

Aléa rocheux : du qualitatif au quantitatif

D. Hantz ⁽¹⁾, J-P. Rossetti ^(1,2), Q. Ventroux ⁽¹⁾, F. Berger ⁽³⁾

(1) ISTerre, Grenoble, (2) Alp'géorisques, (3) IRSTEA

Méthodologie de gestion du risque rocheux

d'après le Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (ISSMGE, IAEG, ISRM)

Etude d'aléa

Analyse des conséquences
(dommages potentiels
humains ou matériels)

Détermination
du risque
annuel
(humain,
économique)

Evaluation du risque
(acceptation ou non)

Gestion du risque

- Surveillance
- Zonage réglementaire
- Réduction de la vulnérabilité
- Réduction de l'aléa

Renforcement des parois
Ouvrages de protection



Analyse de l'aléa rocheux

Aléa rocheux



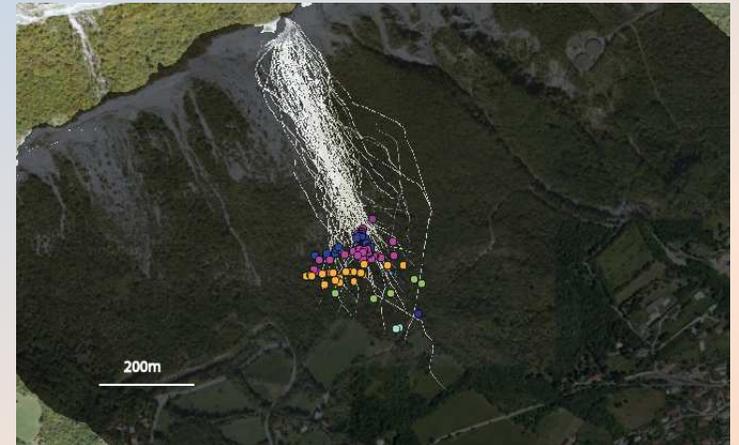
- **Aléa de rupture :**
probabilité ou fréquence de rupture
(en fonction du délai considéré)

- **Aléa de propagation :**
probabilité (conditionnelle) de propagation
jusqu'à un point donné (avec une énergie
cinétique minimale donnée)



Dire d'expert

*Dire d'expert ou
modélisation mécanique*



Analyse de l'aléa rocheux

Aléa rocheux

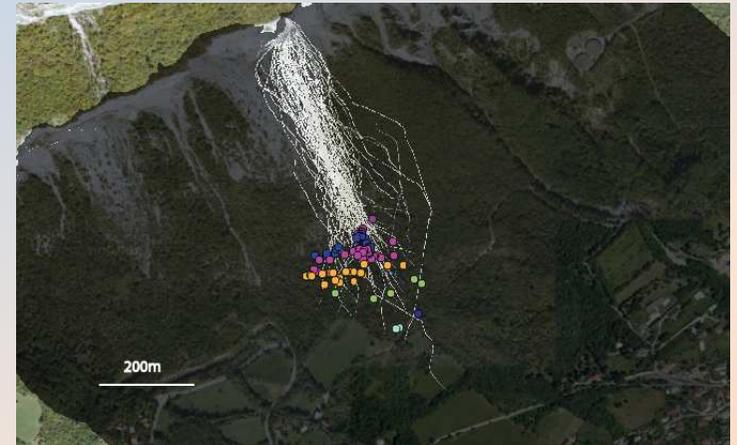


- **Aléa de rupture :**
probabilité ou fréquence de rupture
(en fonction du délai considéré)



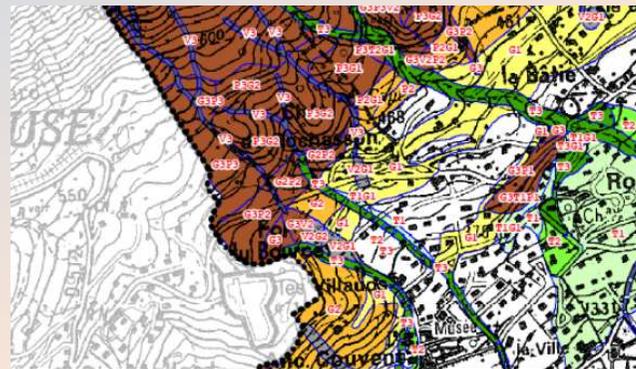
- **Aléa de propagation :**
probabilité (conditionnelle) de propagation
jusqu'à un point donné (avec une énergie
cinétique minimale donnée)

*Dire d'expert ou
modélisation mécanique*



- **Aléa résultant :**
Probabilité ou fréquence d'impact en un
point donné

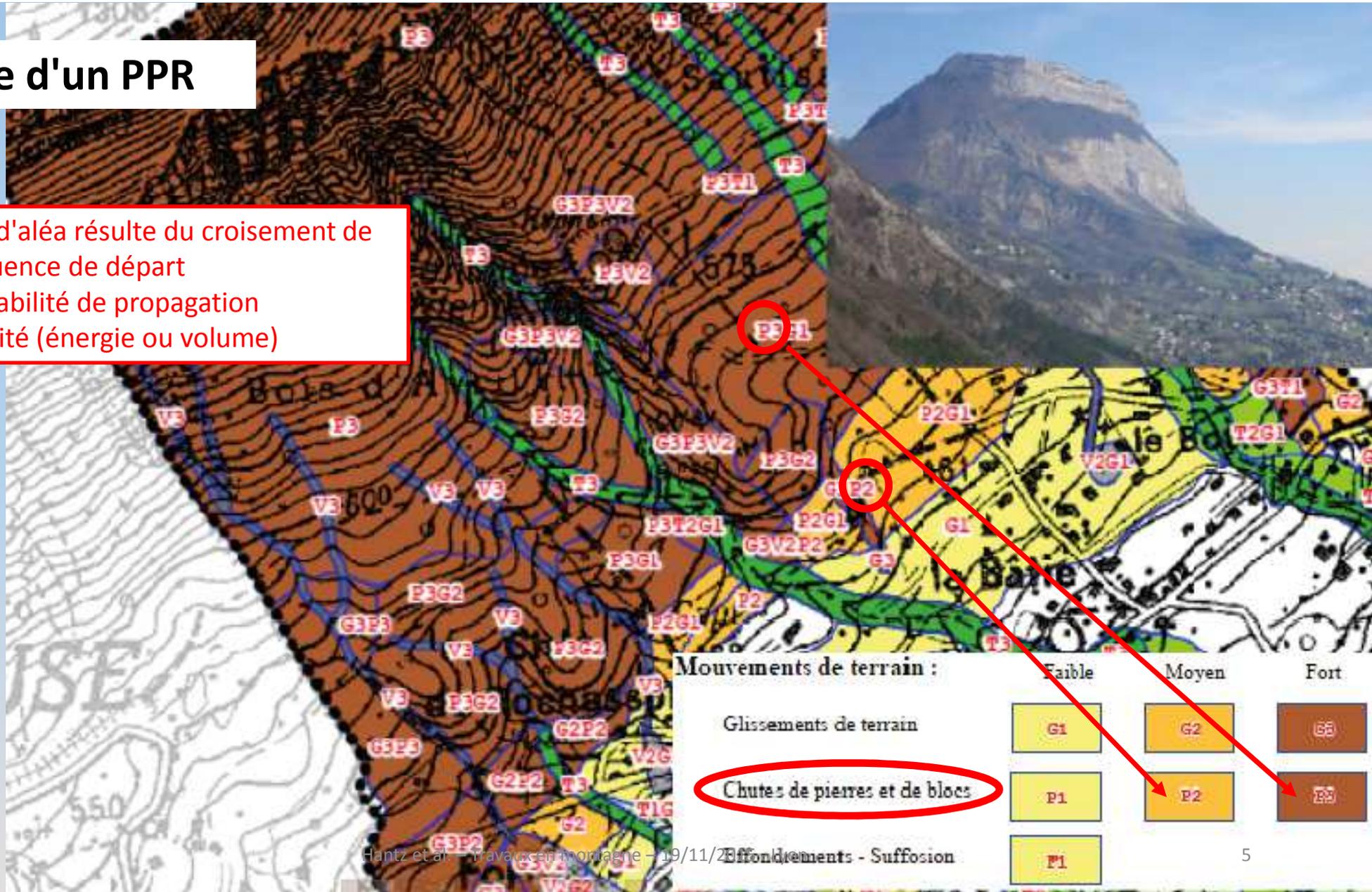
*Forcément qualitatif
et subjectif*



Exemple d'un PPR

Le niveau d'aléa résulte du croisement de

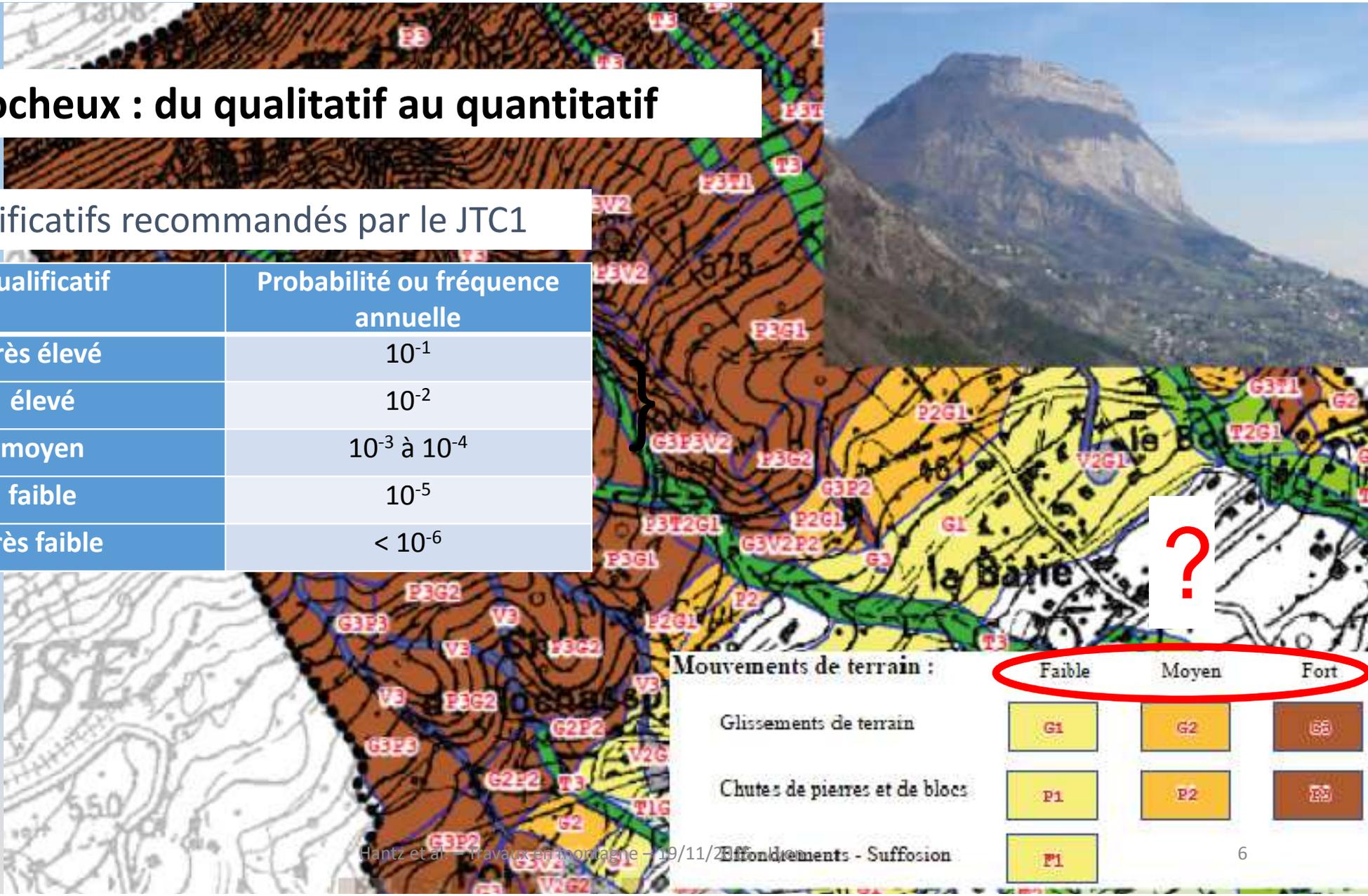
- la fréquence de départ
- la probabilité de propagation
- l'intensité (énergie ou volume)



Aléa rocheux : du qualitatif au quantitatif

Qualificatifs recommandés par le JTC1

Qualificatif	Probabilité ou fréquence annuelle
très élevé	10^{-1}
élevé	10^{-2}
moyen	10^{-3} à 10^{-4}
faible	10^{-5}
très faible	$< 10^{-6}$



Mouvements de terrain :

	Faible	Moyen	Fort
Glissements de terrain	G1	G2	G3
Chutes de pierres et de blocs	P1	P2	P3
Effondrements - Suffosion	F1		

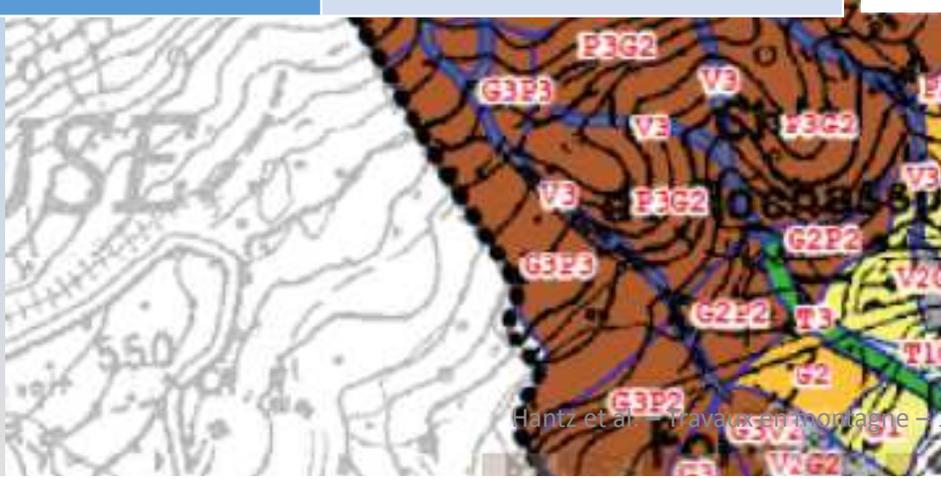
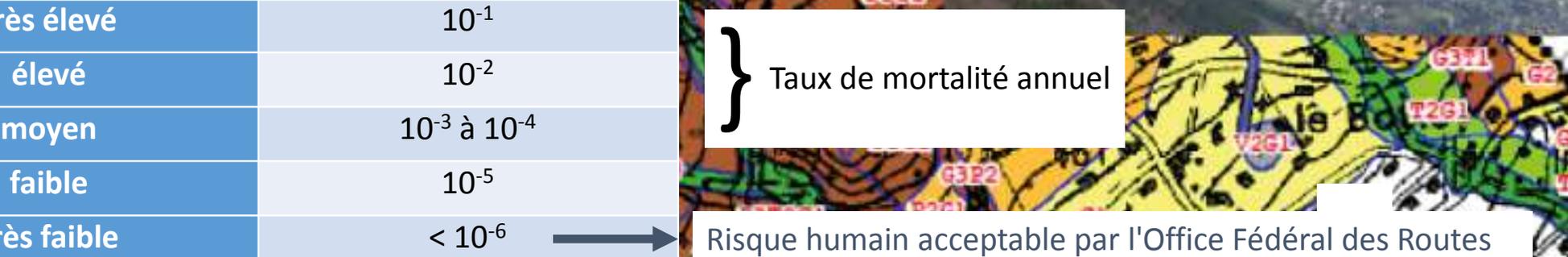
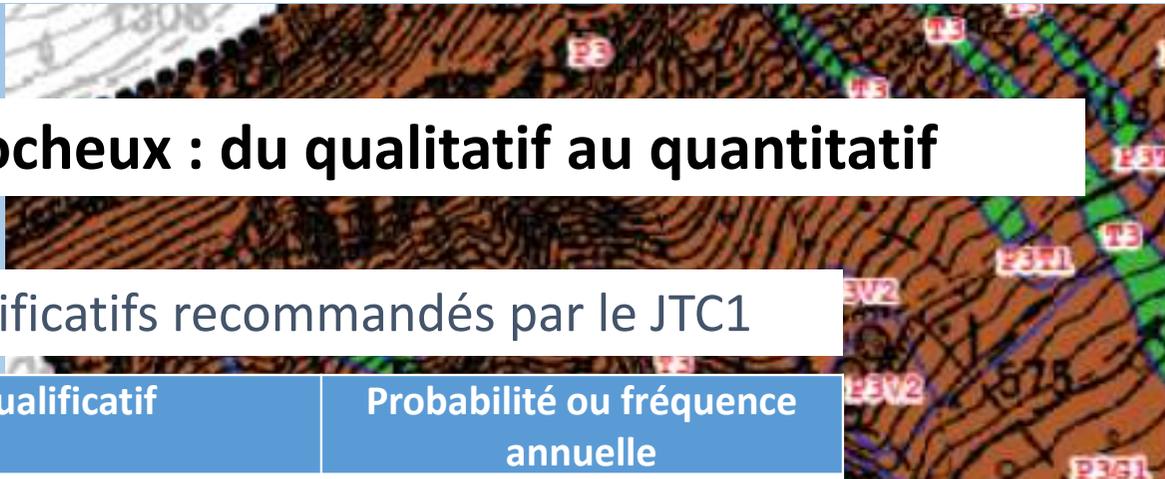
Aléa rocheux : du qualitatif au quantitatif

Qualificatifs recommandés par le JTC1

Qualificatif	Probabilité ou fréquence annuelle
très élevé	10^{-1}
élevé	10^{-2}
moyen	10^{-3} à 10^{-4}
faible	10^{-5}
très faible	$< 10^{-6}$ →

} Taux de mortalité annuel

Risque humain acceptable par l'Office Fédéral des Routes



Mouvements de terrain :

	Faible	Moyen	Fort
Glissements de terrain	G1	G2	G3
Chutes de pierres et de blocs	P1	P2	P3
Effondrements - Suffosion	F1		

Objectif : simulation spatio-temporelle d'un aléa

1. Volume total des chutes (par exemple, sur 1000 ans)

2. Distribution en blocs de différents volumes

3. Simulation des trajectoires

4. Fréquence d'impact sur les enjeux
Par exemple : nombre de blocs par m²
(de volume > 1m³)

*Application
au Mont Saint-Eynard*

1. Volume total des chutes

Chutes détectées par comparaison de modèles numériques de falaise obtenus par scanner laser terrestre
(Exemple: Mont Saint-Eynard)

Critère de détection:
écart > 10 cm

233 chutes > 0.1 m³
détectés entre 2009 et
2012



1. Volume total des chutes

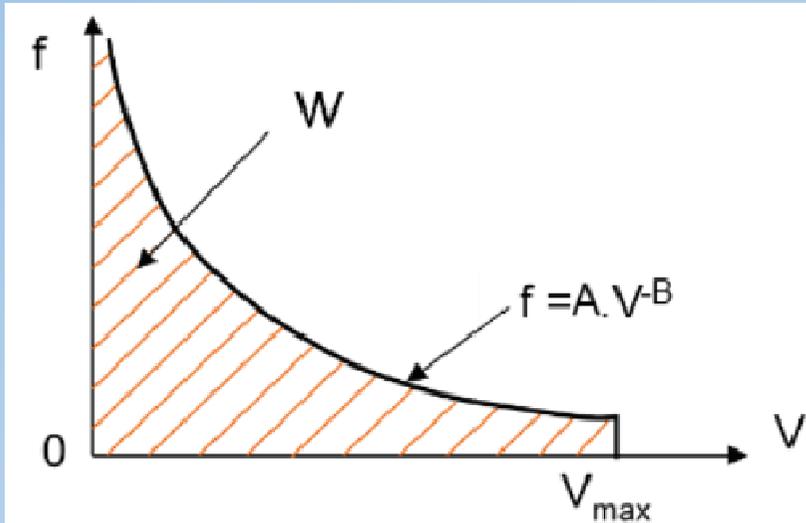
Influence des facteurs géologiques :
fréquence spatio-temporelle des chutes $> 0.1 \text{ m}^3$

Site	Gorgette	Lower St-Eynard	Upper St-Eynard	Chabloz	Venosc
Rock	bedded limestone	bedded limestone	massive limestone	massive limestone	massive gneiss
Observed number of rockfalls in 3 years	64	233	3	2	12
Wall surface (hm^2)	5	13	8	10	37
Spatial temporal frequency ($\text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$)	3.85	5.57	0.12	0.06	0.10
Scaling exponent (B)	0.64	0.75			0.38

Bedded

Massive

1. Volume total des chutes



f : nbre d'éboulements $>$ à V ($\text{an}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)
 A : nbre d'éboulements $>$ à 1m^3 ($\text{an}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)
 B : coefficient qui dépend du type de falaise
 V : volume d'un éboulement (m^3)

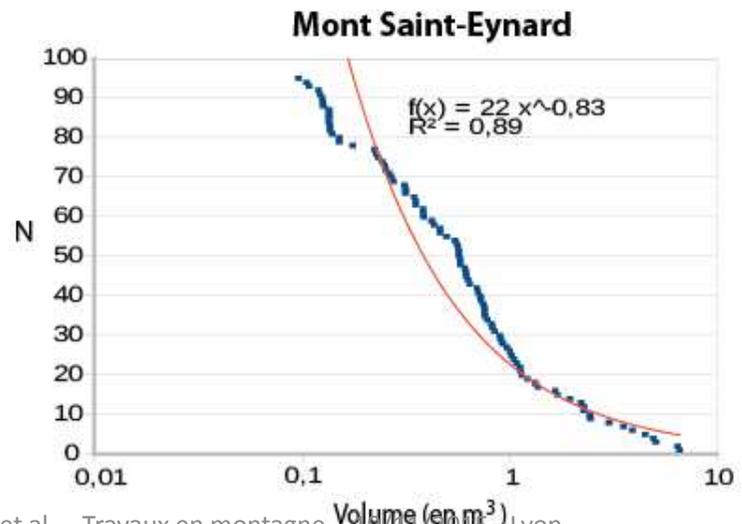
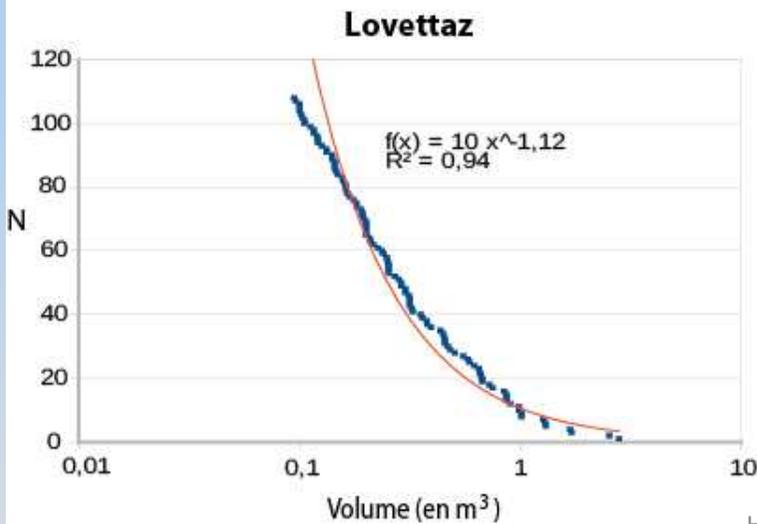
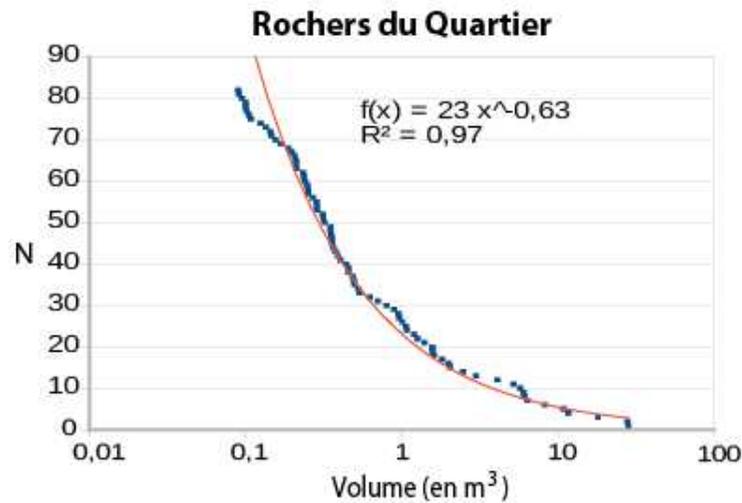
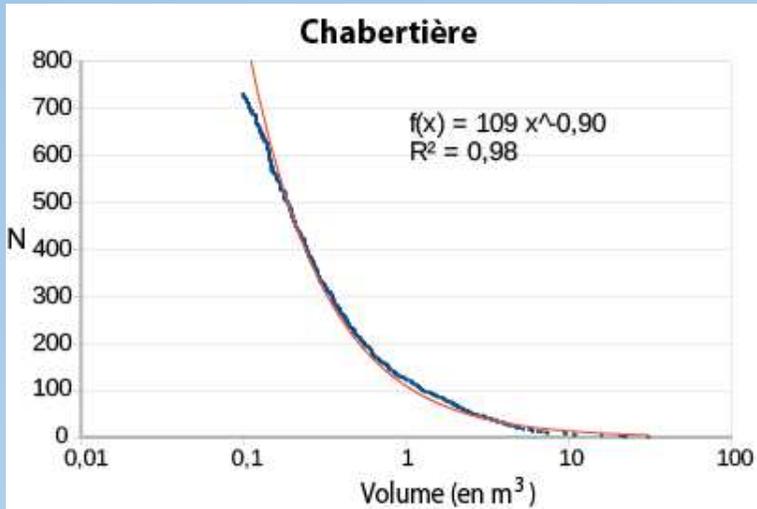
$$\int_0^{V_{max}} V df = \frac{A}{(1-B)} V_{max}^{(1-B)}$$

(Hantz et al., 2002)

Cas du Mont Saint-Eynard (fréquence déterminée par un suivi Lidar, Guerin et al., 2014)

$A = 10^{-4} \text{ an}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; $B = 0,7$; $V_{max} = 10^6 \text{ m}^3$; $W = 0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

2. Distribution en blocs de différents volumes



$$n = av^{-b}$$

2. Distribution en blocs de différents volumes

Le volume total éboulé est relié aux paramètres de la loi de distribution des volumes de blocs :

$$W = \frac{a}{(1-b)} v_{max}^{(1-b)}$$

a : nombre de blocs > 1m³

b : paramètre caractéristique du massif rocheux, reflétant la distribution entre petits et gros blocs

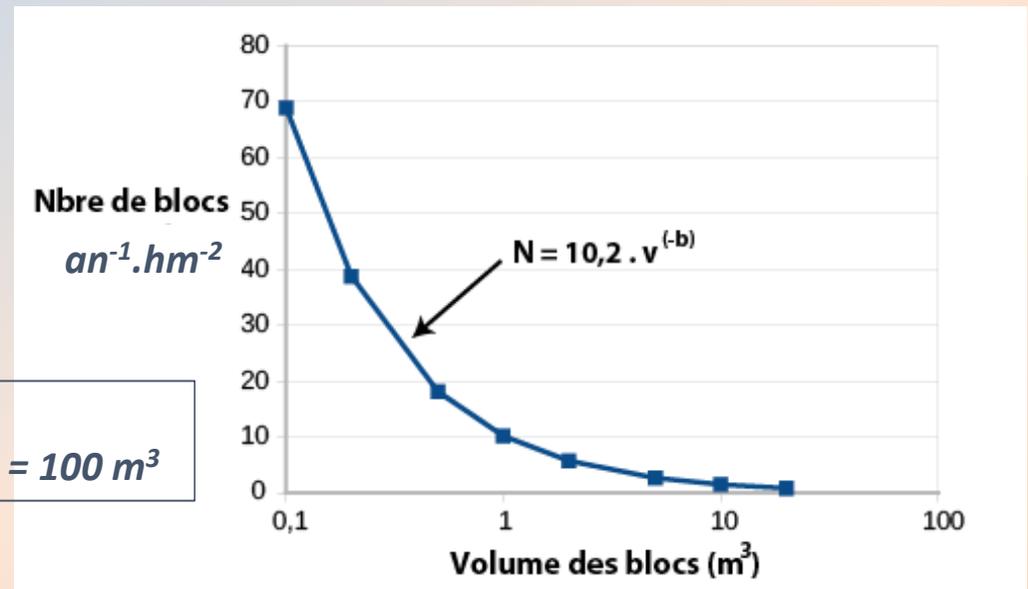
v_{max} : volume maximal d'un bloc

Connaissant W, b et v_{max} , on peut déterminer a, et connaître ainsi le nombre de blocs de différentes tailles

$$a = \frac{(1-b)W}{v_{max}^{(1-b)}}$$

Cas du Mont Saint-Eynard

$W = 0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; $b = 0,83$; $v_{max} = 100 \text{ m}^3$



3. Simulation des trajectoires

Simulation des chutes
des blocs tombant du
Saint-Eynard sur 1000 ans

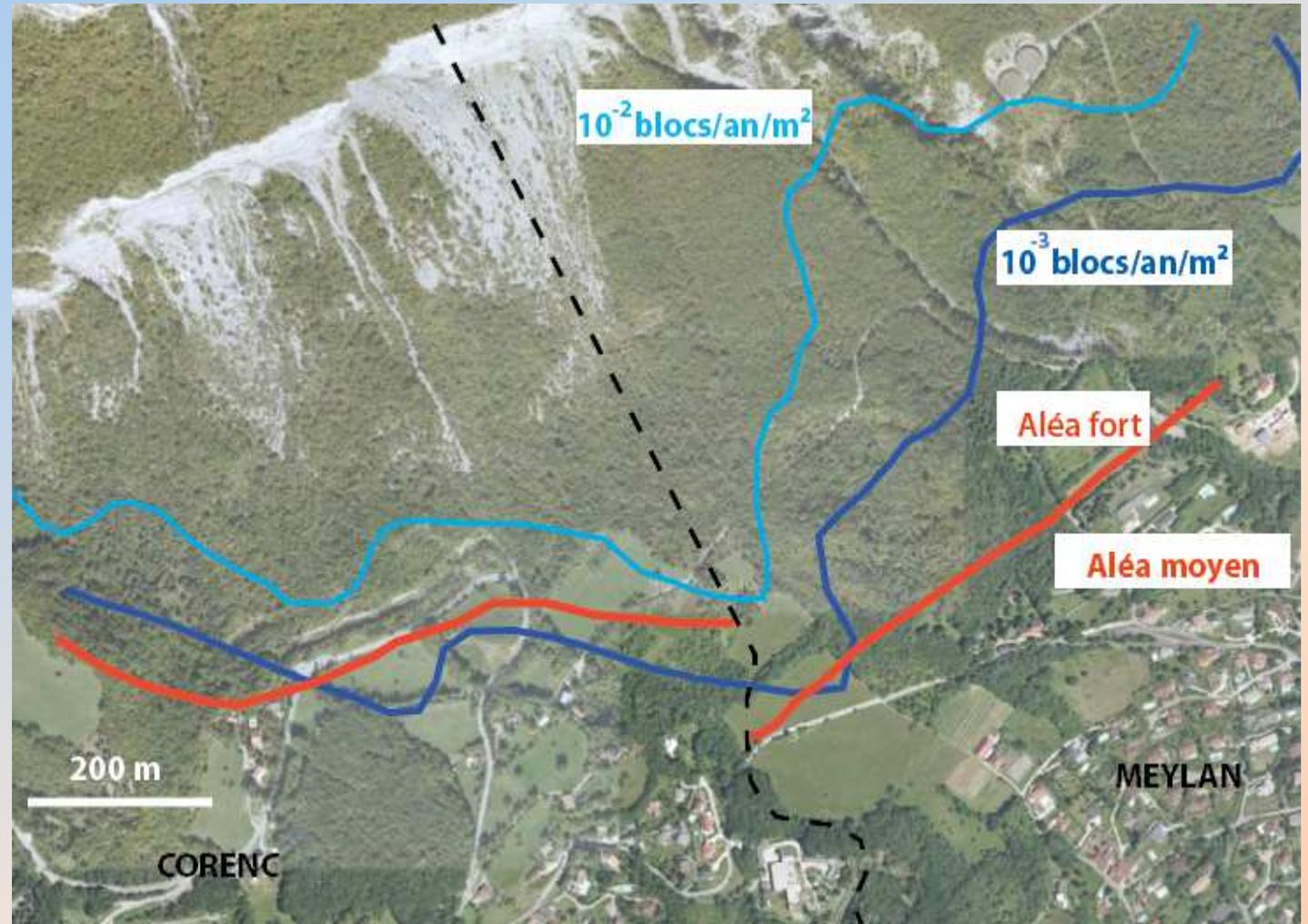
Logiciel Rockyfor3D
(*Dorren et Berger, 2012*)



4. Fréquence d'impact sur les enjeux

Mont Saint-Eynard

Fréquence d'impact des blocs $>1\text{m}^3$



Conclusion

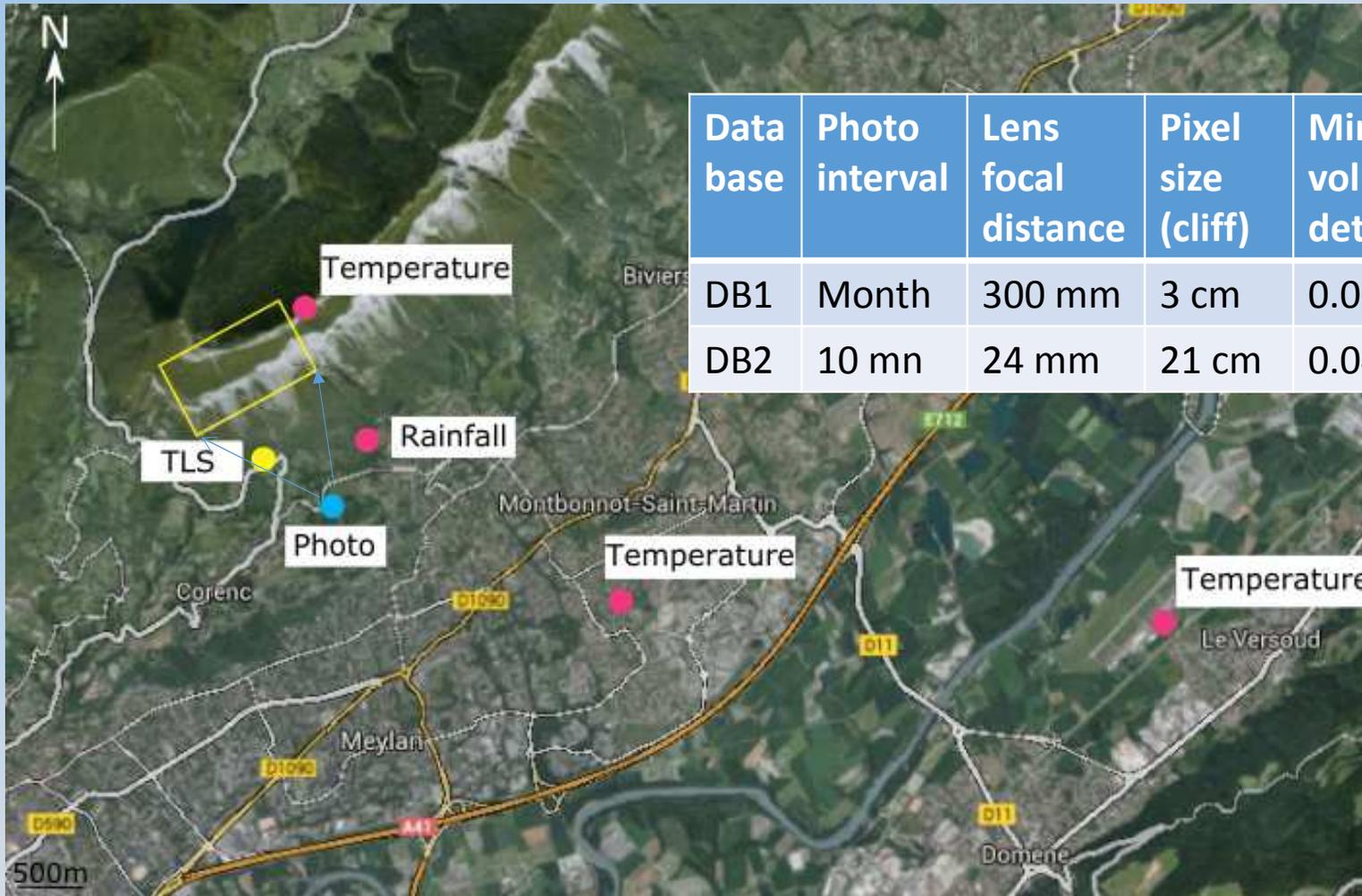
Aléa rocheux : du qualitatif au quantitatif

Yes we can!

MAIS

- Meilleure connaissance des fréquences de départ (ou des vitesses de recul)
- Meilleure connaissance de la fragmentation des masses rocheuses en blocs
- Simulation des trajectoires des blocs : OK ?

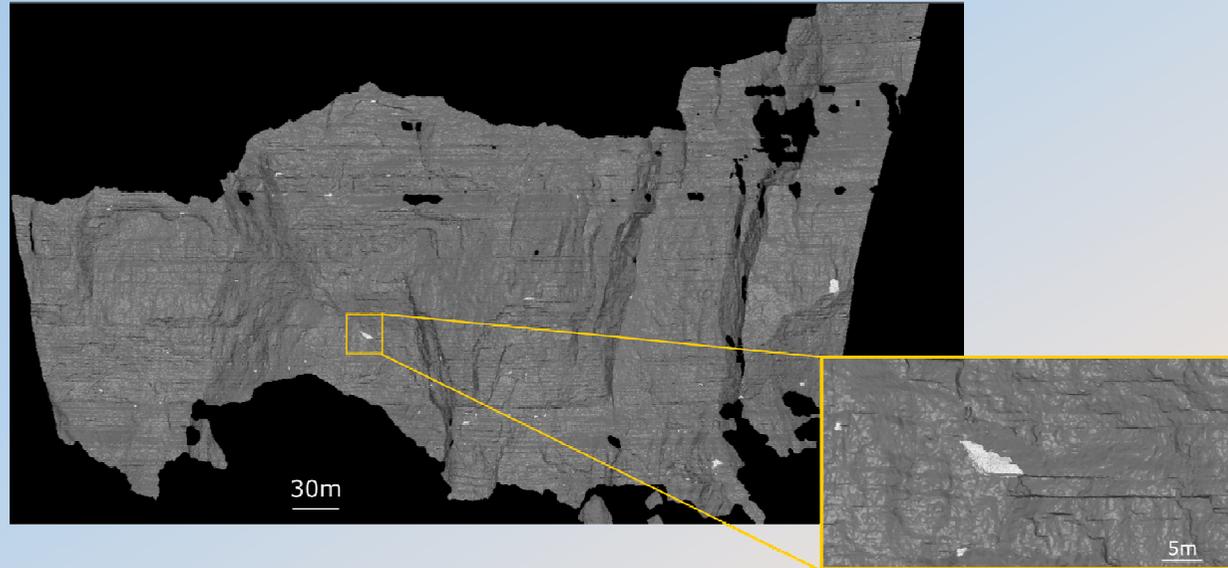
Etude l'influence des facteurs météorologiques au Mont Saint-Eynard



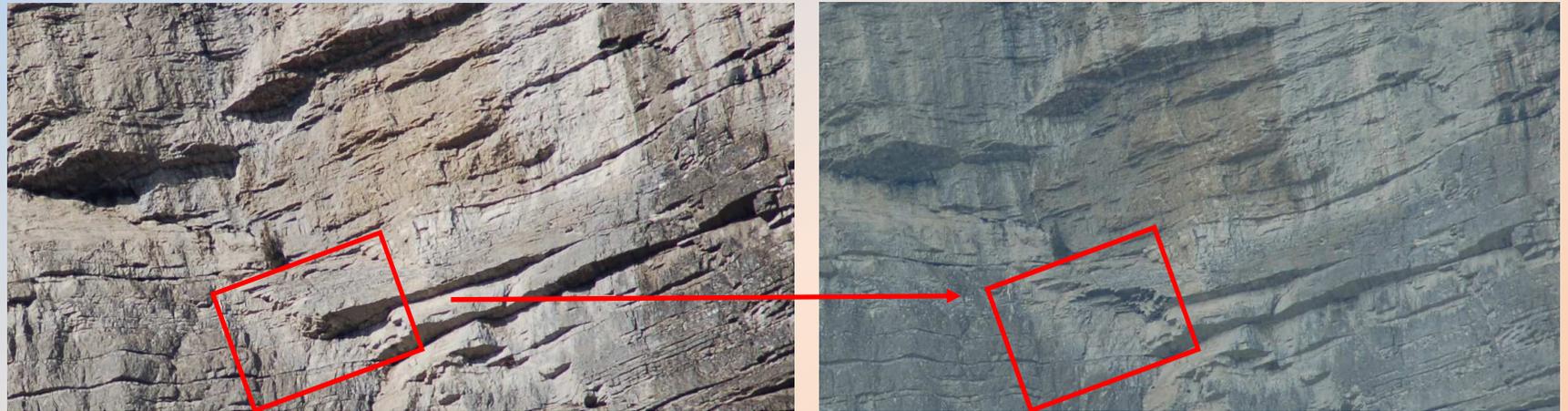
Data base	Photo interval	Lens focal distance	Pixel size (cliff)	Minimal volume detected	Rockfalls detected	Number of days
DB1	Month	300 mm	3 cm	0.002 m ³	854	887
DB2	10 mn	24 mm	21 cm	0.04 m ³	214	810

Etude l'influence des facteurs météorologiques: méthode de datation

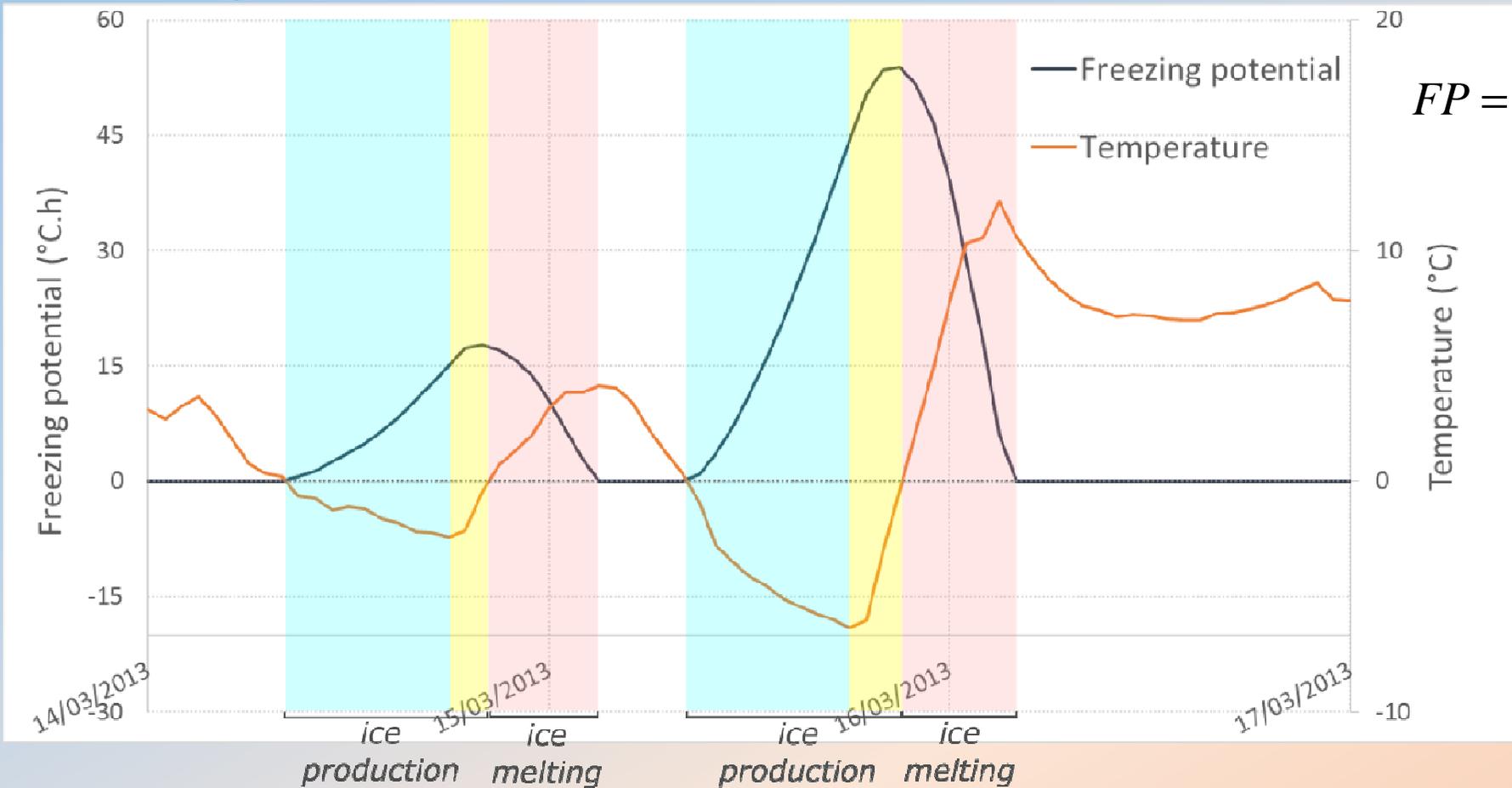
1 Détection et localisation par scanner laser terrestre



2 Datation par comparaison diachronique de photos



Etude l'influence des facteurs météorologiques : définition des épisodes de gel-dégel



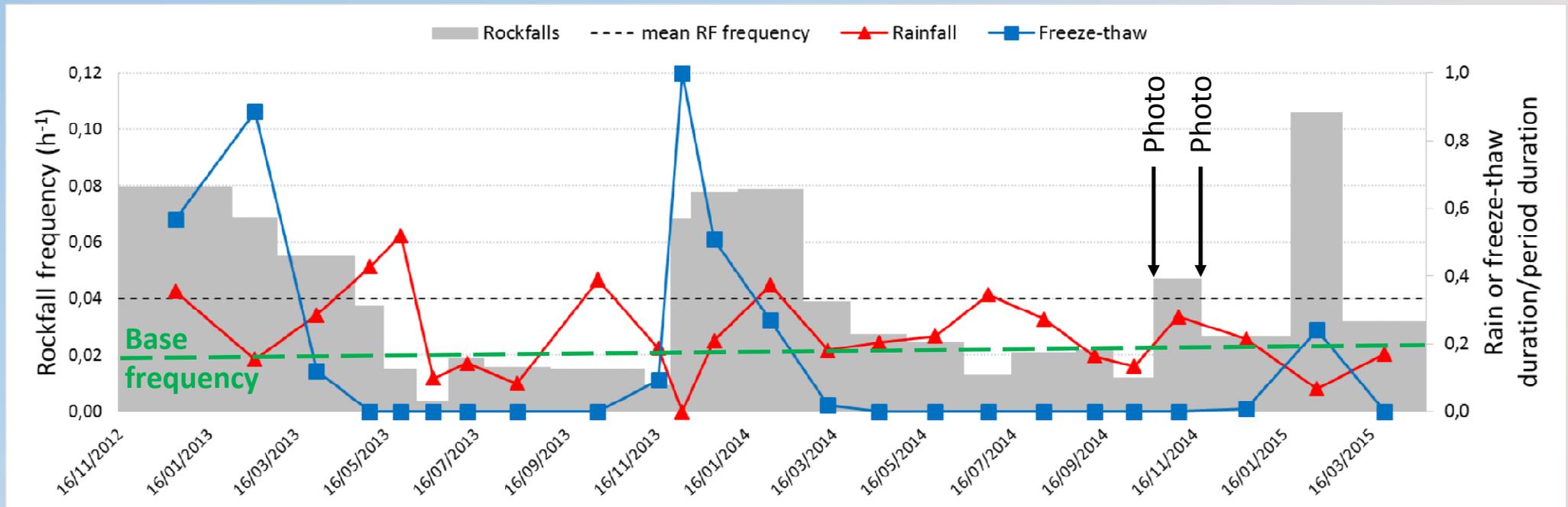
$$FP = \int_{t_0}^t (T_f - T(t)) dt$$

(defined if > 0)

T_f : Freezing temperature

(Matsuoka, 1994)

Résultats de la BD 1 (précision ≈ mois)



The 7 periods with the highest proportions of freeze-thaw give the highest rockfall frequencies

The influence of rainfall is less

50% of the variability can be explained by freeze-thaw and rainfall

50% of the rockfalls occur without freeze-thaw or rainfall ("base" rockfall frequency)

Résultats de la BD 1 (précision ≈ mois)

Knowledge of the base frequency allows determining the frequencies during freeze-thaw or rainfall episodes:

- Rockfall frequency is **7 times** higher during freeze-thaw episodes than without freeze-thaw or rainfall
- Rockfall frequency is **4.5 times** higher during rainfall episodes than without freeze-thaw or rainfall

***Data base 2** (dating precision: **10 mn to 20 h**) allows studying the influence of freezing periods (**ice formation**), warming negative periods (**ice dilatation**), thawing periods (**ice melting**), **rainfall** amount and intensity*

Résultats de la BD 2 (précision: 10 mn à 20 h)

(Chutes dont l'intervalle de datation est inclus dans une période météo)

Analyse de l'influence du gel-dégel

	Duration (h)	Number of rockfalls	Rockfall frequency (h ⁻¹)
Complete period	19440	98	0.0050
No meteorological factor	3243	14	0.0043
Freeze-thaw episodes	2084	14	0.0067
Negative cooling periods	846	2	0.0024
Negative warming periods	374	2	0.0053
Thawing periods	864	10	0.0116

Negative temperature decrease doesn't cause rockfalls (cryostatic pressure unlikely to develop in MSE cliff)

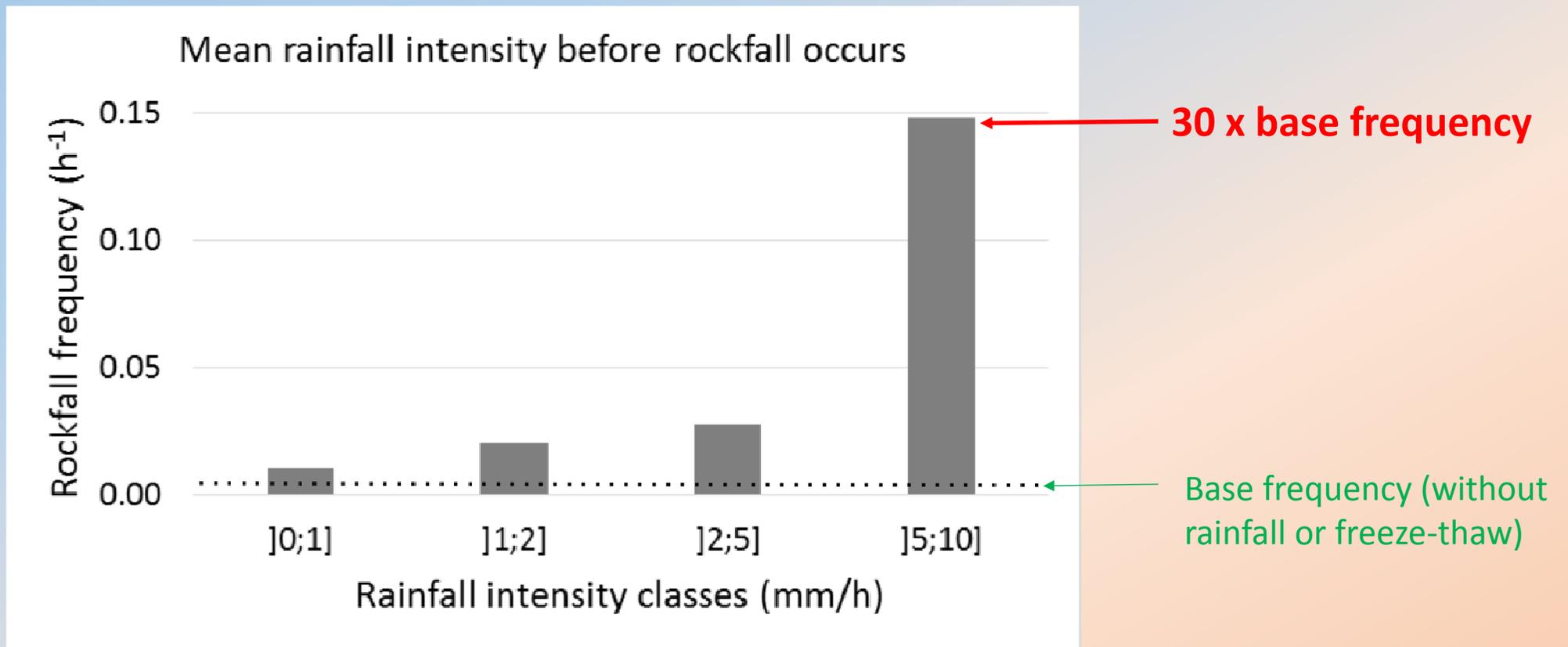
Negative temperature increase causes more rockfalls (ice dilatation may cause failure but ice cohesion can delay rockfall)

Rockfall frequency during thawing is significantly higher (ice melting, melting water effect)

Résultats de la BD 2 (précision: 10 mn à 20 h)

(Chutes dont l'intervalle de datation est inclus dans une période météo)

Analyse de l'influence de la pluie



Proposition d'une échelle de prévision de l'aléa rocheux

- **Low hazard:** No rainfall or freeze-thaw episode in progress
- **Medium hazard (influence factor > 2):** Cumulative rainfall higher than 20 mm (since the beginning of the rainfall episode)
- **High hazard (influence factor > 5):** during negative warming, thawing (defined using the freezing potential) or if the cumulative rainfall since the beginning of the rainfall episode is higher than 30 mm
- **Very high hazard (influence factor > 10):** rainfall intensity since the beginning of the rainfall episode higher than 5 mm/h

Conclusions

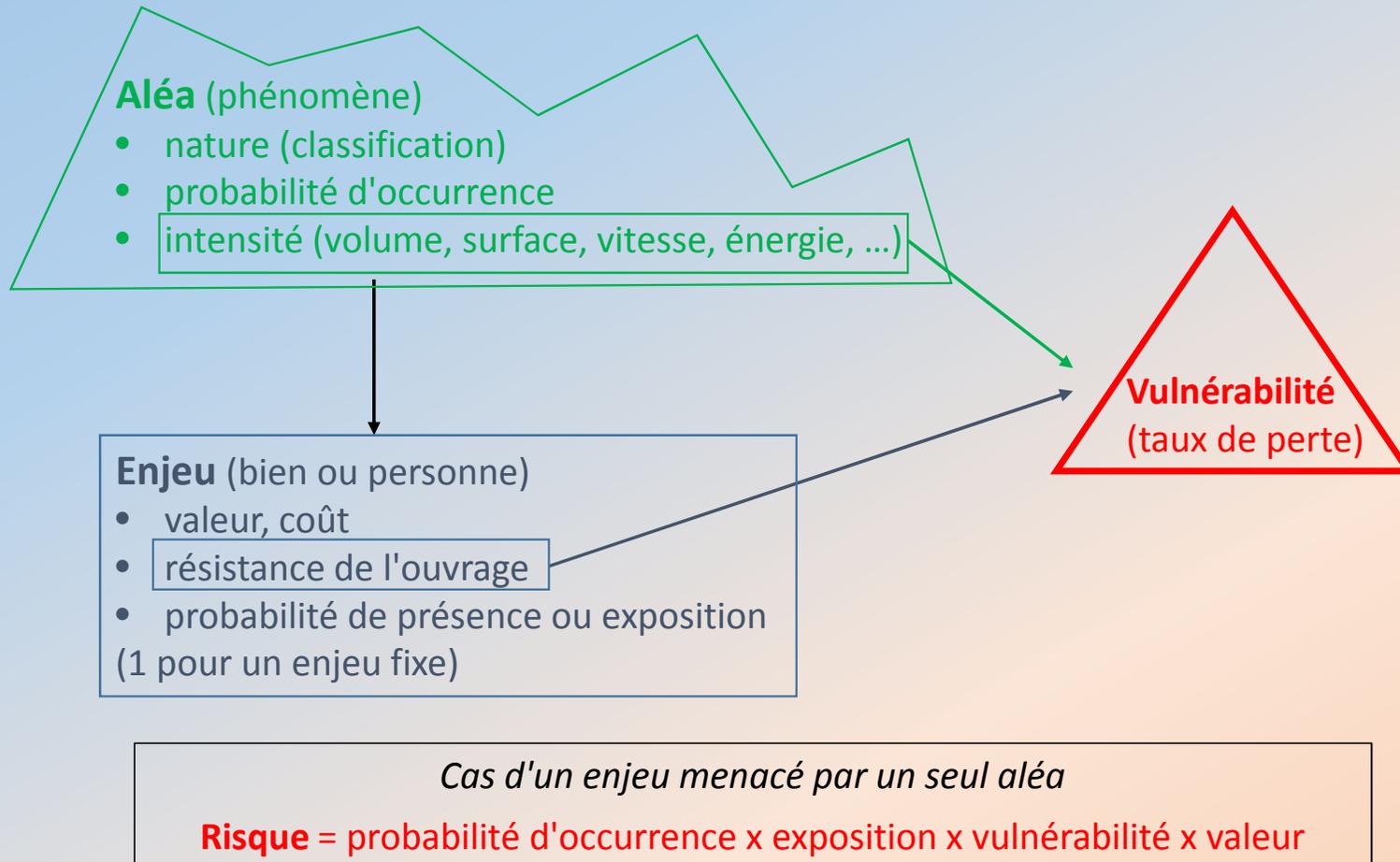
- La **fréquence spatio-temporelle** de chute peut être déterminée pour différents types de falaise, en utilisant le scanner laser terrestre
- Combiné avec une modélisation de la propagation, cela permet une **évaluation quantitative de l'aléa rocheux**
- **L'influence du gel-dégel et de la pluie** peut être précisée en couplant la surveillance photographique avec le scanner laser
- Une **échelle de prévision du risque rocheux** en fonction de la prévision météo est proposée
- Ces résultats doivent être précisés en constituant de nouvelles bases de données dans des conditions géologiques et météorologiques différentes



Merci de votre attention

1. INTRODUCTION de l'aléa au risque

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



1. Volume total des chutes

Fréquence de chute dans **différentes falaises**

Paramètres de la distribution des volumes (Hantz et al., 2015)

Site	Gorgette	St-Eynard	St-Eynard	Chabloz	Venosc
Orientation	SW	SSE	SSE	E	SW
Altitude (m)	1300-1500	850-1100	1150-1300	750-1050	1000-1800
Pente (°)	55	70	80	65	65
Roche	Calcaire lité	Calcaire lité	Calcaire massif	Calcaire massif	Gneiss massif
Dir. pendage / pend. (°)	90 / 40	345 / 35	330 / 60	270 / 45	
Nbre de chutes > 0.1m ³ sur 3.23 ans	64	233	3	2	12
Int. confiance (95%)	[50-80]	[204-262]	[1-7]	[1-6]	[7-20]
Surface de falaise (hm ²)	5.14	12.96	7.72	10.46	36.57
F _{st} (0.1m ³) (hm ⁻² .an ⁻¹)	3.85	5.57	0.12	0.06	0.10
Int. confiance (95%)	[3.0-4.8]	[4.9-6.3]	[0.04-0.28]	[0.03-0.18]	[0.06-.017]
Exponent B	0.64	0.75	-	-	0.38
Int. confiance (95%)	[0.55-0.73]	[0.67-0.83]			[0.16-0.60]