

*Pôle Grenoblois Risques Naturels*  
*Appel d'offre 2006*  
*Projet 9*

**Datation et méthodologie de constitution  
d'une base de données d'avalanches rocheuses  
en vue de l'évaluation de l'aléa**

**D. Hantz**  
**LIRIGM-LGIT**  
**Université Grenoble 1**

## **1. Introduction**

### **Projet proposé en 2006**

**Titre : Datation et reconnaissance géophysique de dépôts d'écroulement en vue de l'évaluation de l'aléa et de l'étude de l'impact des changements climatiques**

**Résumé :** Le projet a pour but d'améliorer l'évaluation de l'aléa écoulement rocheux (probabilité d'occurrence et zone menacée), en utilisant les événements passés. Leur étude permettra aussi, à terme, d'appréhender l'impact des changements climatiques sur ces phénomènes. Pour cela, une méthodologie est proposée pour dater les événements et pour estimer leur volume (à partir du dépôt). Pour la datation, la méthode récente des isotopes cosmogéniques sera testée sur deux éboulements. Pour l'estimation du volume, des méthodes géophysiques seront validées sur un cas récent bien documenté, puis utilisées sur des cas anciens. Les méthodes développées permettront de mieux quantifier la probabilité d'occurrence des écoulements de falaises calcaires et de valider les modèles de propagation, en utilisant des dépôts d'éboulements anciens dont l'épaisseur aura pu être déterminée par prospection géophysique.

### **Avis du Conseil Scientifique**

Le CST note que ce projet s'intègre dans une démarche d'ensemble validée visant à caractériser l'aléa d'écroulement rocheux en terme de fréquences-volumes à partir de l'analyse et de la datation d'écroulements passés.

Le CST regrette cependant que le projet se disperse vers de multiples objectifs : validation des méthodes de datation par isotopes cosmogéniques, exploration et caractérisation géophysique des dépôts, validation des simulations numériques de propagation, évaluation de l'influence des conditions climatiques...

En conséquence, le CST décide de soutenir partiellement ce projet avec un financement réduit et en limitant le champ de l'étude à la datation et à la méthodologie de constitution d'une Base de Données des « avalanches rocheuses »

Financement demandé : 13 000 €

Financement proposé : 6 000€

Compte tenu de l'avis du CST, le titre du projet a été modifié et le travail a porté sur la datation des avalanches rocheuses et sur la méthodologie de constitution d'une base de données (BD) d'avalanches rocheuses en vue de l'évaluation de l'aléa.

## 2. L'évaluation de l'aléa d'éboulement et d'avalanche rocheuse

Les éboulements en masse (plus de  $10^5 \text{ m}^3$ ), appelés aussi écroulements ou avalanches rocheuses, sont des phénomènes relativement rares, par comparaison avec les chutes de blocs, mais beaucoup plus destructeurs. Le bassin grenoblois et l'ensemble des Préalpes sont particulièrement menacés par ces phénomènes. Des éboulements de plus de  $10^5 \text{ m}^3$  s'y sont produits au 19<sup>e</sup> siècle, en 1826, 1867 et 1889, et au 20<sup>e</sup> siècle en 1988, heureusement dans des zones non urbanisées (RTM, 1996). Au 17<sup>e</sup> siècle, une avalanche rocheuse a détruit le hameau des Ruines à Saint-Paul de Varcès, et en 1248, le glissement-écroulement exceptionnel du Granier ( $500 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) a détruit plusieurs villages, provoquant la mort de plusieurs milliers de personnes. D'autre cas, préhistoriques ou historiques, non datés, sont connus dans les Préalpes.

L'évaluation de l'aléa écroulement se décompose en deux phases. La première consiste à localiser les compartiments susceptibles de s'ébouler et à évaluer la probabilité plus ou moins grande que cela se produise. La seconde a pour but de délimiter les zones menacées. Le travail présenté a pour but de développer ce thème de recherche dans le cas des vallées entaillées dans le massif des Ecrins et dans celui des falaises de calcaire massif, telles que celles qui entourent le bassin grenoblois. En effet, le LIRIGM est impliqué dans l'étude des aléas majeurs d'écroulement rocheux dans l'agglomération grenobloise (aux côtés du CETE de Lyon et de l'ADRGT), et il serait souhaitable que les résultats qui seront obtenus puissent être pris en compte dans l'évaluation des zones menacées.

En ce qui concerne la probabilité de départ des éboulements (ou probabilité de rupture), son évaluation à long terme est jusqu'à présent qualitative pour deux raisons : la première est que l'approche géomécanique ne permet pas (encore ?) d'évaluer précisément la stabilité d'une falaise ni son évolution future ; la seconde, que l'approche historique et statistique, utilisée pourtant avec succès pour les séismes et les crues, et de plus en plus pour les glissements de terrain, est peu utilisée pour les éboulements à cause du manque de données historiques. Si elle ne permet pas d'évaluer directement la probabilité de rupture d'une masse rocheuse donnée, cette approche historique permettrait de valider une évaluation globale de l'aléa à l'échelle d'un bassin de risque, en vérifiant sa compatibilité avec les données historiques (Vengeon et al., 2001; Hantz et al., 2003). Par exemple, une première analyse statistique sur le Y grenoblois, basée sur l'inventaire établi par le service RTM, montre que plusieurs éboulements de plus de  $10^5 \text{ m}^3$  (2 en moyenne), peuvent se produire en un siècle dans les 150 km de falaises qui dominent le bassin grenoblois (Dussauge-Peisser et al., 2002; Hantz et al., 2002; Hantz et al., 2003). Une évaluation globale qui signifierait 30 aléas majeurs (forte probabilité de rupture) sur la même zone, ne serait donc pas validée. Mais cette première analyse comporte trop peu d'événements de volume important pour être suffisamment significative, et demande donc à être complétée à la fois dans l'espace et dans le temps. D'autre part, elle suppose que la fréquence moyenne d'éboulements est la même depuis plusieurs siècles, et ne prend donc pas en compte l'impact des changements climatiques sur le déclenchement des avalanches rocheuses. Cet impact pourrait être étudié à partir d'une base de données préhistoriques, incluant les écroulements post-glaciaires. L'objectif de ce projet est

de développer une méthode permettant de mieux connaître la fréquence des gros éboulements, d'une part en déterminant la date et le volume des principaux éboulements majeurs, d'autre part à partir de la loi de distribution des éboulements. Pour la datation, nous testerons la méthode des isotopes cosmogéniques (cosmonucléides), récemment développée en France par Bourlès et son équipe à l'Université d'Aix-Marseille (Siame et al., 2000; Bigot-Cormier et al., 2005). Pour préciser la relation fréquence-volume, nous proposerons une méthode d'estimation des volumes à partir de relevés topographiques de terrain.

### **3. Les bases de données destinées à l'évaluation de l'aléa**

L'évaluation de l'aléa consiste à localiser et caractériser les éboulements potentiels et à estimer leur probabilité d'occurrence pour un délai donné (par exemple un siècle). Les méthodes utilisées peuvent être classées suivant deux approches (non exclusives) : l'approche géomécanique, qui tente de prévoir l'évolution future des compartiments rocheux repérés par des analyses mécaniques quantitatives et qualitatives, et l'approche historique ou empirique, qui attache une importance particulière aux éboulements passés. Jusqu'à présent, cette approche s'appuie essentiellement sur la mémoire de l'expert et sur une information dispersée dans la littérature spécialisée. Le développement des bases de données peut rendre cette approche historique plus efficace et plus quantitative. Celles-ci peuvent être utilisées de deux manières :

(a) pour identifier les éboulements potentiels et évaluer leur probabilité d'occurrence individuelle en appliquant le principe de similarité, selon lequel les éboulements futurs se produiront dans les mêmes conditions que les événements passés ; ce principe peut s'appliquer directement en recherchant des cas similaires dans une base de données, ou indirectement en utilisant des méthodes d'analyse statistique multivariée.

(b) pour estimer la fréquence d'éboulements dans une zone homogène, pour laquelle on dispose d'un inventaire exhaustif sur une période donnée et pour une gamme de volume donnée ; cette fréquence permet ensuite de contrôler la vraisemblance des probabilités d'occurrence estimées par les autres méthodes, ou même de déterminer ces probabilités en combinant les différentes approches (méthode HGP –Historique-Géomécanique-Probabiliste-Vengeon et al., 2001 ; Hantz et al., 2003).

Notons qu'il existe des bases de données nationales ou locales informatives (BDMVT, IRMA, ...), dont la vocation est d'informer sur le risque mouvement de terrain, mais qui ne sont pas suffisamment adaptées à l'évaluation de l'aléa.

### **4. Estimation de la probabilité d'occurrence individuelle des éboulements potentiels**

La première utilisation (a) nécessite des bases de données comportant des informations sur les caractéristiques géologiques, géomorphologiques, hydrologiques, climatiques du versant, sur les mécanismes de la rupture initiale et de la propagation, sur les facteurs déclenchants et sur l'état final de la pente. Un travail important sur la structure de telles bases de données a été effectué dans le cadre du projet européen Interreg Rockslidetec (BD Badaboum) et dans celui du projet région Rhône-Alpes SIHREN (Système d'Information Historique pour les Risques Naturels). La base de données Badaboum est destinée à recenser et décrire les éboulements et avalanches rocheuses de plus de  $10^6$  m<sup>3</sup> survenus sur l'ensemble de l'arc alpin. Les événements historiques concernant les Alpes françaises, suisses et valdotaines ont été décrits dans le cadre du projet Rockslidetec. Dans le cadre du projet

Climchalp, la base doit être étendue à d'autres régions alpines. Des exemples d'exploitation de BD pour l'identification et l'évaluation de l'aléa éboulement sont donnés dans (Frayssines et Hantz, 2006) et (Hantz et Frayssines, 2007).

## 5. Estimation de la fréquence d'éboulements dans une zone donnée

L'estimation de la fréquence d'éboulements (b) nécessite une base de données exhaustive pour une certaine gamme de volume, une certaine période et sur une zone géographique définie. La période étudiée et la zone observée doivent être suffisamment importantes pour avoir une certaine homogénéité spatiale et temporelle, et pour fournir un nombre significatif d'évènements pour chaque classe de volume. La BD doit comporter au minimum, pour chaque évènement, la localisation de la niche d'arrachement, la date de rupture, le type de phénomène et le volume. Pour chaque classe de volume, une fréquence peut être déterminée, en terme de nombre d'éboulements par siècle (ou année) pour la zone considérée ou de nombre d'éboulements par siècle et par km<sup>2</sup> (ou par km de falaise) pour des pentes ayant les mêmes caractéristiques que la zone couverte par l'inventaire (fréquence spatio-temporelle).

La période pouvant être couverte dépend de la gamme de volume visée et des méthodes d'investigation utilisées. Pour fixer les idées, on peut donner les chiffres suivants :

- $10^2 - 10^4 \text{ m}^3 \rightarrow 10\text{-}50$  ans (observation, enquête, archives)
- $10^4 - 10^5 \text{ m}^3 \rightarrow 50\text{-}100$  ans (archives, observation)
- $10^5 - 10^6 \text{ m}^3 \rightarrow 100\text{-}200$  ans (archives, observation)
- $> 10^6 \text{ m}^3 \rightarrow 500$  ans (archives, observation)

Des études de fréquence d'éboulements ont été effectuées sur différentes zones géographiques, notamment sur les 150 km de falaises calcaires de l'agglomération grenobloise, pour lesquelles une base de données a été réalisée à partir des archives du service RTM 38 (RTM, 1996 ; Dussauge-Peisser et al., 2002 ; Hantz et al., 2003). Celle-ci a permis d'estimer des fréquences d'éboulements (tableau 1). On constate sur le tableau 1, que le nombre de cas survenus sur la période et la zone observées diminue lorsque le volume augmente. Il en résulte que l'incertitude sur la fréquence obtenue diminue.

Tableau 1. Fréquences d'éboulement observées sur les 150 km de falaise de l'agglomération grenobloise (Hantz et al., 2003).

Classe de volume (m <sup>3</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

Pour obtenir une meilleure estimation de la fréquence des gros éboulements (notamment des avalanches rocheuses), nous avons développé plusieurs axes de recherche :

- Extension de la période couverte par les bases de données, en utilisant les nouvelles méthodes de datation pour dater les évènements holocènes (survenus depuis la disparition des glaciers qui recouvraient les grandes vallées alpines) ;
- Extension des bases de données dans l'espace, en établissant des collaborations avec les différentes régions alpines et en développant une méthodologie de recherche et de caractérisation des éboulements récents ; des fréquences spatio-temporelles d'éboulements par type de terrain pourront ainsi être déterminées ;

- Détermination de la loi de distribution des éboulements suivant leur volume (relation fréquence-volume), afin de pouvoir déterminer par extrapolation les fréquences des gros volumes lorsque les données sont insuffisantes ; les premiers résultats obtenus (Dussauge-Peisser et al., 2002) doivent être consolidés en analysant de nouvelles BD.

## 6. Méthodologie d'acquisition des données

Une méthodologie d'acquisition des données (localisation, date, type, volume) a été développée dans le cadre de ce projet (stage de Master P. Dupire). Elle a été mise au point lors de la constitution d'une BD recensant les éboulements survenus dans les vallées entaillées dans les roches plutoniques et métamorphiques massives (granite, gneiss, ...) du massif des Ecrins.

Les éboulements ont été identifiés :

- par observation directe des versants en recherchant les niches d'arrachement (repérables par leur couleur plus claire ou leur morphologie) et les dépôts correspondants ;
- par consultation des BD informatives existantes (BDMVT, IRMA), de la documentation spécialisée et des cartes géologiques (pour les plus gros éboulements holocènes) ;
- par enquête auprès des habitants et acteurs locaux (gardes du Parc national des Ecrins, techniciens RTM, ...).

La localisation de la zone de départ a été effectuée si possible au télémètre laser – clinomètre (portée ~ 1000 m ; précision en distance ~ 0,3 m ; angle vertical ~ 0,5°) à partir d'une station localisée grâce à un GPS de randonnée (précision ~ 10 m). Les niches d'arrachement hors de portée du télémètre ont été localisées plus grossièrement en les situant sur la carte IGN au 1/25 000.

Les dimensions de la niche d'arrachement ont été déterminées au moyen du télémètre laser – clinomètre (figure 1), complété par des jumelles marines pour les angles horizontaux (précision ~ 20%). Le volume de chaque éboulement a ainsi pu être estimé grossièrement, ce qui permet une classification par ordre de grandeur (comme dans le tableau 1) ou demi-ordre de grandeur.

Dans le cas où elle ne figurait pas dans un document ou une BD, on a tenté de retrouver la date de l'évènement en interrogeant les habitants. Si la connaissance de la date exacte est nécessaire pour étudier l'influence des conditions météorologiques journalières sur le déclenchement des éboulements (Frayssines et Hantz, 2006), elle ne l'est pas pour estimer la fréquence moyenne à l'échelle de l'année ou du siècle. Pour une période d'étude de quelques années ou décennies, il suffit de savoir si un éboulement a bien eu lieu durant la période considérée.

Le mécanisme de rupture initial est généralement déterminé par observation aux jumelles. Dans quelques cas, des observations et mesures rapprochées ont été effectuées. La distance maximale de propagation est également relevée.

Environ 170 éboulements ont ainsi été répertoriés, dont une centaine datant du XXème siècle. L'exploitation de ces données est en cours (mémoire de Master de P. Dupire, qui sera soutenu en juin 2008).

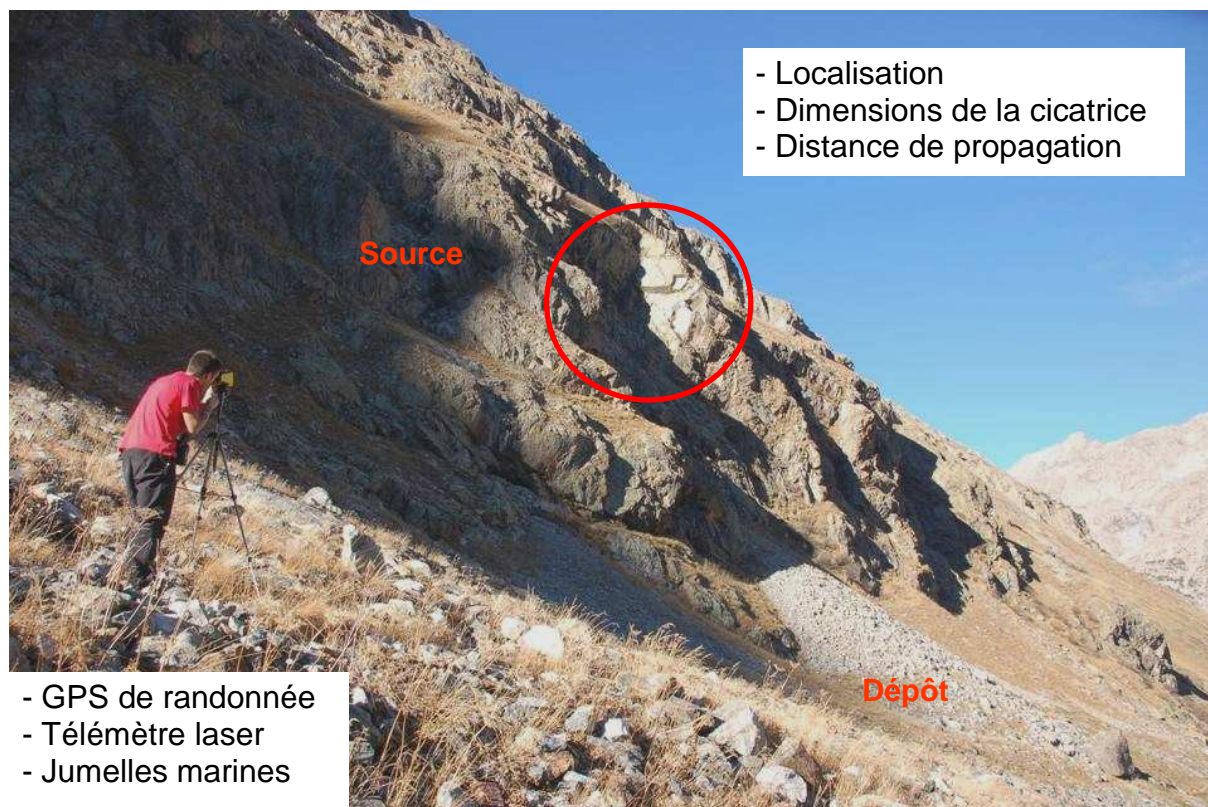


Figure 1. Localisation et estimation des dimensions d'une cicatrice d'éboulement.

## 7. Datation par les cosmonucléides

Le rayonnement cosmique, constitué de particules à très haute énergie, interagit avec l'atmosphère, produisant des particules secondaires qui vont elles-mêmes interagir avec des molécules atmosphériques mais aussi avec certains constituants des roches en contact (ou proches du contact) avec l'atmosphère. Les produits de cette interaction sont appelés nucléides cosmogéniques ou cosmonucléides. La quantité de ces produits contenue dans les roches exposées dépend de la durée d'exposition. En prélevant des échantillons sur une cicatrice d'éboulement ou sur des blocs éboulés, on peut donc estimer la date de celui-ci. Les cosmonucléides utilisés sont le  $^{10}\text{Be}$  pour les roches contenant du quartz (granite, gneiss) et le  $^{36}\text{Cl}$  pour celles contenant de la calcite (calcaire). Les échantillons prélevés (quelques centaines de grammes) sont broyés puis subissent un traitement chimique, qui a pour but de séparer le cosmonucléide des autres éléments de la roche. La quantité de  $^{10}\text{Be}$  ou  $^{36}\text{Cl}$  est finalement mesurée en utilisant un spectromètre de masse à accélérateur, qui a été mis en service en 2006 au CEREGE, à Aix-en-Provence, pour un coût d'environ 4 M€ (figure 2).

L'appareil est maintenant opérationnel pour le  $^{10}\text{Be}$  et a été utilisé pour dater l'éboulement du Lauvitel, dont l'âge est estimé à environ 4000 ans (figure 3). Il est encore en cours d'étalonnage pour la mesure du  $^{36}\text{Cl}$ . Les échantillons qui ont été prélevés sur les sites d'éboulement dans le calcaire et ont subi la préparation chimique n'ont donc pas encore été analysés.

Des échantillons ont été prélevés sur deux sites d'éboulements majeurs en Vercors et Chartreuse. Le premier est celui de l'éboulement des Rochers de la Bourgeoise qui, probablement au XVII<sup>ème</sup> siècle, aurait détruit l'ancien village de Saint-Paul de Varcès (figure 4). Ce cas devrait permettre de valider la méthode de datation utilisée. Le second, dont la date



est inconnue, est celui de la Pointe de Blonnière, dont le dépôt (plusieurs  $\text{hm}^3$ ) remplit le cirque de Saint-Même sur environ 1 km de longueur (figure 5).

### Accélérateur pour les Sciences de la Terre, Environnement,



Figure 2. Accélérateur du CEREGE (Aix-en-Provence) utilisé pour déterminer la quantité de cosmonucléides contenue dans les roches.

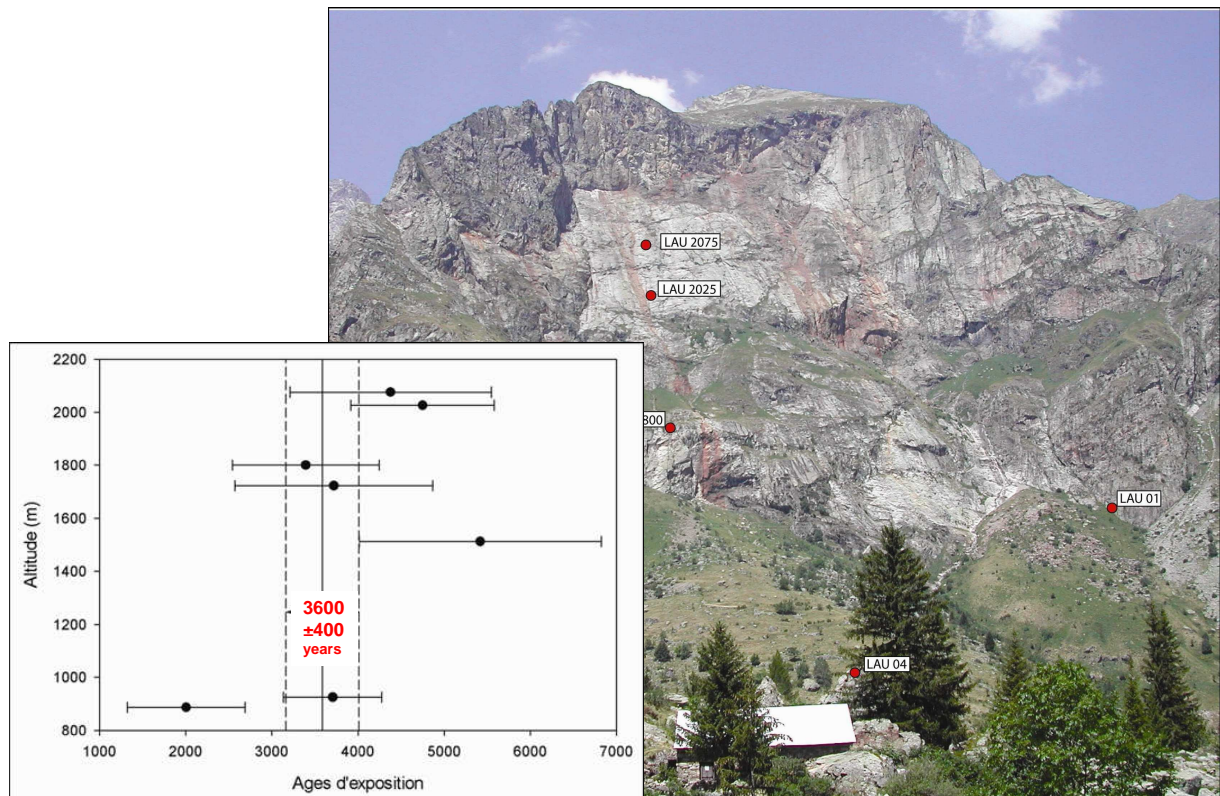


Figure 3. Eboulement du Lauvitel (environ  $50 \text{ hm}^3$ ). Localisation des prélèvements et âges obtenus.



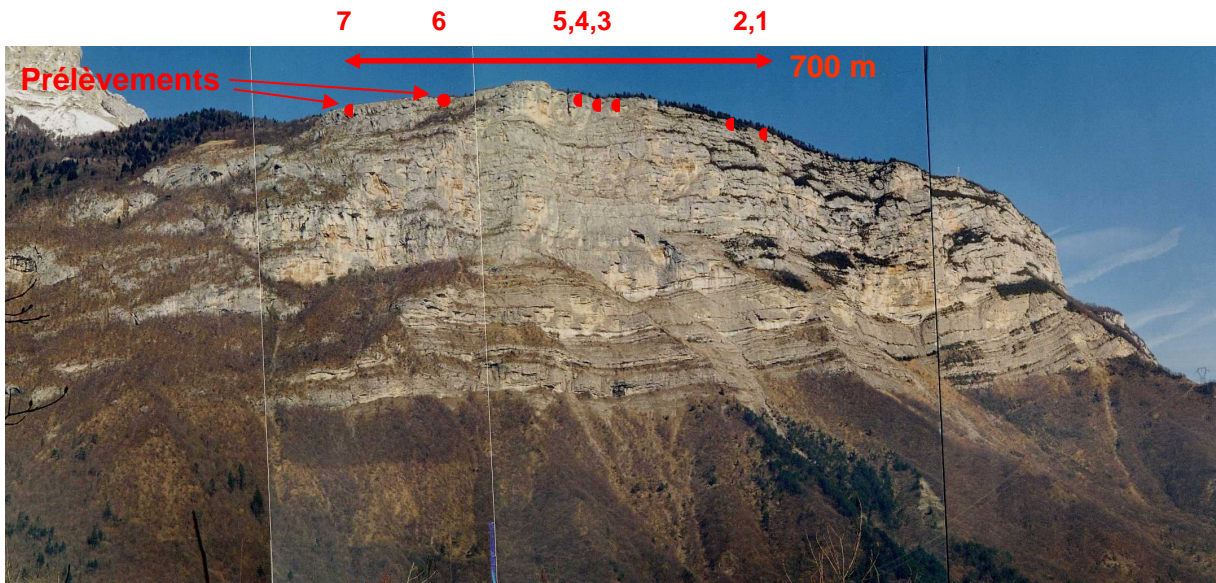


Figure 4. Eboulement des Ruines à Saint-Paul de Varcès ( $4 \text{ hm}^3$ ). Localisation des prélèvements.

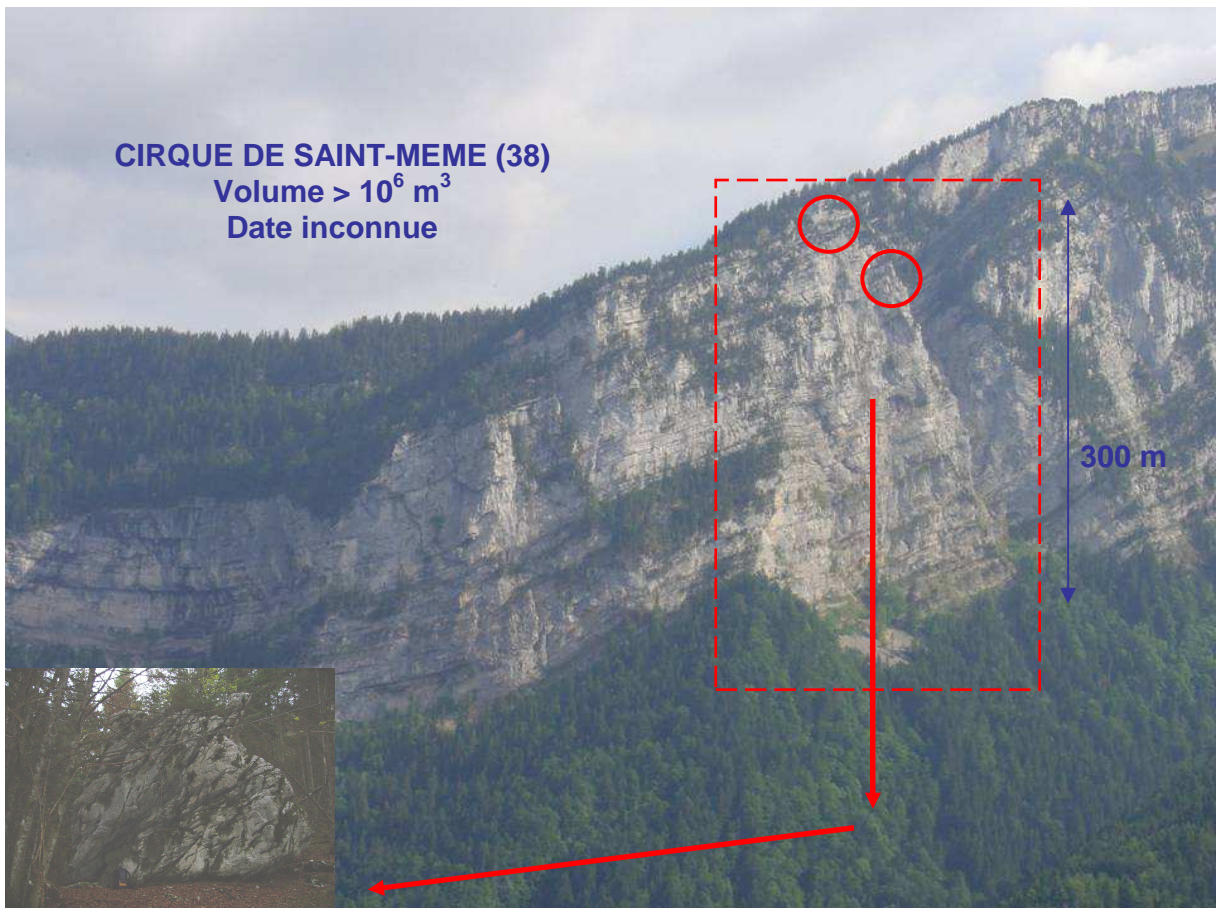


Figure 5. Cicatrice de l'éboulement de Saint-Même et localisation des prélèvements.



**PUBLICATIONS DE L'EQUIPE MOUVEMENTS DE TERRAIN (LGIT, UNIVERSITE GRENOBLE 1) SUR LE SUJET**

- Hantz D., Frayssines, M. (2007) Contribution à l'évaluation de la durée de vie d'un compartiment rocheux susceptible de s'ébouler. *Revue Française de Géotechnique*, n°119, 65-79.
- Frayssines, M., Hantz, D. (2006) Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the Subalpine ranges (French Alps). *Accepté par Engineering Geology*.
- Hantz, D., Jongmans, D. (2005) L'apport de la recherche dans l'évaluation de l'aléa éboulement rocheux. *Risques Infos*, n°16, p.18-20.
- Hantz, D., Vengeon, J.M., Dussauge-Peisser, C. (2003) An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 693-701.
- Hantz D., Dussauge-Peisser C., Jeannin M., Vengeon J-M. (2003) Rock fall hazard assessment: from qualitative to quantitative failure probability. *Int. conf. on Fast Slope Movements, Naples, 11-13 May 2003*, pp. 263-267.
- Dussauge-Peisser C, Helmstetter A, Grasso J-R, Hantz D, Jeannin M, Giraud A. (2002) Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2: 15-26.
- Hantz D, Dussauge-Peisser C, Jeannin M, Vengeon J-M. (2002) Danger d'éboulements rocheux : de l'opinion d'expert à une évaluation quantitative. *Symp. Geomorphology: from expert opinion to modelling, Strasbourg, 26-27/04/02*, p.115-122.
- Vengeon J-M, Hantz D, Dussauge C. (2001) Prédicibilité des éboulements rocheux : approche probabiliste par combinaison d'études historiques et géomécaniques. *Revue Française de Géotechnique*, n°95/96, pp.143-154.
- Groupe "Falaises", Programme Interreg 2C. (2001) Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises - Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin.
- Hantz D. (2001) Ingénierie des pentes rocheuses naturelles et artificielles. *Les Techniques de l'Industrie Minérale*, n°10, *Les progrès dans la maîtrise des mouvements de terrain*, pp.66-75.

**AUTRES REFERENCES CITEES**

- Benedetti, L., P. Tapponnier, Y. Gaudemer, I. Manighetti and J. Van Der Woerd (2003), Evidence for an emergent thrust along the southwestern edge of the Po Plain: The Broni-Stradella fault, *J. Geophys. Res.*, 108(B5), 2238, doi: 10.1029/2001JB001546.
- Bigot-Cormier F., R. Braucher, D.L. Bourlès, Y. Guglielmi, M. Dubar and J.-F. Stéphan (2005) – Chronological Constraints on Processes Leading to Large Active Landslides - *Earth and Planetary Science Letters* 235, 141-150.
- Palumbo L., L. Benedetti, D.L. Bourlès (2004), A. Cinque and R. Finkel - Slip History of the Magnola Fault (Apennines, Central Italy) from <sup>36</sup>Cl Surface Exposure Dating: Evidence for Strong Earthquakes over the Holocene - *Earth and Planetary Science Letters* 225 (1-2), 163-176.
- RTM (1996) Inventaire des mouvements rocheux, Secteur de l'Y grenoblois, Rapport du Service de Restauration des Terrains en Montagne de l'Isère, Grenoble, France.
- Siame L.L., R. Braucher and D.L. Bourlès (2000) – Les Nucléides Cosmogéniques Produits *In-Situ* : de Nouveaux Outils en Géomorphologie Quantitative – *Bulletin de la Société Géologique de France* 171 (4), 383-396.