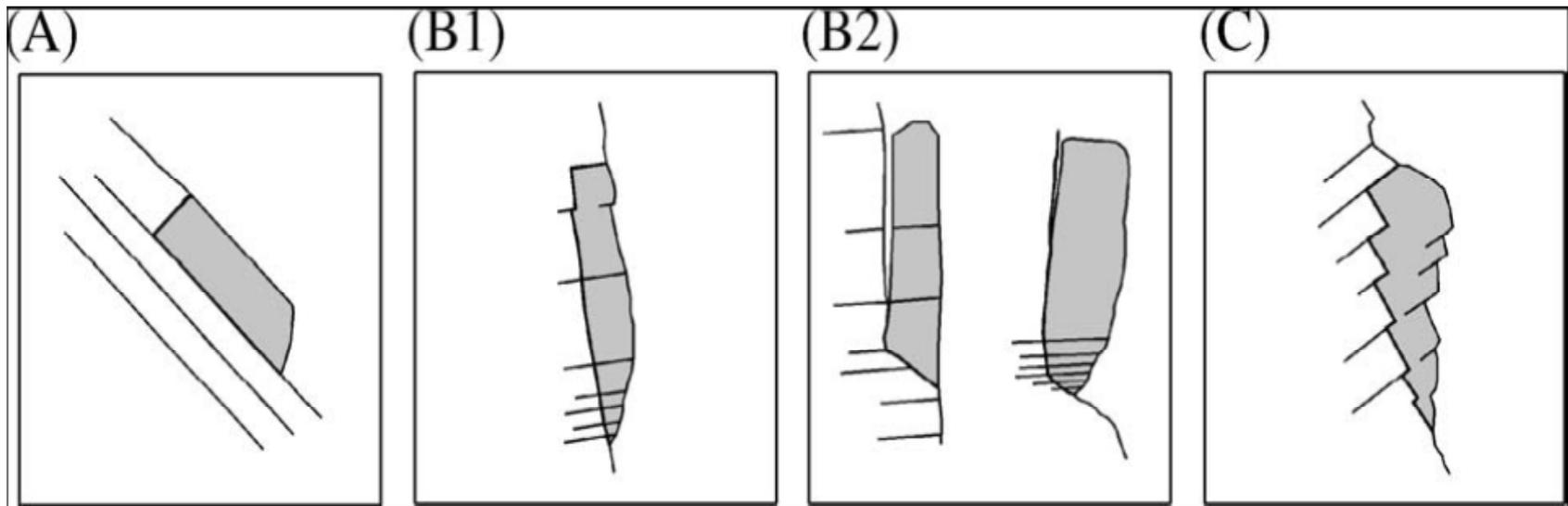
### Cas des éboulements rocheux : mécanismes et processus de rupture

Cas des falaises calcaires de Chartreuse et du Vercors :

Analyse de 25 éboulements (20 à 30000 m<sup>3</sup>)

(Frayssines et Hantz, 2006)

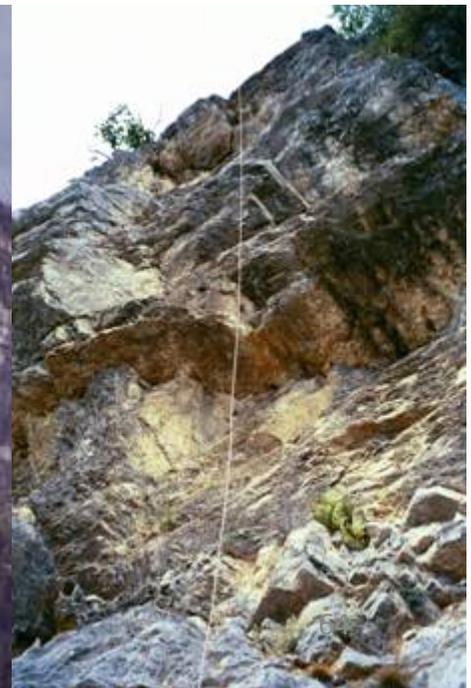
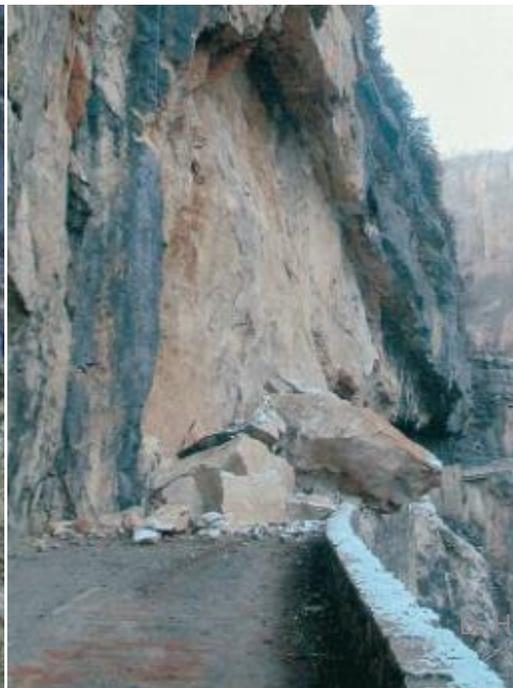




*Pente conforme  
aux strates*

*Pendage des strates < 30°*

*Pente opposée  
aux strates*



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

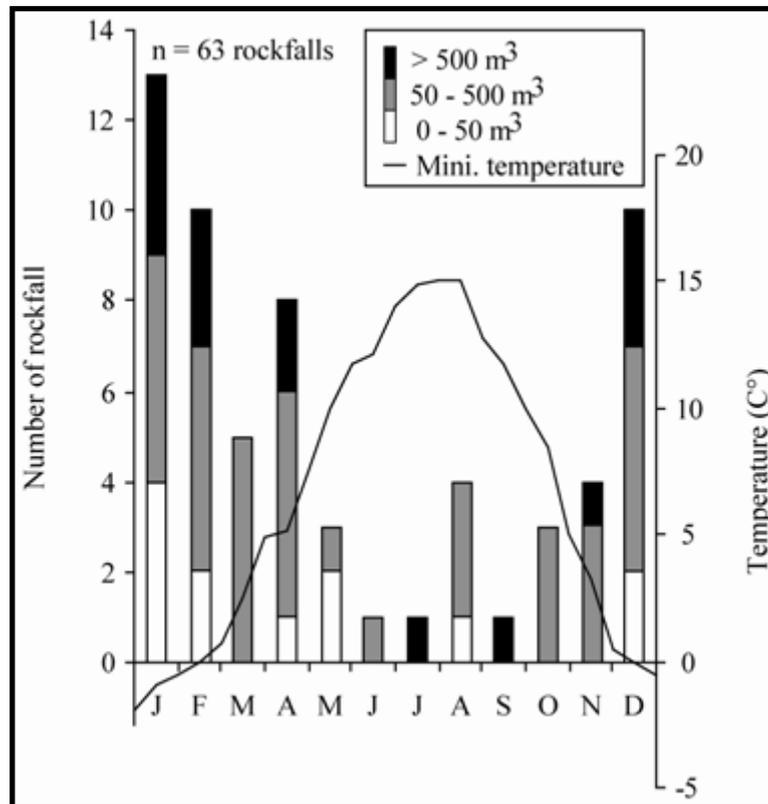
#### 3.1. Approche mécanique

##### 3.1.2. Evolution de la stabilité

### Cas des éboulements rocheux : mécanismes et processus de rupture

Recherche des facteurs déclenchants

(Frayssines et Hantz, 2006)



Conditions météo	Nombre de jours-éboulements	éboulements	Nombre d'éboulements par jour
<b>Gel-dégel</b>	164 852	23	<b>1,4x10<sup>-4</sup></b>
<b>Pas de gel-dégel</b>	403 616	23	<b>0,6x10<sup>-4</sup></b>
Total	568 468	46	<b>0,8x10<sup>-4</sup></b>

- Précipitations : pas de corrélation
- Séismes : pas de corrélation

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

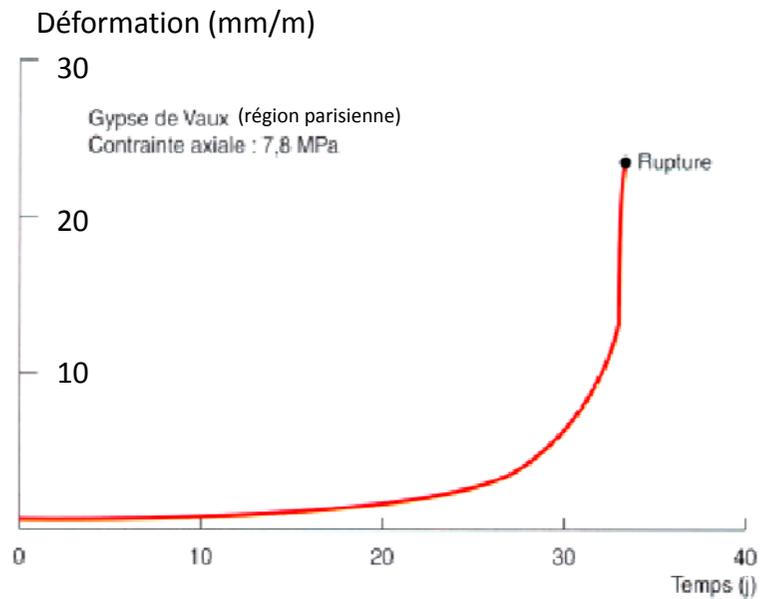
#### 3.1. Approche mécanique

##### 3.1.2. Evolution de la stabilité

#### Cas des éboulements rocheux : mécanismes et processus de rupture

##### Rupture par propagation de la micro-fissuration

**Essai de fluage** : consiste à maintenir une charge constante sur un échantillon jusqu'à sa rupture éventuelle.



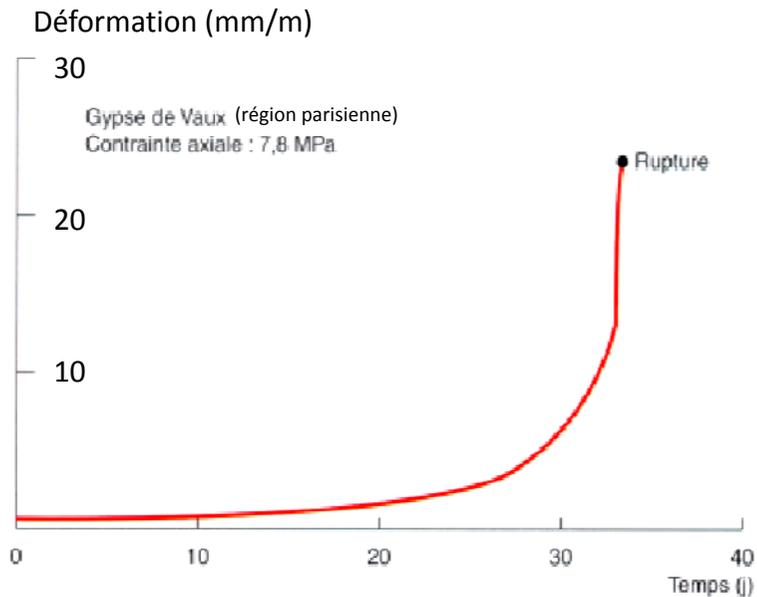
### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

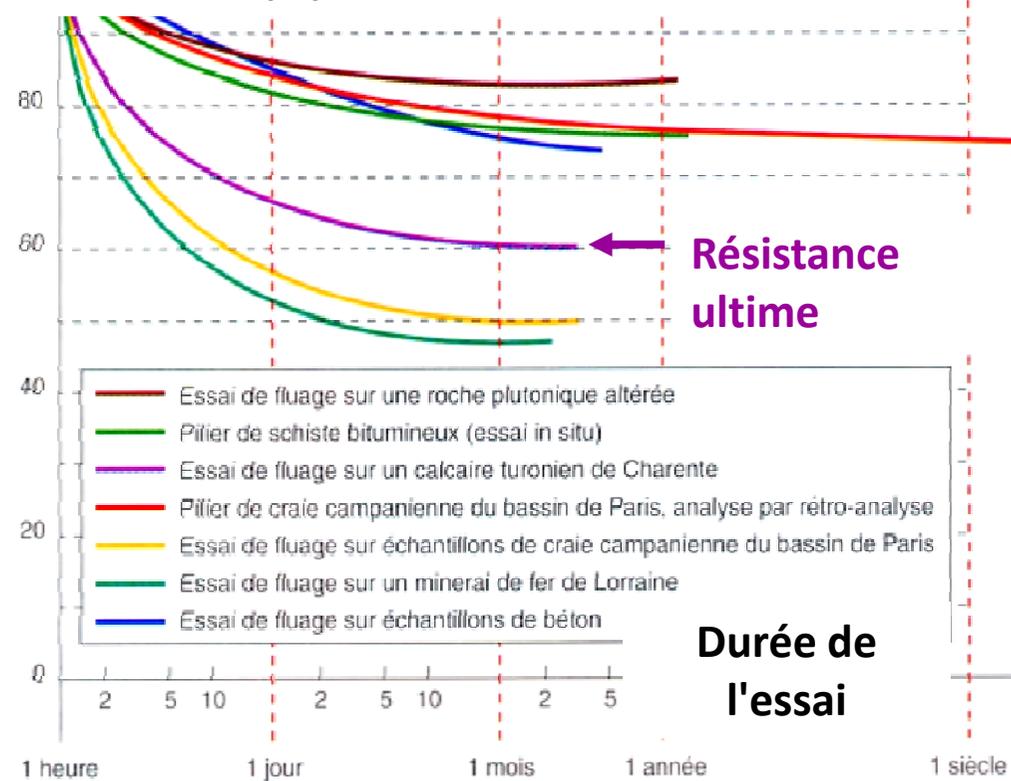
##### 3.1.2. Evolution de la stabilité

### Cas des éboulements rocheux : mécanismes et processus de rupture Rupture par propagation de la micro-fissuration

**Essai de fluage** : consiste à maintenir une charge constante sur un échantillon jusqu'à sa rupture éventuelle.



### Résistance à terme / Résistance instantanée (%)



(figures extraites de Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines, INERIS, LCPC)

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

##### 3.1.2. Evolution de la stabilité

#### Cas des éboulements rocheux : mécanismes et processus de rupture

#### Modèle de Shaw

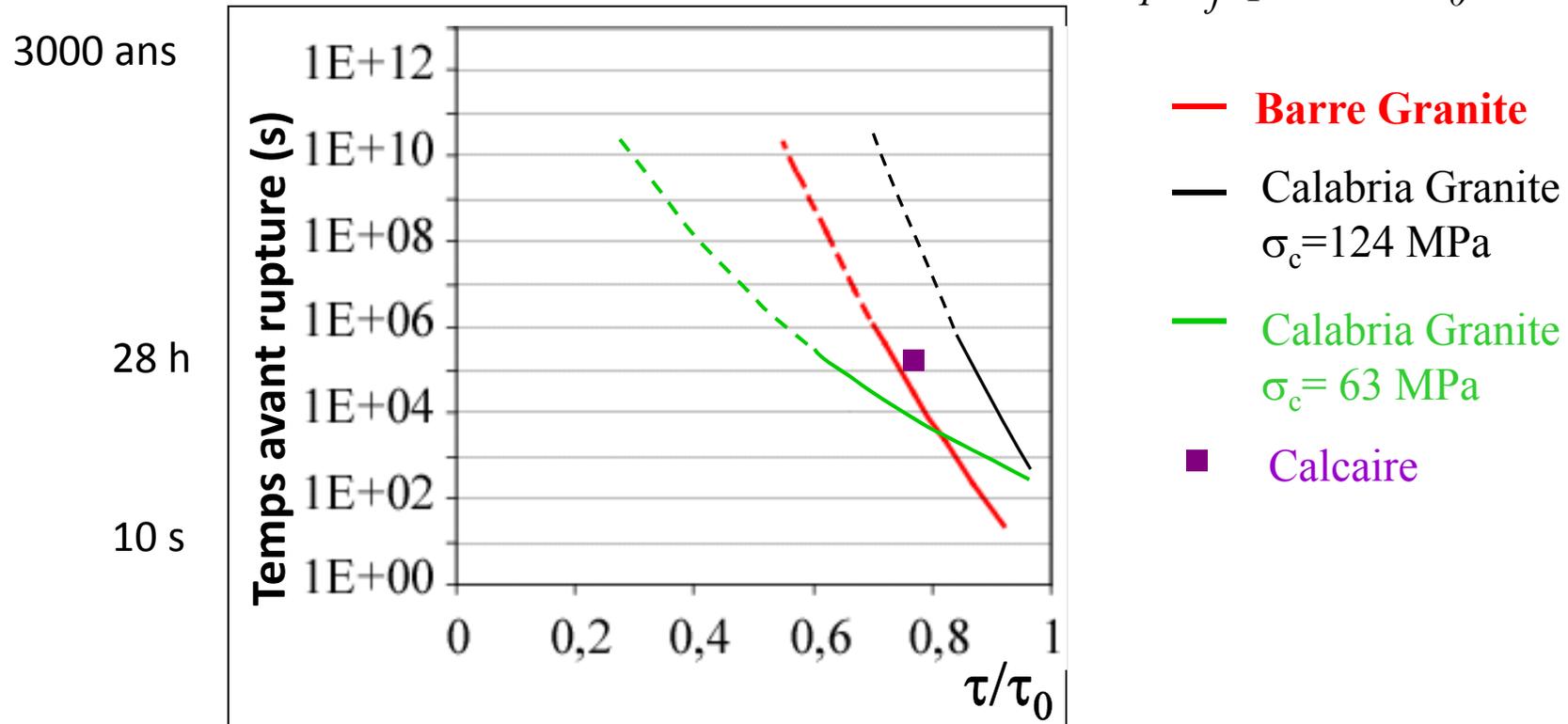
Temps avant rupture :

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

$\tau$  : contrainte appliquée

$\tau_0$  : résistance à court terme

$t_1$  :  $t_f$  pour  $\tau = \tau_0$



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

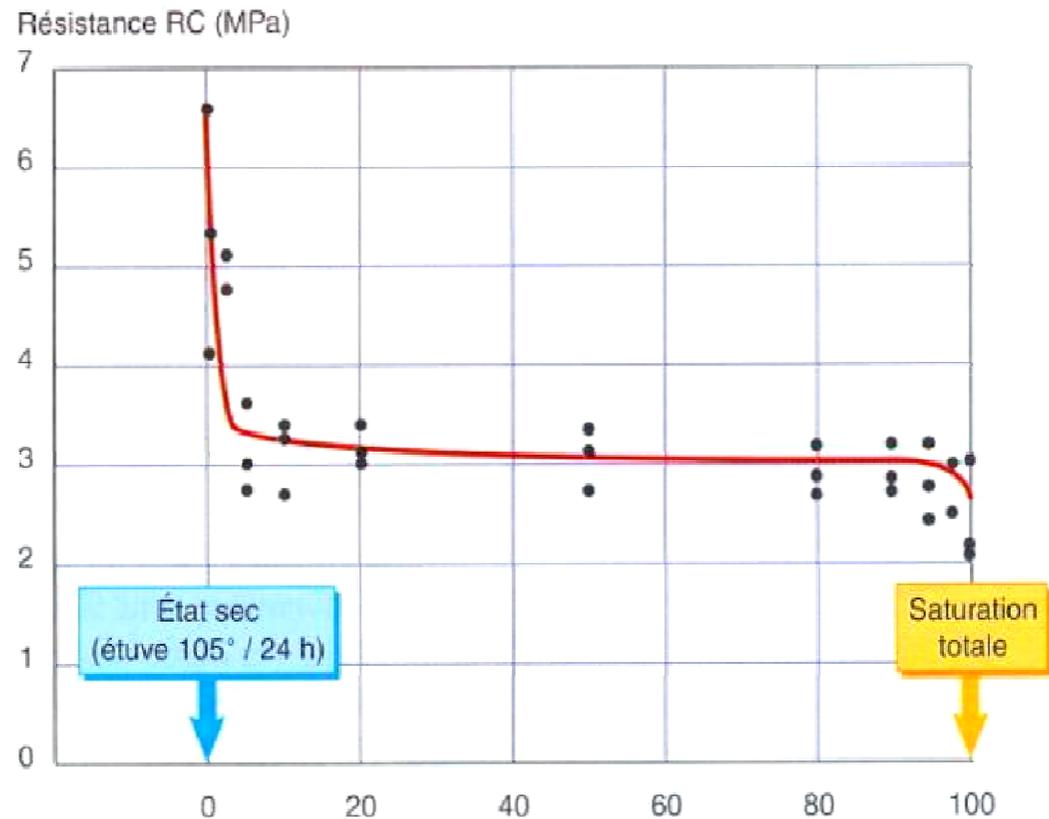
#### 3.1. Approche mécanique

##### 3.1.2. Evolution de la stabilité

### Cas des éboulements rocheux : mécanismes et processus de rupture

La résistance peut également être diminuée par :

- le gel
- une augmentation de la teneur en eau (figure ci-contre);
- l'altération ou la dissolution de la roche ;
- des sollicitations mécaniques répétées (fatigue).



Résistance en fonction du degré de saturation en eau

de la **craie** campanienne de Meudon

(figure extraite de *Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines*, INERIS, LCPC)

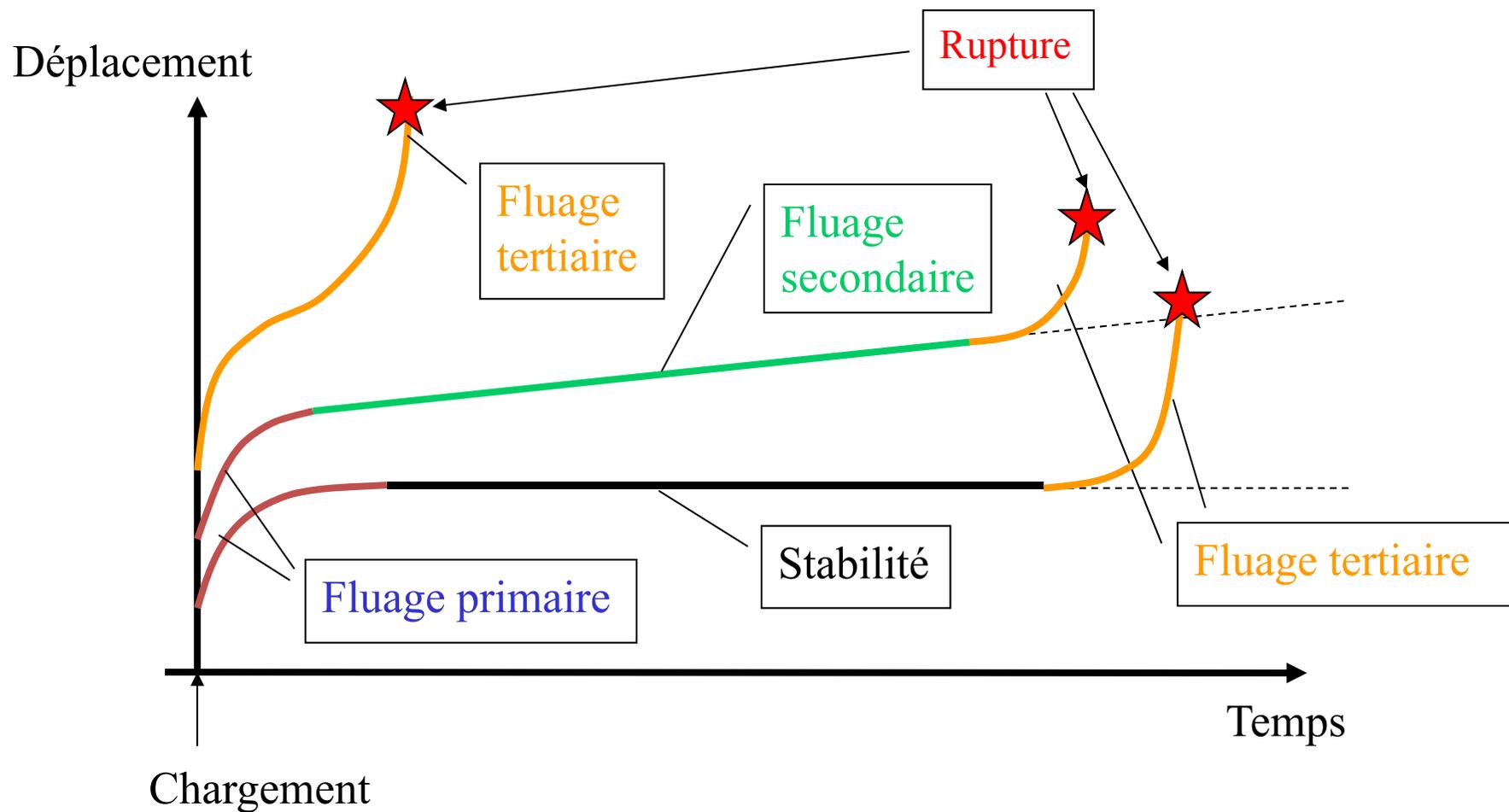
D. Hantz

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

#### 3.1.3. Prédiction de la rupture à court terme

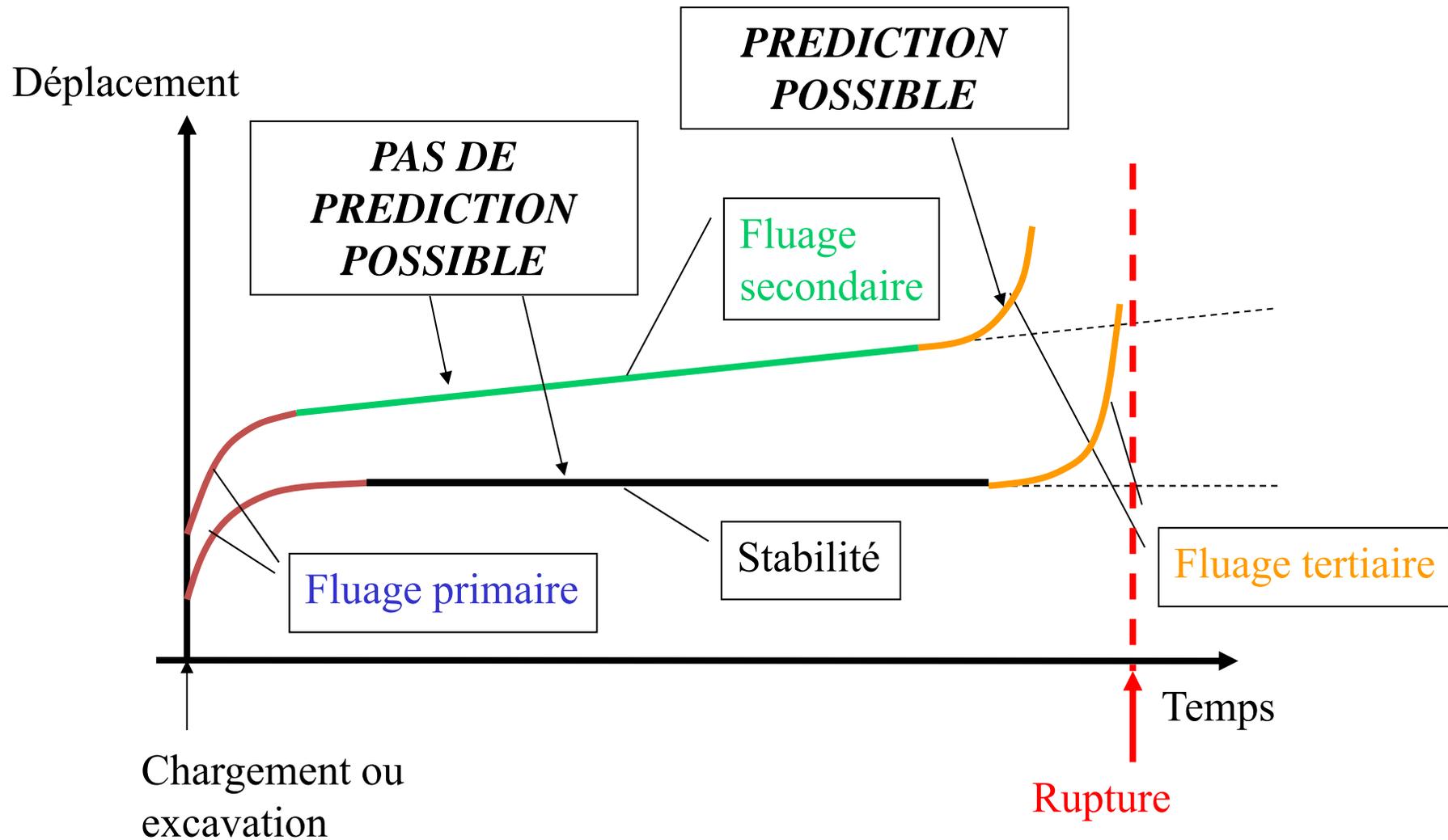
### Comportement rhéologique des roches



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

#### 3.1.3. Prédiction de la rupture à court terme



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

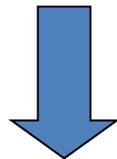
#### 3.1. Approche mécanique

##### 3.1.3. Prédiction de la rupture à court terme

Evaluation de la probabilité de rupture, à l'échelle du siècle, d'une pente actuellement stable ou en fluage secondaire

$$F \geq 1$$

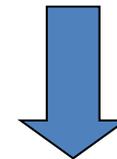
Grosse incertitude sur la valeur réelle de  $F$  et sur son évolution



Evaluation qualitative

Evaluation de la probabilité de rupture d'une pente en mouvement

$F$  proche de 1



Modèle de fluage tertiaire

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

##### 3.1.3. Prédiction de la rupture à court terme

#### **Modèles empiriques de fluage tertiaire**

*Objectif : prévoir le moment de la rupture  $t_r$  à partir de la vitesse mesurée  $V$  et de son évolution*

Modèle de Saito (1969)

$$t_r - t \approx \frac{1}{V}$$

*La rupture se produit ( $t = t_r$ )  
lorsque la vitesse tend vers l'infini*

Modèle de Yamaguchi (1978)

$$t_r - t \approx \frac{1}{V^b}$$

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

#### 3.1.3. Prévion de la rupture à court terme

Exemple de prévision réussie : glissement du CD 926 (vallée de l'Arvan, Savoie)

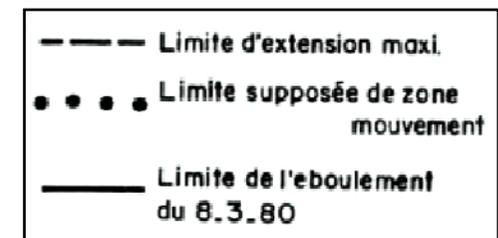
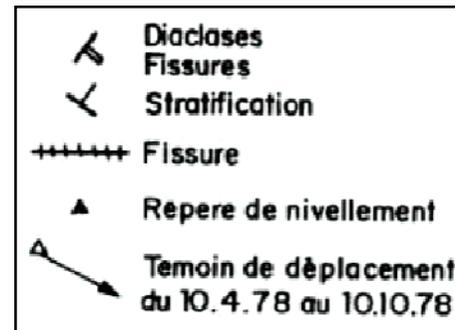
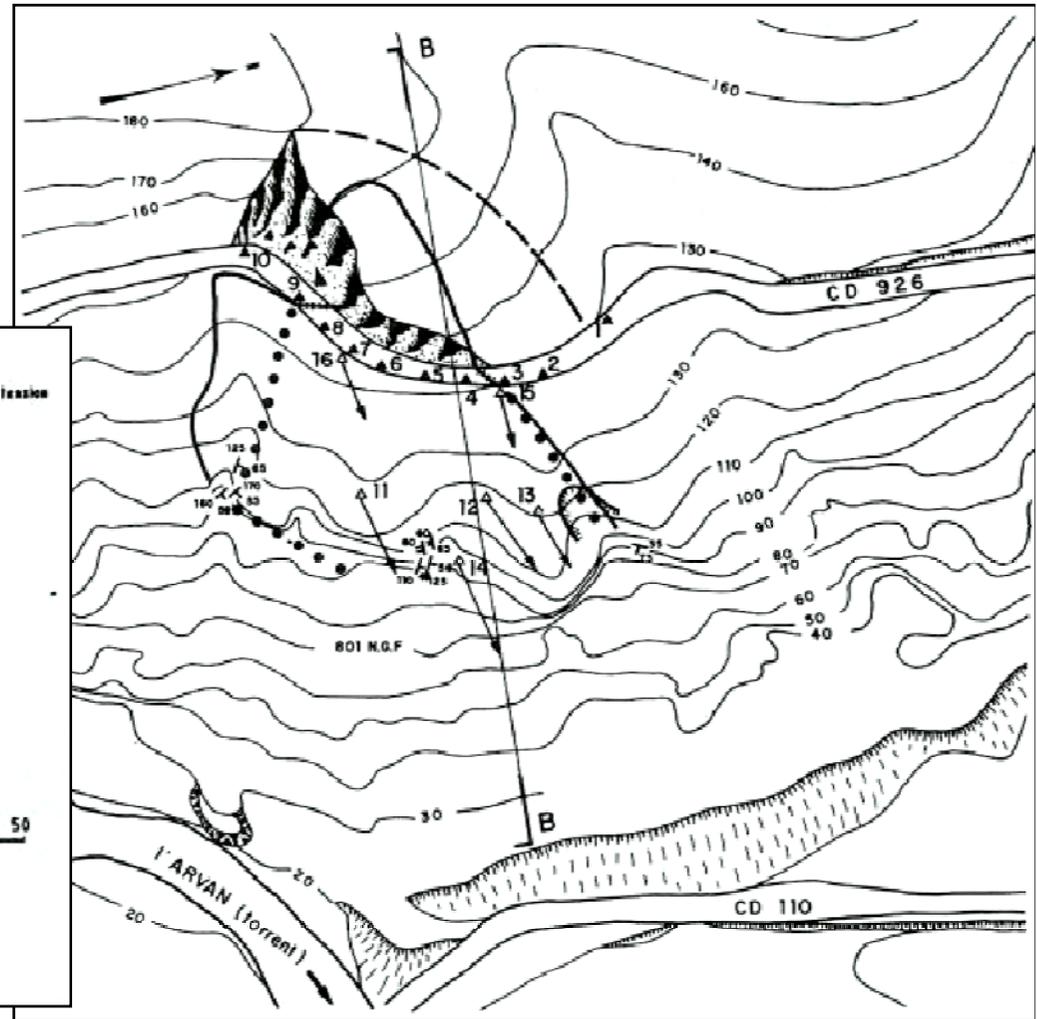
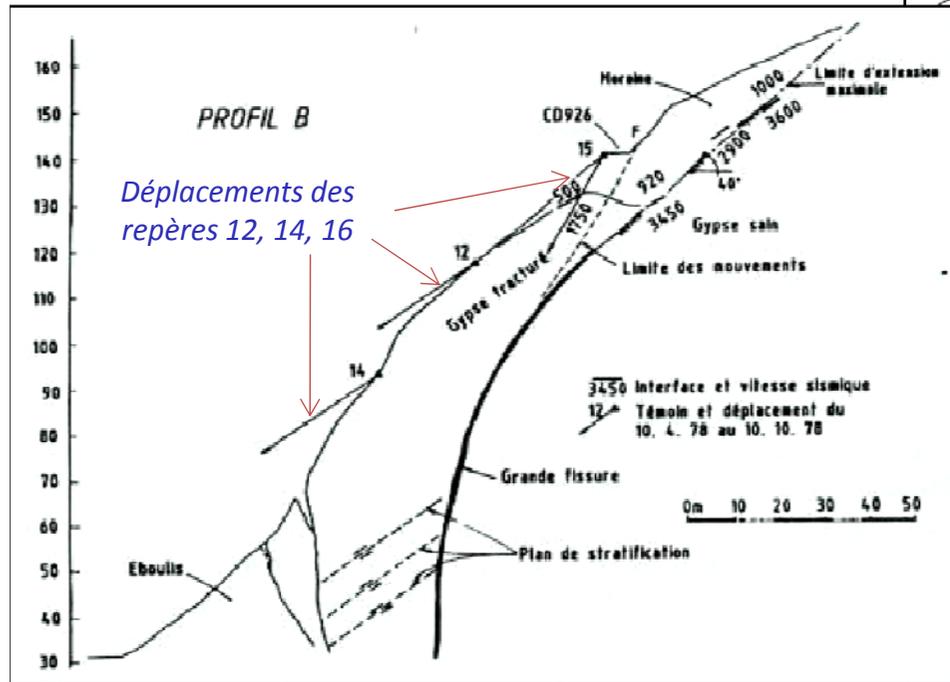


Carrière souterraine de gypse

Photo 1989-01-17

### 3.1.3. Prévision de la rupture à court terme

**Exemple de prévision réussie :  
glissement du CD 926  
(vallée de l'Arvan, Savoie)**

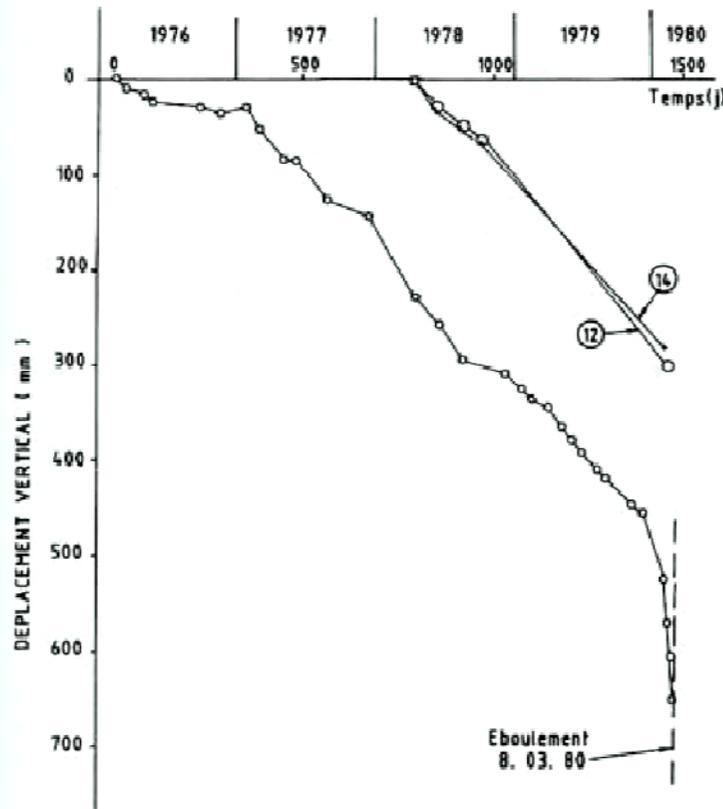


### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

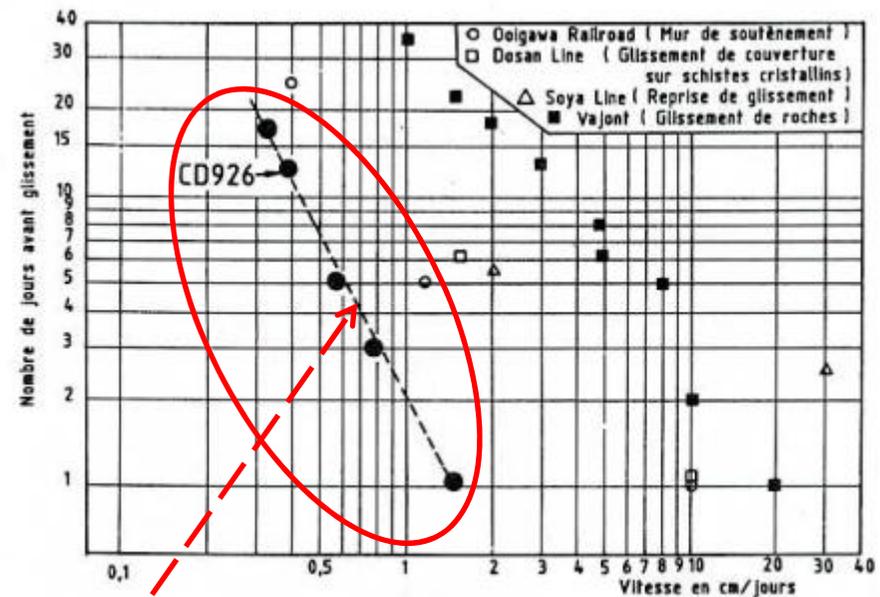
#### 3.1. Approche mécanique

#### 3.1.3. Prédiction de la rupture à court terme

### Exemple de prédiction réussie : glissement du CD 926 (vallée de l'Arvan, Savoie)



$$t_r - t = a / V$$



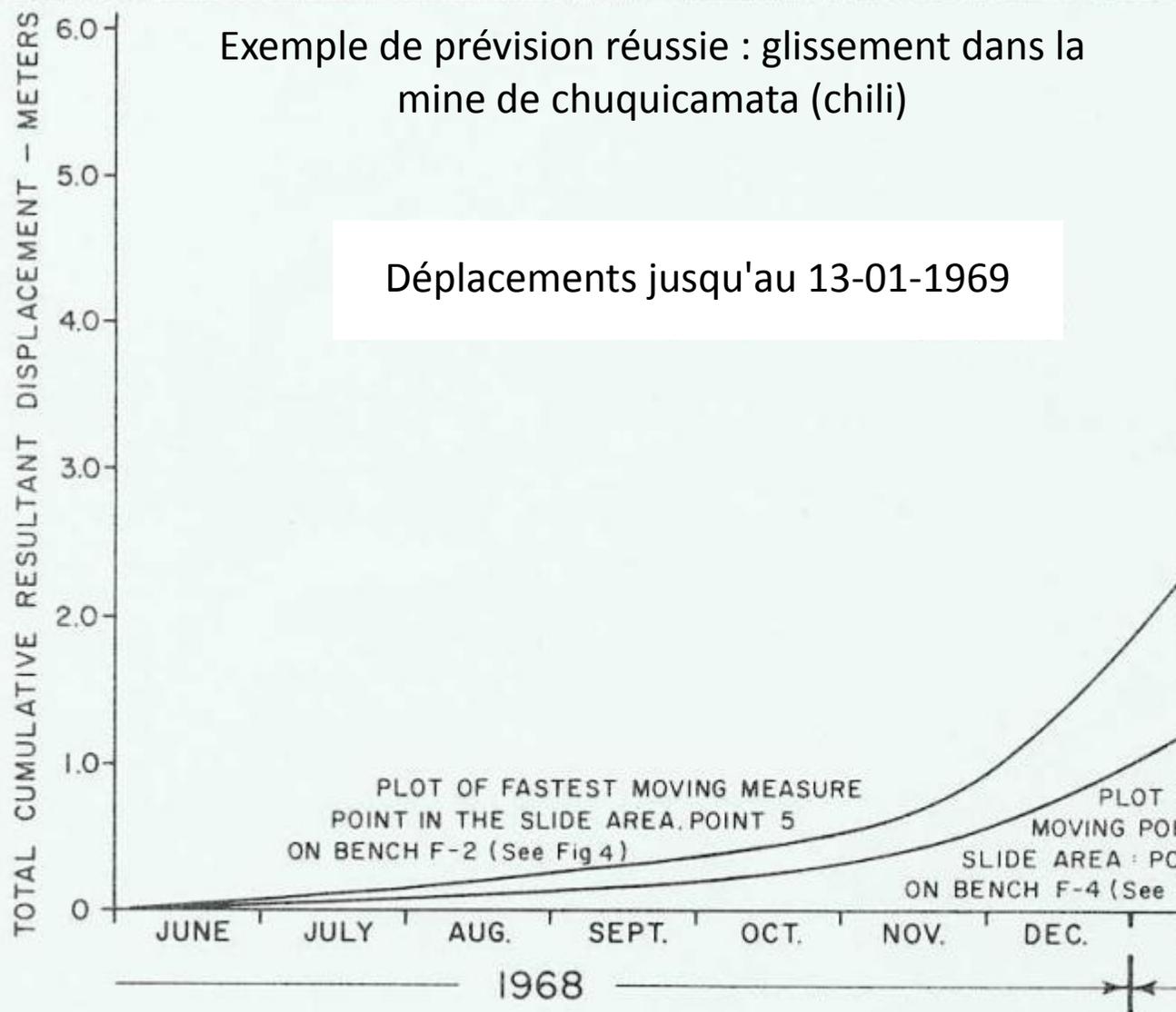
$$\log (t_r - t) = \log a - b \log V$$

*a et b sont déterminés par régression linéaire*

### 3.1.3. Prévision de la rupture à court terme

Exemple de prévision réussie : glissement dans la mine de chuquicamata (chili)

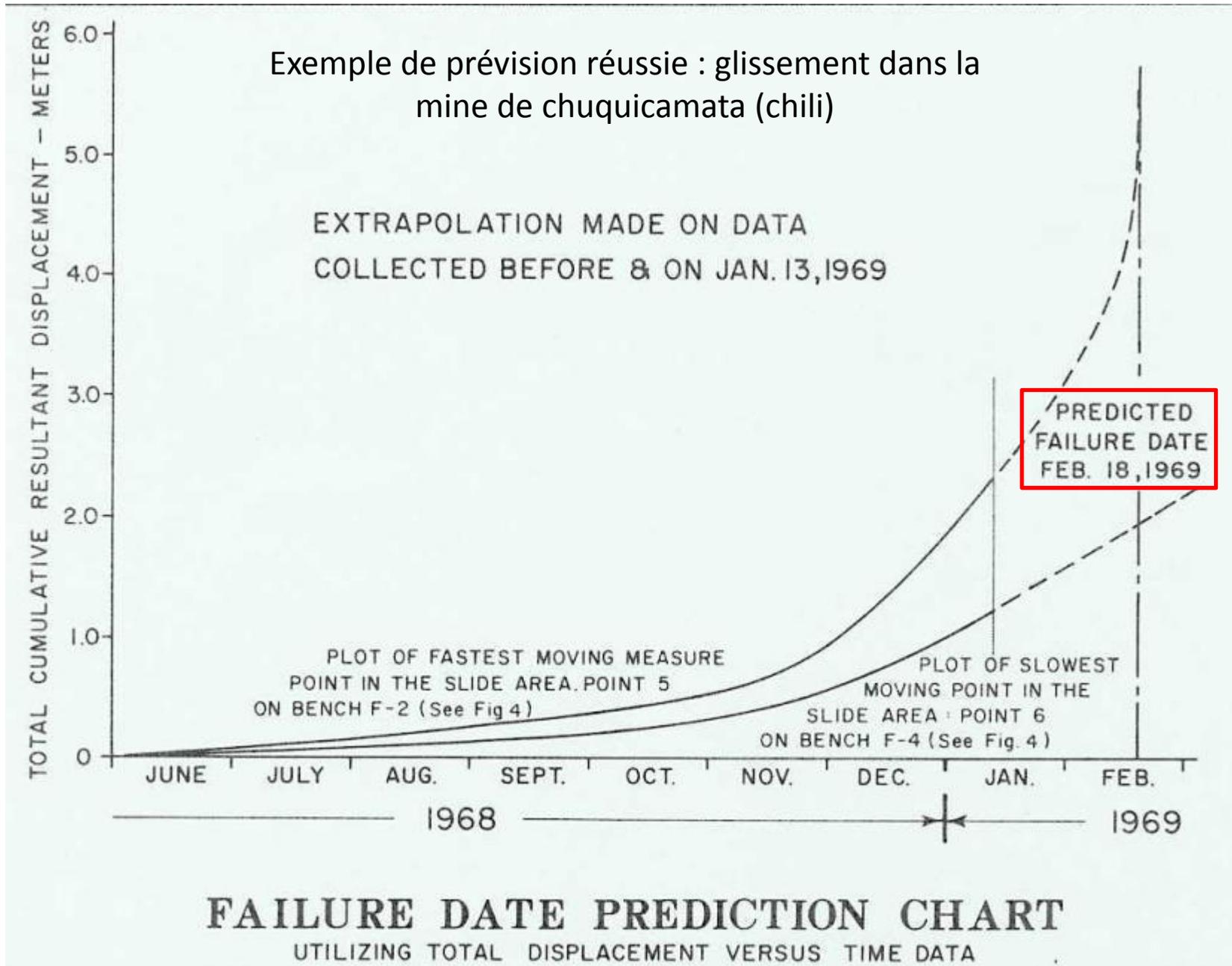
Déplacements jusqu'au 13-01-1969



**FAILURE DATE PREDICTION CHART**  
UTILIZING TOTAL DISPLACEMENT VERSUS TIME DATA

### 3.1.3. Prévision de la rupture à court terme

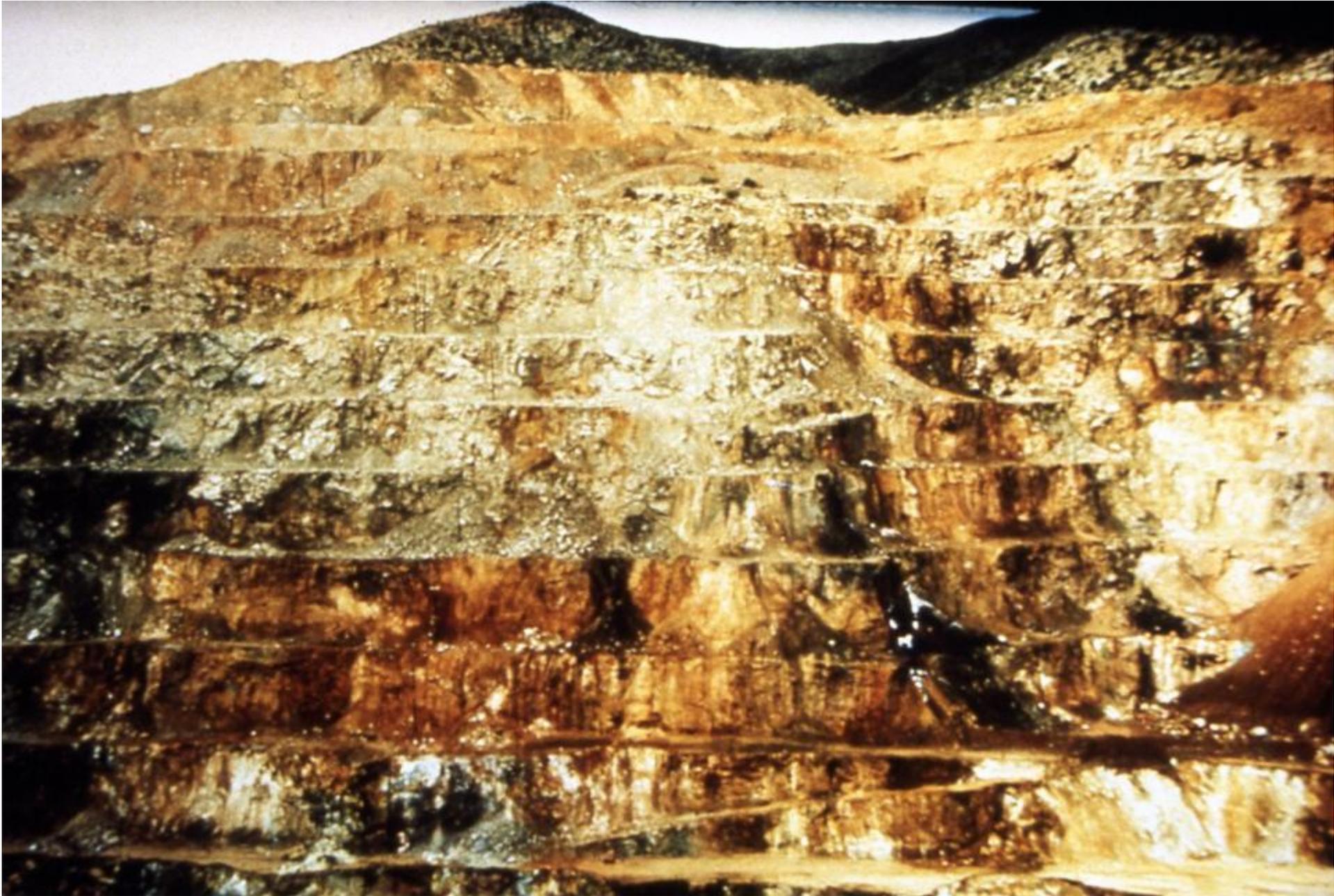
Exemple de prévision réussie : glissement dans la mine de chuquicamata (chili)





**Hauteur : 250 m**

**Pente moyenne : 43°**



18-02-1969



18-02-1969



18-02-1969



18-02-1969



18-02-1969



18-02-1969



18-02-1969







### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

##### 3.1.3. Préviation de la rupture à court terme

### Conclusion

- Il existe quelques exemples de prévision réussie quelques jours ou quelques semaines à l'avance, par extrapolation de la courbe de fluage tertiaire
- Mais aussi des prévisions qui ont échouées (car la vitesse peut varier également durant un fluage secondaire, si les contraintes effectives varient)
- Ce type de prévision est de nature probabiliste ("la probabilité que la rupture se produise dans le délai considéré est élevée, moyenne, faible, ...")
- Il n'existe aucune méthode quantitative éprouvée pour la prévision à long terme (c'est à dire avant le début du fluage tertiaire). La prévision repose sur le jugement de l'expert.
- La probabilité d'occurrence à long terme peut être estimée quantitativement pour les séismes et les inondations, grâce aux bases de données historiques.

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

#### 3.1.4. Modélisation de la propagation

### **Propagation des mouvements de terrain**

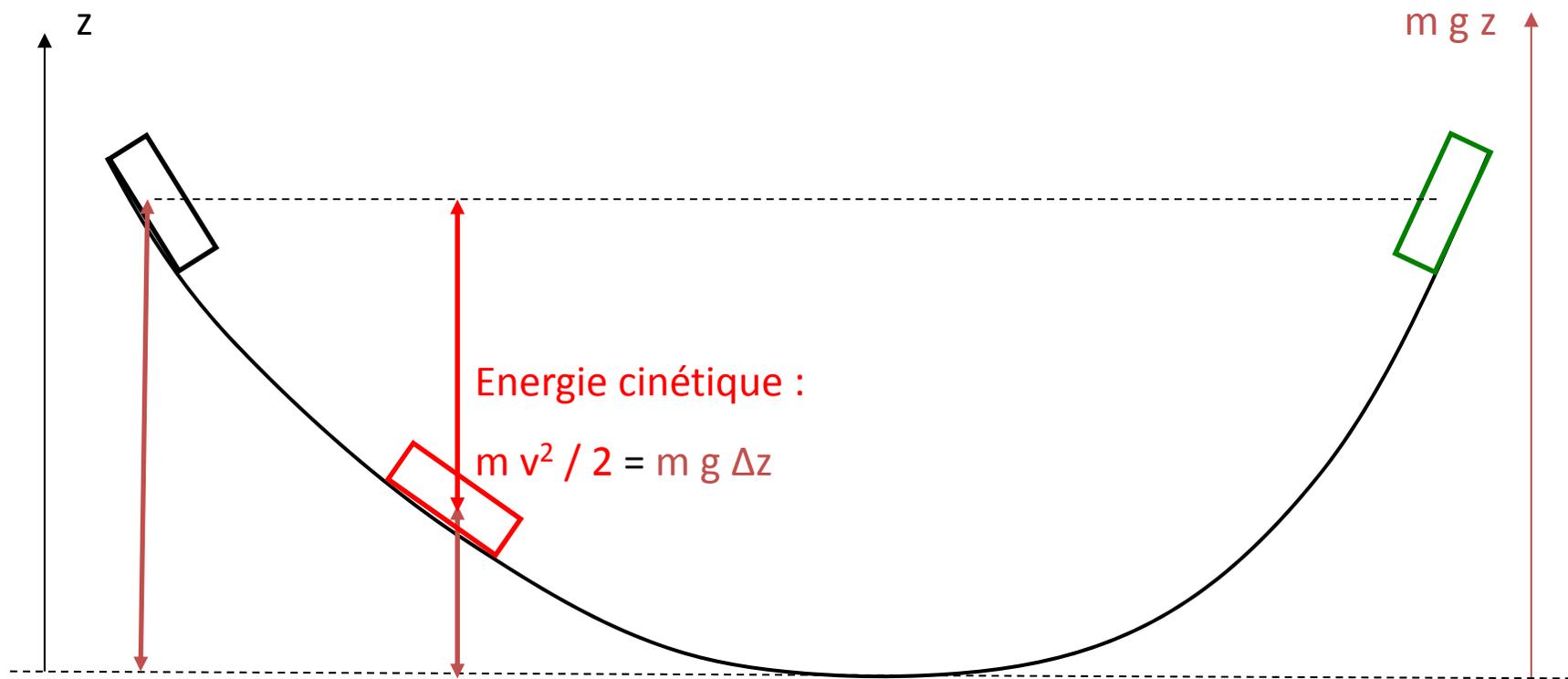
- Glissements
- Chutes de blocs indépendants
- Eboulements en masse

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.1. Approche mécanique

#### 3.1.4. Modélisation de la propagation

#### GLISSEMENT SANS FROTTEMENT



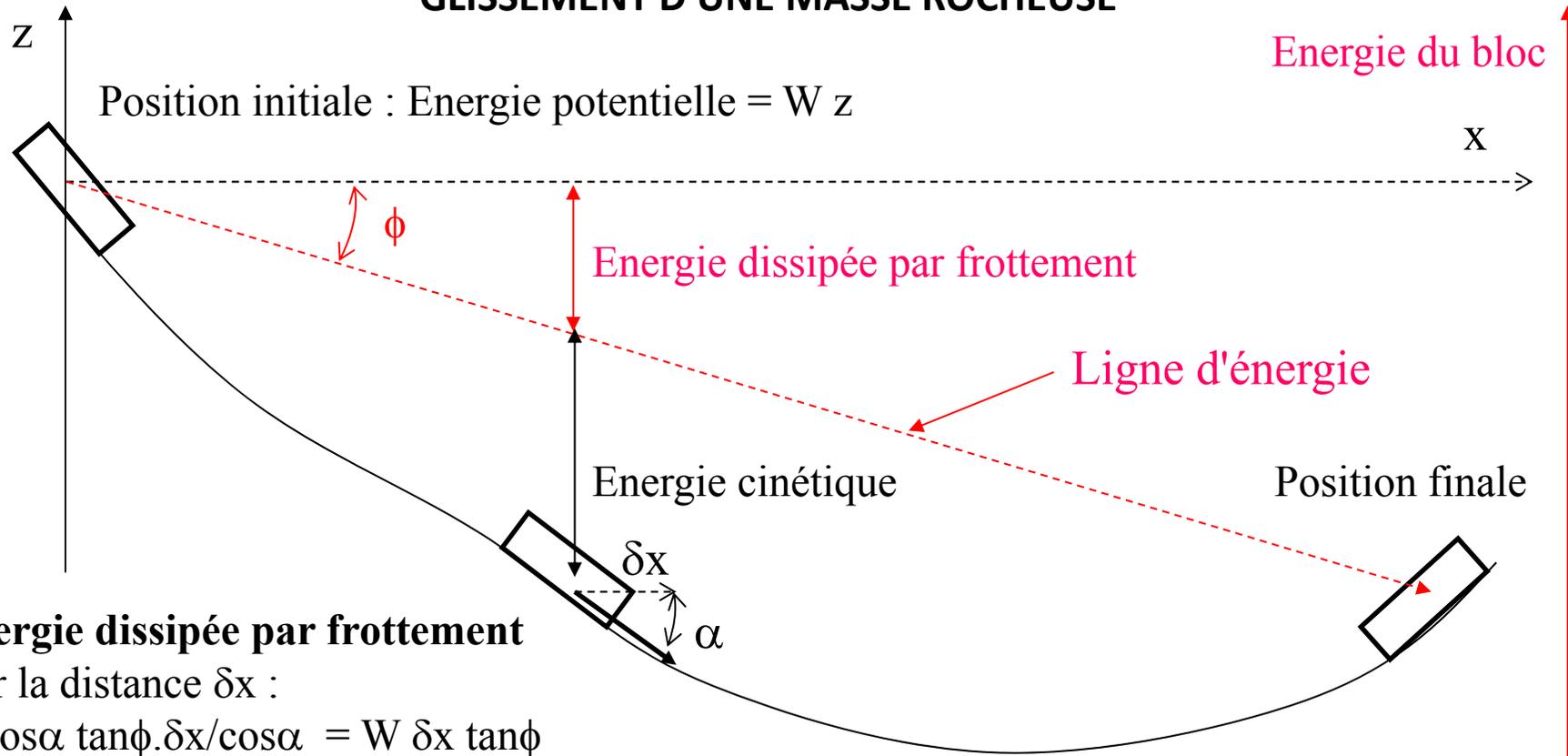
Energie potentielle :

$m g z$

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Propagation des mouvements de terrain

#### GLISSEMENT D'UNE MASSE ROCHEUSE



#### Energie dissipée par frottement

-sur la distance  $\delta x$  :

$$W \cos \alpha \tan \phi \cdot \delta x / \cos \alpha = W \delta x \tan \phi$$

-depuis le départ :  $W x \tan \phi$

#### Perte d'énergie potentielle

depuis le départ :  $W \Delta z$

Position finale ( $v=0$ ) :  $W x \tan \phi = W \Delta z$

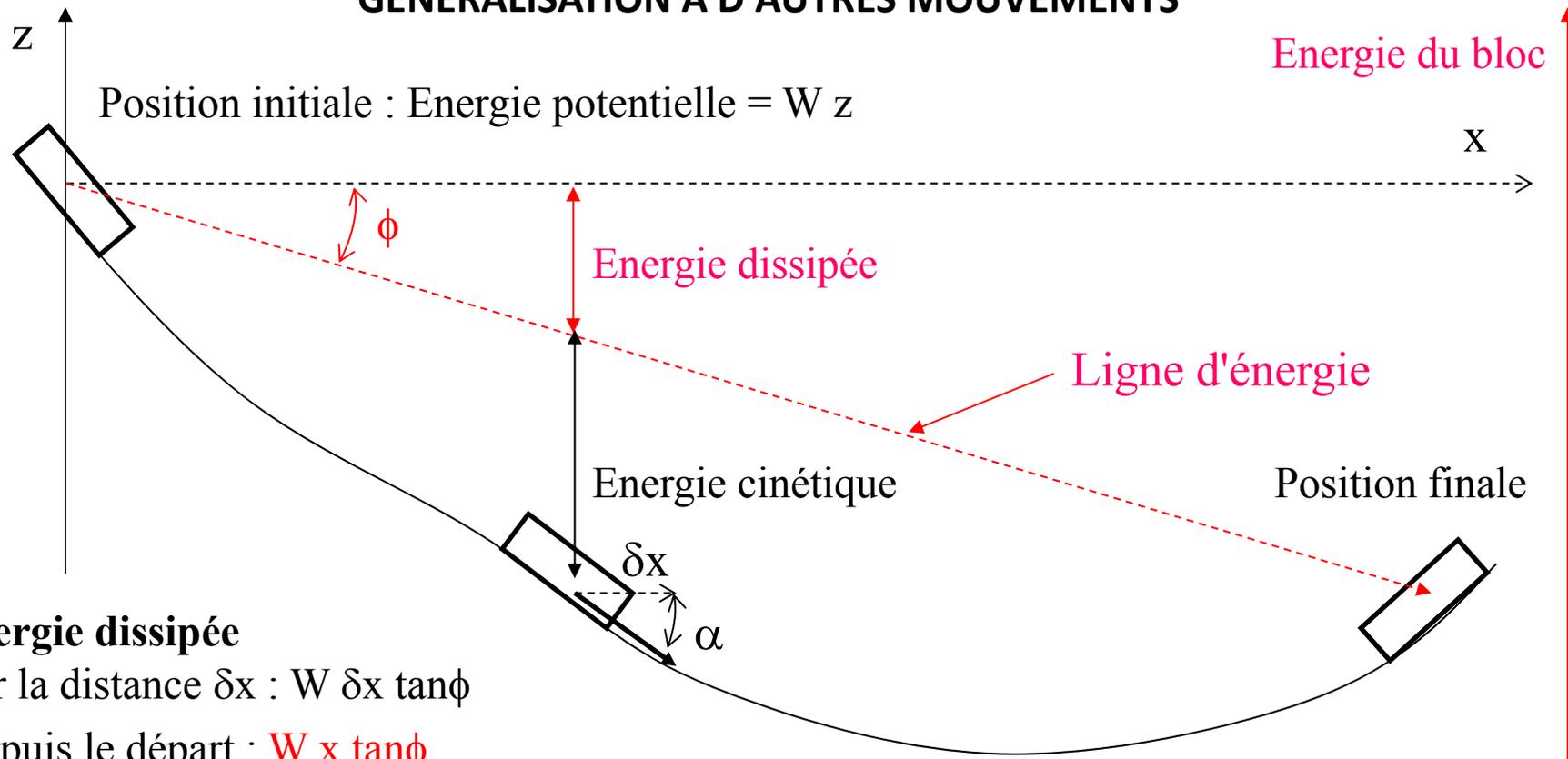
D'où :  $\Delta z / x = \tan \phi$

$\phi$  est l'angle de propagation du glissement

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Propagation des mouvements de terrain

#### GENERALISATION A D'AUTRES MOUVEMENTS



#### Energie dissipée

-sur la distance  $\delta x$  :  $W \delta x \tan \phi$

-depuis le départ :  $W x \tan \phi$

#### Perte d'énergie potentielle

depuis le départ :  $W \Delta z$

Position finale ( $v=0$ ) :  $W x \tan \phi = W \Delta z$

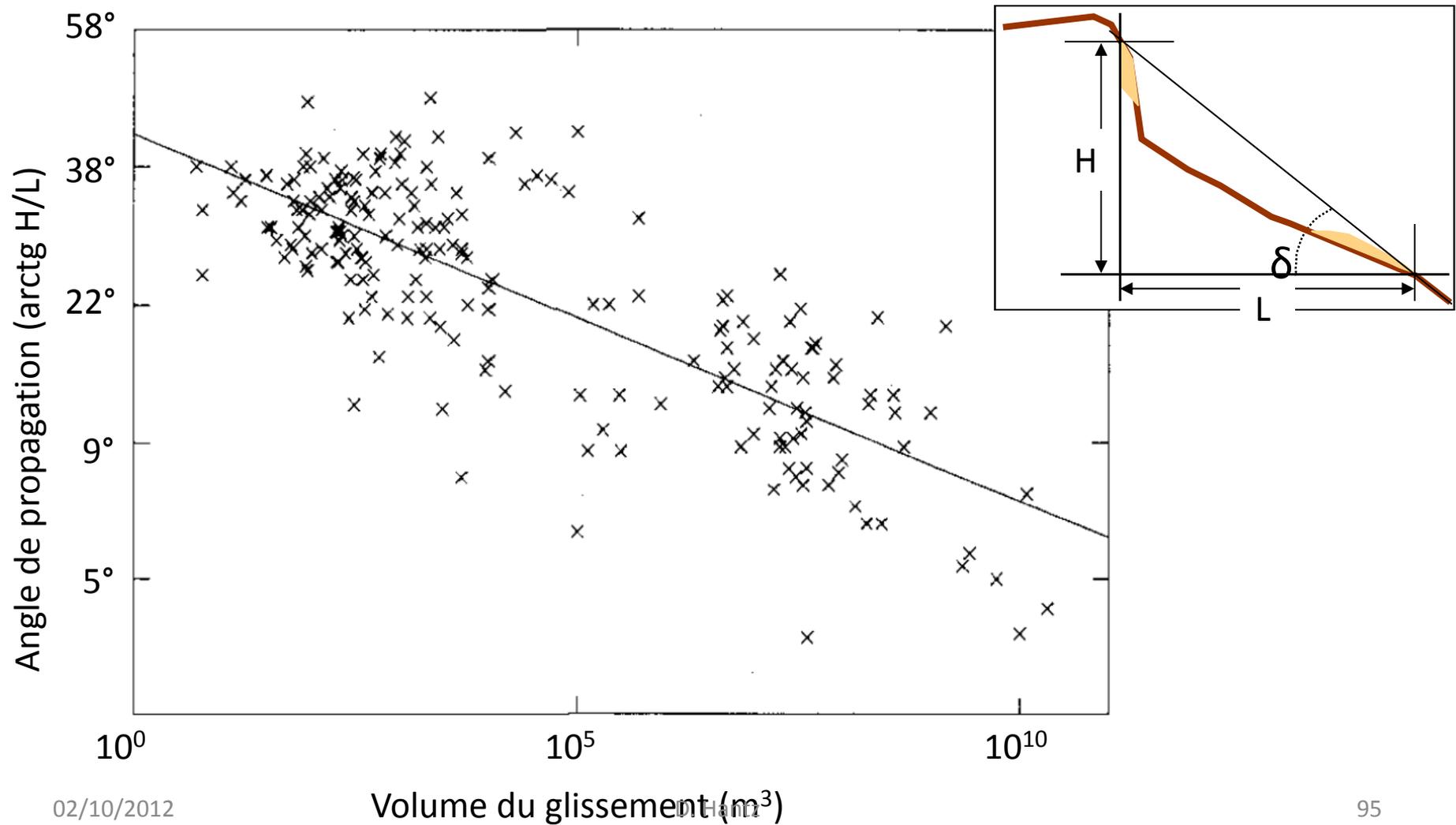
D'où :  $\Delta z / x = \tan \phi$

$\phi$  est l'angle de propagation du mouvement

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Propagation des mouvements de terrain

Angles de propagation observés pour 204 glissements, éboulements et coulées  
(d'après Corominas, 1996, Can. Geotech. J. 33: 260-271)

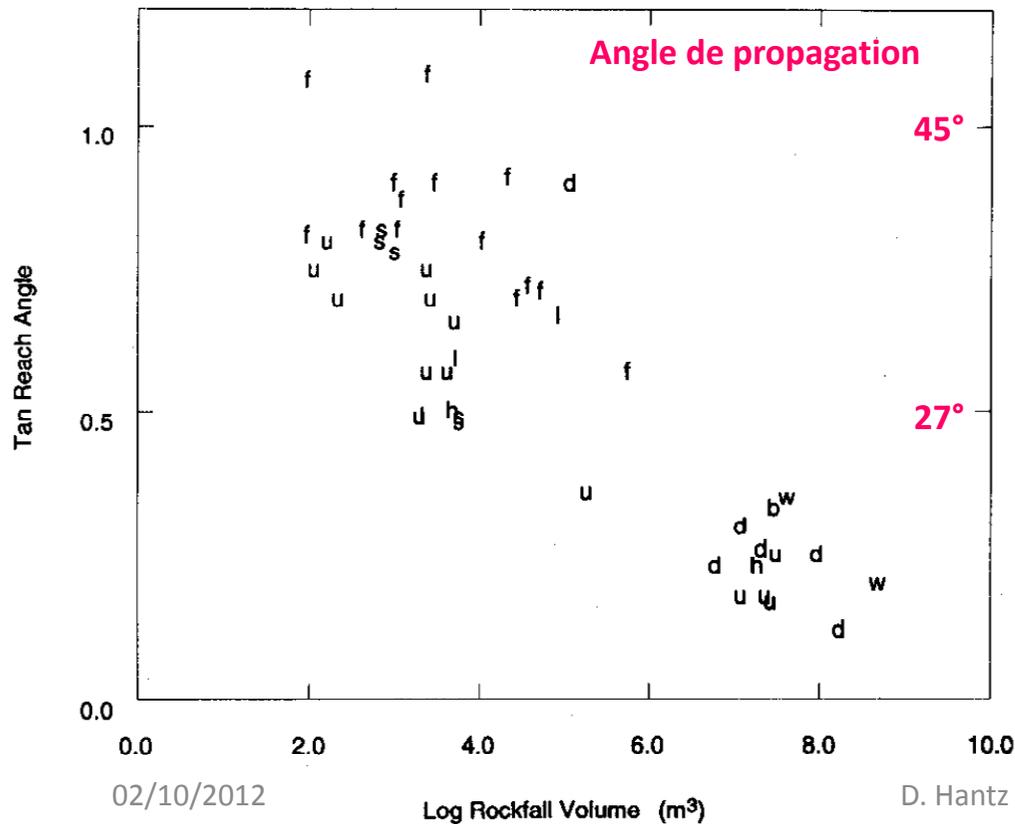


## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

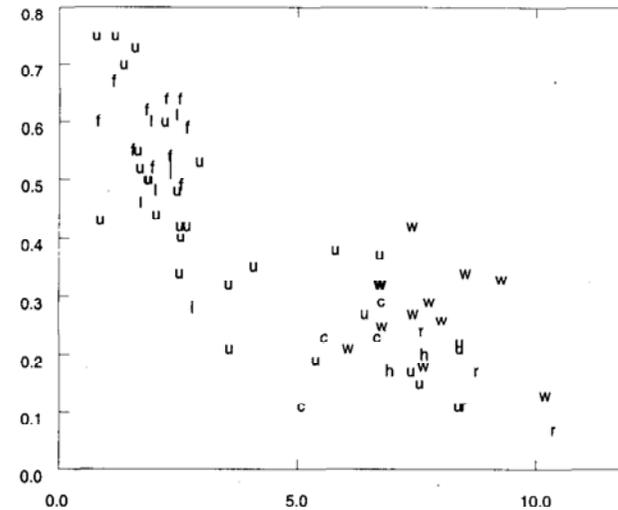
### Propagation des mouvements de terrain

Angles de propagation observés pour 47 éboulements et 69 glissements translationnels  
(d'après Corominas, 1996, Can. Geotech. J. 33: 260-271)

**Fig. 3.** Plot of rockfall and rockfall avalanche volume versus tangent of the reach angle for 47 events. Labels correspond to obstacles and topographic constraints of the path: f, dense forest; l, open forest; s, scree deposit; b, bends; d, deflections; h, channeling; w, opposing wall; u, unobstructed.



**Fig. 5.** Plot of translational slide volume versus tangent of the reach angle for 69 events. Labels correspond to obstacles and topographic constraints of the path: f, dense forest; l, open forest; c, confined; h, channeling; r, run-up over a gentle slope; w, opposing wall; u, unobstructed.



## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Propagation des mouvements de terrain

#### **MODELES MECANQUES D'EBOULEMENTS EN MASSE**

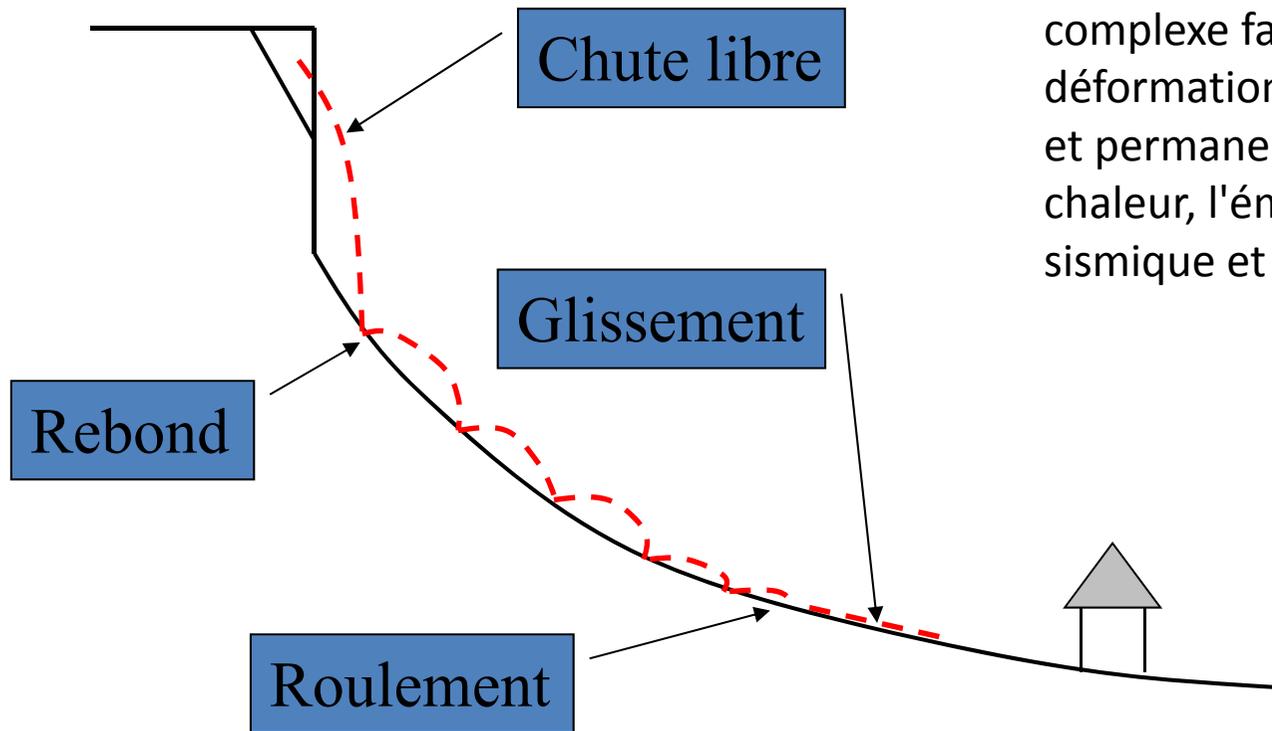
Deux types de modèle :

- Modèles d'éléments discrets (les blocs et leurs interactions sont modélisés directement)
- Modèles continus équivalents (l'éboulement est représenté par un fluide qui s'écoule sur la pente)

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Propagation des mouvements de terrain

#### CHUTE D'UN BLOC ROCHEUX



Le rebond est un phénomène complexe faisant intervenir des déformations du terrain (élastiques et permanentes), un dégagement de chaleur, l'émission d'énergie sismique et sonore

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

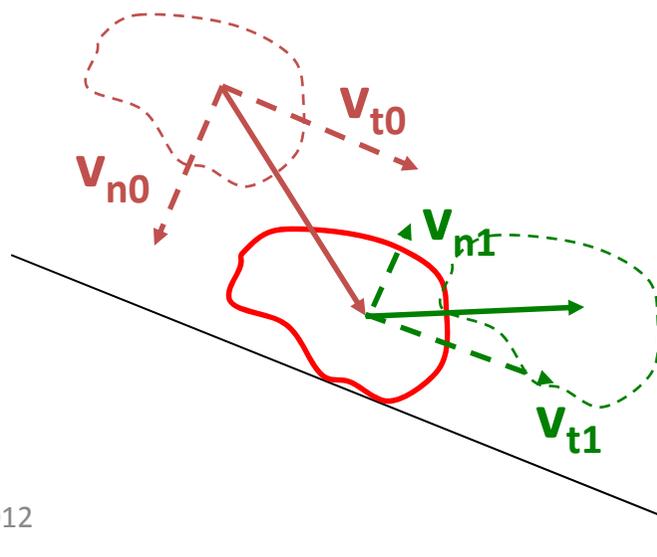
### Propagation des mouvements de terrain

#### CHUTE D'UN BLOC ROCHEUX

Une analyse rigoureuse doit prendre en compte :

- la géométrie exacte du bloc et du terrain (échelle adaptée)
- leurs caractéristiques physiques, élastiques et de résistance
- la présence d'arbres

Les caractéristiques mécaniques étant très difficiles à déterminer, de nombreuses méthodes utilisent des coefficients de restitution, déterminés empiriquement, qui permettent de déduire la vitesse "réfléchie" de la vitesse incidente.



$$K_n = v_{n1} / v_{n0}$$

$$K_t = v_{t1} / v_{t0}$$

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Propagation des mouvements de terrain

#### CHUTE D'UN BLOC ROCHEUX

**Méthodes rigoureuses** considérant la géométrie réelle des blocs et leur rotation (*ex: éléments discrets*)

**Méthodes à masse concentrée** ne considérant pas la vitesse de rotation

#### **COEFFICIENTS DE RESTITUTION**

*(d'après Barbieri et al., 1988)*

<i>Terrain</i>	$K_n$	$K_t$
<i>Rocher</i>	<i>0,50</i>	<i>0,95</i>
<i>Rocher recouvert de gros blocs</i>	<i>0,35</i>	<i>0,85</i>
<i>Eboulis</i>	<i>0,30</i>	<i>0,70</i>
<i>Sol couvert de végétation</i>	<i>0,25</i>	<i>0,55</i>

## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Propagation des mouvements de terrain

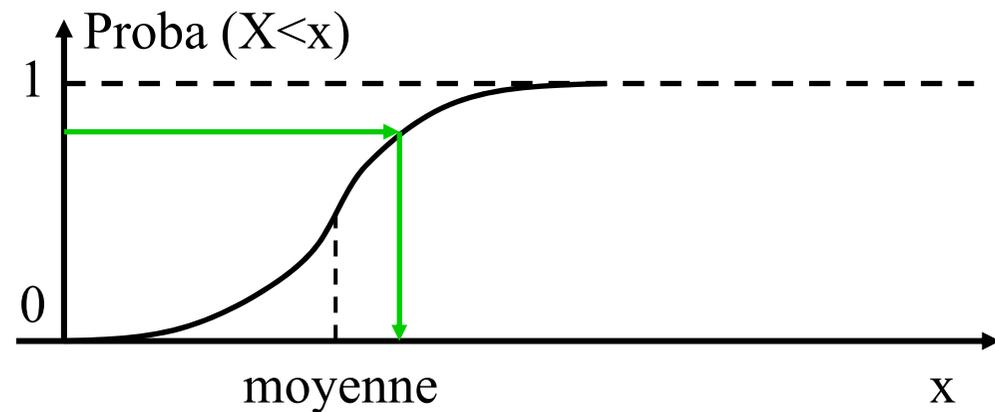
#### CHUTE D'UN BLOC ROCHEUX

#### Gestion de l'incertitude : approche probabiliste (Méthode de Monte Carlo)

Chaque paramètre  $X$  est décrit par sa distribution de probabilité

Pour chaque calcul, la valeur de chaque paramètre est déterminée par tirage d'un nombre entre 0 et 1

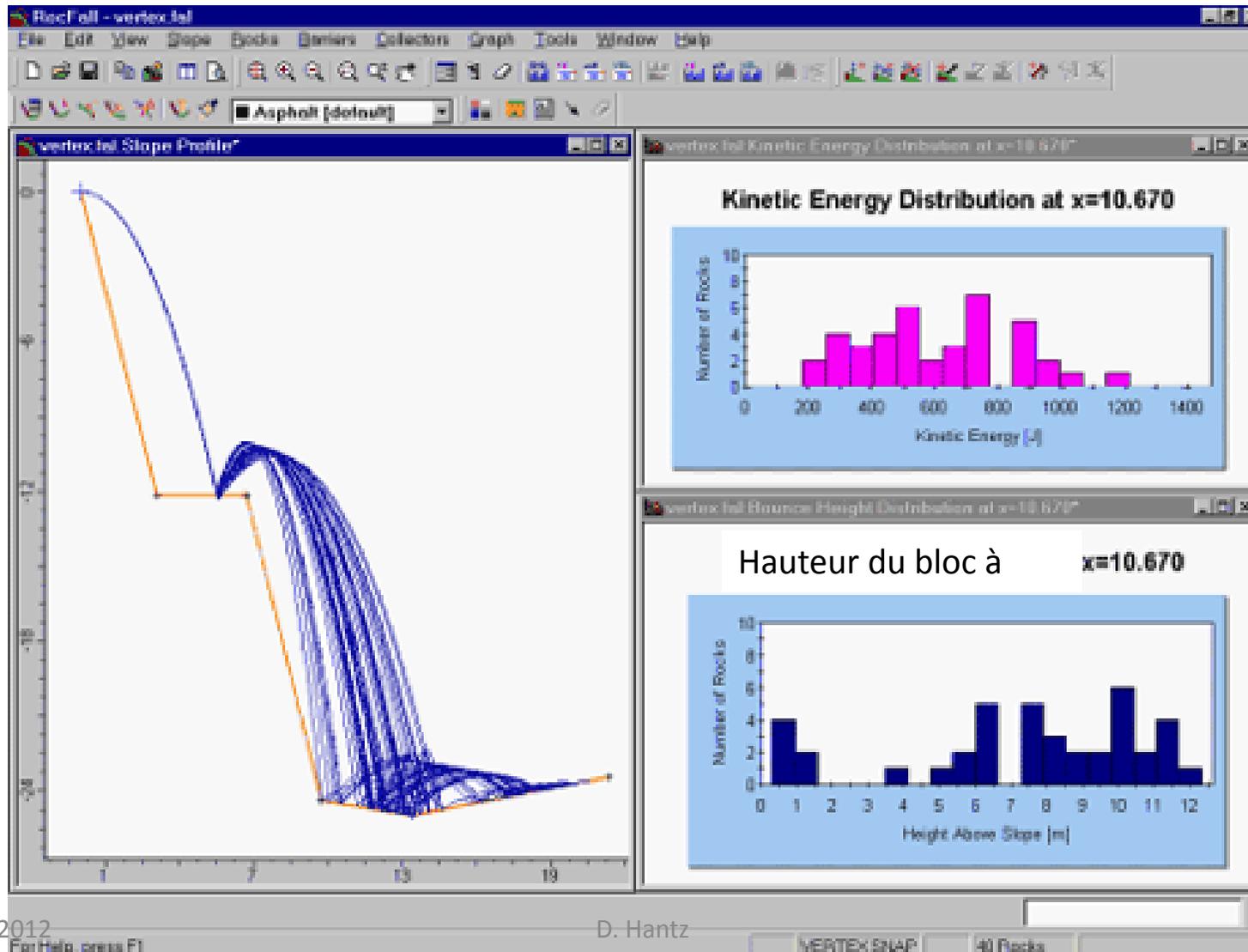
Après avoir effectué un grand nombre de calculs, on détermine la distribution du résultat (abscisse d'arrêt par exemple)



# CHUTE D'UN BLOC ROCHEUX

Exemple de logiciel de calcul de trajectoires de blocs : RocFall

Méthode simplifiée, à masse concentrée, ne considérant pas la rotation des blocs

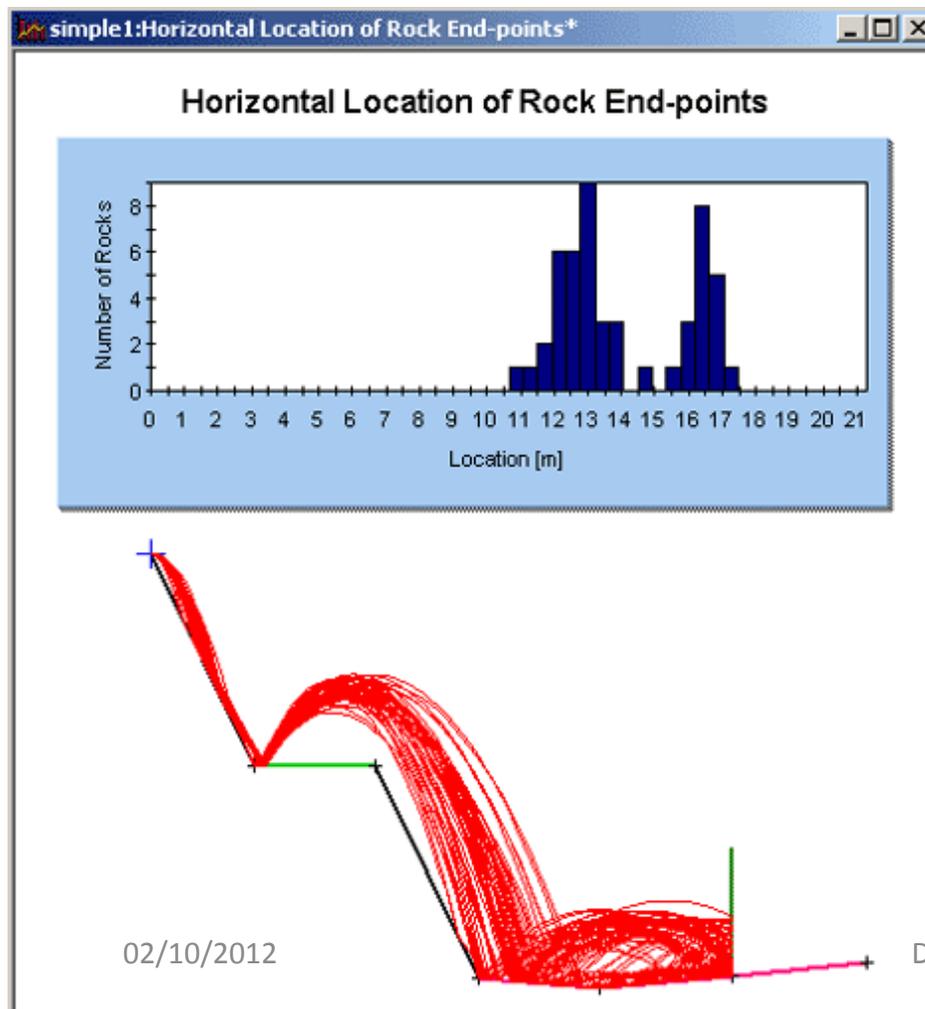


# CHUTE D'UN BLOC ROCHEUX

Exemple de logiciel de calcul de trajectoires de blocs : RocFall

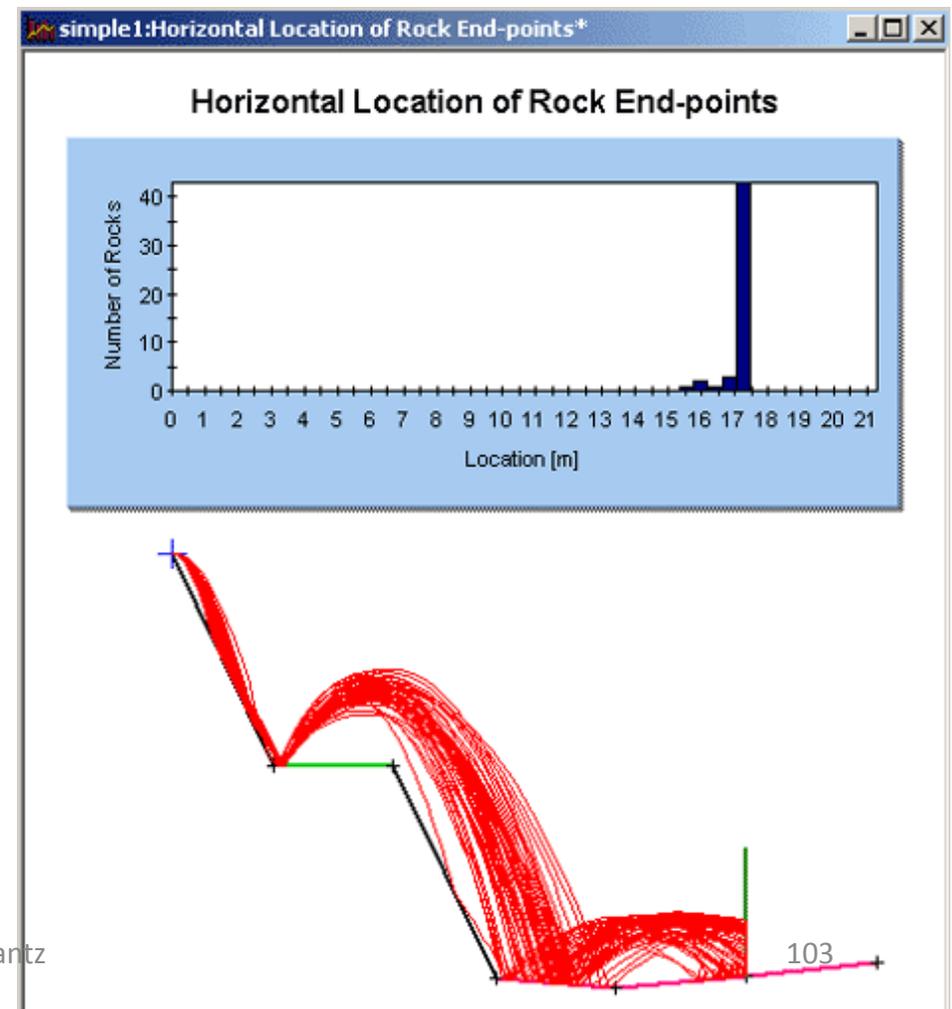
Barrière parfaitement élastique ( $R_n = R_t = 1$ )

Les blocs rebondissent sur la barrière



Barrière parfaitement inélastique ( $R_n = R_t = 0$ )

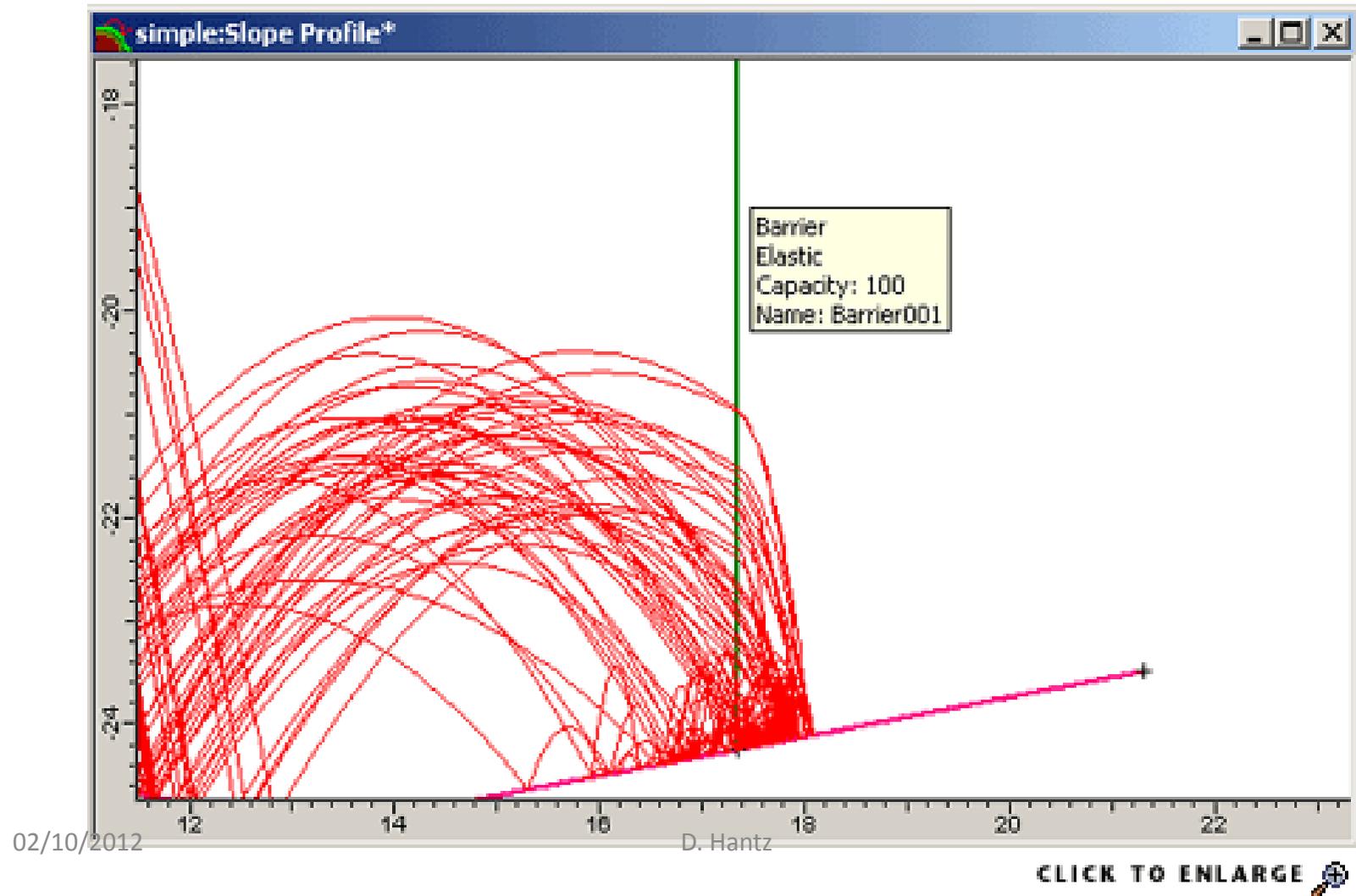
Les blocs ne rebondissent pas



## CHUTE D'UN BLOC ROCHEUX

Exemple de logiciel de calcul de trajectoires de blocs : RocFall

Les blocs dont l'énergie cinétique excède la capacité de la barrière, passent au travers en perdant de la vitesse



## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### **Propagation des mouvements de terrain**

Exemple d'étude de trajectoire de bloc suite à l'éboulement du  
18/02/2007 à Saint-Paul de Varcès



## 2. DETECTION ET CARACTERISATION DES PHENOMENES

### Propagation des mouvements de terrain

Exemple d'étude de trajectoire de bloc suite à l'éboulement du  
18/02/2007 à Saint-Paul de Varcès

Centrale électrique  
communale

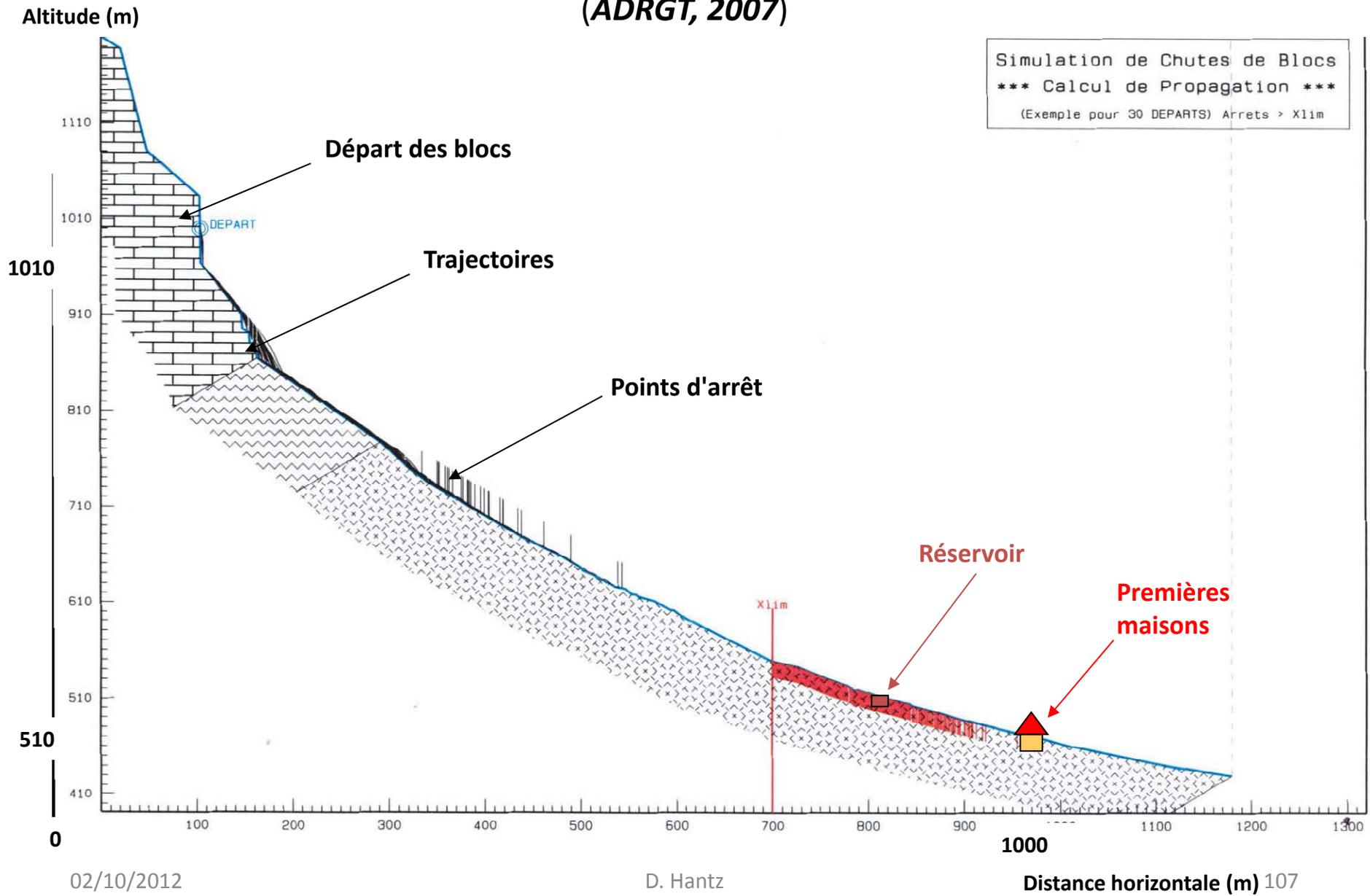
Réservoir d'eau  
communale



*Photo D. Hantz 24-08-07*

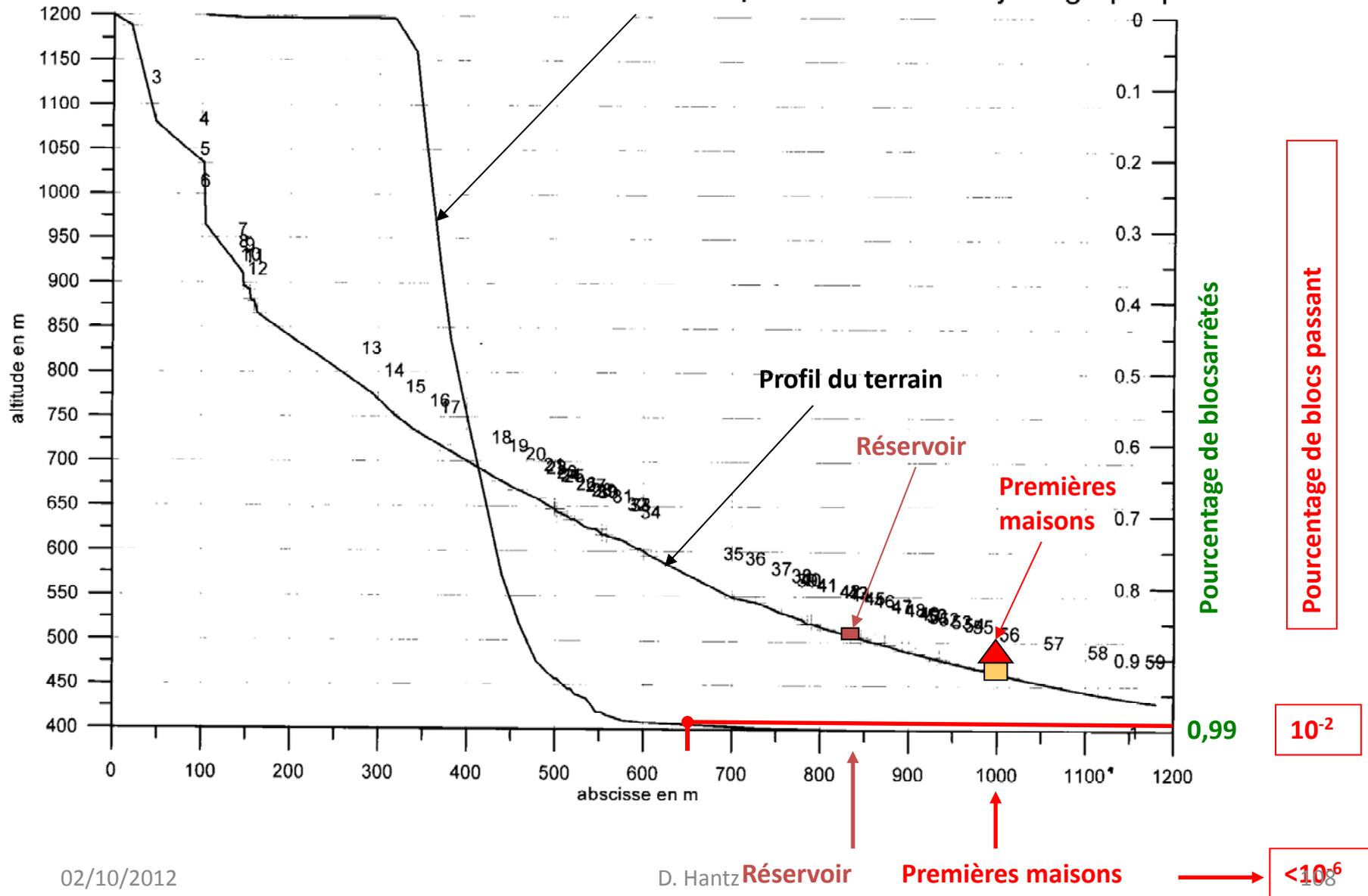
Bloc le plus éloigné (environ 400 m<sup>3</sup>)

Saint-Paul de Varcès – Ravin des Charbonniers  
Simulation de 30 chutes de blocs de 200 à 1000 m<sup>3</sup>  
(*ADRGT, 2007*)



Charbonniers - Simulation de  $1,8 \cdot 10^6$  chutes de blocs de 200 à 1000 m<sup>3</sup>  
**(ADRGT, 2007)**

Répartition des abscisse d'arrêt des blocs obtenus d'après les calculs trajectograpiques



### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.2. Jugement qualitatif d'expert



- La probabilité de rupture (ou la fréquence) est évaluée à dire d'expert (forte, moyenne, ou faible)
- Pour les cartes d'aléa, elle est généralement combinée à la probabilité de propagation et à l'intensité, pour obtenir un niveau (ou degré) d'aléa.
- Compte tenu de la difficulté d'évaluation, certains bureaux d'études préfèrent la considérer comme certaine (égale à 1).

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE DE RUPTURE - 3.2. Jugement qualitatif d'expert

Cas d'un aléa localisé : exemple de l'évaluation de la probabilité d'éboulement du versant instable de Séchilienne, Isère (*rapport du collège d'experts, 2000*)

- *L'éboulement en masse de toute la zone active (volume de 2 à 3 hm<sup>3</sup>) est un scénario envisageable à court terme (1 à 10 ans)*
- *L'analyse de l'ensemble des données disponibles sur le site permet de considérer comme très improbable à court terme (1 à 10 ans) et peu probables à moyen terme (10 à 50 ans) la réalisation des autres scénarios, conduisant à des volumes d'éboulement de 20 ou 25 hm<sup>3</sup>*

Cet avis est fondé sur un certain nombre d'éléments objectifs décrits dans le rapport



02/10/2012



D. Hantz

110

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE DE RUPTURE

#### 3.2. Jugement qualitatif d'expert

Exemple de carte d'aléa :

Plan de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN)

Oris-en-Rattier (38)

*Niveau fort, moyen ou faible :  
Combinaison de la probabilité  
et de l'intensité*

02/10/2012



La probabilité de rupture est évaluée à partir de données historiques

### Plan de Prévention des risques Naturel Prévisibles hors débordement de l'Isère VEUREY-VOROIZE

Carte informative des  
phénomènes naturels  
prévisibles)

- Chutes de blocs
- Glissement de terrain
- Crues torrentielles
- Ruissellements
- Cours d'eau de plaine
- Débordement/inondation
- Diluvations torrentielles/ruissellements
- Limites communales
- 1980 phénomène historique

Inondation de la plaine par le Ruisset et l'Isère en octobre 1928

Violent épisode orageux le 5/07/1971

Plusieurs glissements de talus le 2/12/1991

juillet 1071

20 et 21 décembre 1991

20-21 décembre 1991

1994 et 1995

juillet 1971

20 et 21 décembre 1991

20-21 décembre 1991

juillet 1971

20 et 21 décembre 1991

20-21 décembre 1991

juillet 1971

20 et 21 décembre 1991

20-21 décembre 1991

juillet 1971

20 et 21 décembre 1991

20-21 décembre 1991

juillet 1971

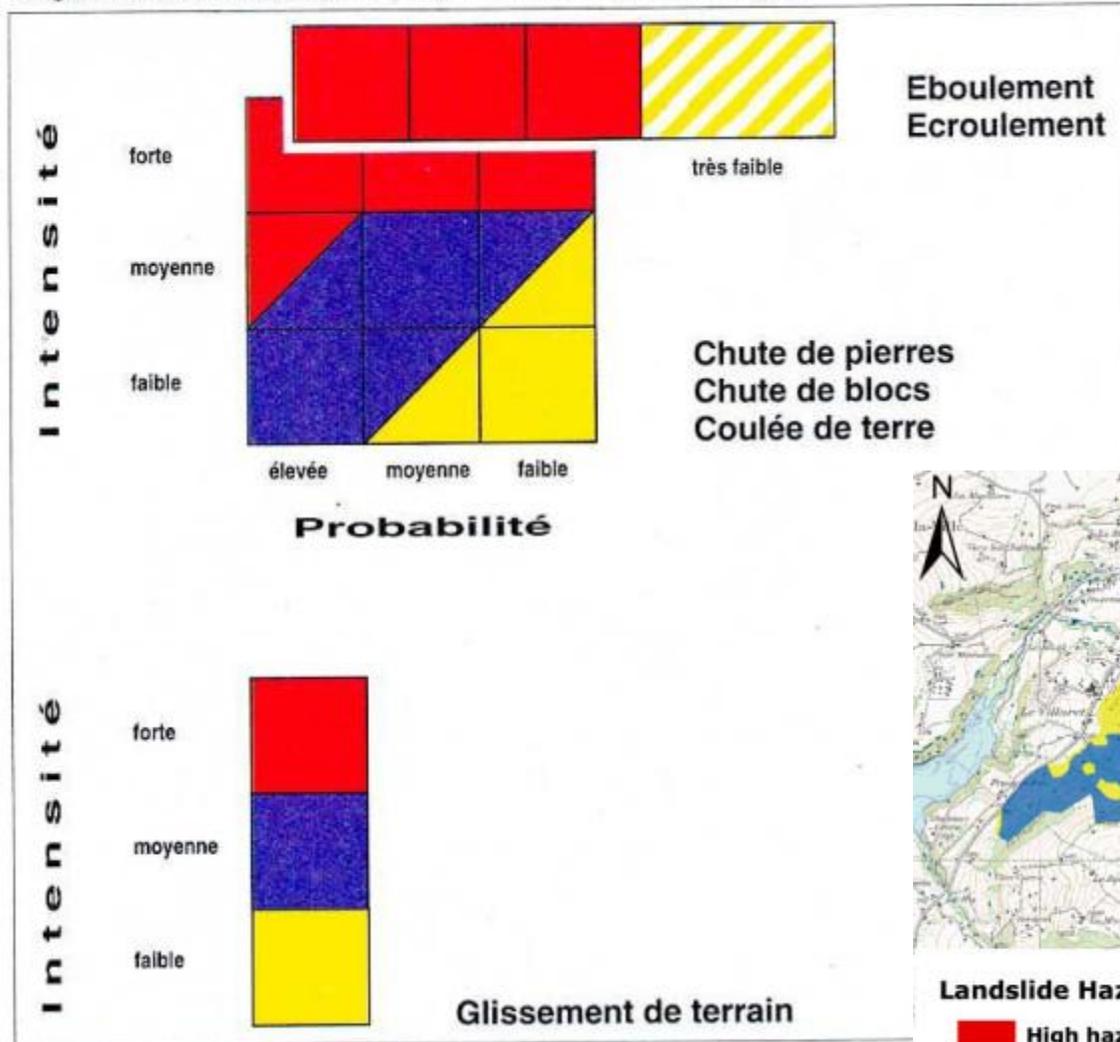


Eboulement du 2/12/1992

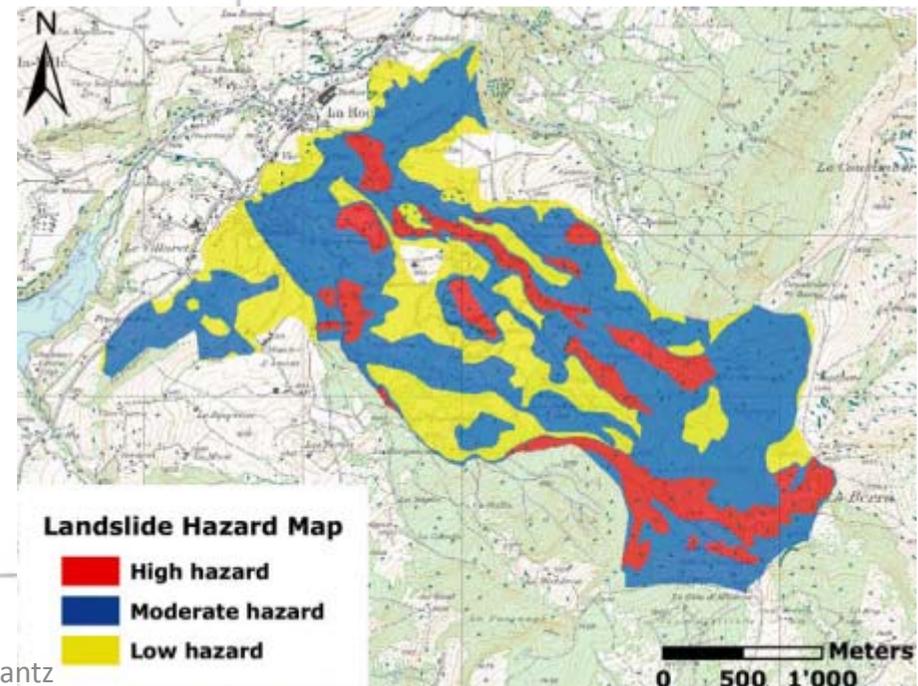
### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE DE RUPTURE - 3.2. Jugement qualitatif d'expert

#### Combinaison de l'intensité et de la probabilité en Suisse

Diagramme intensité-probabilité (diagramme des degrés de danger)



Exemple de carte d'aléa  
(d'après Lateltin et al., 2005)



## 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

### 3.3. Approche historique

- Principe : le passé est la clef du futur
- L'approche historique permet d'évaluer la fréquence de rupture à partir d'un inventaire exhaustif d'évènements datés, portant sur une zone relativement homogène
- Seule, elle ne s'applique qu'à un aléa diffus, mais associée à une autre approche, elle apporte une dimension temporelle quantitative à l'évaluation

### 3. EVALUATION DE LA PROBABILITE D'OCCURRENCE OU DE LA FREQUENCE

#### 3.3. Approche historique

##### **Aléa diffus**

Un aléa diffus se caractérise par sa **fréquence**.

##### **•Fréquence temporelle**

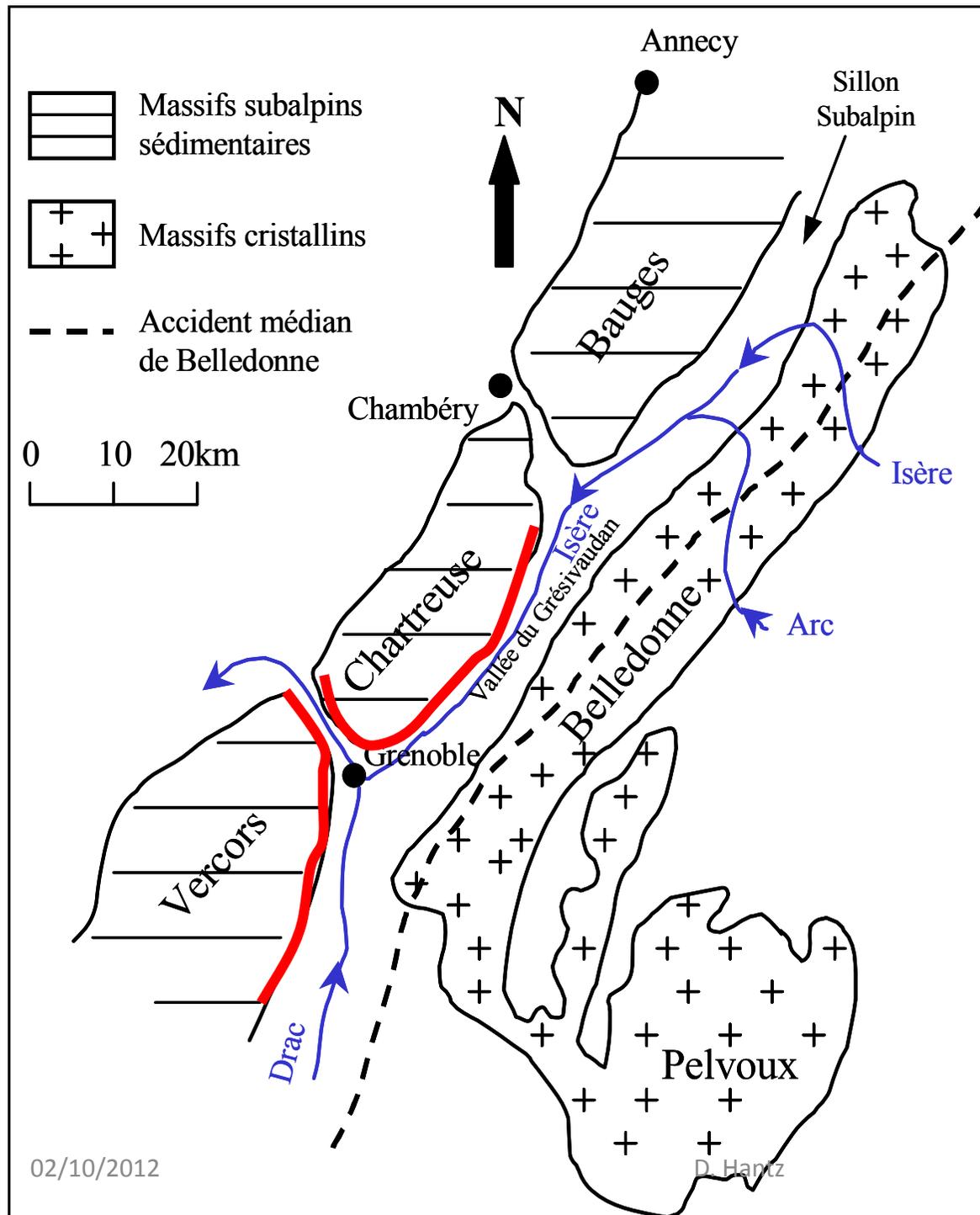
Nombre moyen d'évènements d'un **type donné**, se produisant dans une **zone donnée**, par unité de temps (généralement estimé à partir d'un inventaire historique)

Une fréquence peut être estimée si plusieurs mouvements de même type se sont produits dans une zone donnée.

L'inverse de la fréquence  $F$  est la **période de retour**  $T$ .

##### **•Fréquence spatiotemporelle**

Pour une **zone homogène**, on peut définir la fréquence spatiotemporelle :  
Nombre d'évènements par unité de temps et par unité de surface (ou de longueur)

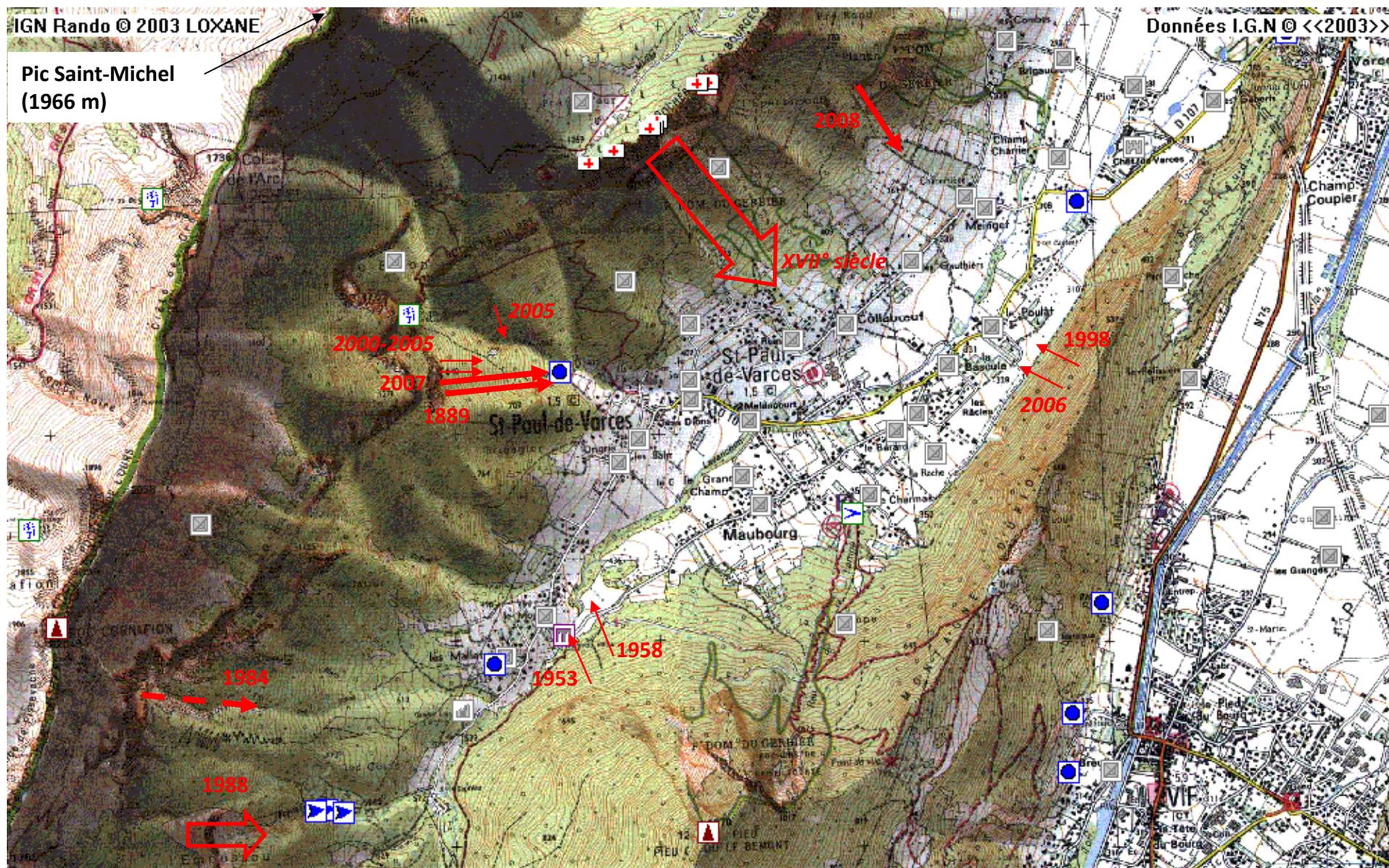


## Exemple d'inventaire historique d'éboulements rocheux

Inventaire d'éboulements portant sur 150 km de falaise entourant l'agglomération grenobloise (service RTM / Université)

**—** Falaises concernées par l'inventaire

# COMMUNE DE SAINT-PAUL DE VARCES



02/10/2011  $10^1-10^3 \text{ m}^3$

$\longrightarrow$   $10^3-10^5 \text{ m}^3$

$\longrightarrow$   $10^5-10^7 \text{ m}^3$

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

#### COMMUNE DE SAINT-PAUL DE VARCES

**Echarina**  
**28/04/1988**  
**500 000 m<sup>3</sup>**

**Barlatier**  
**02/1984**  
**10 000 m<sup>3</sup>**

**Charbonniers**  
**18/02/2007**  
**20 000 m<sup>3</sup>**

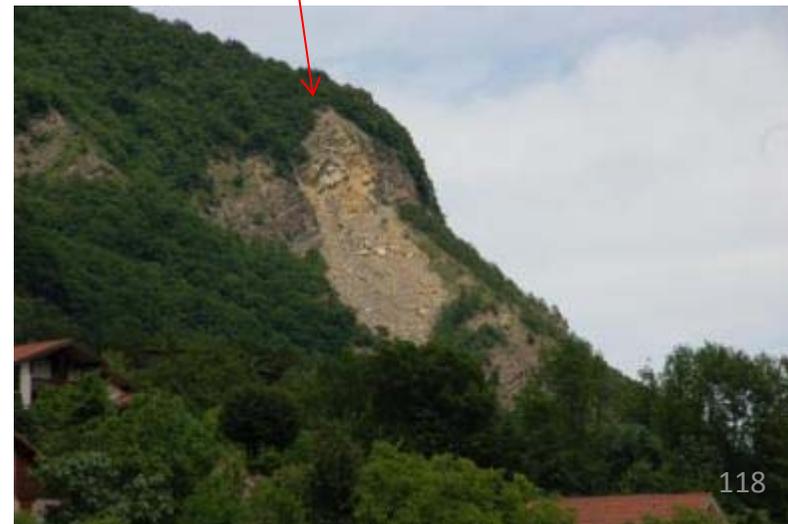
**Bourgeoise**  
**XVII<sup>e</sup> siècle**  
**3,5 hm<sup>3</sup>**

**Charbertière**  
**26/12/2008**  
**1 000 m<sup>3</sup>**



02/10/2012

D. Hantz



118

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

#### Exemple d'inventaire historique

#### Calcul des fréquences

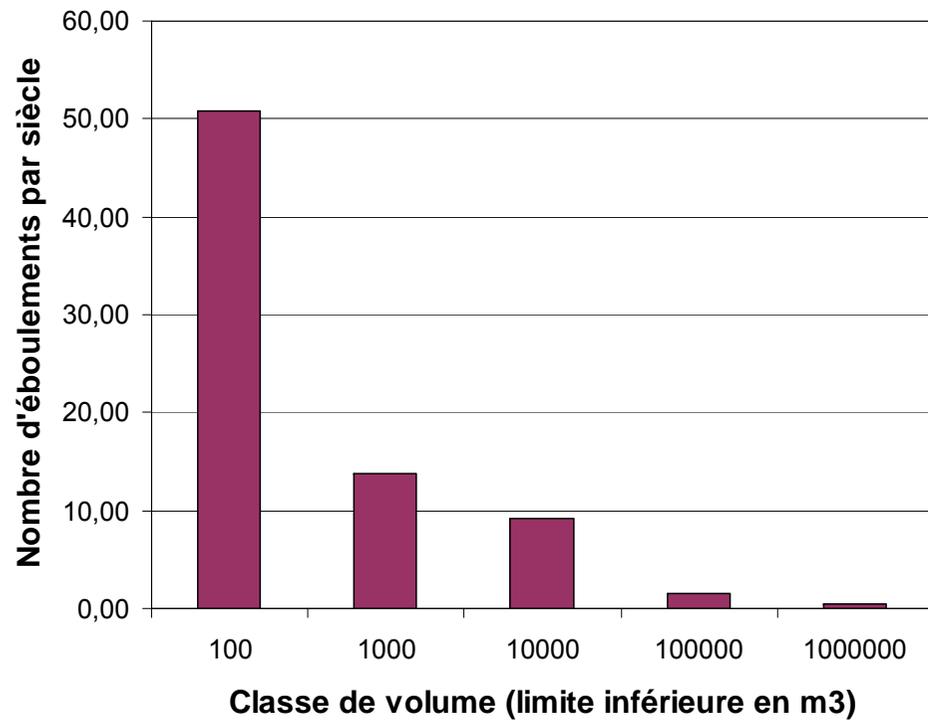
(Hantz et al., 2003)

<b>Classe de volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup></b>	<b>10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup></b>	<b>10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup></b>	<b>10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup></b>	<b>10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup></b>
Période d'observation	1935-2000	1935-2000	1935-2000	1800-2000	1600-2000
Nombre d'éboulements	33	9	6	3	2
<b>Fréquence observée (par siècle)</b>	<b>51</b>	<b>14</b>	<b>9</b>	<b>1.5</b>	<b>0.5</b>
<i>Fréquence cumulée observée</i>	<i>76</i>	<i>25</i>	<i>11</i>	<i>2</i>	<i>0,5</i>

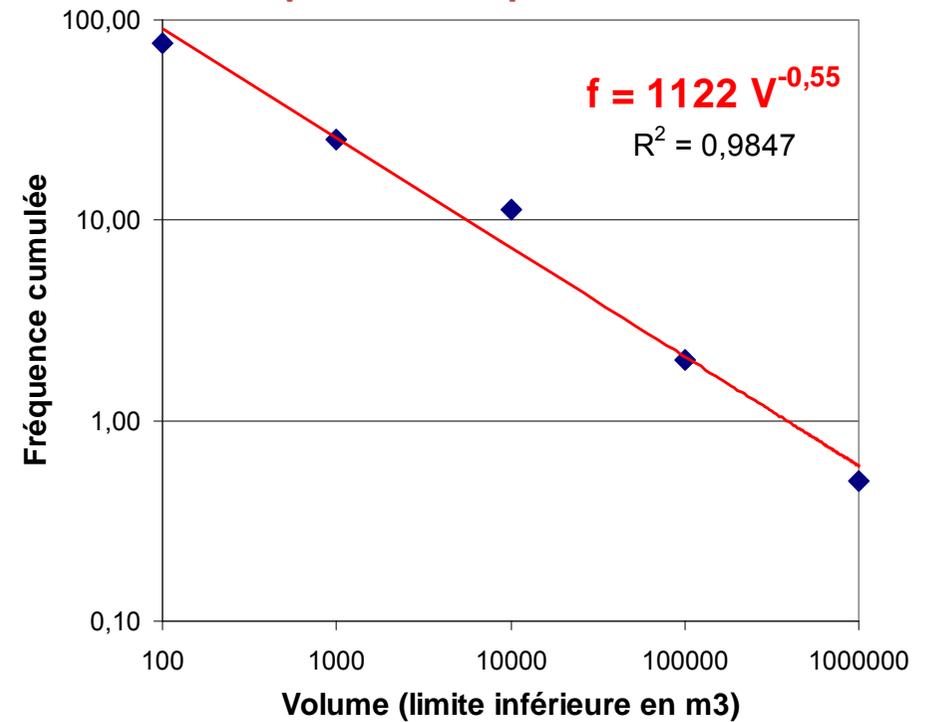
### 3. EVALUATION DE L'ALEA - 3.4. Approche historique

#### Exemple d'inventaire historique Relation fréquence-volume

Fréquence par classe de volume



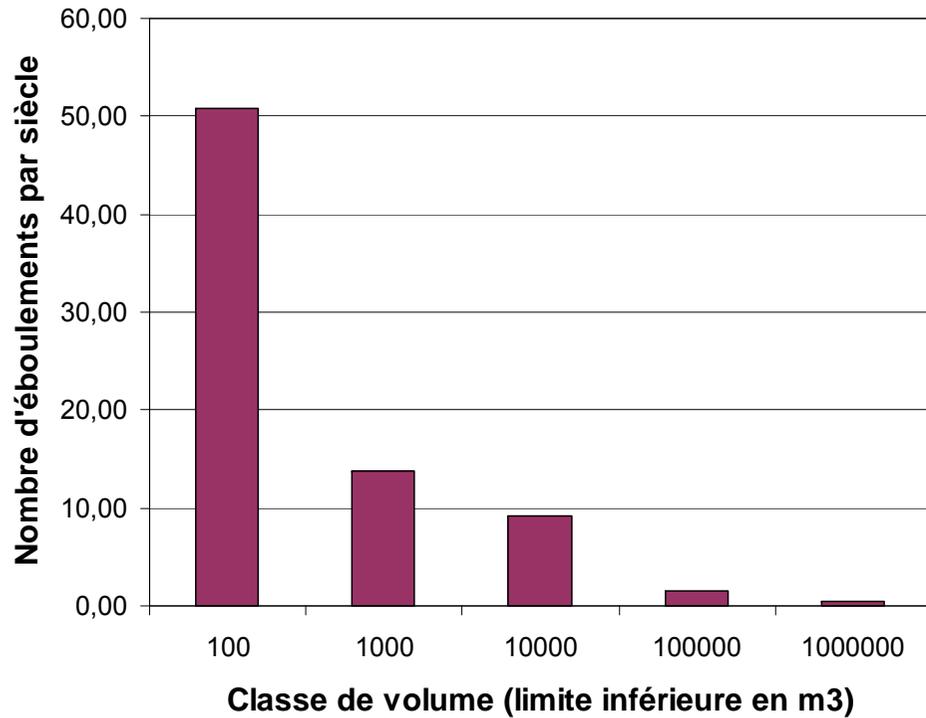
Ajustement de la fréquence cumulée  
par une loi puissance



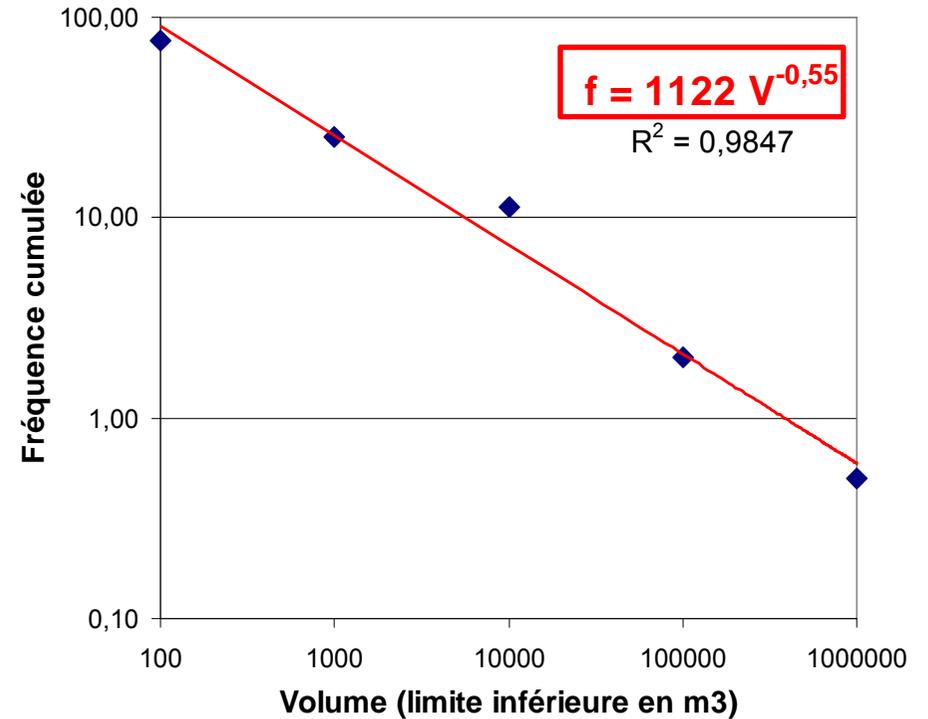
### 3. EVALUATION DE L'ALEA - 3.4. Approche historique

#### Exemple d'inventaire historique Relation fréquence-volume

Fréquence par classe de volume



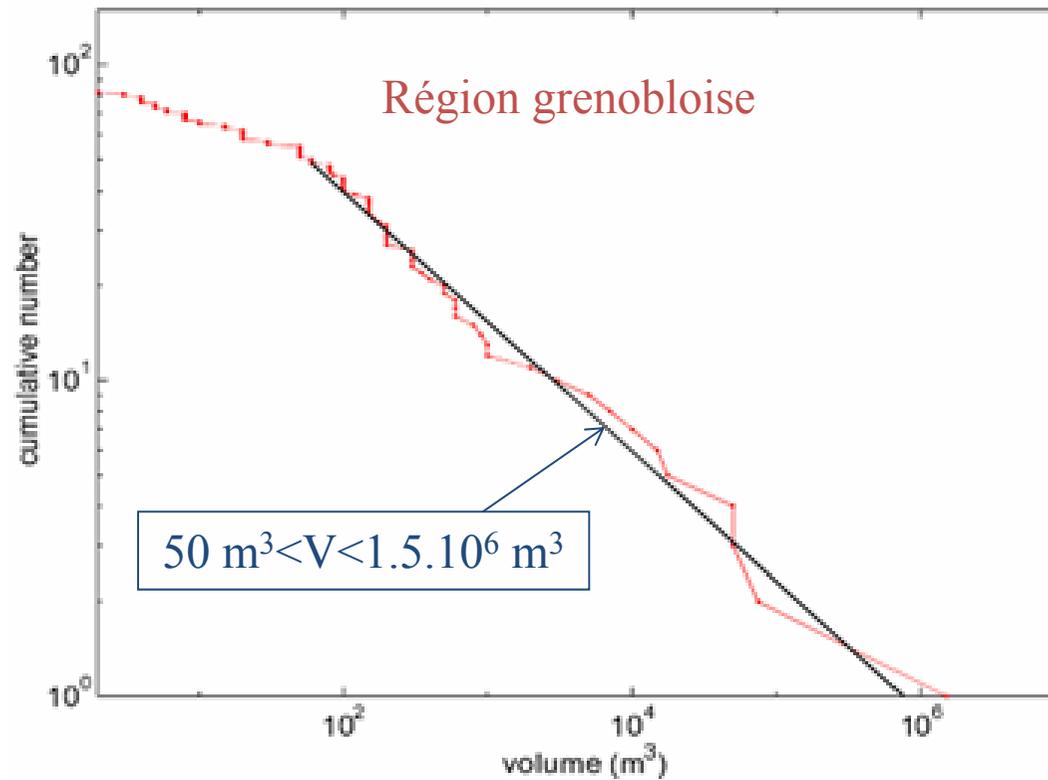
Ajustement de la fréquence cumulée  
par une loi puissance



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

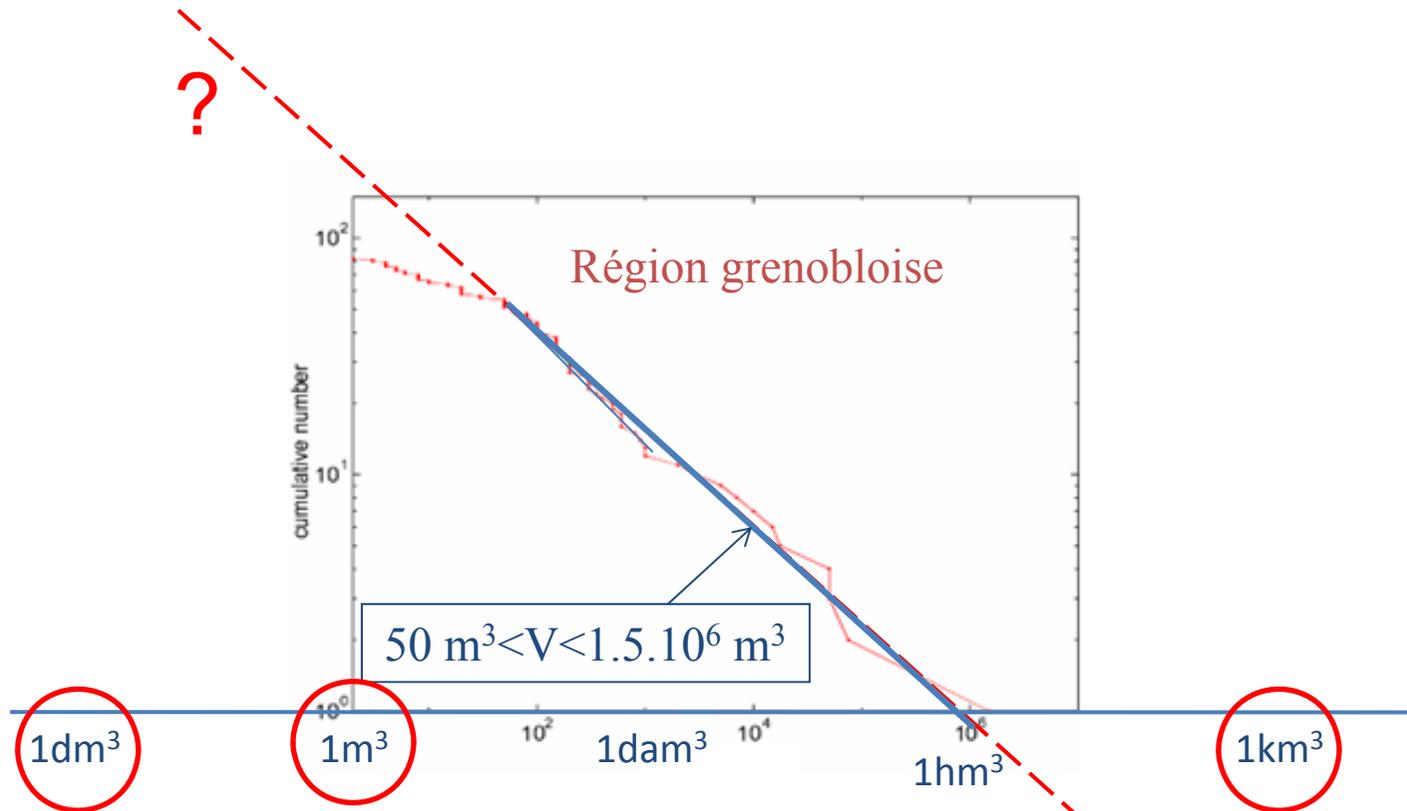
#### Relations fréquence-volume

(Dussauge-Peisser et al., 2002)



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

#### Relations fréquence-volume (*Dussaige-Peisser et al., 2002*)

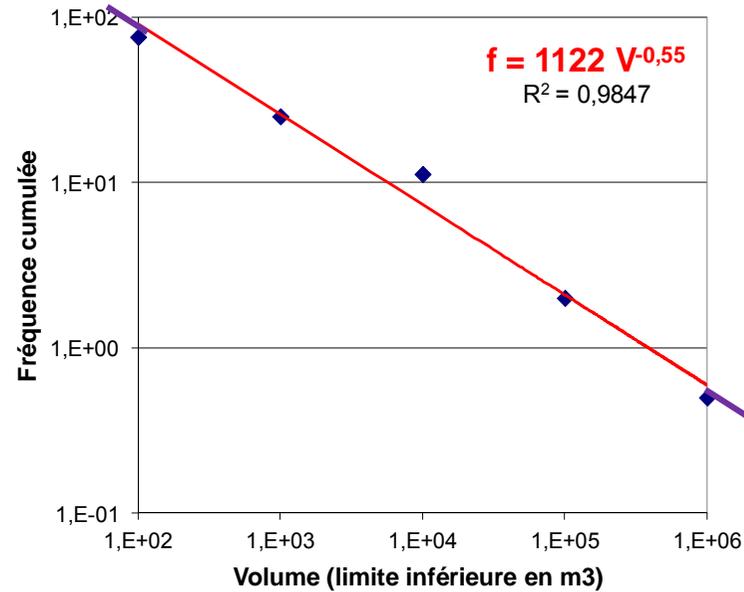


**Validité de la loi pour les petits ou les gros volume ?**

# Perspectives

## Petits volumes

- Résolution plus fine
- Mesures annuelles
- LIDAR

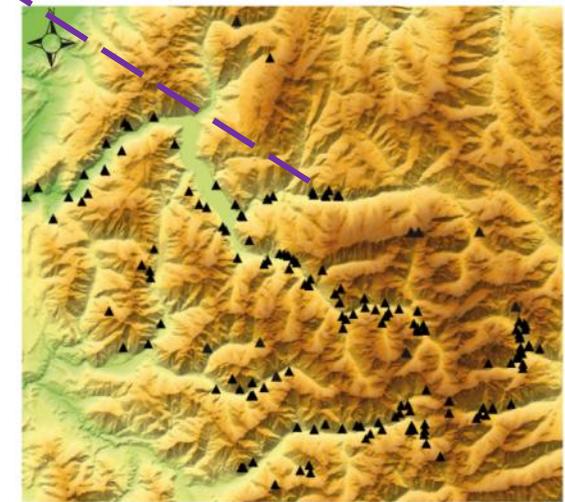


## Gros volumes

- Vallée ou massif
- Dépôts holocènes (10<sup>4</sup> ans)
- Datation (cosmonucléides)
- Volume (géophysique)



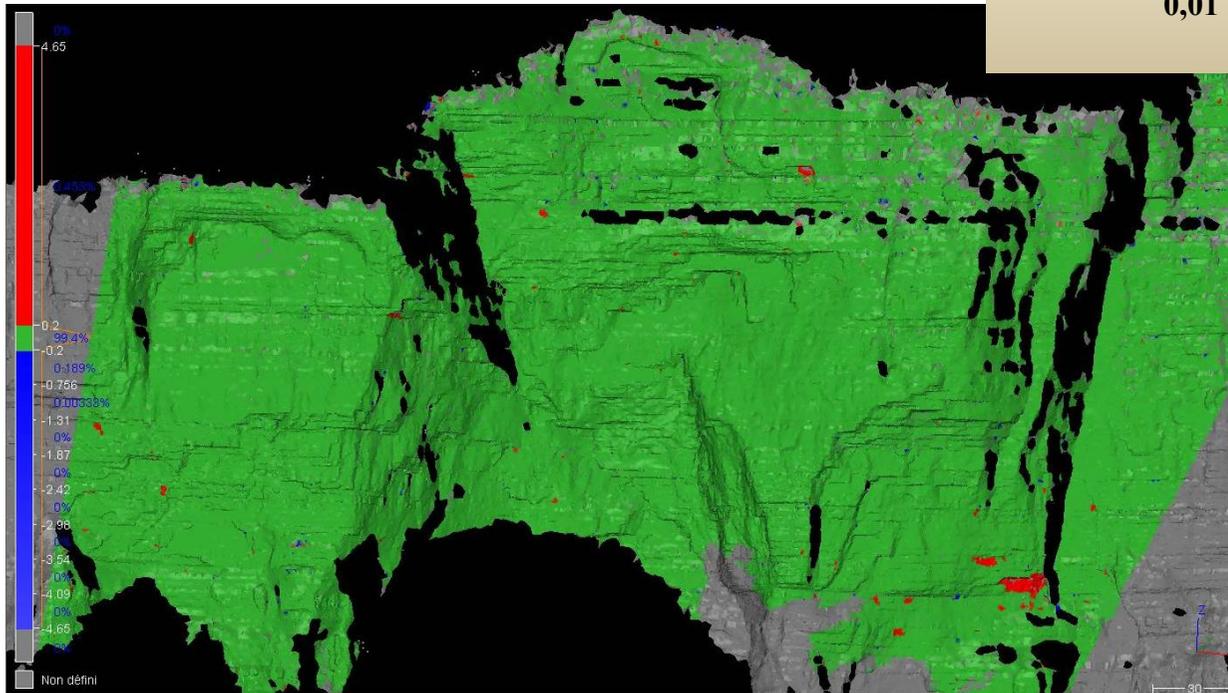
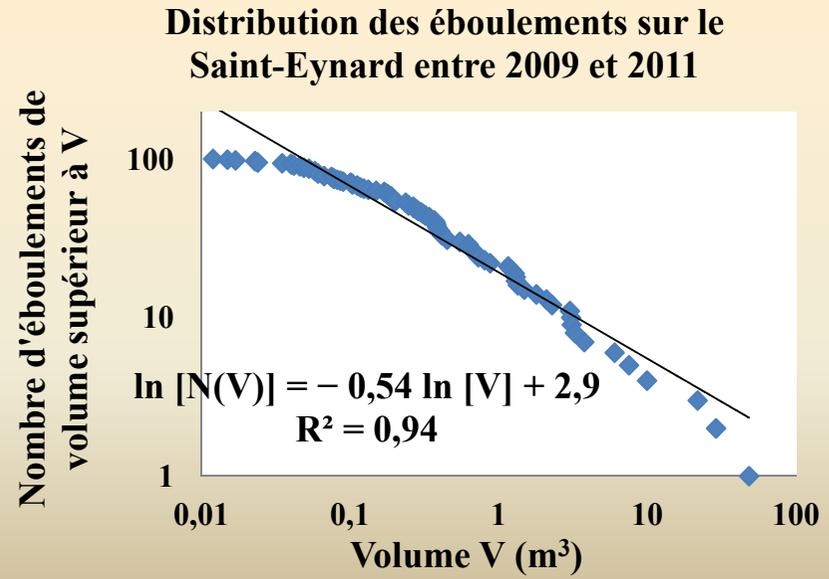
1 km



Altitude  
Eboulements massif des Ecrins  
0 10 km

# Détection d'éboulements rocheux par comparaison d'images Lidar

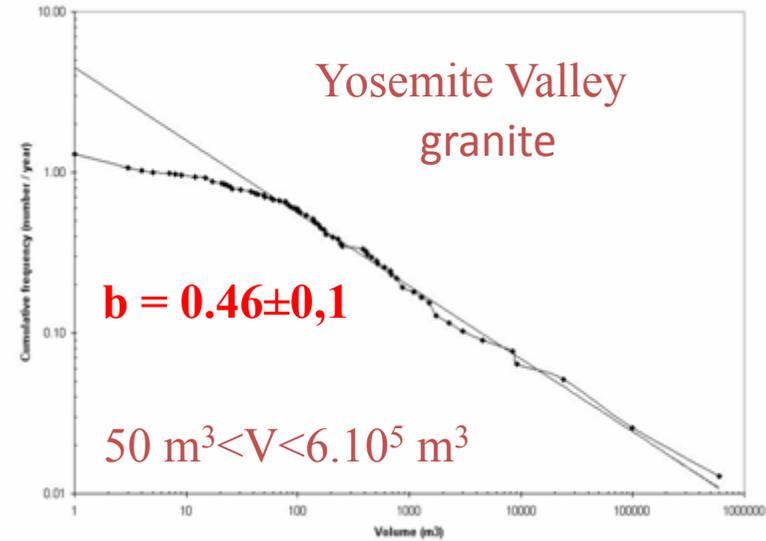
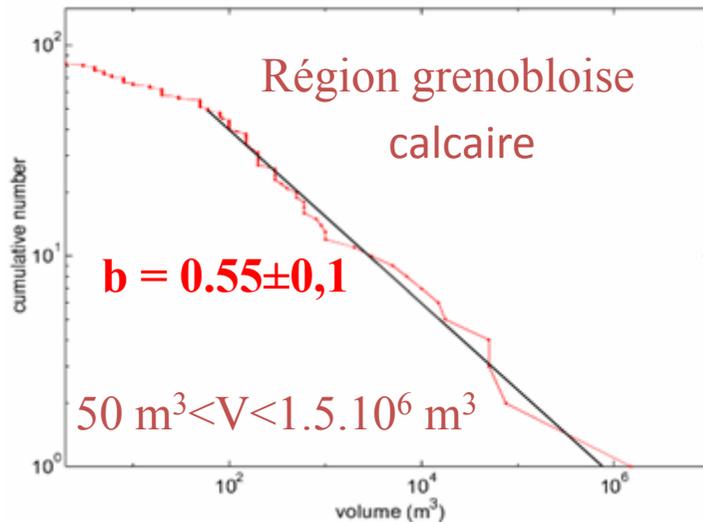
D. Hantz, J-P. Rossetti



- en rouge, les éboulements détectés
- exhaustif au-dessus de 0,1 m<sup>3</sup>

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

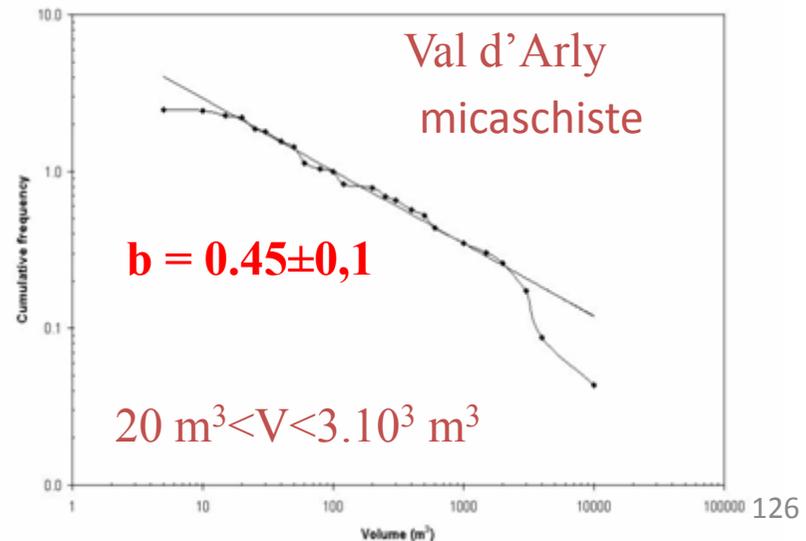
#### Relations fréquence-volume (*Dussauge-Peisser et al., 2002*)



Loi puissance

$$f(V) = a V^{-b}$$

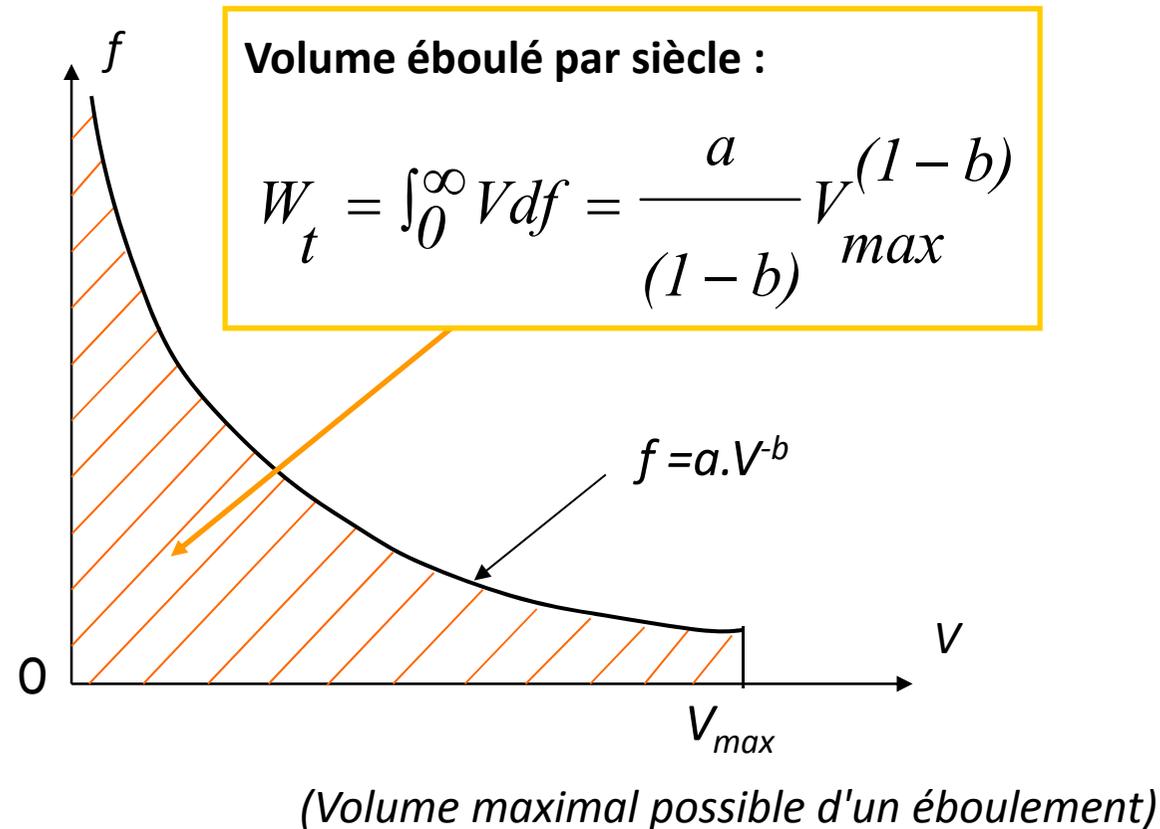
*b* pourrait être indépendant des contextes géologique et géomorphologique



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

#### Relation fréquence d'éboulements – taux de recul de la falaise

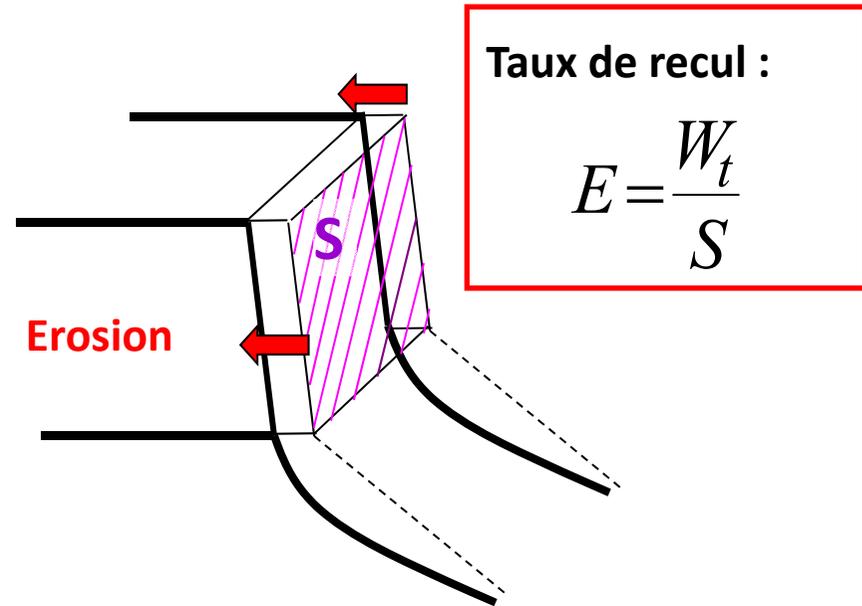
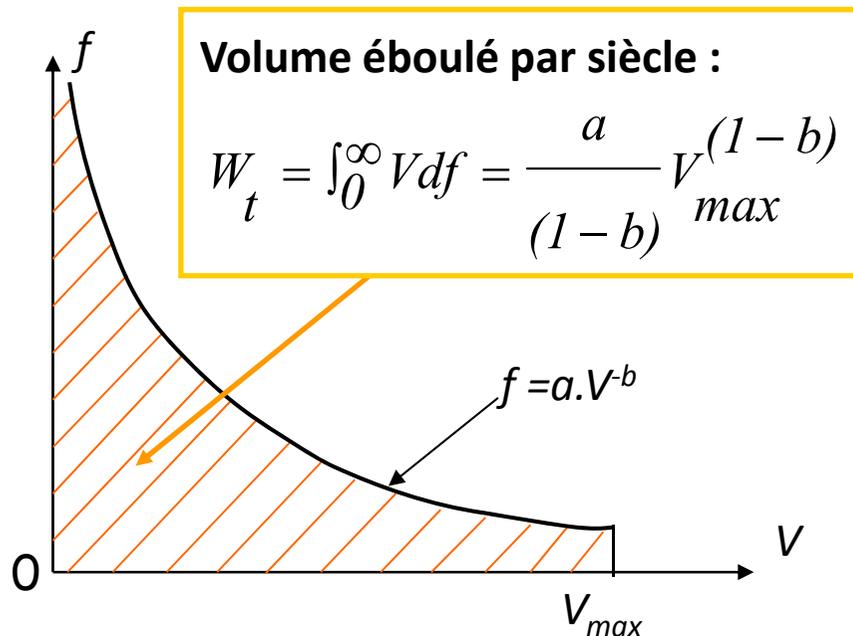
(Hantz et al., 2002)



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

#### Relation fréquence d'éboulements – taux de recul de la falaise

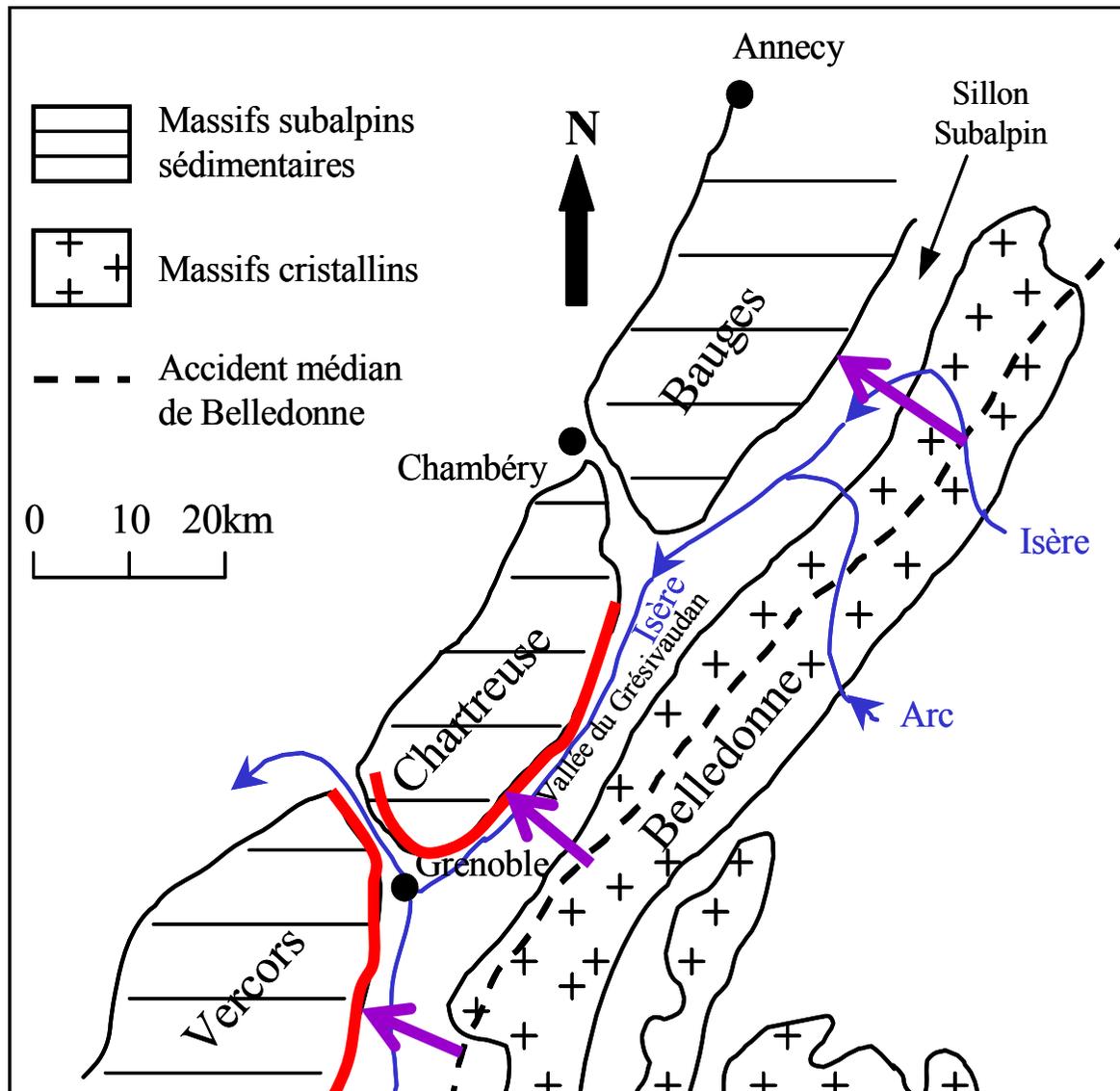
(Hantz et al., 2002)



#### Exemple des falaises calcaires de l'agglomération grenobloise

- Inventaire historique (échelle du siècle)
- Histoire géologique (million d'années)

→ E = 1,5 mm/an  
???



**Relation fréquence d'éboulements – taux de recul de la falaise**

D'après H. Arnaud, la plateforme urgonienne s'étendait environ jusqu'à l'accident médian de Belledonne, situé environ 15 km plus à l'est.

**Exemple des falaises calcaires de l'agglomération grenobloise**

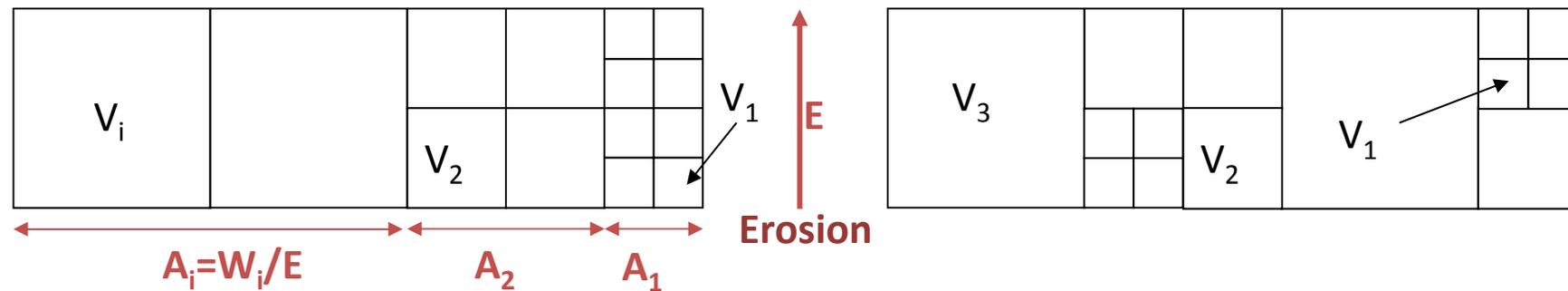
● Inventaire historique (échelle du siècle)	→ E = 1,5 mm/an
● Histoire géologique (million d'années)	→ recul de 15 km en 10 <sup>7</sup> ans
	→ E = 1-1,5 mm/an

02/10/2012 D. Hantz 129

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

#### Relation fréquence d'éboulements – âge moyen de la falaise (Hantz et Frayssines, 2007)

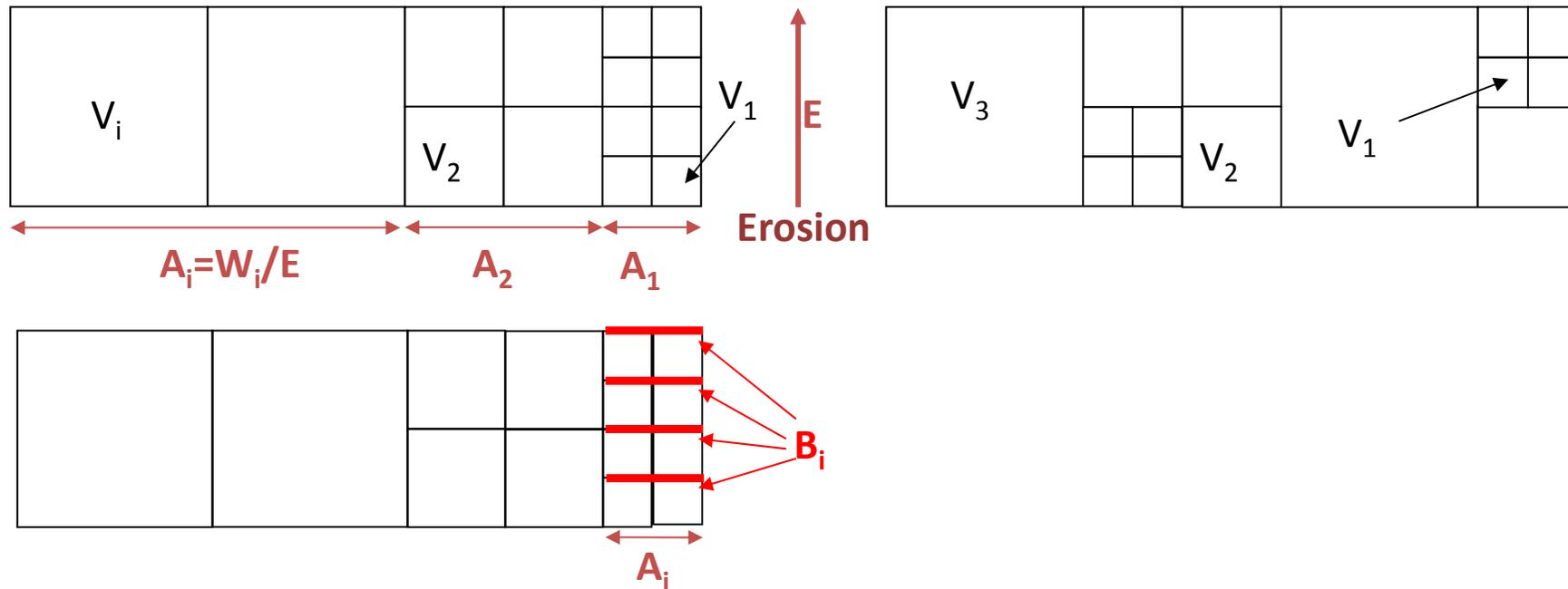
*Vue de dessus des compartiments qui s'éboulent en 1 siècle (modèles simplifiés)*



### 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)

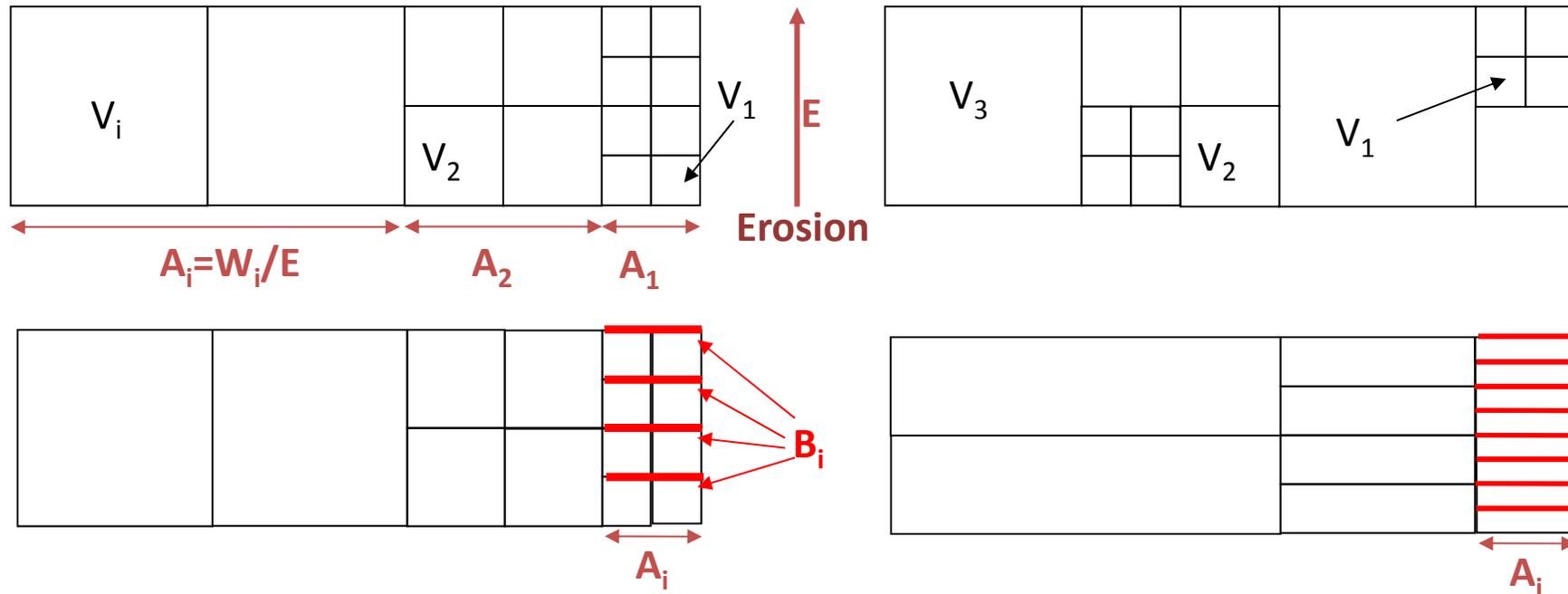
**Taux de renouvellement de la surface  $A_i$  (par siècle) =  $B_i / A_i$**

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

### 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) =  $A_i / B_i$**

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

#### Relation fréquence d'éboulements – âge moyen de la falaise

#### Exemple des falaises grenobloises

Classe de volume (m <sup>3</sup> )	0-10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>
Période d'observation		1935-2000	1935-2000	1935-2000	1800-2000	1600-2000
Nombre d'éboulements		33	9	6	3	2
Fréquence observée (par siècle)		51	14	9	1.5	0.5
Fréquence moyenne calculée		65	18	5	1.5	0.6
Taux volumique d'érosion par classe de volume (m <sup>3</sup> /siècle)	10 893	19 807	55 825	157 336	443 433	2,83 10 <sup>6</sup>
Taux volumique d'érosion global	3 521 927					
Surface totale de falaise (m <sup>2</sup> )	24 10 <sup>6</sup>					
Taux linéaire d'érosion (m/siècle)	0,15					
Surface moyenne de falaise affectée par des éboulements de volume compris entre V <sub>i</sub> and V <sub>i+1</sub> (m <sup>2</sup> )	0,07 10 <sup>6</sup>	0,1 10 <sup>6</sup>	0,4 10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	3 10 <sup>6</sup>	19 10 <sup>6</sup>
Taux d'apparition de cicatrices (m <sup>2</sup> /siècle)	27 264	14 240	21 677	33 000	50 235	150 769
<b>Durée de vie moyenne des masses potentiellement instables (ans)</b>	<b>272</b>	<b>948</b>	<b>1 755</b>	<b>3 249</b>	<b>6 015</b>	<b>12 812</b>

**Durée de vie moyenne pondérée = 11 000 ans**

**→ Age moyen des falaises = 5 500 ans**

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

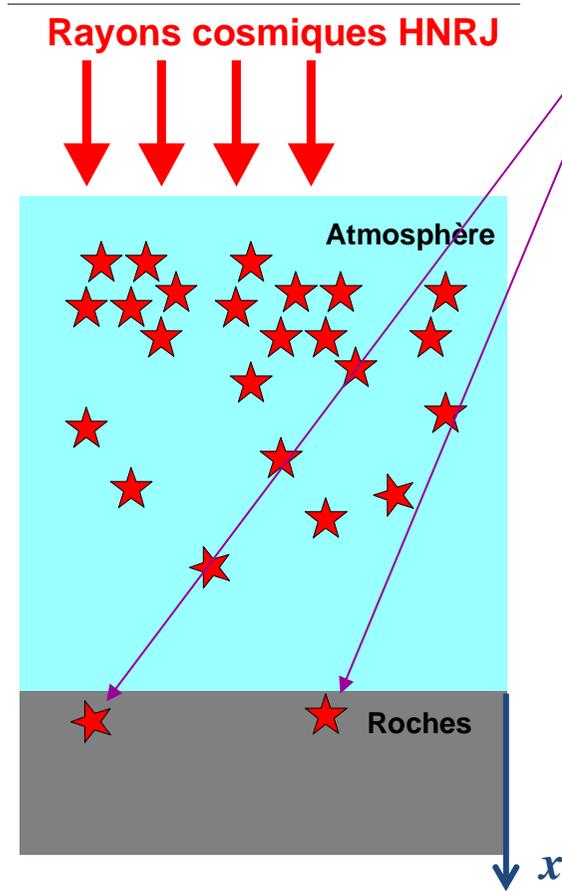
#### Validation du modèle de recul par datation des falaises

#### Principe de la datation par les cosmonucléides

Cosmonucléides produits in situ :  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{10}\text{Be}$

Demie-vie radioactive : 300 kans

Début horloge = début du contact avec l'atmosphère



La méthode?...

Gains : Production  $P_0 \cdot e^{-\rho x(t)}$

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \text{Gains} - \text{pertes}$$



Pertes : érosion  $\varepsilon \cdot \frac{\partial C(x,t)}{\partial x}$

...un problème de robinet!!

Pertes : décroissance radioactive  $-\lambda C(x,t)$

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

## Dtation par les cosmonucléides : échantillonnage



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

## Datation par les cosmonucléides : sites d'échantillonnage



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

#### **Datation par les cosmonucléides : sites d'échantillonnage**



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

## Datation par les cosmonucléides : sites d'échantillonnage

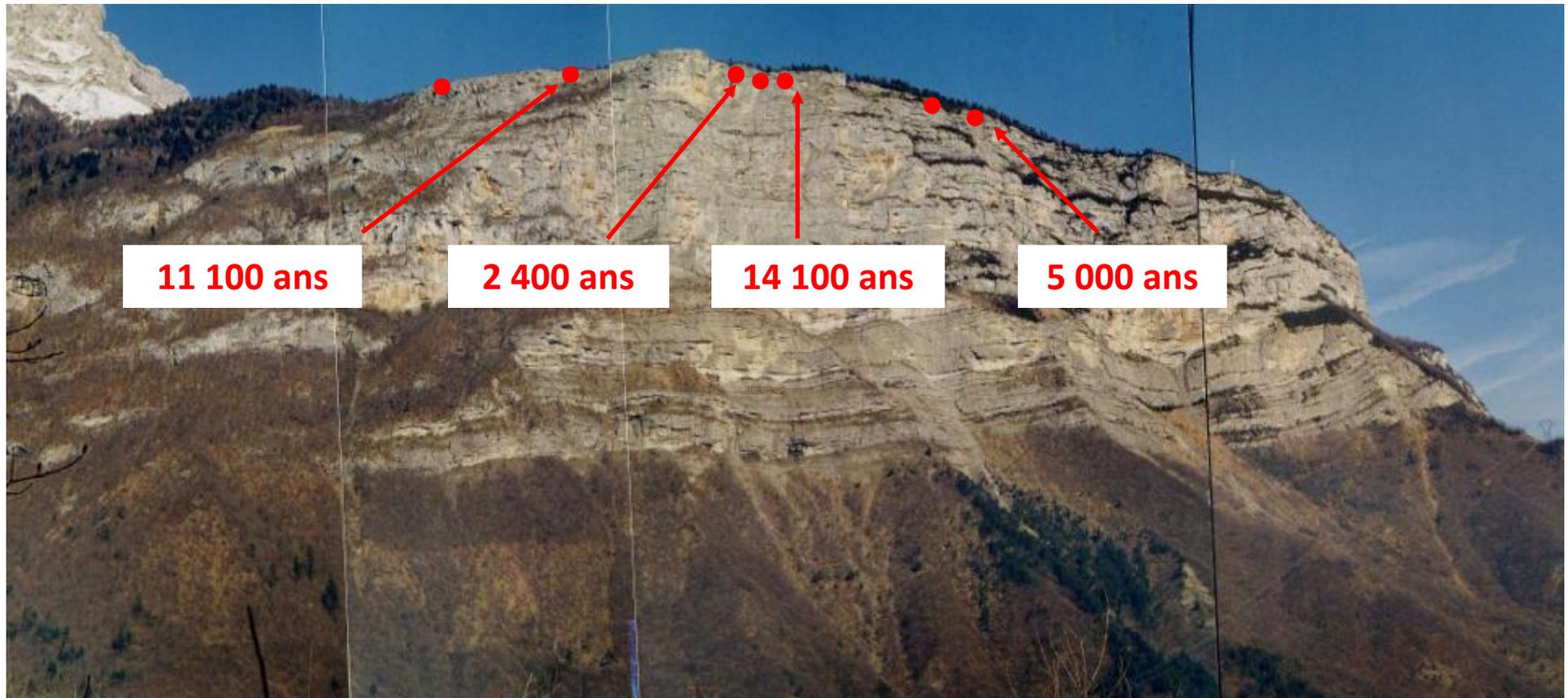
Prélèvements:

7

6

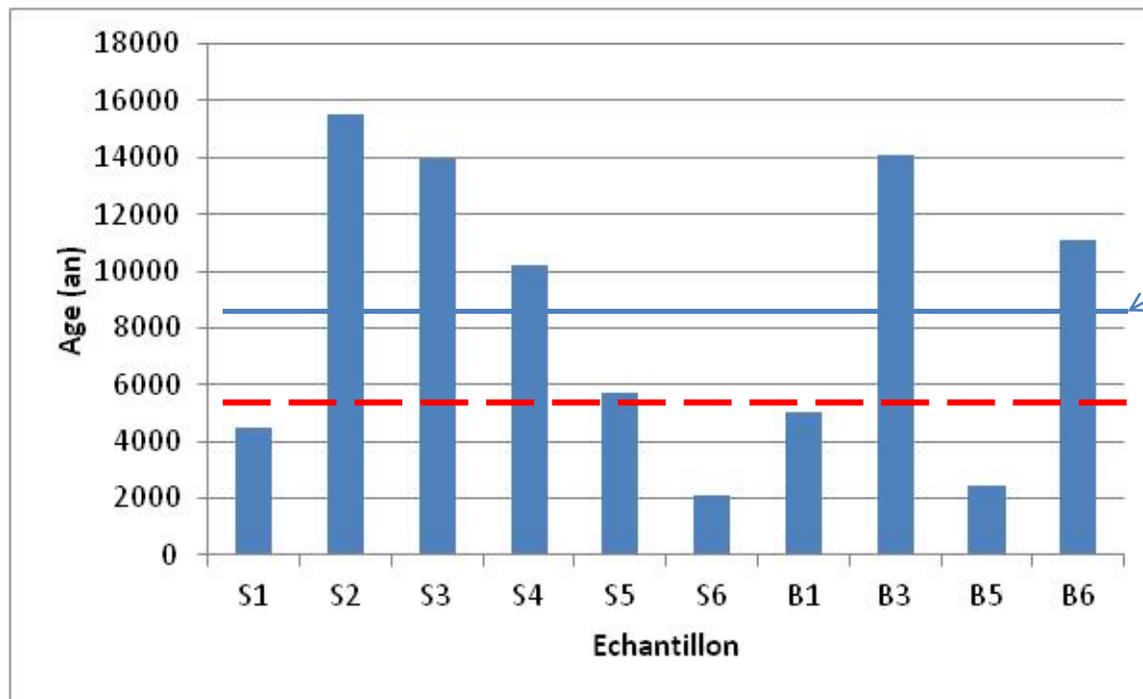
5,4,3

2,1



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

## Validation du modèle de recul par datation des falaises



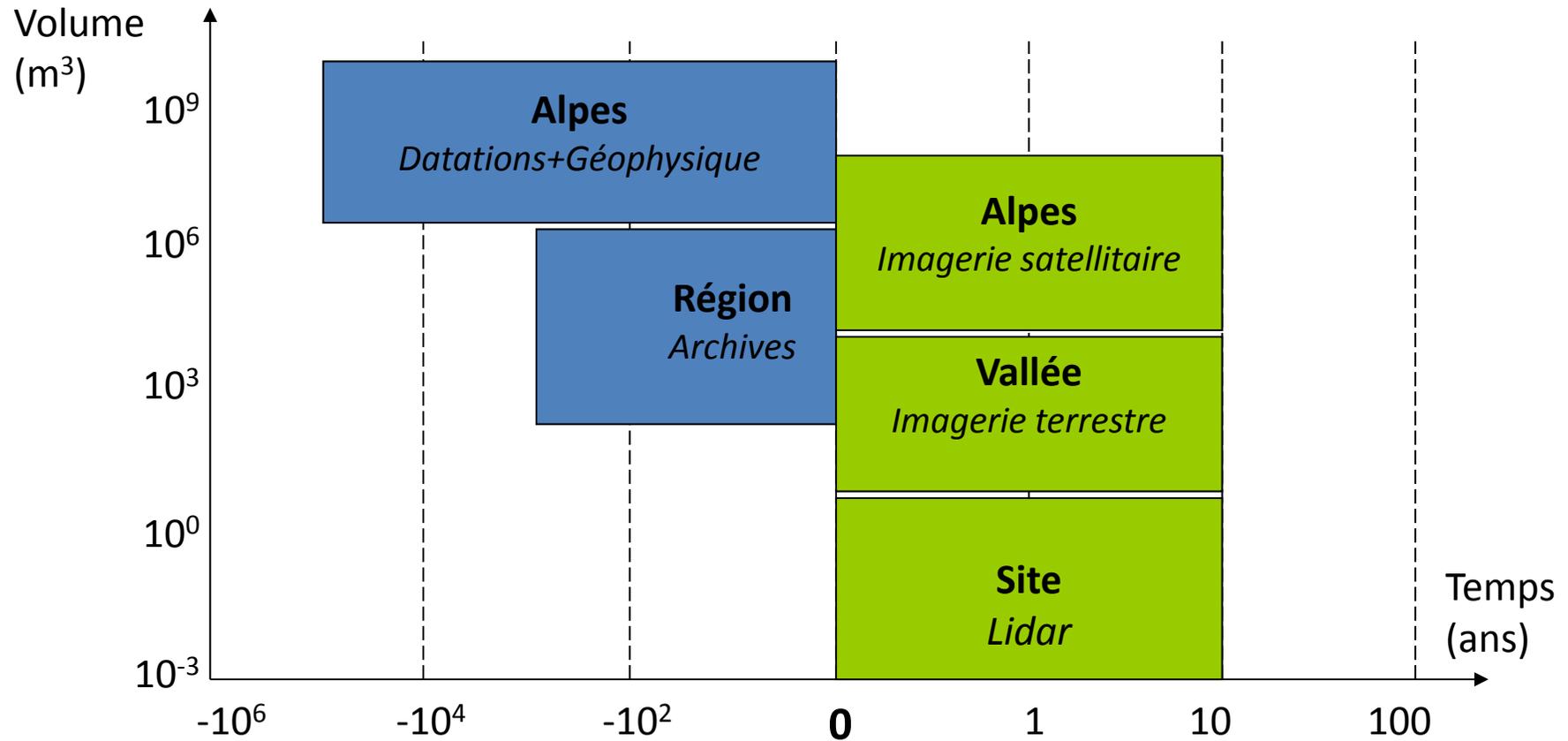
*Moyenne des mesures :  
8500 ans*

**Modèle de recul : 5500 ans**

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

#### Etude des fréquence d'éboulements à différentes échelles spatiales et temporelles

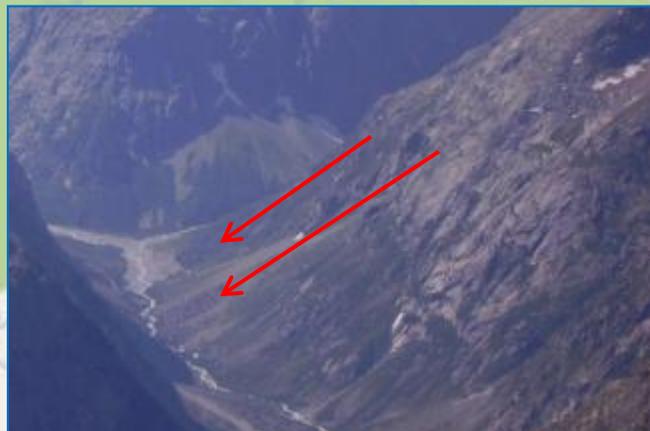
Echelles et méthodes d'observation



# Datations d'éboulements dans la vallée du Vénéon (ISTerre, CNRS-UJF)



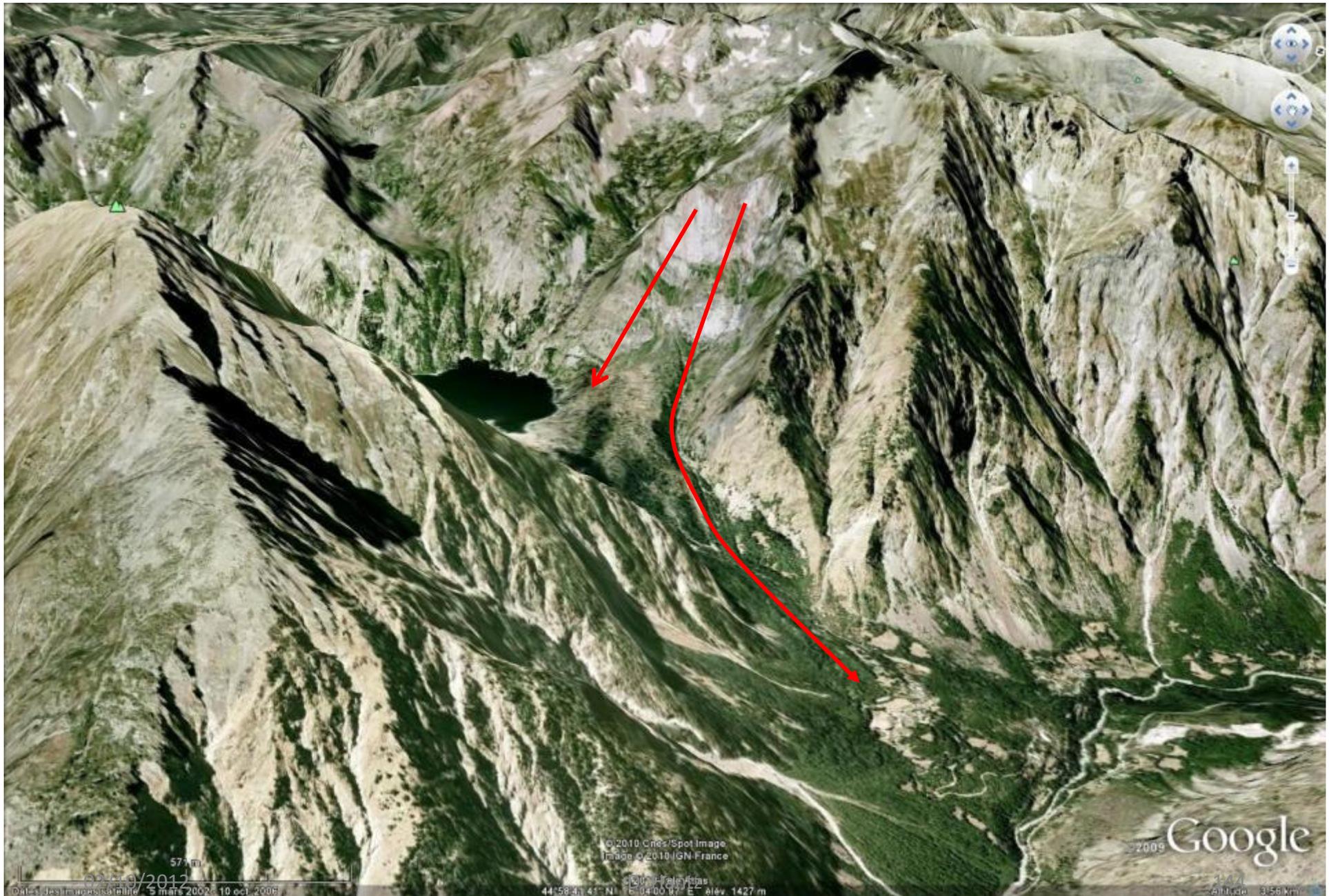
# Datations d'éboulements dans la vallée du Vénéon (ISTerre, CNRS-UJF)



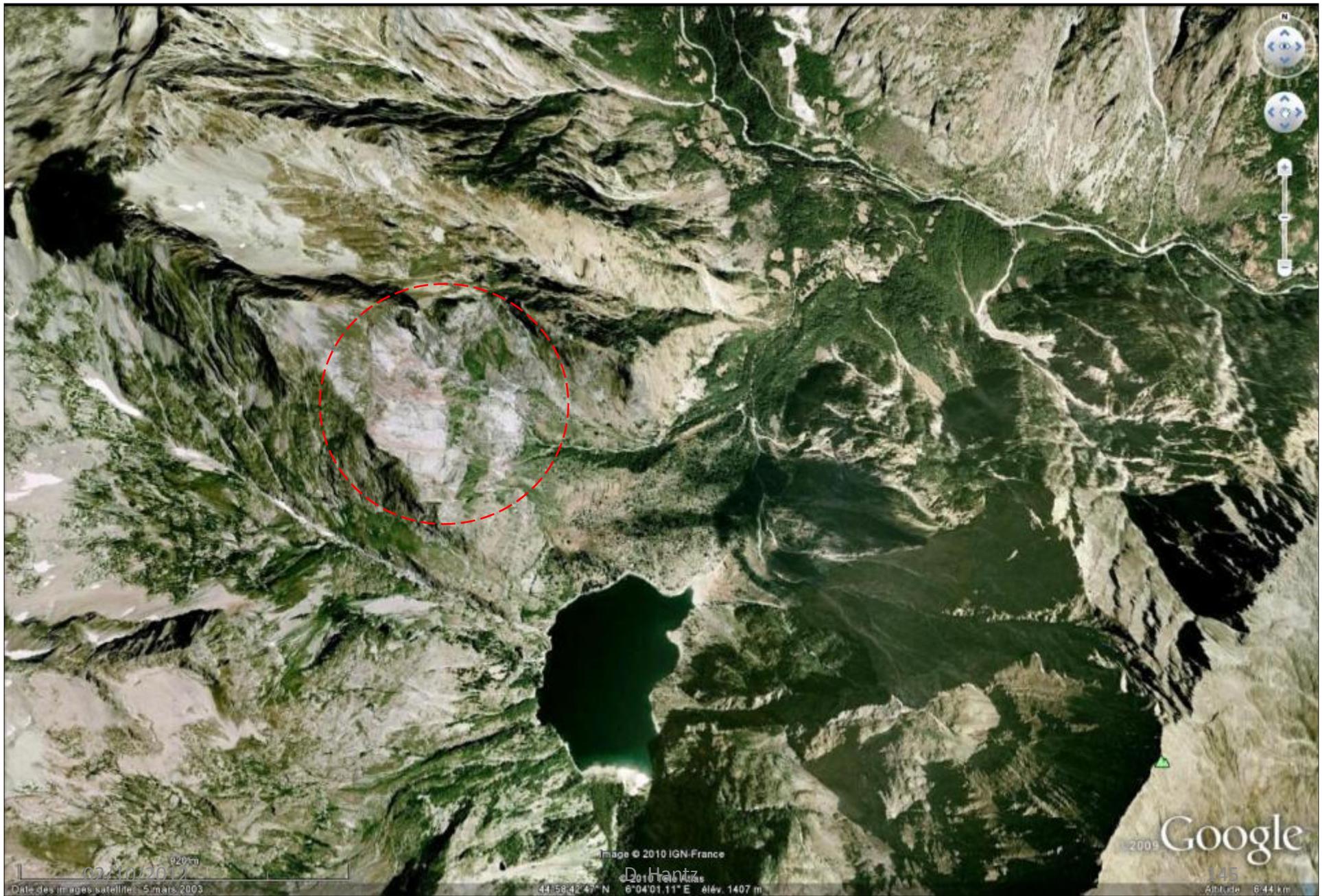
# Eboulement du Lauvitel



# Eboulement du Lauvitel

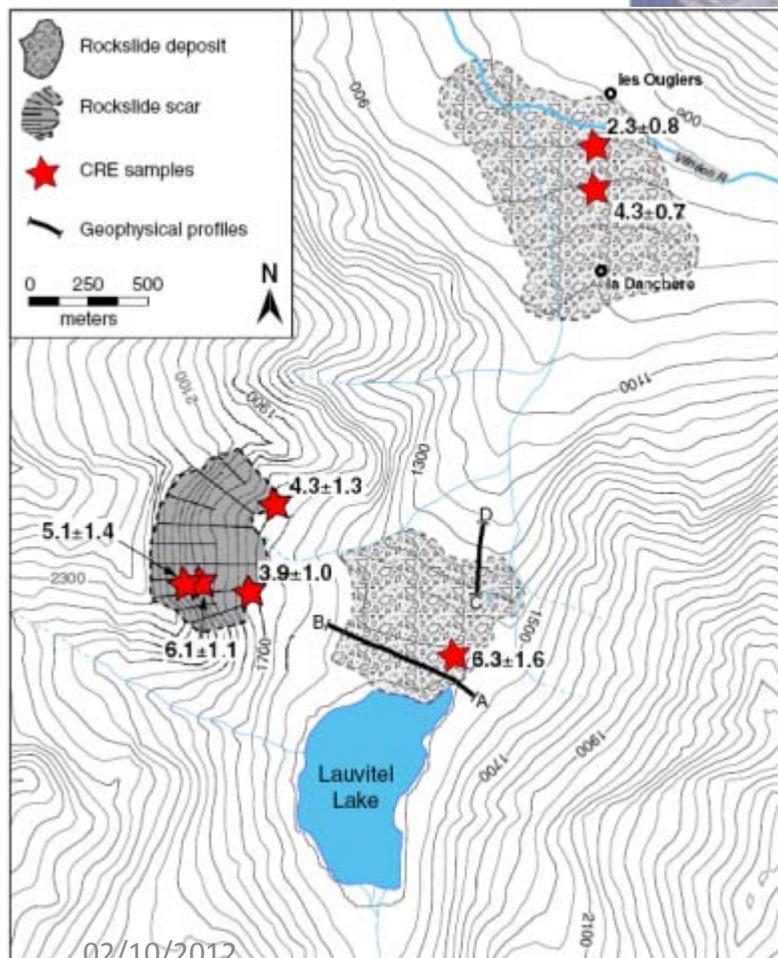
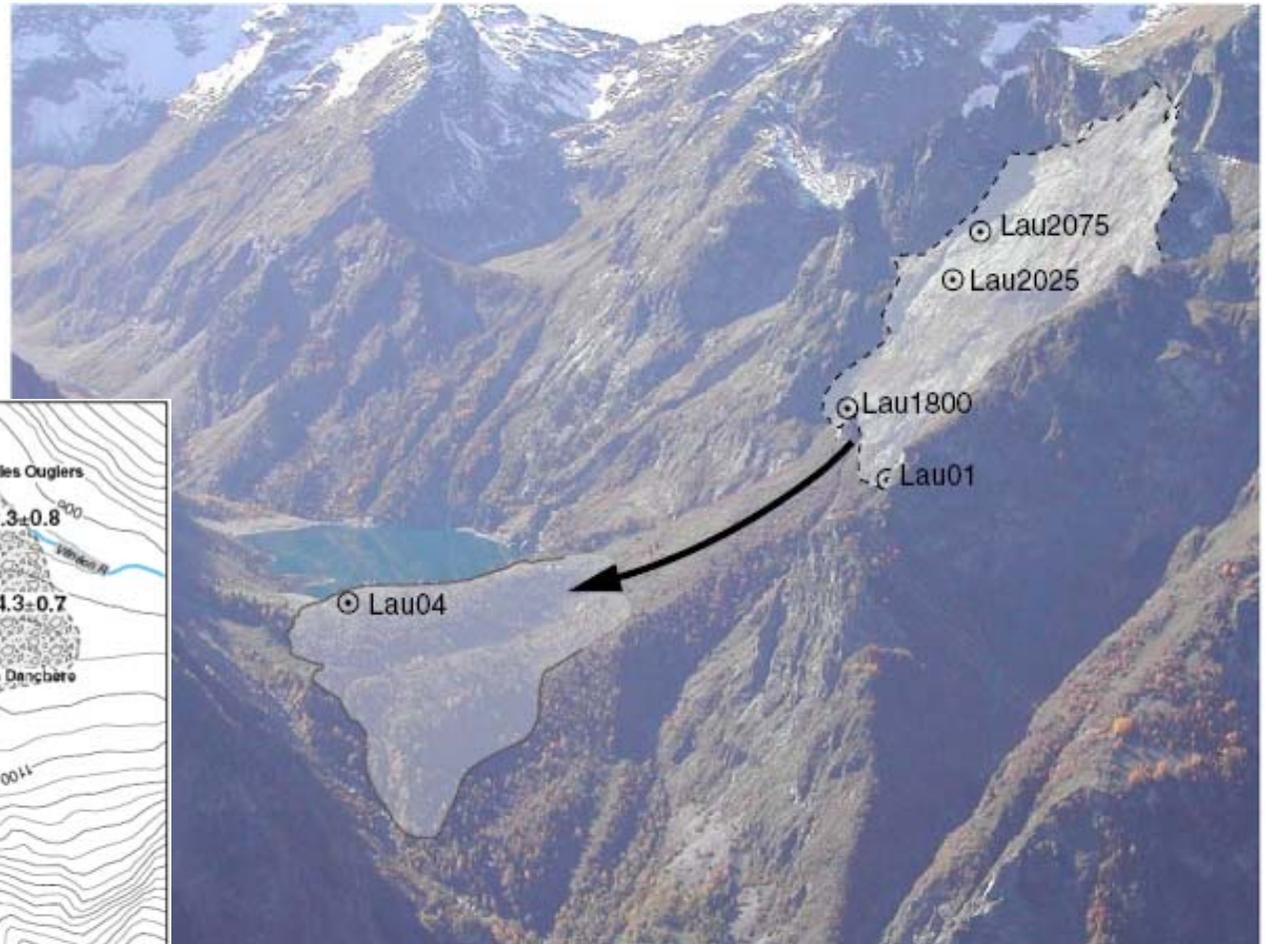


# Eboulement du Lauvitel



# Eboulement du Lauvitel

Localisation des prélèvements



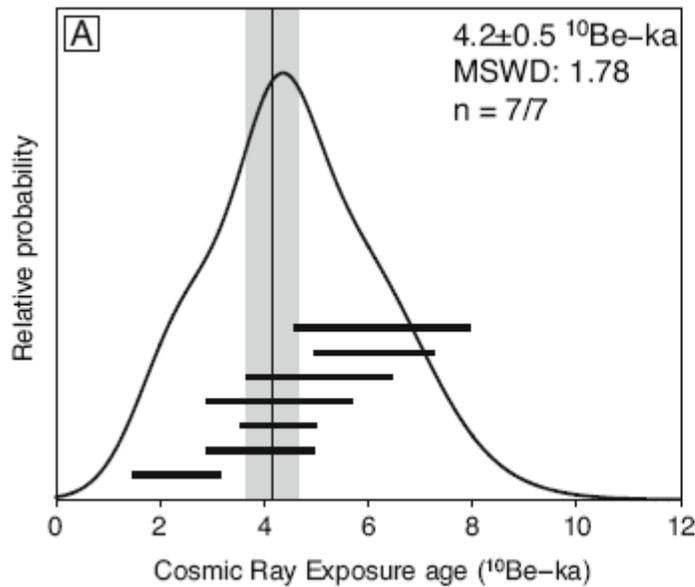
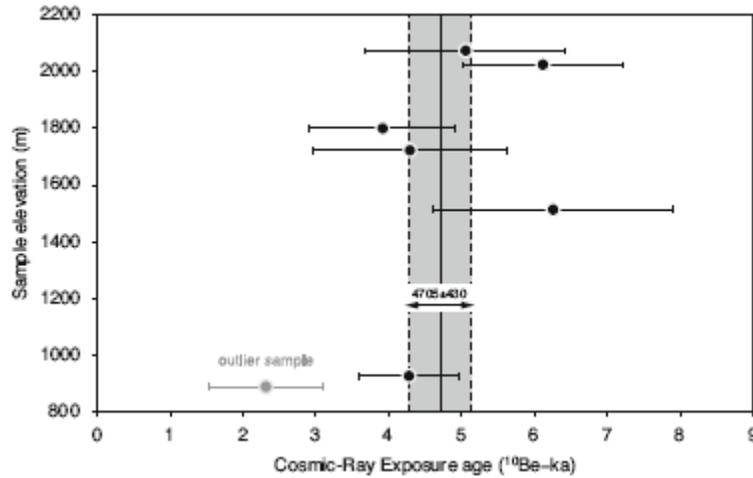
Delunel et al., 2010

## Principe des datations

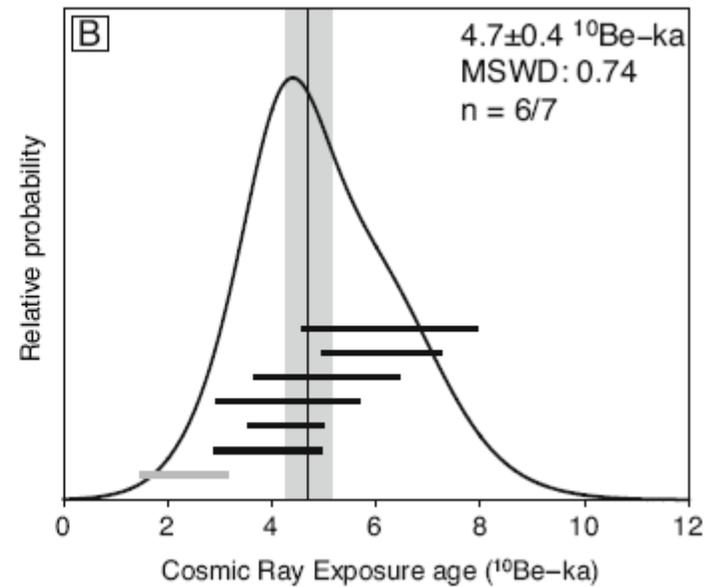
A la suite d'un éboulement, la surface rocheuse est exposée au rayonnement cosmique secondaire (alors qu'auparavant elle en était protégée par plusieurs mètres de roche). Le silicium contenu dans la roche est alors transformé en béryllium. En mesurant la concentration en béryllium, on peut en déduire la durée d'exposition.

D. Hantz

146



Avec Lau 11



Sans Lau 11 (Outlier)

**Volume du barrage :  $12 \pm 4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .**

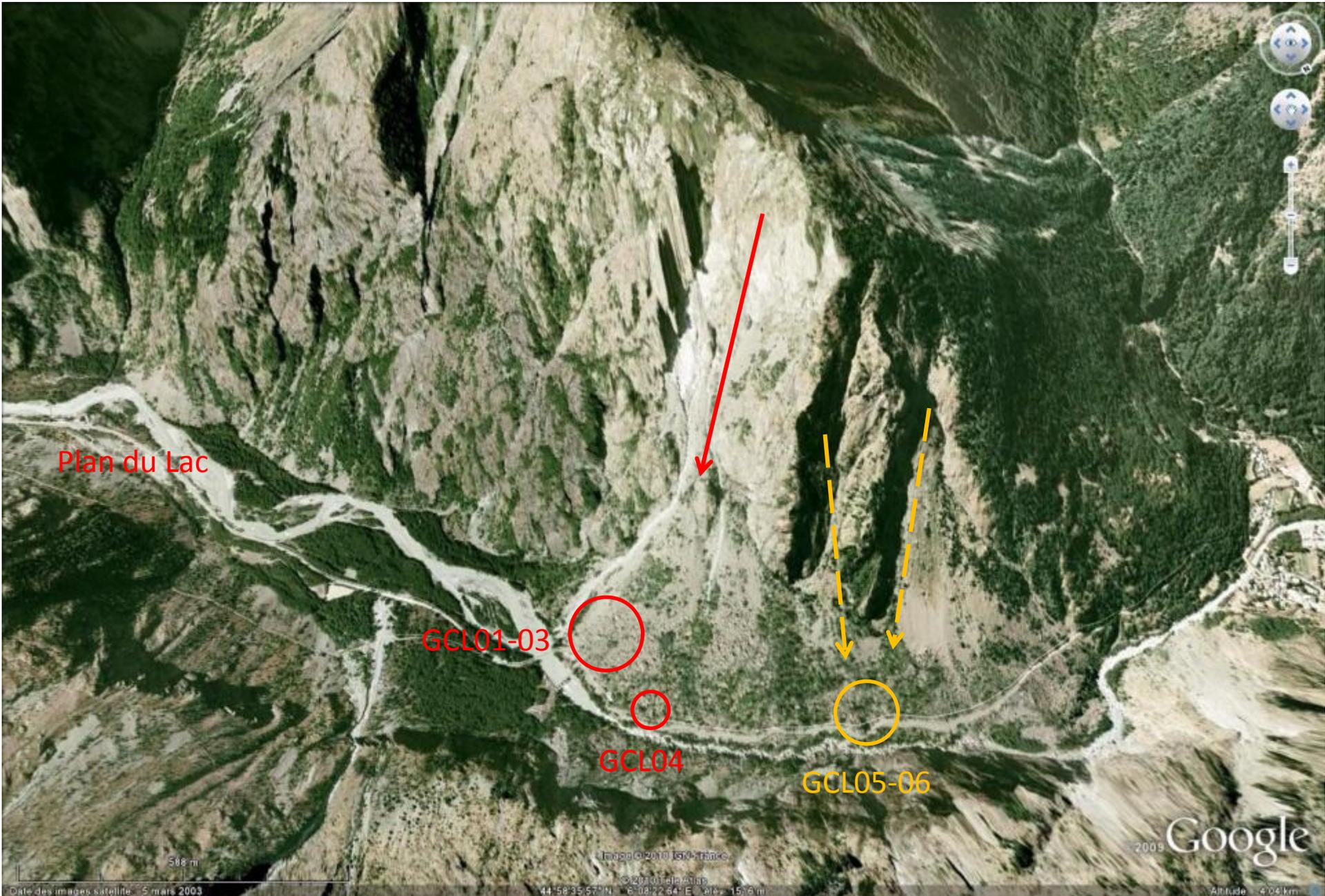
**Volume total éboulé :  $50-70 \cdot 10^6 \text{ m}^3$**

**Eboulement principal  $\sim 4.7 \pm 0.4 \text{ }^{10}\text{Be-ka}$  (MSWD 0.74, n=6)**

02/10/2012

D. Hantz

**Remarque: la date la plus récente peut être due à l'érosion du dépôt par le Vénéon**



Plan du Lac

GCL01-03

GCL04

GCL05-06

Date des images satellite : 5 mars 2003

© 2011 Google  
44°58'35.57"N 6°08'22.54"E Elev. 1516 m

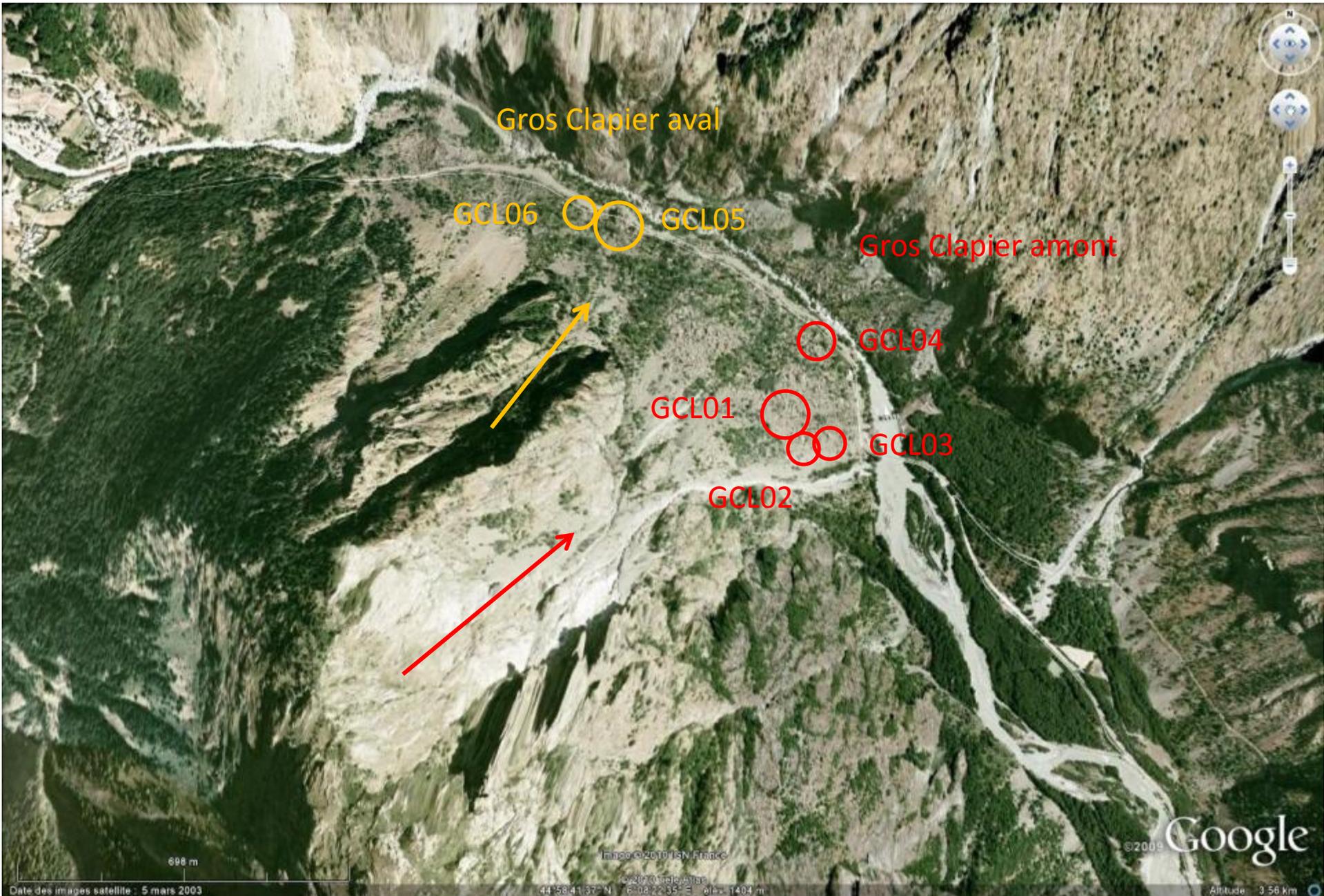
D. Hantz

2005 Google

Altitude 4.04 km  
148



Plan du Lac



02/10/2012

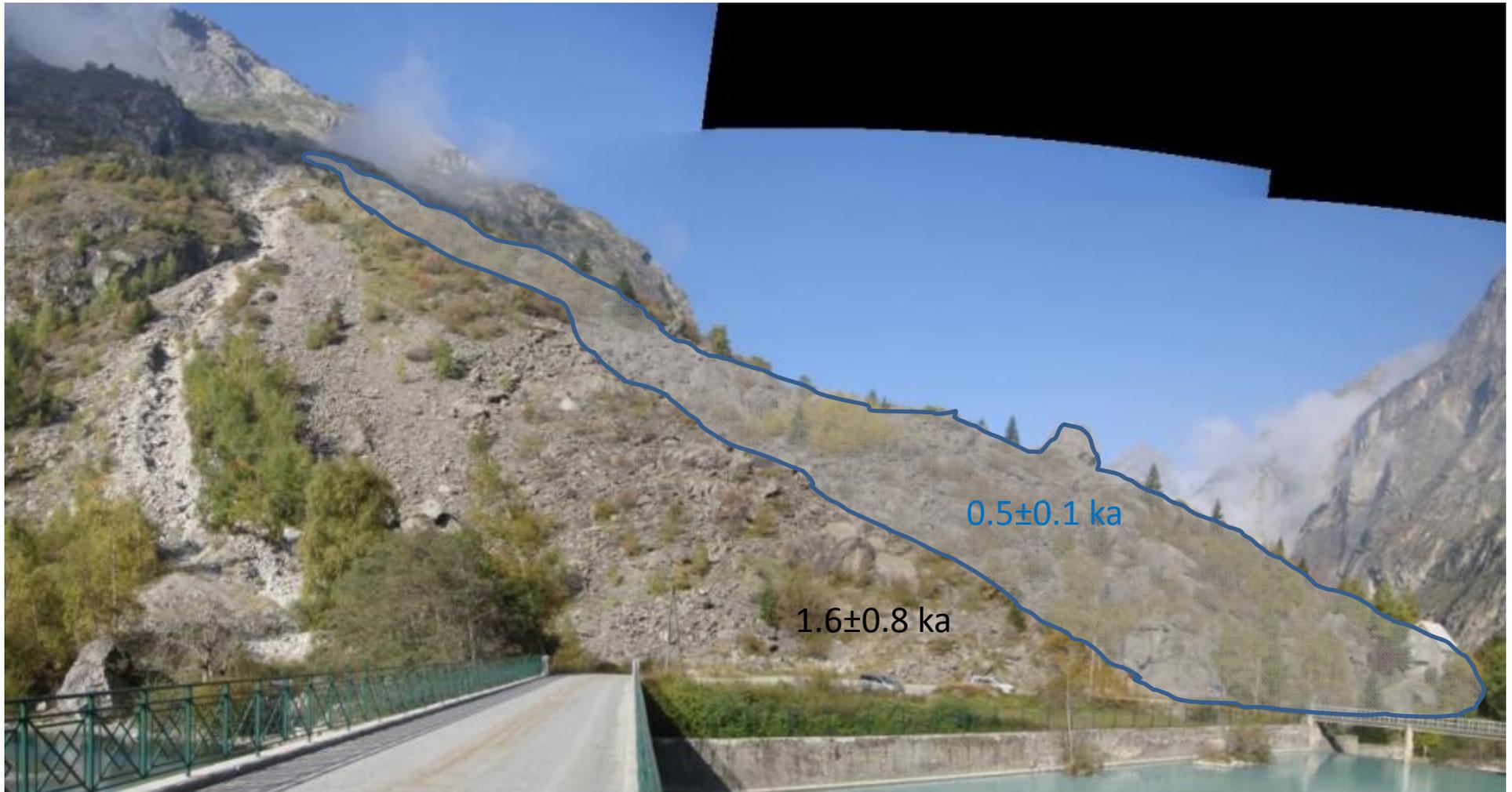
D. Hantz

150



# Eboulement du Gros Clapier

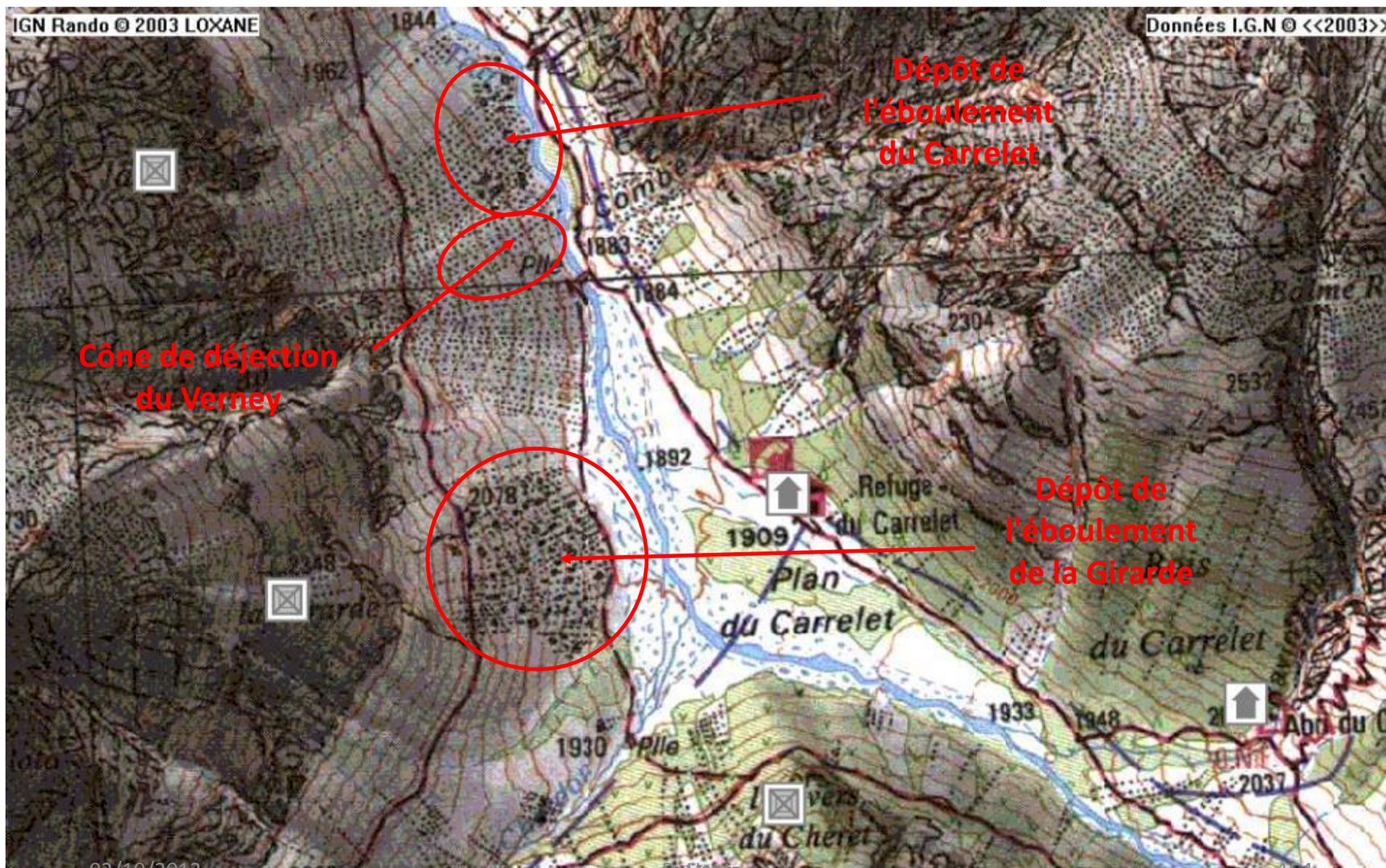




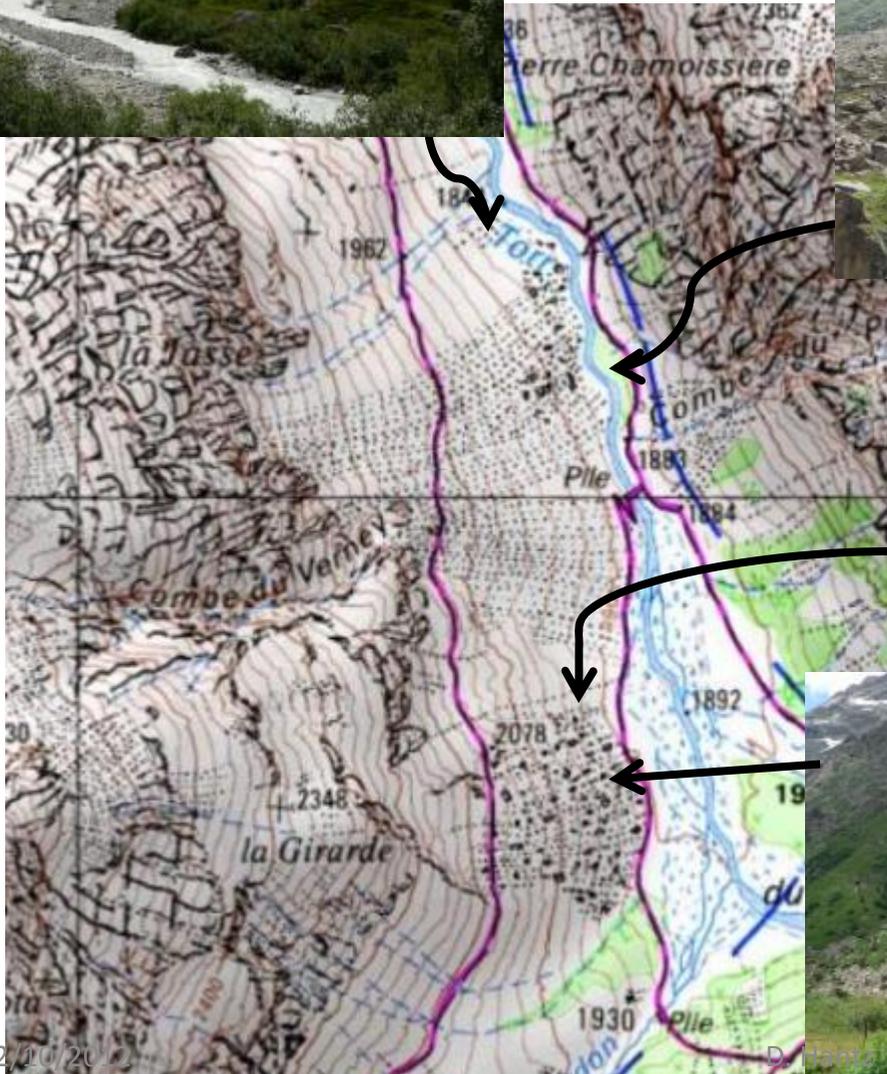
Gros Clapier amont

- 2 phases
- 1.6±0.8 ka
- 0.5±0.1 ka (moyenne pondérée)

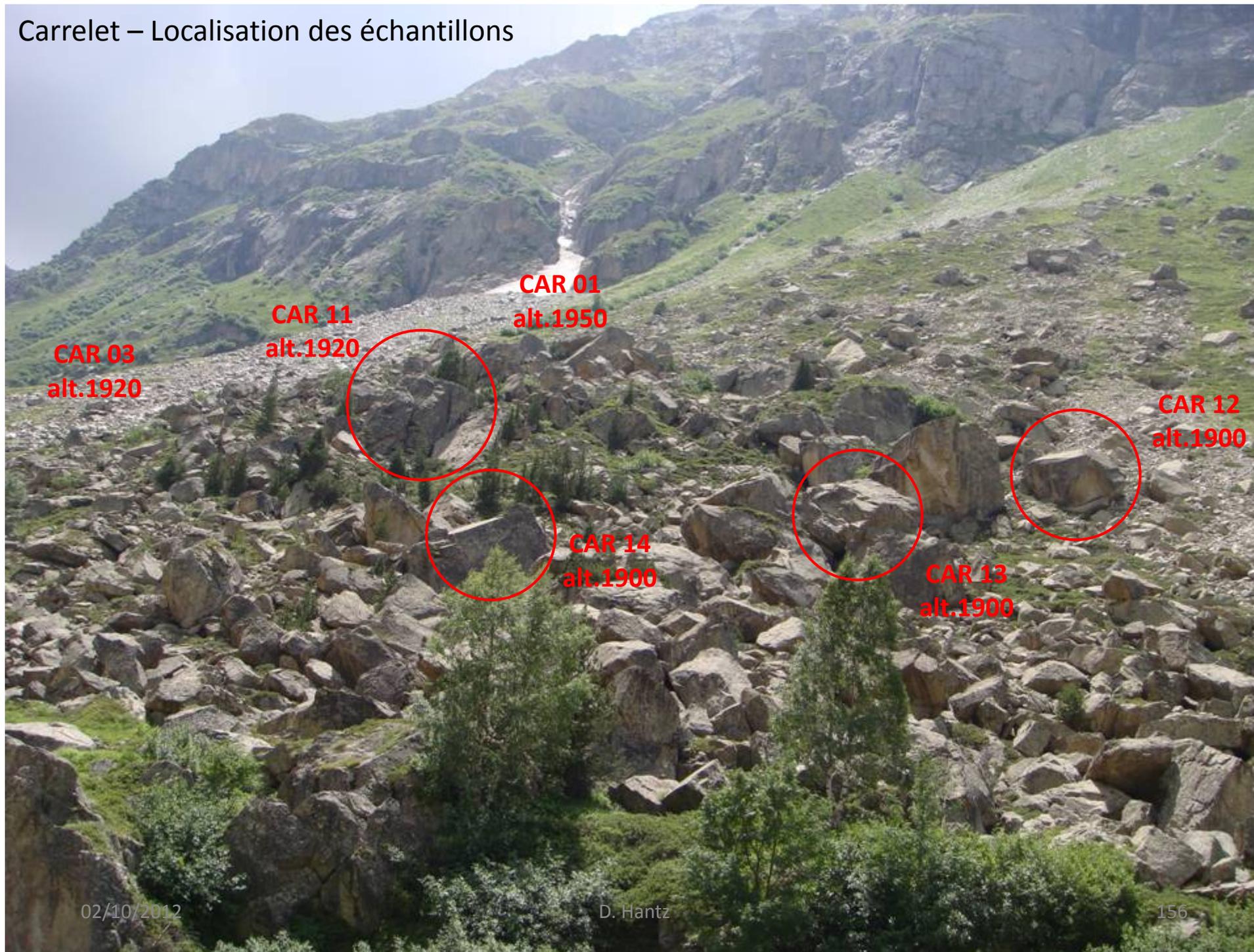
## Eboulements du Plan du Carrelet



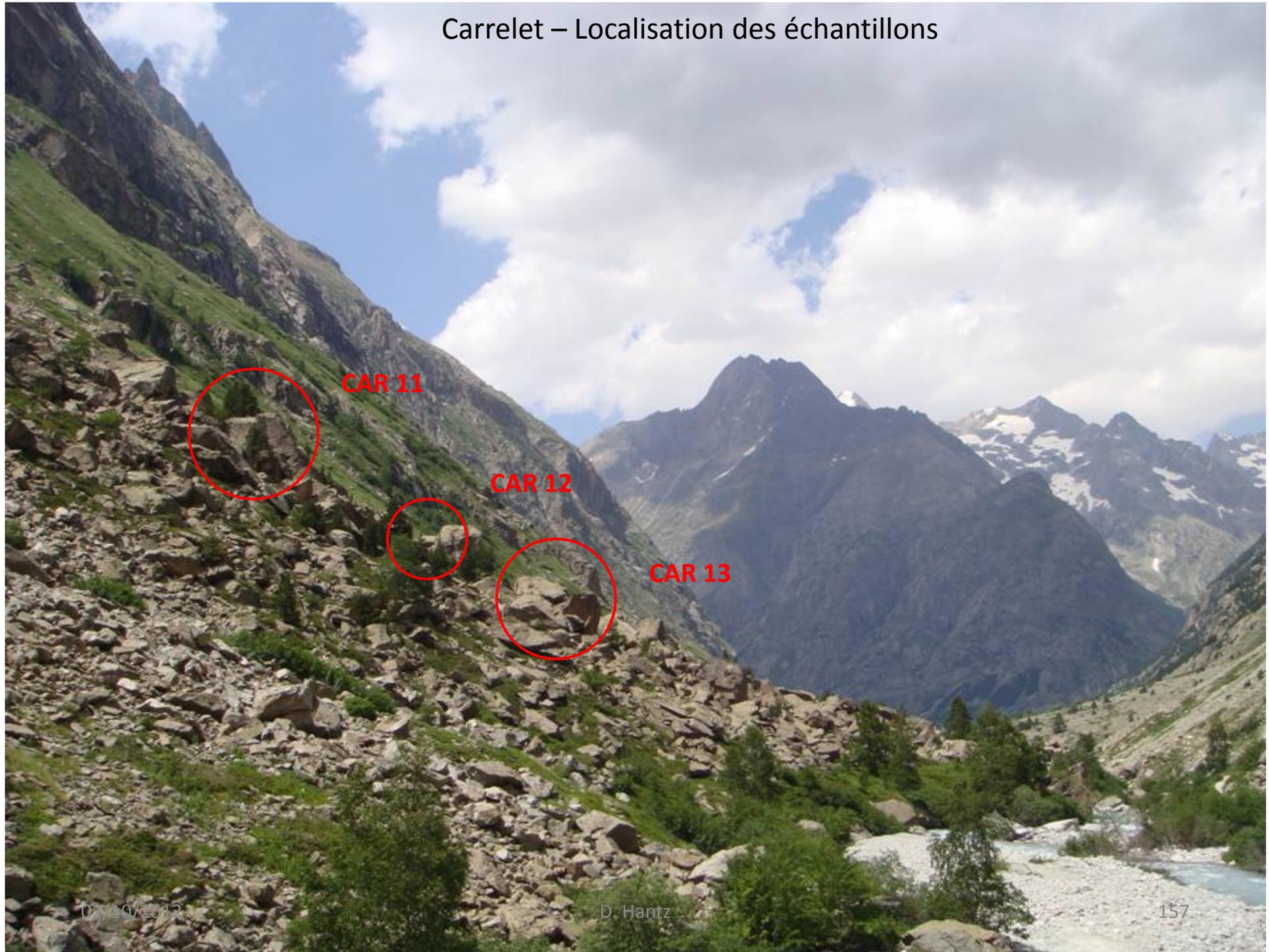
# Eboulements du Carrelet et de la Girarde



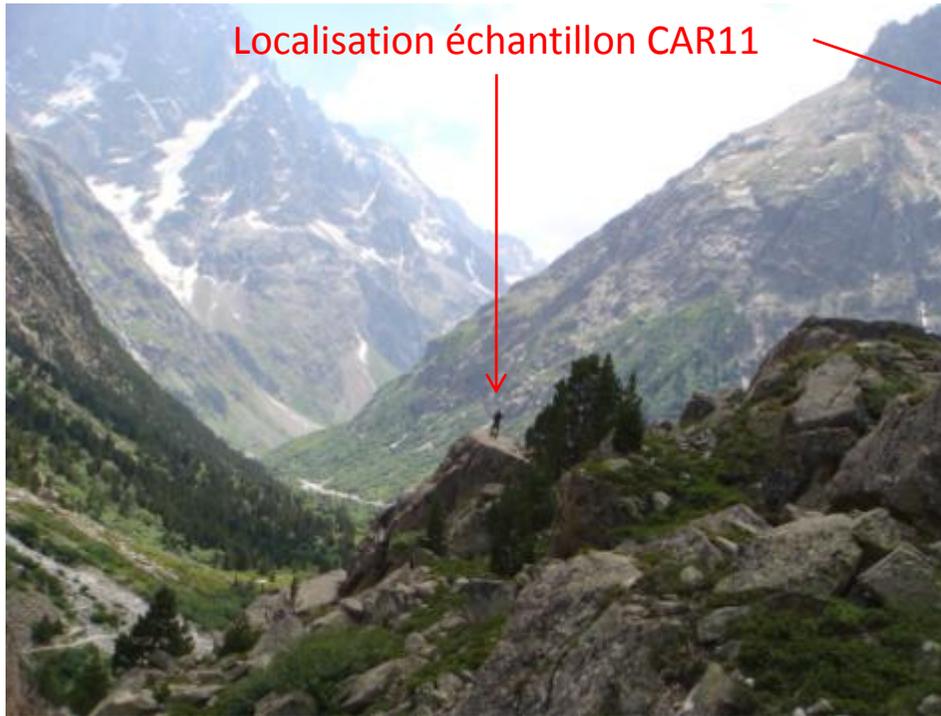
# Carrelet – Localisation des échantillons



## Carrelet – Localisation des échantillons



Localisation échantillon CAR11



Localisation échantillon CAR12

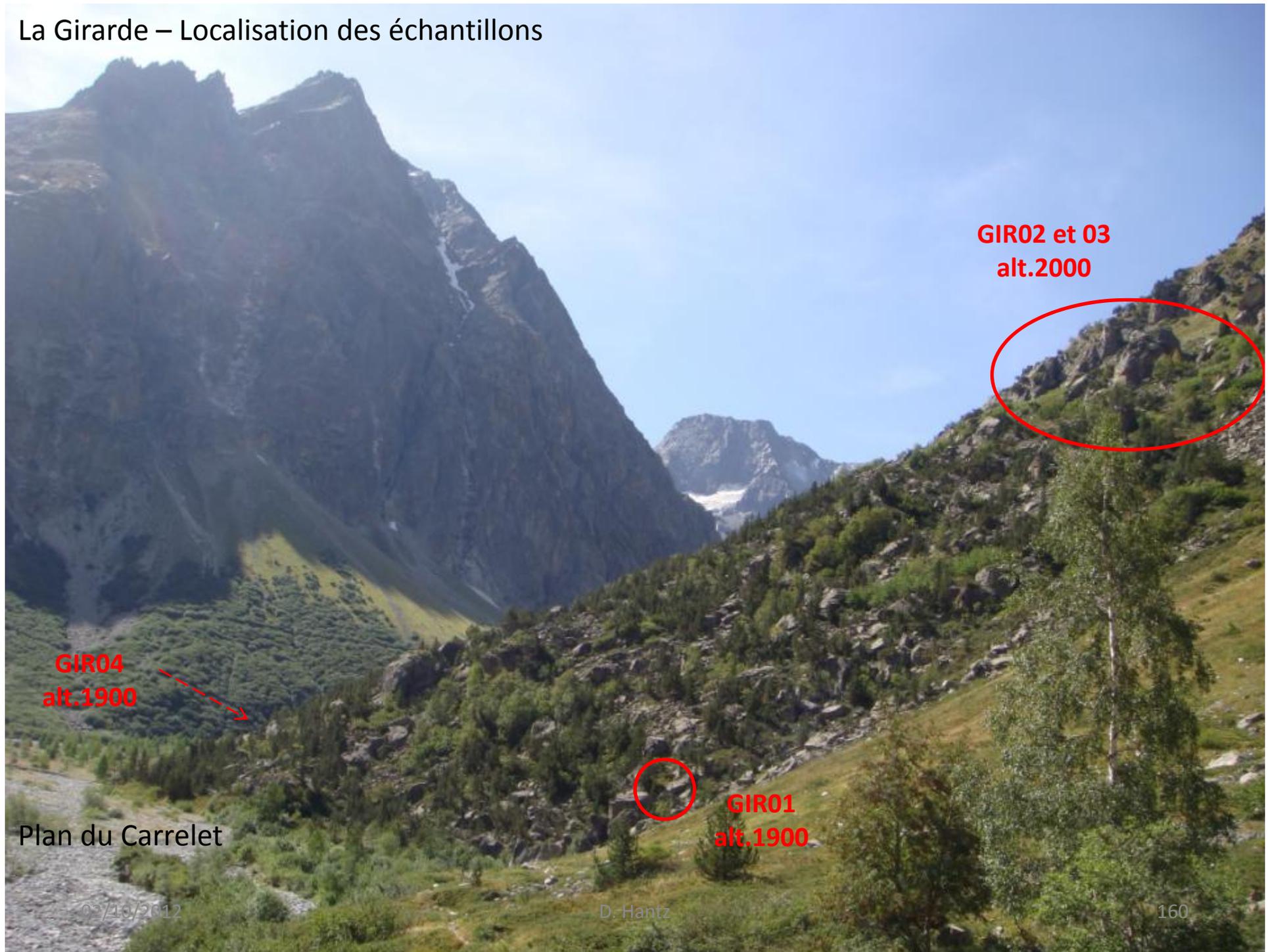


La Girarde

**GIR02 et 03  
alt.2000**

**GIR01**

# La Girarde – Localisation des échantillons



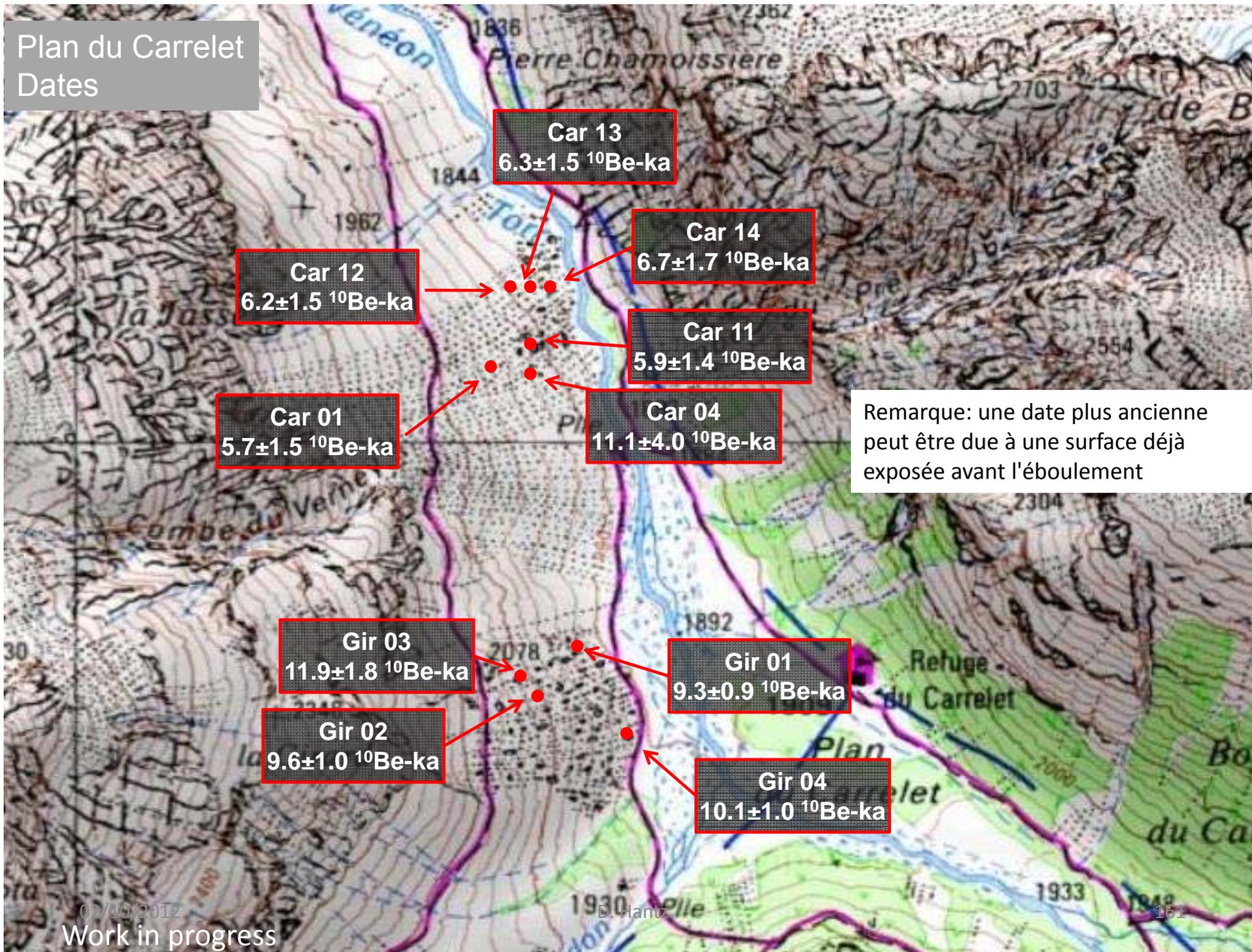
**GIR02 et 03  
alt.2000**

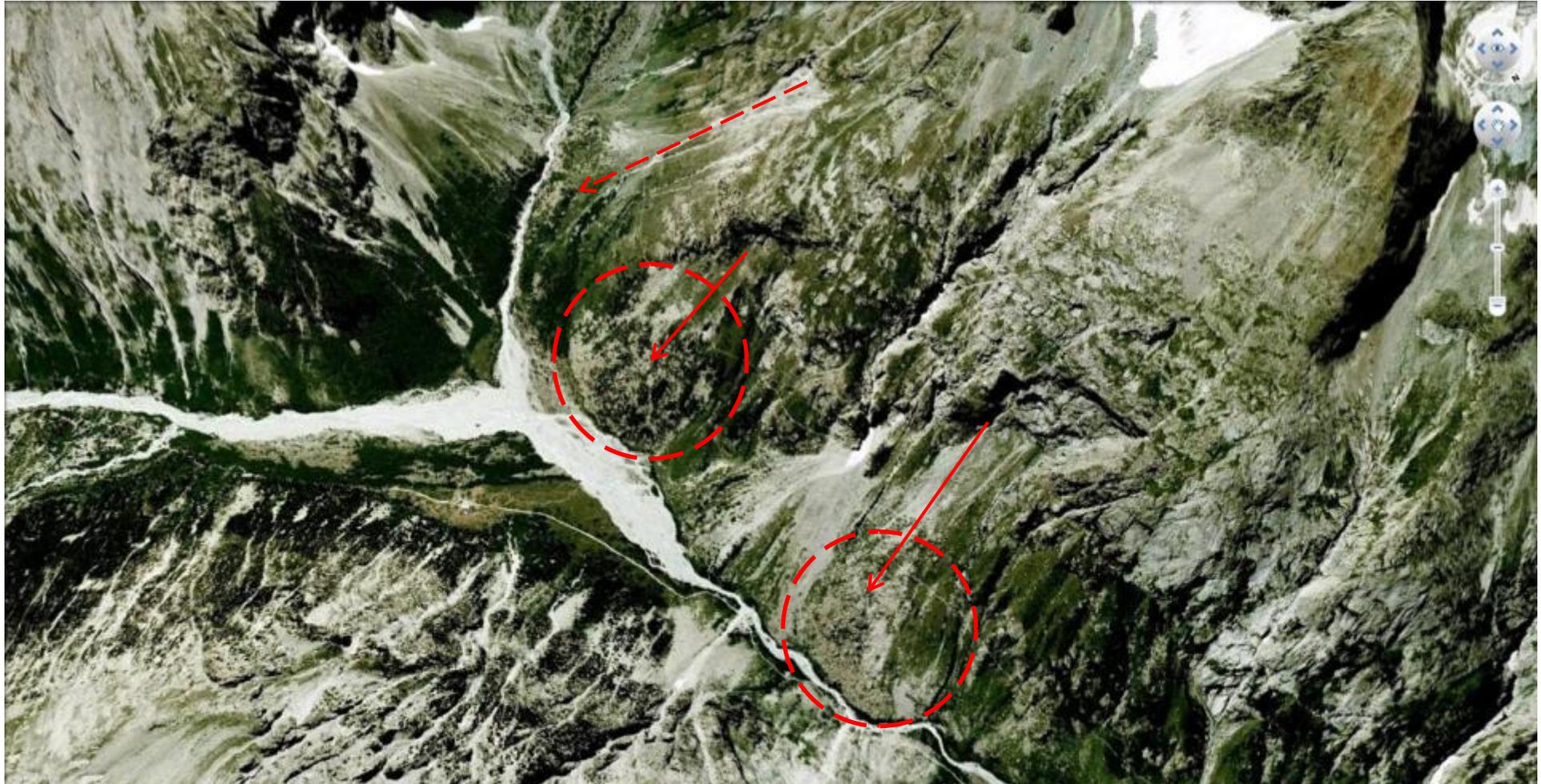
**GIR04  
alt.1900**

**GIR01  
alt.1900**

Plan du Carrelet

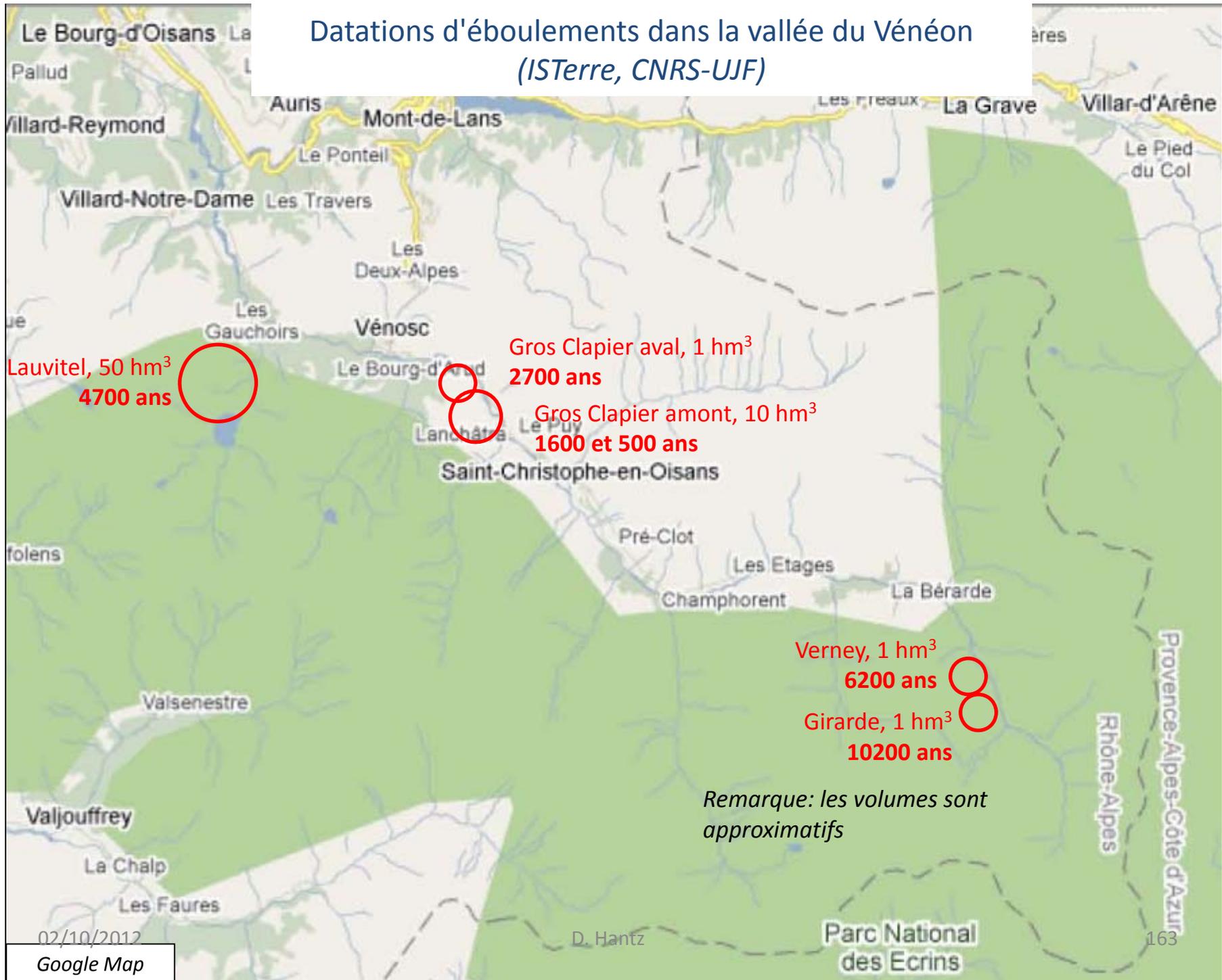
# Plan du Carrelet Dates





La végétation plus abondante sur le dépôt de la Girarde que sur celui du Carrelet, confirme la date plus récente de ce dernier.  
Un troisième éboulement semble s'être produit dans le vallon du Chardon (flèche en tirets)

# Datations d'éboulements dans la vallée du Vénéon (ISTerre, CNRS-UJF)



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

#### Distribution temporelle des éboulements rocheux

##### Loi de Poisson

Probabilité que n évènements se produisent durant une période t :

$$p(n) = \frac{e^{-\mu} \mu^n}{n!}$$

$\mu$  : nombre moyen d'évènements durant une période t

$\mu = F t$  (F : fréquence)

Probabilité qu'il se produise au moins 1 évènement durant une période t :

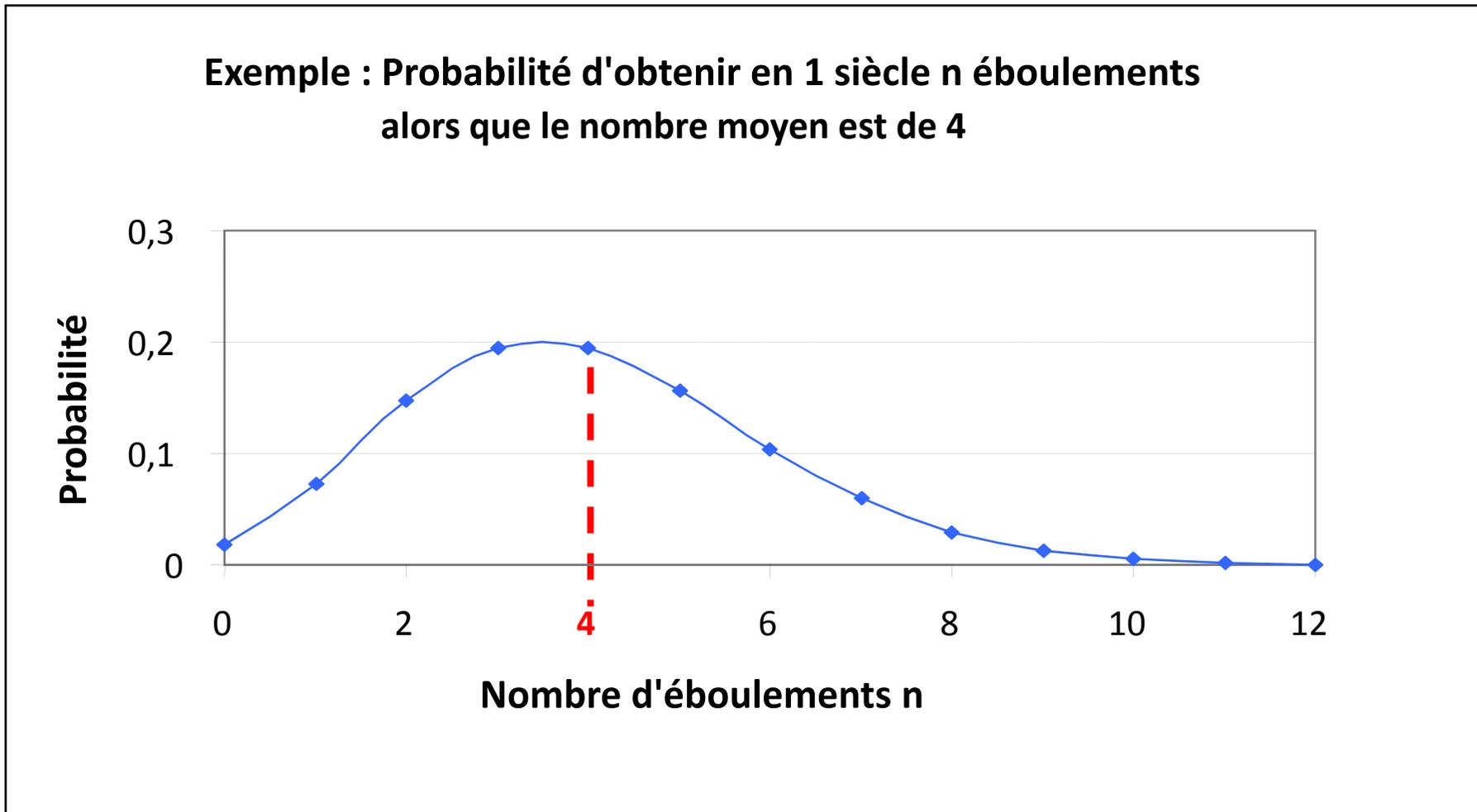
$$p(n > 0) = 1 - e^{-\mu} = 1 - e^{-Ft}$$

Si  $Ft \ll 1$  (ou  $t < T$ ),  $p(n > 0) \approx Ft$

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

## Distribution temporelle des éboulements rocheux

### Loi de Poisson



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

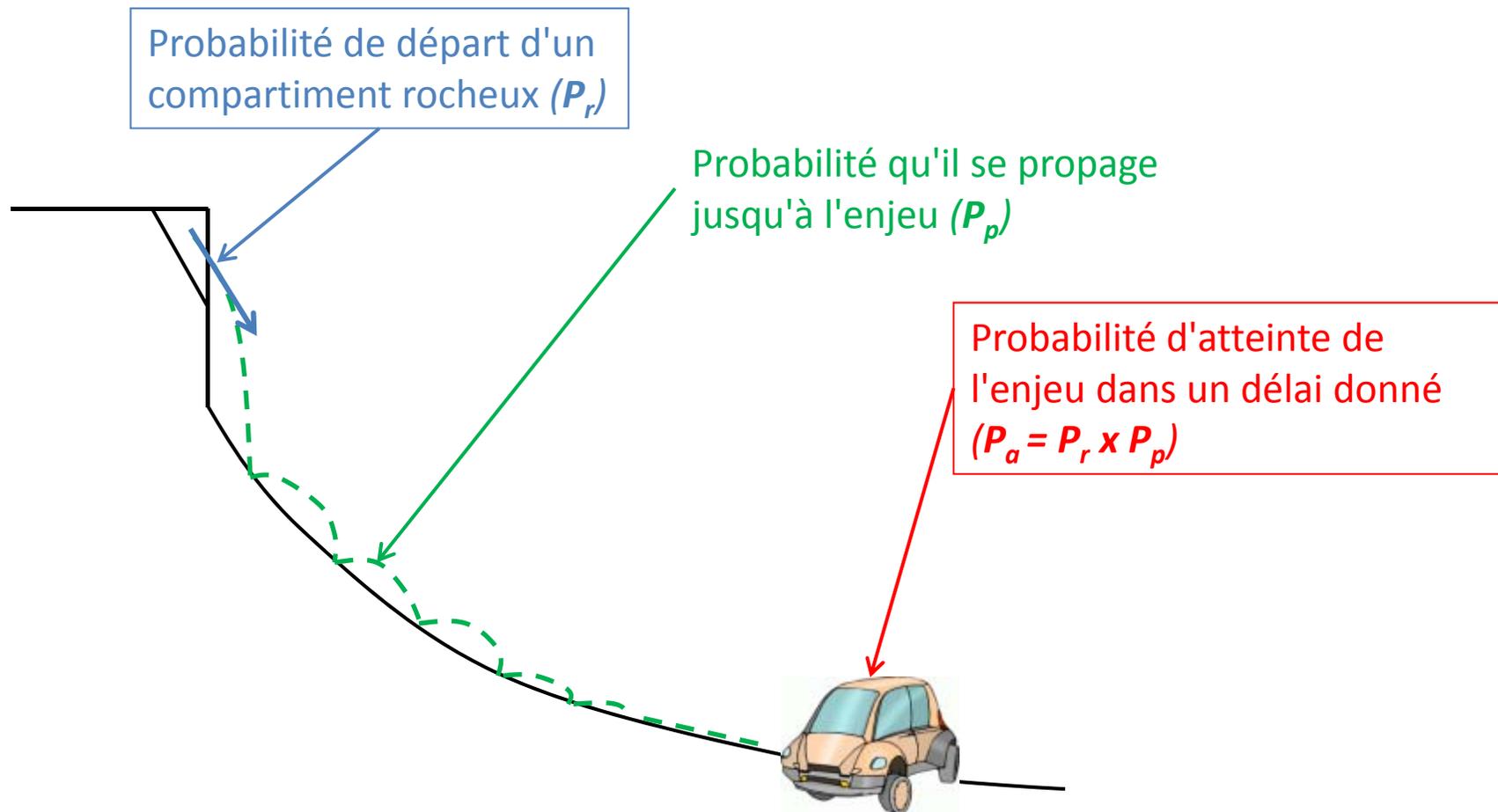
#### Evaluation de la probabilité d'occurrence d'un aléa diffus

- La connaissance de la **fréquence** de départ (ou de rupture) sur une zone de falaise donnée permet l'évaluation de la **probabilité** qu'au moins un départ de volume minimal donné se produise dans cette zone dans une période donnée, **mais sans préciser où**.
- Si la zone peut être considérée comme **homogène** (même probabilité d'éboulement en tout point), on peut définir une **fréquence spatio-temporelle** (nombre d'éboulements par unité de temps et d'espace)
- Unité d'espace : **surface** ou **longueur**

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

#### Evaluation quantitative de l'aléa d'éboulement en pied de falaise

Objectif d'une étude d'aléa rocheux



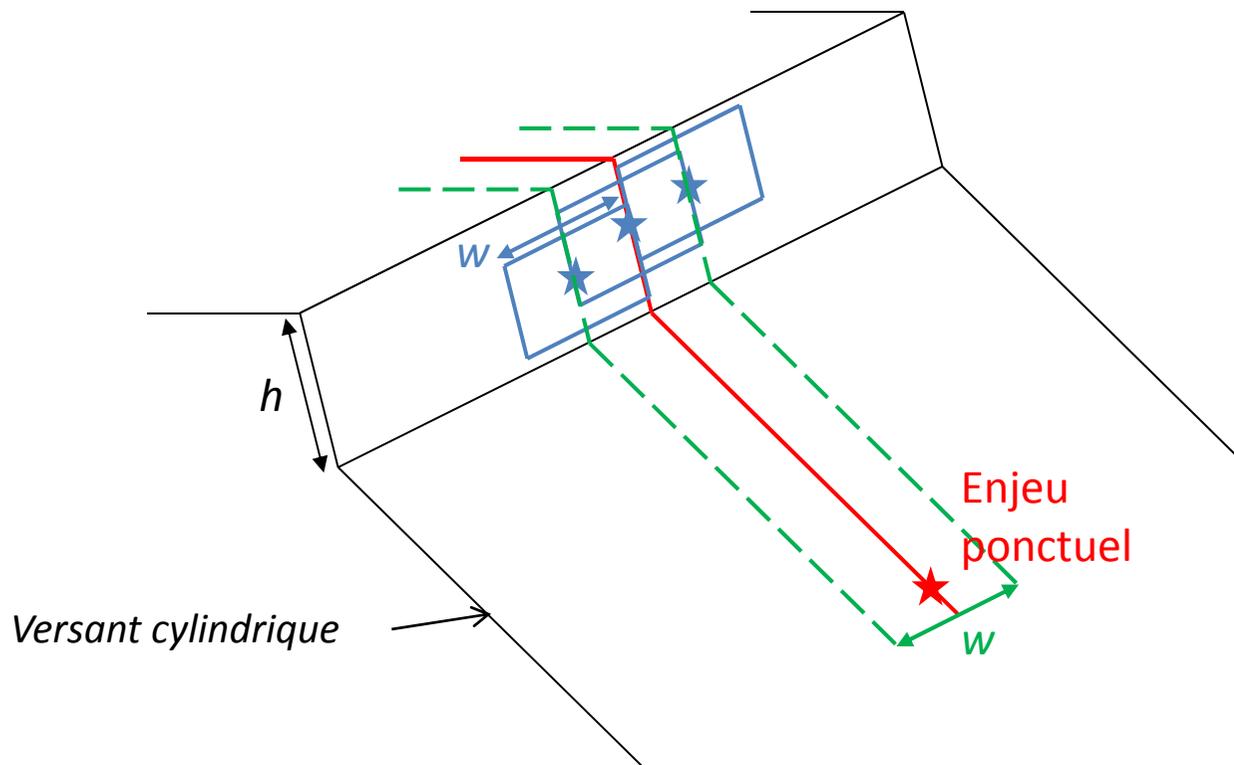
### 3. EVALUATION DE L'ALEA - 3.4. Approche historique

#### Evaluation quantitative de l'aléa d'éboulement en pied de falaise (aléa diffus)

Dans une paroi homogène, la probabilité de départ dépend de la fréquence d'éboulement, qui peut être déterminée à partir d'un inventaire

Fréquence de rupture spatio-temporelle  $F_{st}$  = nombre d'éboulements par  $m^2$  et par an

Pour des compartiments de largeur  $w$ , la fréquence de départ des éboulements menaçant un enjeu ponctuel est :  $F_r = F_{st} h w$



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

#### Evaluation quantitative de l'aléa d'éboulement en pied de falaise (Hantz, 2010)

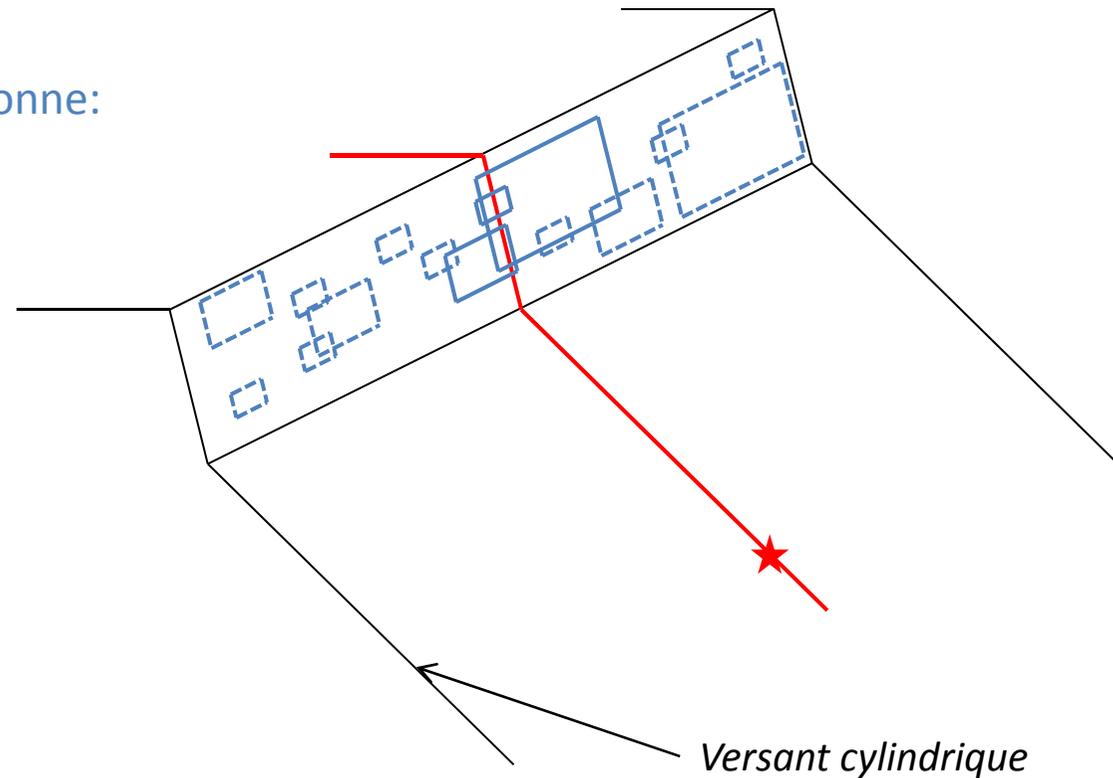
Pour des compartiments de largeur comprise entre  $w$  et  $w+dw$ , la fréquence de départ à considérer est :  $dF_r = dF_{st} h w$

Or la fréquence  $F_{st}$  et la largeur  $w$  sont reliés au volume  $V$  de l'éboulement:

$$F_{st} = aV^{-b} \text{ et } V = kw^3$$

L'intégration entre  $V_{min}$  et  $V_{max}$  donne:

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



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

#### Evaluation quantitative de l'aléa d'éboulement en pied de falaise (Hantz, 2010)

Pour des compartiments de largeur comprise entre  $w$  et  $w+dw$ , la fréquence de départ à considérer est :  $dF_r = dF_{st} h w$

Or la fréquence  $F_{st}$  et la largeur  $w$  sont reliés au volume  $V$  de l'éboulement:

$$F_{st} = aV^{-b} \text{ et } V = kw^3$$

L'intégration entre  $V_{min}$  et  $V_{max}$  donne:

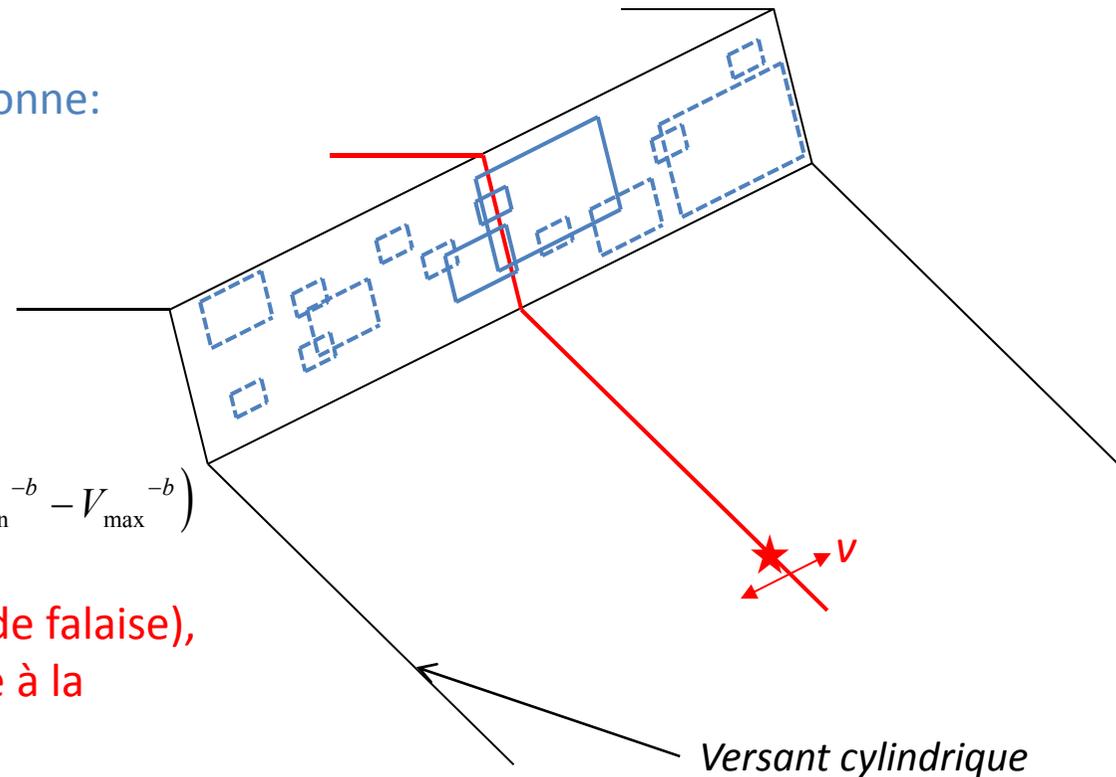
$$F_r = \frac{3abhk^{-\frac{1}{3}}}{(3b-1)} \left( V_{min}^{\frac{1}{3}-b} - V_{max}^{\frac{1}{3}-b} \right)$$

Pour un enjeu de largeur  $v$ :

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

Si  $P_p = 1$  (enjeu proche du pied de falaise),  
la fréquence d'atteinte est égale à la  
fréquence de rupture  $F_r$

Si  $V_{min}$  tend vers 0,  $F_r$  tend vers l'infini



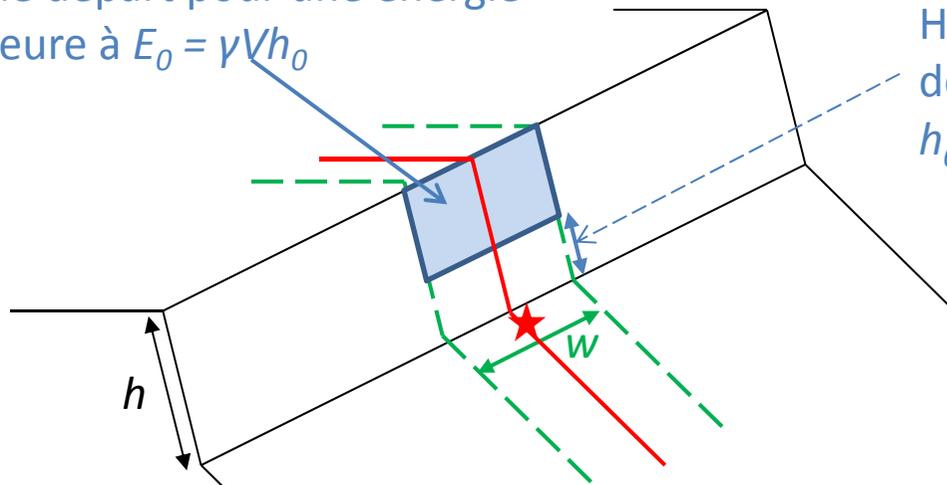
### 3. EVALUATION DE L'ALEA - 3.4. Approche historique

#### Evaluation quantitative de l'aléa d'éboulement en pied de falaise (Hantz, 2010)

Prise en compte d'une énergie cinétique minimale  $E_0$   
(cas d'un enjeu en pied de falaise)

Zone de départ pour une énergie  
supérieure à  $E_0 = \gamma V h_0$

Hauteur minimale à considérer pour  
des volumes entre  $V$  et  $V+dV$ :  
 $h_0 = E_0 / \gamma V$



Versant cylindrique

On obtient:

$$F_a = F_r - \frac{3abk}{\gamma(3b+2)} \frac{E_0}{V} \left( V_{\min}^{-b-\frac{2}{3}} - V_{\max}^{-b-\frac{2}{3}} \right) - \frac{abvE_0}{\gamma(b+2)} \left( V_{\min}^{-b-1} - V_{\max}^{-b-1} \right)$$

avec  $V_{\min} = E_0 / \gamma h$

Période de retour:  $T_a = 1/F_a$

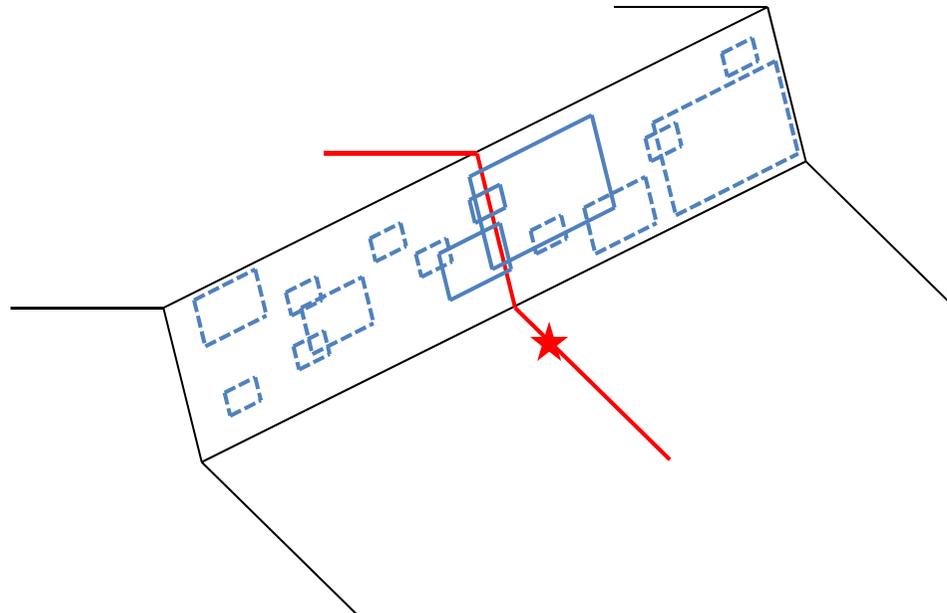
### 3. EVALUATION DE L'ALEA - 3.4. Approche historique

#### Evaluation quantitative de l'aléa d'éboulement en pied de falaise (Hantz, 2010)

Probabilité que l'enjeu soit atteint par au moins 1 éboulement

Avec une distribution temporelle de Poisson:  $P_a = 1 - e^{-\frac{t}{T_a}}$

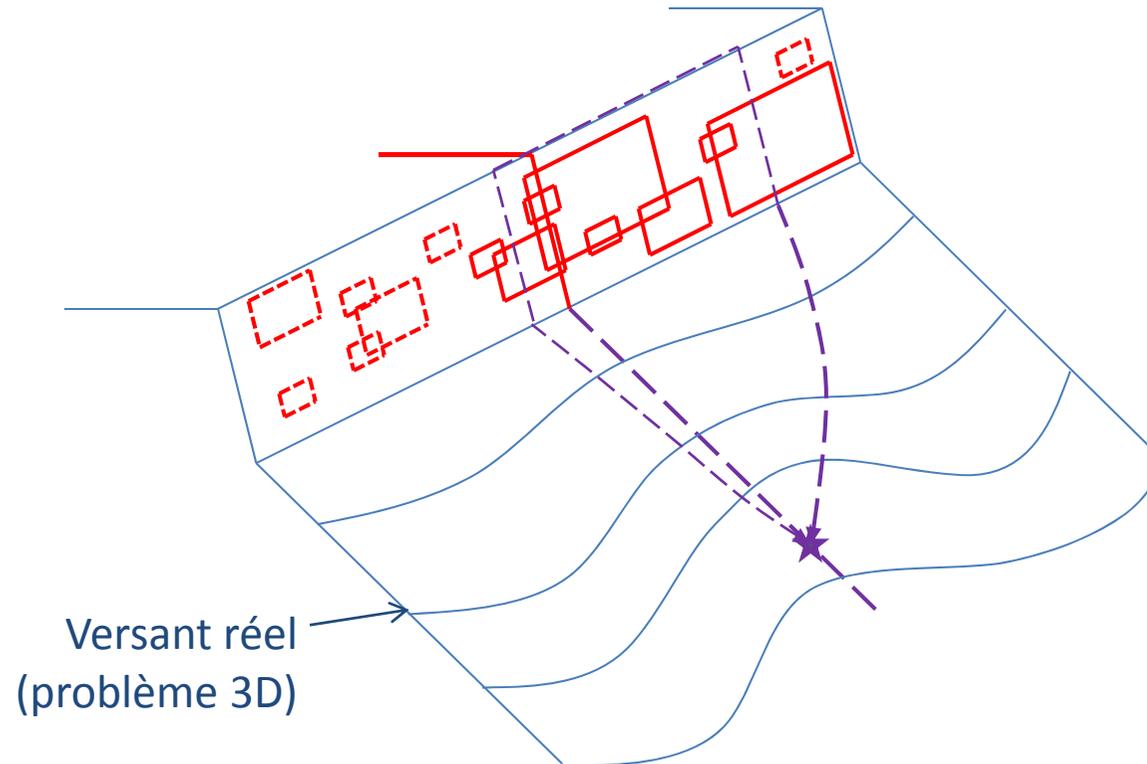
Pour une durée t petite devant la période de retour  $T_a$ :  $P_a = t / T_a$



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

#### Evaluation quantitative de l'aléa d'éboulement en pied de falaise (Hantz, 2010)

Enjeu éloigné de la falaise et versant non cylindrique



- La largeur de falaise à considérer dépend de la topographie du versant
- La probabilité de propagation dépend des volumes des blocs

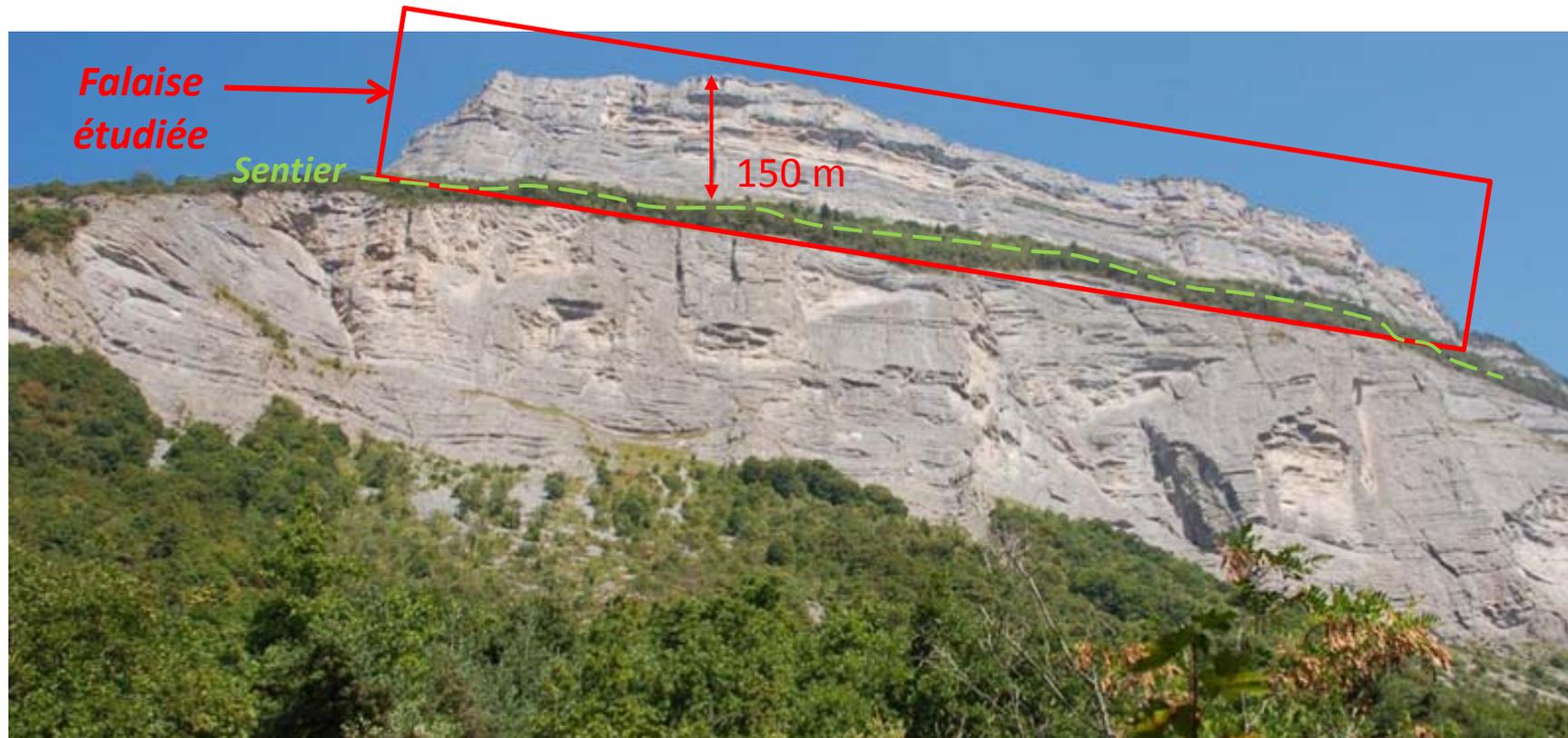
### 3. EVALUATION DE L'ALEA - 3.4. Approche historique

#### Evaluation quantitative de l'aléa d'éboulement en pied de falaise (Hantz, 2010)

Application au sentier du Saint-Eynard

Fréquence spatio-temporelle déterminée sur les 120 km de falaise de la région grenobloise, à partir d'un inventaire RTM :

$$F_{st} = 5.10^{-7} V^{0,55} \text{ éboulement.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$$



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

#### Evaluation quantitative de l'aléa d'éboulement en pied de falaise (Hantz, 2010)

Application au sentier du Saint-Eynard

*Aléa*

Fréquence d'atteinte d'un enjeu de 0,5 m (piéton), avec une énergie d'au moins 0,025 kJ, sous une falaise de 150 m de hauteur (nombre de chutes par an).

a ( $10^{-7}$ chutes/an.m <sup>2</sup> )	2,3	4,7	9,4
b = 0,45	$3,8 \times 10^{-3}$	$7,7 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$
b = 0,55	$1,1 \times 10^{-2}$	<b><math>2,3 \times 10^{-2}</math></b>	$4,5 \times 10^{-2}$
b = 0,65	$3,5 \times 10^{-2}$	$7,1 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-1}$

Période de retour : 44 ans

## 4. CALCUL ET EVALUATION DU RISQUE

**Risque = probabilité d'occurrence x probabilité de présence x vulnérabilité x valeur du bien (ou nombre de personnes)**

La **probabilité de présence** est la probabilité que l'élément exposé soit présent au point considéré (elle vaut un pour un bien immobilier)

La **vulnérabilité** représente le taux de perte (ou d'invalidité) résultant de la réalisation de l'aléa.

Pour un danger mortel, la vulnérabilité est de 1.

## 4. CALCUL ET EVALUATION DU RISQUE

### **Risque individuel**

Le risque individuel est défini comme l'incrément de risque imposé à un individu donné par l'existence d'un danger. Cet incrément de risque vient se rajouter au risque quotidien auquel l'individu est soumis dans sa vie de tous les jours. Le risque individuel est généralement exprimé sous forme de probabilité annuelle de mourir suite à la survenance du danger. On le compare généralement au taux de mortalité annuel.

## 4. CALCUL ET EVALUATION DU RISQUE

### Risque sociétal

#### **Exemple du risque rocheux en France**

D'après les statistiques du ministère de l'écologie entre 2001 et 2007, on peut estimer qu'en moyenne, environ 2 personnes sont tuées chaque année par des chutes de roche dans les Alpes françaises. Les accidents mentionnés concernent 1 ou 2 personnes, essentiellement des automobilistes, mais aussi des alpinistes. Les volumes étaient compris entre 10 litres et 2000 m<sup>3</sup>.

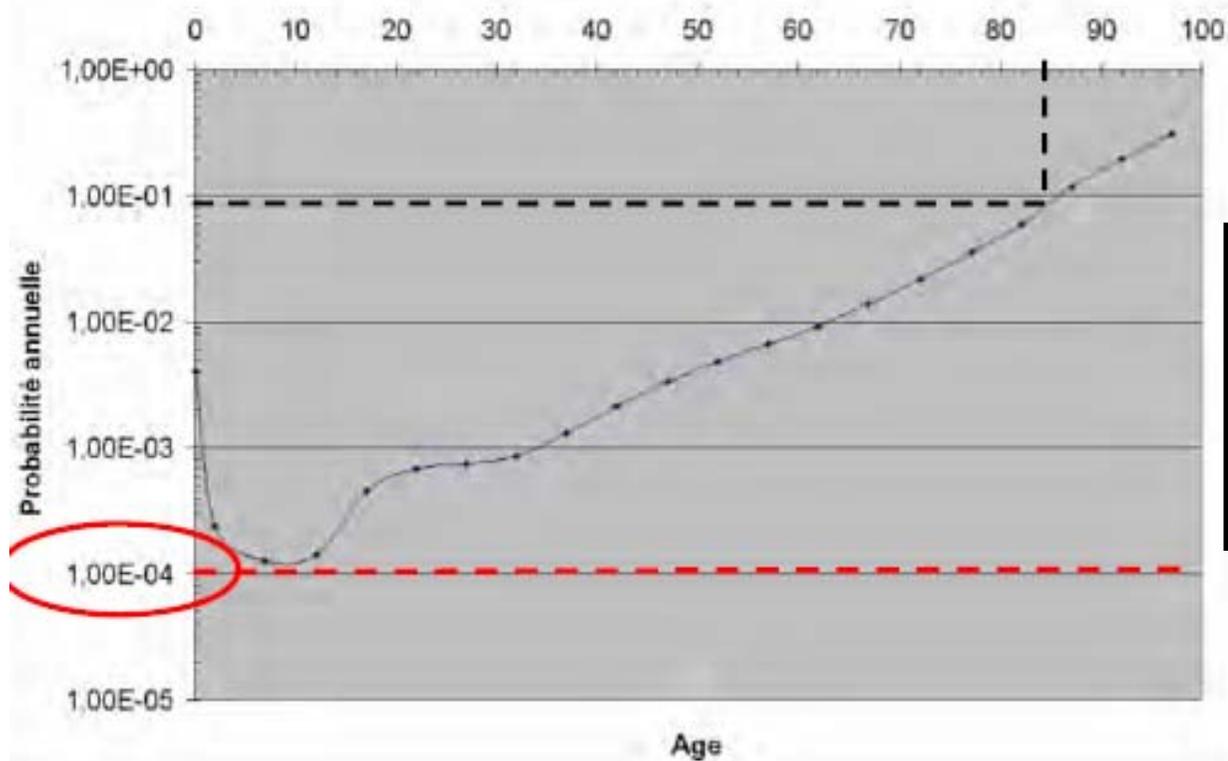
## 4. CALCUL ET EVALUATION DU RISQUE

### Exemple d'analyse du risque : sentier du Saint-Eynard

#### *Risque individuel*

Pour un randonneur qui parcourt chaque année le sentier en 1h, sa probabilité annuelle de décès est augmentée d'environ  $10^{-6}$

#### Probabilité annuelle de décès en France



Taux de mortalité annuelle en France :

- à 65 ans :  $10^{-2}$

- à 35 ans :  $10^{-3}$

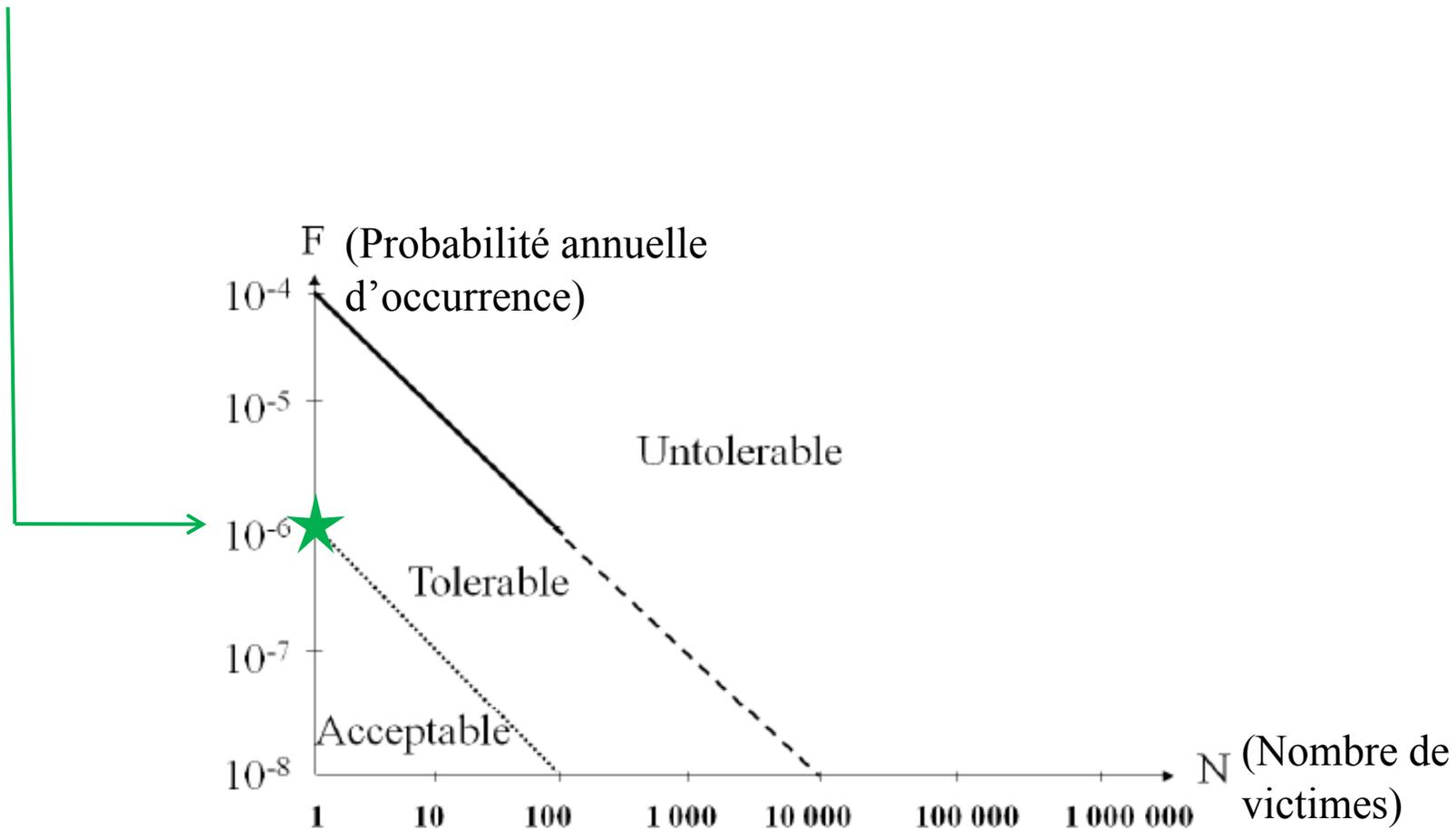
- à 10 ans :  $10^{-4}$

## 4. CALCUL ET EVALUATION DU RISQUE

### Application au sentier du Saint-Eynard

#### *Risque individuel*

Pour un randonneur qui parcourt chaque année le sentier en 1h, sa probabilité annuelle de décès est augmentée d'environ  $10^{-6}$



## 4. CALCUL ET EVALUATION DU RISQUE

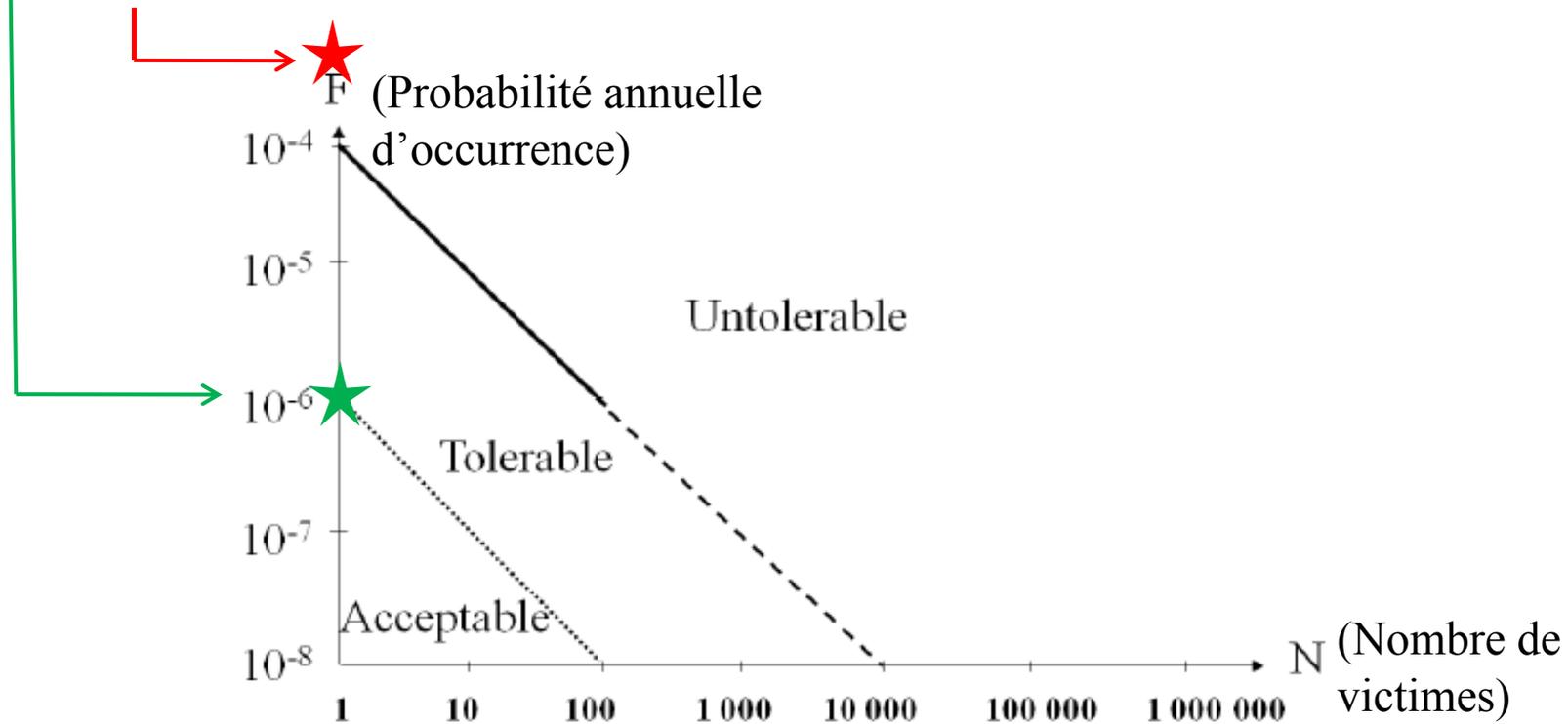
### Application au sentier du Saint-Eynard

#### *Risque individuel*

Pour un randonneur qui parcourt chaque année le sentier en 1h, sa probabilité annuelle de décès est augmentée d'environ  $10^{-6}$

#### *Risque sociétal*

Si 1000 randonneurs indépendants parcourent le sentier chaque année, la probabilité annuelle d'un décès est d'environ  $10^{-3}$  ; de  $n$  décès, elle est de  $(10^{-3})^n$



## 4. CALCUL ET EVALUATION DU RISQUE

### ***Conclusion sur le risque rocheux***

- *Une évaluation quantitative de l'aléa de départ et du risque sont possibles dans certaines situations*
- *Des inventaires d'éboulements suffisamment documentés (date, volume, dimensions) sont nécessaires pour une meilleure évaluation*

## 4. CALCUL ET EVALUATION DU RISQUE

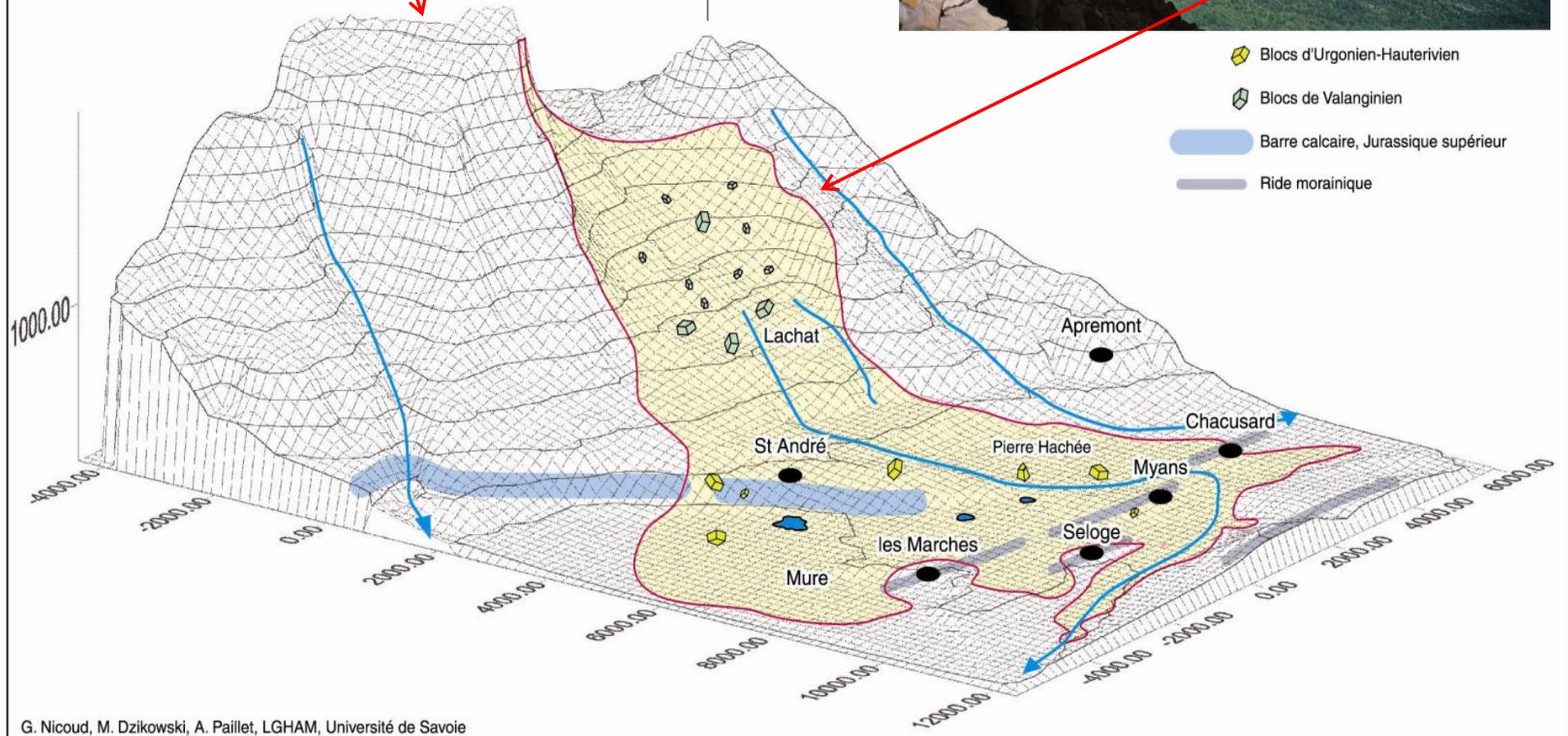
### Evènements historiques

Dans les temps historiques (2000 dernières années), le plus gros mouvement de versant connu dans les Alpes ( $500 \text{ hm}^3$ ), et probablement le plus meurtrier, est celui qui a affecté en 1248, le versant Est du **Col du Granier**, près de Chambéry, et qui est associé à l'écroulement de la face nord du Mont Granier, constitué de hautes falaises calcaires (Nicoud, 1999). La masse rocheuse s'est propagée sur 8 km, détruisant plusieurs villages. **Le nombre de victimes est estimé à plusieurs milliers.**

# Glissement du Granier (1248) 500 hm<sup>3</sup>



Mt Joigny



Blocs d'Urgonien-Hauterivien

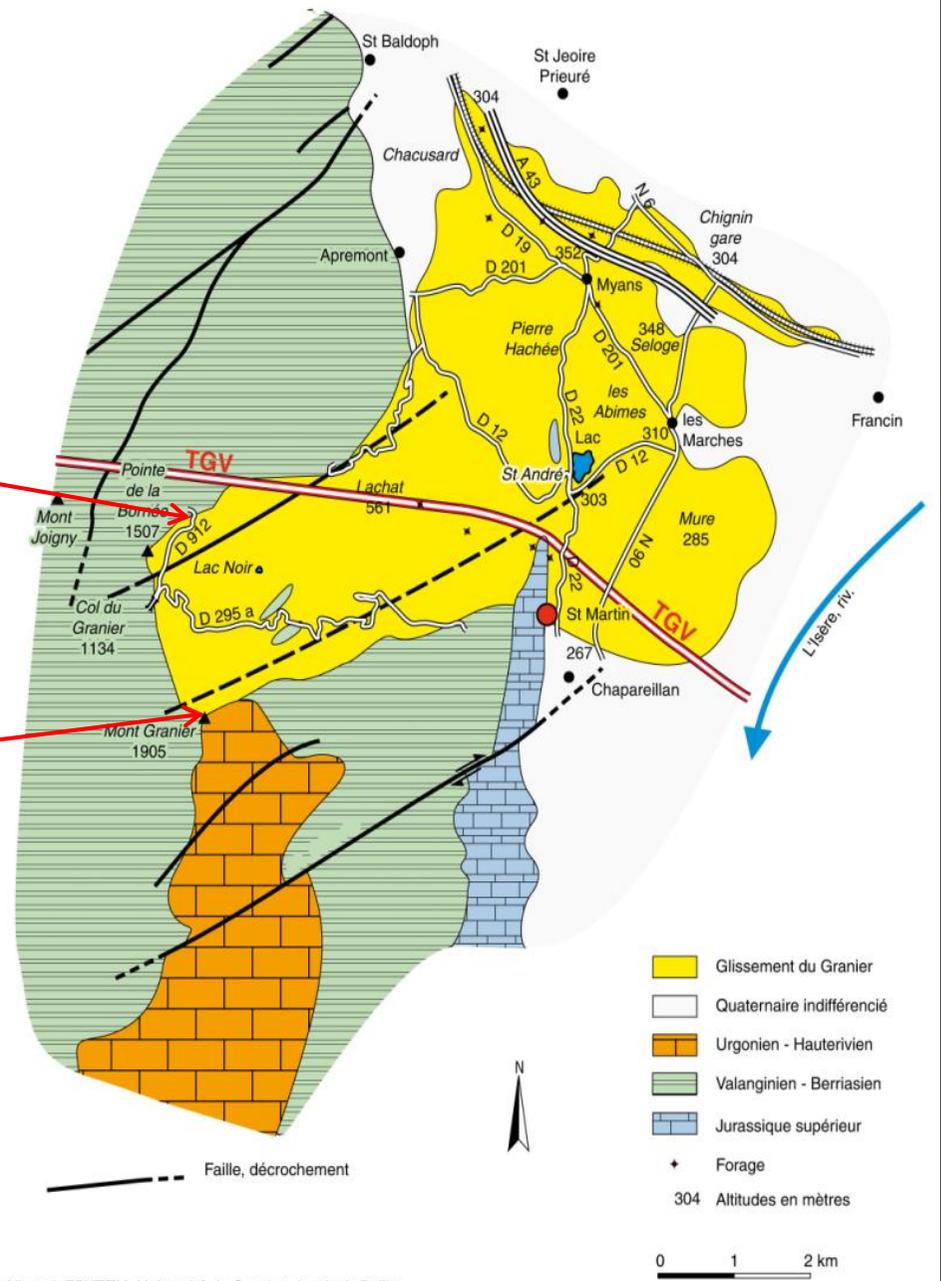
Blocs de Valanginien

Barre calcaire, Jurassique supérieur

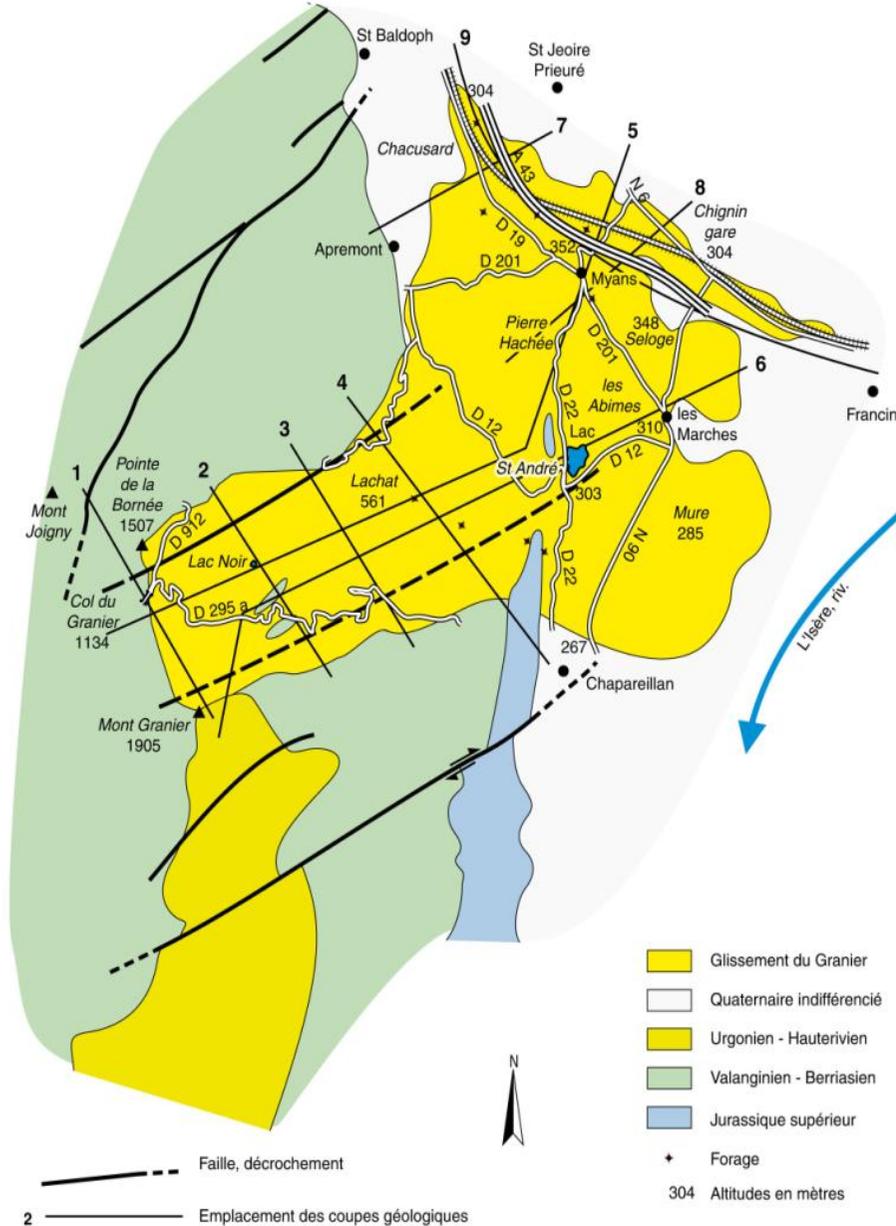
Ride morainique



Glissement du Granier de 1248  
Cadre géologique simplifié

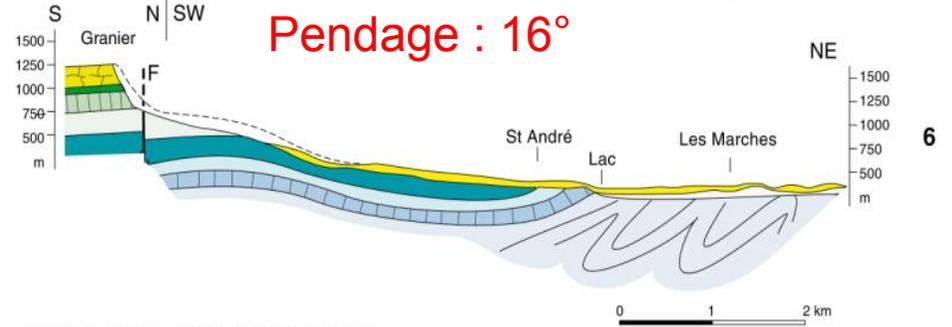
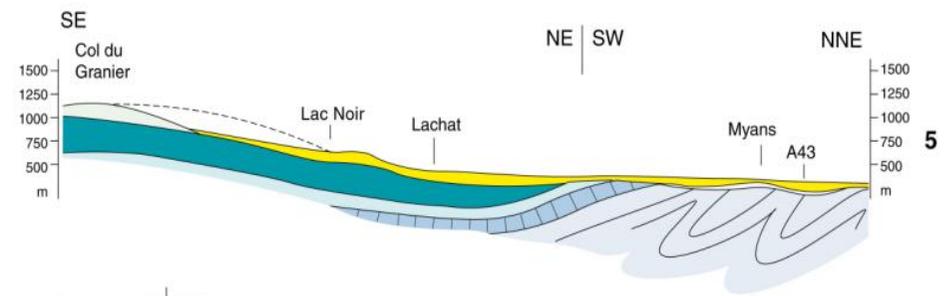
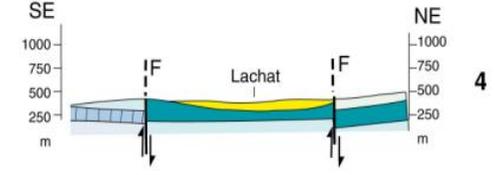
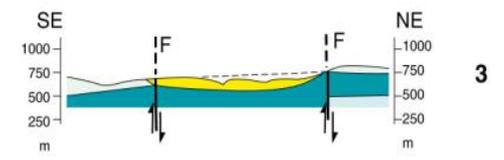
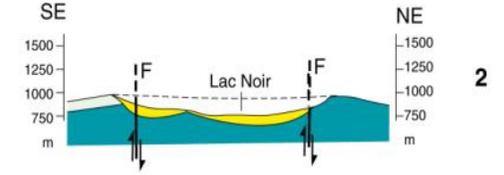
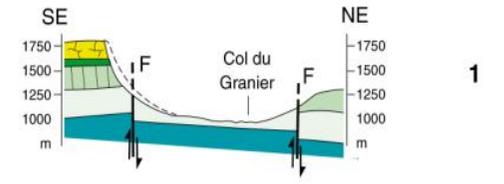


Glissement du Granier de 1248  
Cadre géologique simplifié



Mont Granier, Savoie  
Coupes géologiques  
sur l'emplacement de  
l'éboulement et glissement  
de 1248

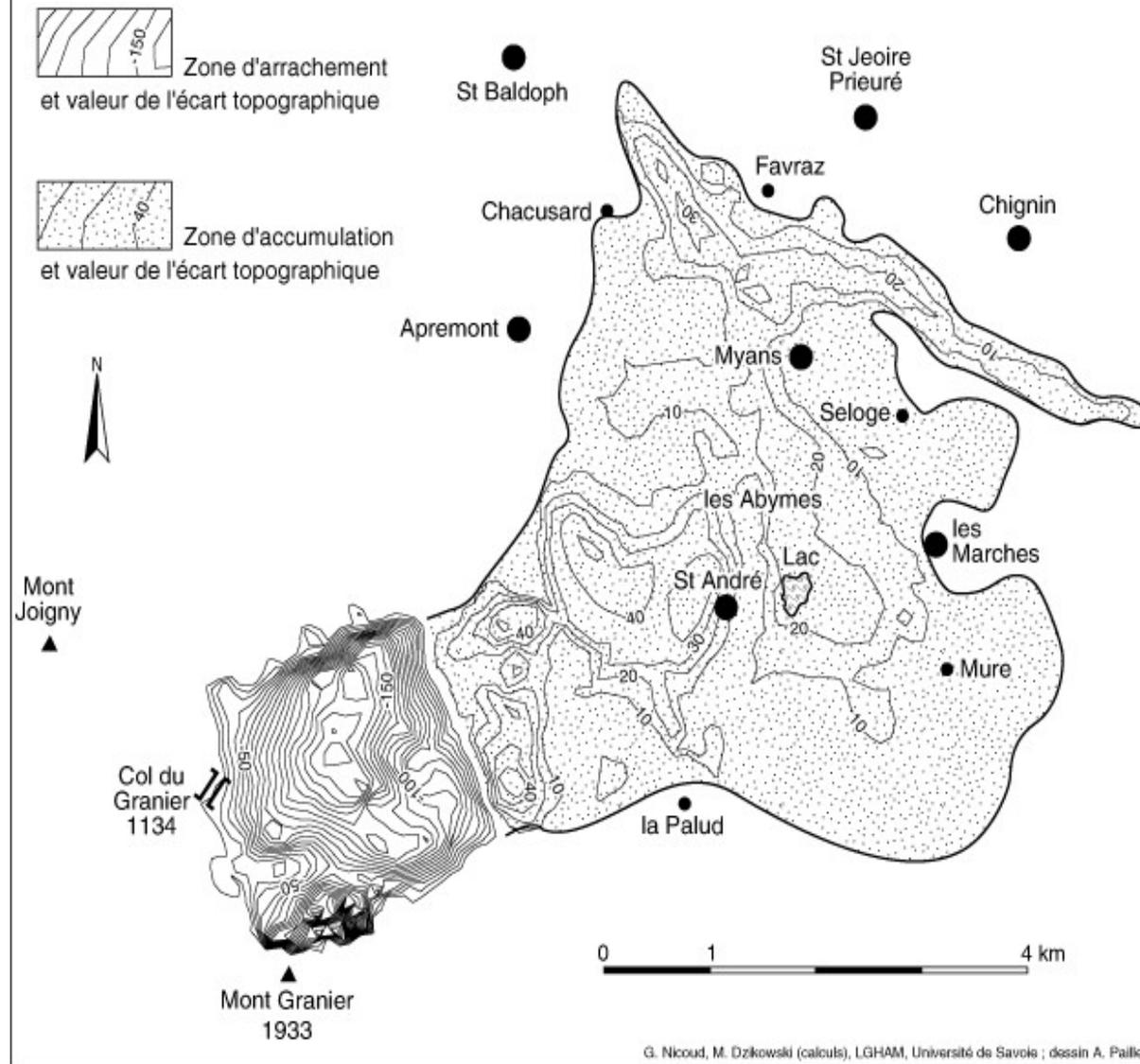
- Glissement
- Quaternaire indifférencié
- Urgonien
- Hauterivien
- Valanginien supérieur
- Valanginien inférieur
- Berriasien supérieur
- Berriasien inférieur
- Jurassique supérieur
- Jurassique moyen



- Glissement du Granier
- Quaternaire indifférencié
- Urgonien - Hauterivien
- Valanginien - Berriasien
- Jurassique supérieur
- Forage
- 304 Altitudes en mètres



Ecart topographique entre surfaces  
actuelle et antérieure reconstituée



## 4. CALCUL ET EVALUATION DU RISQUE

### Phénomènes induits par les mouvements de pentes

En tombant dans un lac ou dans la mer, un grand glissement peut provoquer un **tsunami**. Mais s'il n'y a pas de lac, il peut barrer la vallée dans laquelle il se produit et provoquer la formation d'un lac (**inondation**). Le **barrage** ainsi formé peut durer très longtemps, jusqu'à ce que le lac soit comblé par des sédiments, mais il peut aussi céder, ce qui provoque un **tsunami**.

En 1191, ce sont des laves torrentielles qui ont barré la Romanche au niveau du Pont de La Véna, provoquant l'inondation de la vallée sur plus de 10 km en amont. En 1219, la rupture du barrage a engendré un tsunami qui a dévasté la vallée jusqu'à Grenoble, faisant probablement des **milliers de victimes**

En 1513, le Val Blenio (Suisse) a été barré par un glissement de 10 à 20 hm<sup>3</sup> (Eisbacher et Clague, 1984). Plus d'un an après, la vidange brutale du lac par rupture de ce barrage naturel a provoqué la mort de plus de **600 personnes**.

## 4. CALCUL ET EVALUATION DU RISQUE

### Evènements historiques

Le séisme de Haiyuan (magnitude 8), du 16 décembre 1920 dans le nord-est de la Chine, a produit de nombreux glissements de terrain dans une zone d'environ 50 000 km<sup>2</sup> (Highland, 2010). On estime que plus de la moitié des **200 000 victimes** du séisme sont dues à ces glissements.

Au Venezuela, en décembre 1999, un épisode pluvieux exceptionnel toucha la région de Vargas (près d'un mètre d'eau en trois jours) et déclencha de nombreux mouvements de versant, provoquant la mort d'environ **30 000 personnes**, sur 40 km de côte.

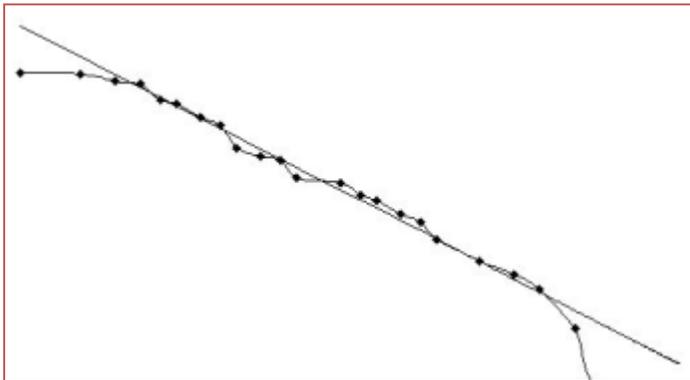
A partir d'un inventaire portant sur les années 1980-2003, le **nombre annuel de décès provoqués par des mouvements de versant**, dans le monde, a été estimé à environ **5000**, ce qui fait un demi-million de victimes par siècle (Petley et al., 2005)

## 5. EVALUATION DE L'ALEA – APPROCHE HGP

Approche historique-géomécanique-probabiliste pour l'évaluation des aléas localisés dans une zone homogène (*méthode HGP, Hantz et al., 2003*)

### **APPROCHE HISTORIQUE OU GEOMORPHOLOGIQUE**

*Nombre d'éboulements par siècle*



***F éboulements attendus***

### **APPROCHE GEOMECANIQUE**

*Identification des compartiments  
potentiellement instables*



***N compartiments détectés  
(équiprobables)***



***Probabilité de chute de chaque compartiment =  $F / N$***

## 5. EVALUATION DE L'ALEA – APPROCHE HGP

Méthodes **géomécaniques locales** :

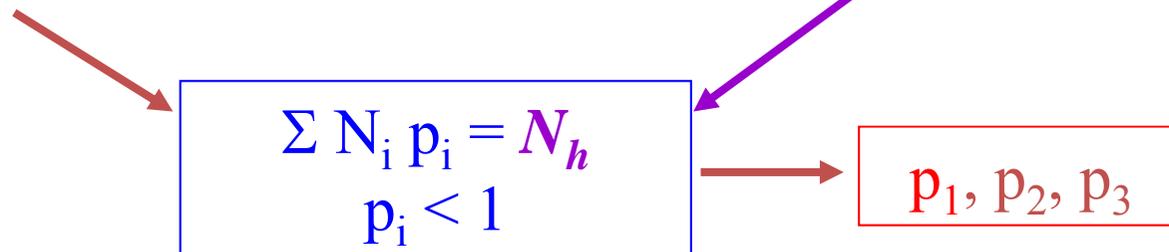
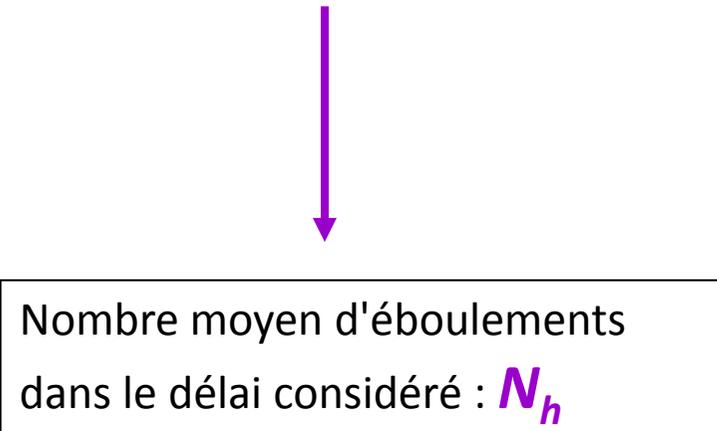
permettent de **hiérarchiser** de manière plus ou moins subjective, les compartiments, suivant leur **probabilité relative** de chuter dans le délai considéré.

*Exemple (évaluation qualitative) :*

qualification de la probabilité	probabilité	nombre de compartiments
élevée	$p_1$ (inconnue)	$N_1$
moyenne	$p_2 = p_1 / r$	$N_2$
faible	$p_3 = p_1 / r^2$	$N_3$

Méthode **historique globale** :

permet d'estimer la **fréquence** d'éboulements dans une zone homogène, pour une classe de volume.



## 5. EVALUATION DE L'ALEA – APPROCHE HGP

### Méthode géomécanique quantitative (*Hantz, 2010*)

La durée de vie d'un compartiment peut être évaluée en utilisant la loi de fatigue statique de Charles (1958) :

$$t_r = t_0 \left( \frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^c = t_0 F^c$$

$t_r$  : temps restant avant rupture

$t_0$  : temps nécessaire à la rupture en appliquant la contrainte  $\sigma_0$  lors d'un essai rapide en laboratoire (de l'ordre de la seconde)

$\sigma$  : contrainte s'exerçant sur le compartiment (dans un pont rocheux par exemple)

$F$  : coefficient de sécurité

$c$  : paramètre rhéologique inconnu dépendant de la roche

La durée de vie de chaque compartiment potentiellement instable peut ainsi être estimée en fonction de  $c$ .

Le nombre d'éboulements prévus dans le délai  $t$  ( $N_g$ ) est donc égal au nombre de compartiments tels que  $t_r < t$ . Il doit être égal au nombre d'éboulements  $N_h$  prévu par la méthode historique, ce qui permet de déterminer la valeur de  $c$  et de calculer les durées de vie des compartiments.

## 5. EVALUATION DE L'ALEA – APPROCHE HGP

### Méthode géomécanique quantitative probabiliste (*Hantz, 2010*)

En réalité, une approche probabiliste s'impose compte tenu des incertitudes

Probabilité de rupture du compartiment  $i$  :

$$P_{ri}(c) = \text{prob}[t_{ri} < t] = \text{prob}\left[F < (t/t_0)^{1/c}\right]$$

Espérance du nombre d'éboulements dans la paroi étudiée, obtenue par l'étude géomécanique :

$$E_g(n_e) = \sum_{i=1}^{n_c} P_{ri}(c)$$

L'application de la méthode HGP permet de déterminer la valeur de  $c$ , qui doit vérifier :

$$\sum_{i=1}^{n_c} P_{ri}(c) = N_h$$

Les durées de vie des différents compartiments peuvent alors être calculées.

## 6. EVALUATION DE L'ALEA A COURT TERME (CAS DES MOUVEMENTS ACTIFS)

### **Prévision de la rupture : conclusion**

- Il existe quelques exemples de prévision réussie quelques jours ou quelques semaines à l'avance, par extrapolation de la courbe de fluage tertiaire
- Mais aussi des prévisions qui ont échouées (car la vitesse peut varier également durant un fluage secondaire, si les contraintes varient)
- Ce type de prévision est de nature probabiliste ("la probabilité que la rupture se produise dans le délai considéré est élevée, moyenne, faible, ...")
- Il n'existe aucune méthode quantitative éprouvée pour la prévision à long terme (c'est à dire avant le début du fluage tertiaire). La prévision repose sur le jugement de l'expert.
- La probabilité d'occurrence en fonction du délai peut être estimée quantitativement pour les séismes et les inondations.