



HAL
open science

Failles normales post-glaciaires dans les alpes françaises

Jean-Claude Hippolyte

► **To cite this version:**

Jean-Claude Hippolyte. Failles normales post-glaciaires dans les alpes françaises. Géosciences, 2009, Terre active, Terre en mouvement, les systèmes d'observation d'une Terre dynamique, 9, pp.38-44. hal-01961926

HAL Id: hal-01961926

<https://hal.science/hal-01961926>

Submitted on 20 Dec 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Failles normales post-glaciaires dans les Alpes françaises

Dans les Alpes, des escarpements créés par des mouvements de failles, dont certaines avaient été interprétées comme sismiques, témoignent de l'affaissement post-glaciaire des reliefs. Ce phénomène, défini sous le terme allemand de *Sackung* est à l'origine des plus grands mouvements de terrains. Les *Sackungs* se distinguent des autres mouvements gravitaires par la taille, la lenteur et la profondeur des déformations.



Jean-Claude Hippolyte

GÉOLOGUE STRUCTURALISTE
CHARGÉ DE RECHERCHE AU CNRS
CEREGE ⁽¹⁾ (UMR-6635 CNRS), AIX-EN-PROVENCE
hippolyte@cerege.fr

⁽¹⁾ CEREGE : Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (European center for research and education on environmental geosciences).

Faille normale à contre-pente arrêtant les éboulis (Sackung des Grands-Moulins, Savoie).

A normal fault cutting through scree (the Grands-Moulins Sackung, Savoie).

© J.-C. Hippolyte

Origine possible des failles post-glaciaires des Alpes

Les escarpements de failles récents, signalés dès les années 1960 dans les Alpes, sont des escarpements rectilignes qui décalent des surfaces morphologiques comme des tabliers d'éboulis ou des polis glaciaires. Trois phénomènes pourraient être à l'origine de tels escarpements en zones de montagne : la tectonique active, des réajustements accompagnant le rebond post-glaciaire, des mouvements gravitaires profonds appelés *Sackungs*.

Failles tectoniques ?

Pendant un séisme, une faille peut produire une rupture de surface. Mais avant de conclure qu'un escarpement de faille possède une origine sismique il faut s'assurer qu'il est compatible avec le régime de déformation crustale local généralement reconnu par la géophysique. Dans les Alpes, la sismotectonique et les mesures GPS ont montré que les zones internes sont en extension radiale (perpendiculaire à la chaîne) [e.g. Delacou et al. (2004)]. Les escarpements récents observés sont généralement dus à des failles normales, parallèles aux reliefs, et sont donc compatibles avec cette extension radiale (figure 1). Ce critère nécessaire n'est pas suffisant pour conclure, car des failles parallèles aux reliefs peuvent résulter d'autres mécanismes.

Les déformations gravitaires profondes sont dénommées Sackung, terme allemand signifiant tassement.

Failles de rebond isostatique ?

Dans les régions nordiques qui, comme les Alpes, ont été recouvertes par des glaciers au Quaternaire, on connaît aussi des escarpements de failles récents. Ils témoignent des déformations qui ont accompagné le soulèvement lithosphérique lié à la disparition du poids des glaciers. Le plus célèbre est l'escarpement de la faille de Parvie en Suède, qui se suit sur 150 km et atteint 10 m de haut. Il s'agit généralement de failles inverses (compressives), réactivées grâce à une diminution de la contrainte verticale lors de la disparition de la glace. De telles ruptures sismiques en faille inverse ne sont pas connues dans les Alpes internes, cependant, comme cela a été supposé pour la Scandinavie, il est possible que le soulèvement post-glaciaire des Alpes ait été accompagné d'une sismicité accrue favorisant les phénomènes gravitaires.

Les Sackungs ou tassements gravitaires des montagnes

Dans les régions de fort relief se produisent parfois des déformations gravitaires lentes (typiquement de 0,4 à 5 mm/an), profondes (d'une centaine à plusieurs centaines de mètres), et de grande ampleur (à l'échelle d'une montagne). Depuis les travaux de Zischinsky (1969), ces déformations gravitaires profondes (DSGSD - Deep Seated Gravitational Slope Deformations) sont dénommées *Sackung*, terme allemand signifiant tassement [McCalpin et Irvine (1995)]. Les *Sackungs* se distinguent des autres phénomènes gravitaires par leur taille et leur vitesse, mais aussi par les morphostructures spectaculaires qui en résultent : grands escarpements de failles à contre-pente, crevasses ouvertes, crêtes dédoublées et fossés de crêtes. La cartographie d'escarpements de failles dans les Alpes a révélé qu'ils étaient très souvent dus à ce phénomène de *Sackung* [Hippolyte et al. (2006b)].



Quelques grands Sackungs alpins

La déformation par *Sackung* est très répandue dans les Alpes ou les Pyrénées. Parmi les plus grands *Sackungs* des Alpes françaises citons le *Sackung* des Grands-Moulins, le *Sackung* des Arcs, le *Sackung* de l'Alpe d'Huez et le *Sackung* de Vars-les-Couniets [Hippolyte et al. (2006a et b)] (figure 1). Ils se situent généralement dans des roches compétentes (dures) et fracturées. Ainsi, le *Sackung* des Grands-Moulins est situé au débouché de la Maurienne dans les granites, gneiss et micaschistes fracturés du massif de Belledonne, profondément entaillés par la vallée de l'Arc.

Les Sackungs se distinguent des autres phénomènes gravitaires par leur taille et leur vitesse, mais aussi par les morphostructures spectaculaires qui en résultent.

▲ Fig. 1 : Localisation de quelques Sackungs alpins.
Fig. 1: Location of some Sackungs in the Alps.
© J.-C. Hippolyte



◀ **Fig. 2 : Structures typiques des Sackungs : escarpements à contre-pente (a, Sackung de l'Oule ; b, c, d, Sackung des Grands-Moulins ; g, Sackung de l'Alpe d'Huez), crêtes multiples (e, Sackung de Vars-les-Couniets) et fossé de crête avec lac (f, Lac Froid, Col de Larche, Alpes-de-Haute-Provence).**

Fig. 2: Characteristic features of the Sackungs. Uphill-facing scarps (a, Oule Sackung ; b, c, d, Grands-Moulins Sackung ; g, Alpe d'Huez Sackung), multiple crests (e, Vars-Les Couniets Sackung) and ridgetop graben with lake (f, Lac Froid, Col de Larche, Alpes-de-Haute-Provence).

© J.-C. Hippolyte

Caractéristiques des déformations de Sackung

Dans les *Sackungs*, les mouvements de failles sont purement normaux et n'ont généralement pas de composante décrochante ou en raccourcissement comme on peut le trouver dans le cas des failles de déformation crustale. Les failles normales à contre-pente, abaissant la partie haute du versant, dominent largement (figures 2a, b, c, d, g ; 3b, d).

Comme dans les autres phénomènes gravitaires, des crevasses ouvertes peuvent également être observées. Elles sont parfois abondantes, comme dans le *Sackung* des Arcs, où les surfaces de stratifications verticales favorisent ces ouvertures (figure 3a). Elles sont surtout

À la différence des failles crustales, les *Sackungs* forment généralement de grands champs d'escarpements.

présentes près des crêtes, où l'on voit alors apparaître d'autres structures typiques : les crêtes multiples et les fossés de crêtes (figures 2e, 2f).

Une organisation en champs de fractures

À la différence des failles crustales, les *Sackungs* forment généralement de grands champs d'escarpements. Les failles sont typiquement parallèles, nombreuses, et relativement courtes (100 m à quelques kilomètres). Le *Sackung* des Grands-Moulins est constitué d'une

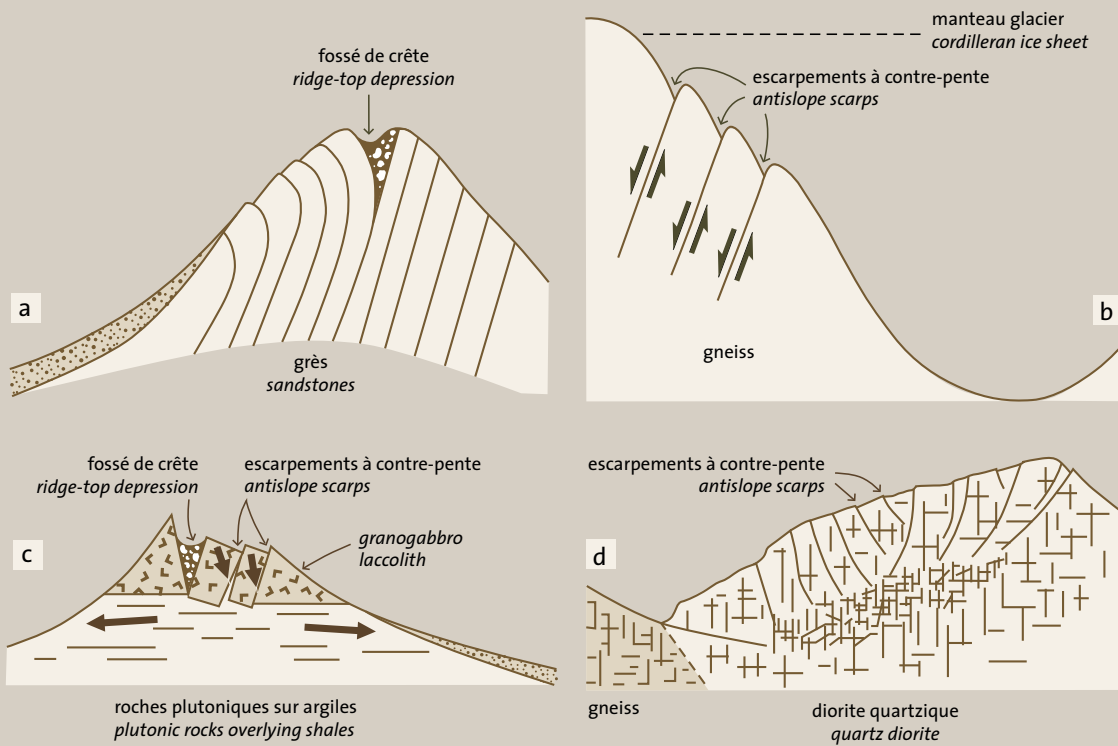


Fig. 3 : Quelques modèles de formation d'escarpements Sackung :

- a grès ;
- b gneiss ;
- c roches plutoniques sur argiles ;
- d granite.

Modifiés d'après M. J. Bovis, 1982

Fig. 3: Possible origin of Sackung scarps:

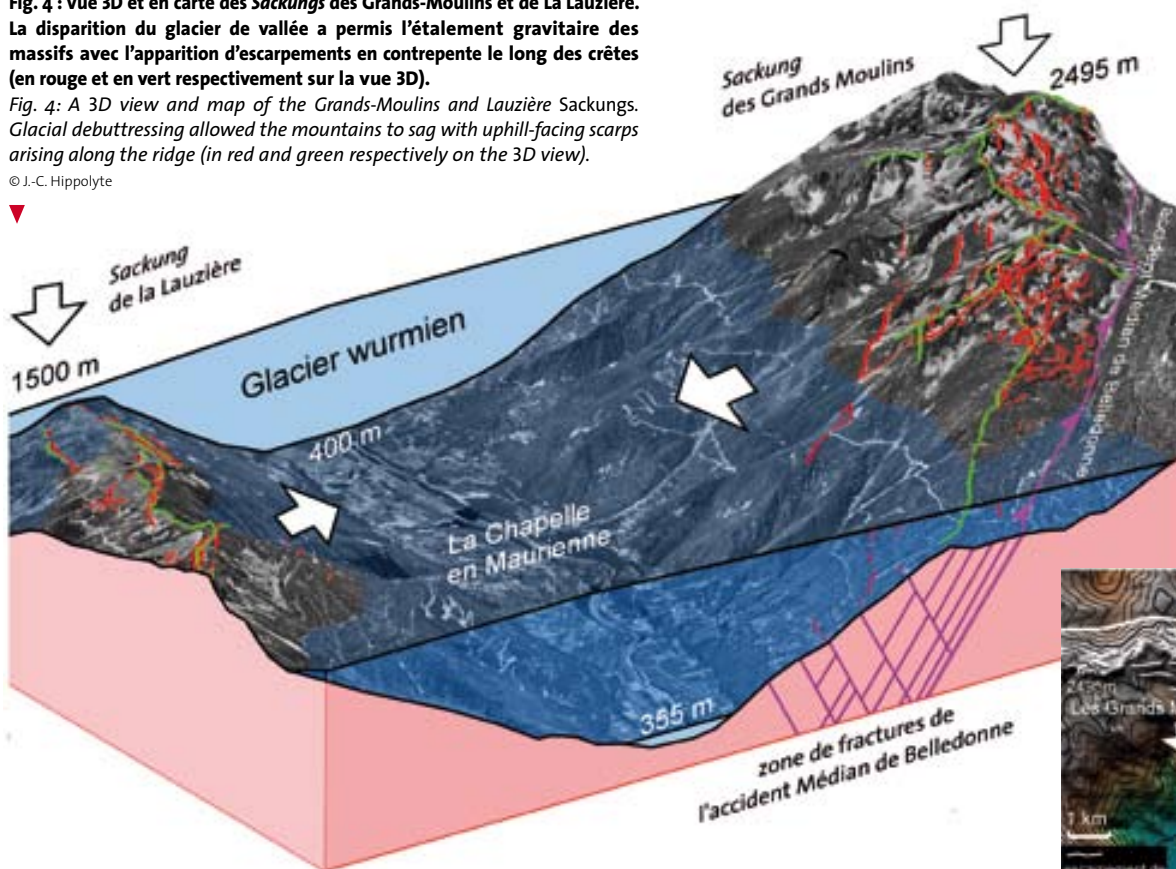
- a sandstones;
- b gneiss;
- c plutonic rocks overlying shales;
- d granite.

Modified from M. J. Bovis, 1982

Fig. 4 : Vue 3D et en carte des Sackungs des Grands-Moulins et de La Lauzière. La disparition du glacier de vallée a permis l'étalement gravitaire des massifs avec l'apparition d'escarpements en contre-pente le long des crêtes (en rouge et en vert respectivement sur la vue 3D).

Fig. 4: A 3D view and map of the Grands-Moulins and Lauzière Sackungs. Glacial debuttressing allowed the mountains to sag with uphill-facing scarps arising along the ridge (in red and green respectively on the 3D view).

© J.-C. Hippolyte



soixantaine de failles normales ne dépassant pas 2,1 km de long, avec des rejets verticaux de 1 à 30 mètres. Ce champ de fractures s'étend le long des crêtes sur 11 km² (figure 4).

L'héritage structural

Les surfaces qui jouent dans les tassements gravitaires sont généralement des discontinuités préexistantes, plans de stratification ou fractures. Dans le cas du *Sackung* des Grands-Moulins, les escarpements sont sur des failles héritées des déformations alpines du Miocène [Hippolyte *et al.* (2006a)] et qui appartiennent à la zone de fracture de l'accident médian de Belledonne (figure 4). Le *Sackung* a remobilisé les fractures situées près de la crête, sans activer l'accident principal.

Un contrôle topographique

À la différence des mouvements tectoniques, ou des failles de rebond post-glaciaire, les escarpements de *Sackung* n'affectent pas les fonds de vallées et leur remplissage alluvial. Ils sont surtout présents dans la partie supérieure des reliefs. Par ailleurs, les escarpements sont toujours sub-parallèles aux courbes de niveaux ou à la ligne de crête et changent de direction

avec elle (figure 4). Cette géométrie démontre qu'ils sont contrôlés par le relief, ce qui confirme leur origine gravitaire. Dans le cas des Grands-Moulins, des failles normales à contre-pente sont présentes sur les deux versants de la crête du Rognier (figure 4). Leur symétrie par rapport à la crête sommitale (où la charge lithostatique est maximale) démontre un contrôle gravitaire à l'échelle de la montagne.

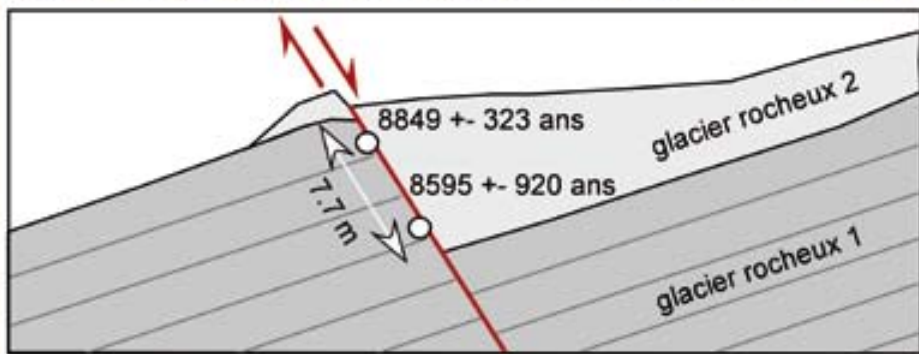
L'âge des mouvements

Les escarpements de *Sackung* sont récents car ils décalent des surfaces modelées par les glaciers, ou plus récentes. On observe des tabliers d'éboulis post-glaciaires ou des glaciers rocheux (structures de blocailles en bourrelets décalés verticalement (figure 2b). Ces derniers sont principalement issus d'éboulis mis en mouvement par fluage de glace interstitielle durant des épisodes froids. Les glaciers rocheux inactifs recoupés par des failles ont donc vraisemblablement été modelés pendant le Tardiglaciaire (18 000 à 11 500 ans). Ils nous ont permis de montrer que la plupart des failles de *Sackung* identifiées avaient bougé pendant et après cette période froide.

“ Leur géométrie confirme leur origine gravitaire. ”

Fig. 5 : Échantillonnage pour datation par ¹⁰Be d'un escarpement de faille (Sackung de l'Oule, Isère); et datation d'une faille Sackung recoupant deux glaciers rocheux superposés (Station des Arcs, Savoie).
 Fig. 5: Sampling for ¹⁰Be dating of a sackung scarp (Oule Sackung, Isère); and ¹⁰Be ages of a sackung fault cross-cutting two superposed rock glaciers (The Arcs ski resort, Savoie).

© J.-C. Hippolyte





► DATATION GRÂCE À LA SPECTROMÉTRIE DE MASSE PAR ACCÉLÉRATEUR

Didier Bourlès CEREGE, UMR 6635 CNRS – Universités Aix-Marseille – bourles@cerege.fr



La spectrométrie de masse par accélérateur est une technique au développement récent dont le champ d'application ne cesse de s'étendre. Aux sélections électriques et magnétiques « classiques » qui permettent de sélectionner des ions d'une charge et d'une masse données, s'ajoute un étage d'accélération qui permet d'accéder à la structure nucléaire des ions sélectionnés et donc de les caractériser par leur numéro atomique. Cette nouvelle technique d'analyse améliore d'un facteur au moins un million la sensibilité de détection relativement aux techniques plus classiques [Klein *et al.* (2008)]. Il est alors possible de travailler à partir de quantités de matière beaucoup plus faibles et de dater plus de types d'objets sur une gamme temporelle plus étendue. On peut alors mesurer la concentration en nucléides cosmogéniques (^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl ...), et déterminer la durée d'exposition au rayonnement cosmique d'une surface rocheuse.

Baptisé ASTER (Accélérateur pour les Sciences de la Terre, Environnement, Risques), le spectromètre de masse par accélérateur, instrument national dédié aux nucléides cosmogéniques autres que le ^{14}C est hébergé par le CEREGE à Aix-en-Provence. Cet équipement, qui délivre une tension terminale de 5 millions de volts, nécessaire notamment à la détection du ^{36}Cl , est seulement le deuxième exemplaire de ce type en activité dans le monde.

Named ASTER (standing for accelerator for earth sciences, environment and risks), this national accelerator mass spectrometer dedicated to cosmogenic nuclides other than ^{14}C is sited at the CEREGE laboratory at Aix-en-Provence. Delivering a final tension of 5 million volts (required notably for detecting ^{36}Cl), it is only the second of its kind in operation in the world. ■

▲ **ASTER, spectromètre de masse par accélérateur, CEREGE, Aix-en-Provence.**
ASTER, accelerator mass spectrometer, CEREGE, Aix-en-Provence.

© D. Bourlès.

Datations par ^{10}Be cosmogénique

L'âge récent des failles *Sackung* peut être précisé grâce au développement des méthodes de datation de surfaces par isotopes cosmogéniques (nucléides formés par l'interaction entre les particules issues du rayonnement cosmique et les atomes cibles de différents substrats). Dans les granites, gneiss et quartzites des *Sackungs*, nous pouvons prélever des échantillons de surfaces rocheuses contenant du quartz dans lequel se forme du béryllium (*figure 5*). La mesure, en spectromètre de masse par accélérateur de la concentration en ^{10}Be dans ces échantillons (*cf. encadré*) permet de dater la mise à l'exposition des surfaces rocheuses contenant ce quartz sur une gamme temporelle allant de quelques milliers d'années jusqu'à un million d'années dans les cas les plus favorables [Klein *et al.* (2008)].

Les premiers résultats de datation de miroirs de failles montrent que toutes les failles d'un *Sackung* peuvent avoir été sub-contemporaines et avoir été actives pen-

dant un temps limité (de 12 000 à 8 000 ans B.P. dans le cas du *Sackung* des Arcs, *figure 5*). Certains dégagements de miroirs ont été rapides (5 m en moins de 1 200 ans), ce qui est compatible avec l'hypothèse de secousses sismiques favorisant ces affaissements de massifs [Hippolyte *et al.* (2006b)].

Conditions favorables à la formation d'un *Sackung*

L'origine et le mécanisme profond des *Sackungs* sont encore peu compris (*figure 3*). Les facteurs favorisant leur formation ou les déclenchant peuvent être multiples : décompression post-glaciaire des versants, secousses sismiques, circulations d'eau... La localisation des *Sackungs* étudiés dans les Alpes montre qu'ils résultent aussi de la conjonction de conditions particulières : présence d'une vallée profonde et d'une crête, parallèles à des surfaces de discontinuité préexistantes (stratigraphie, fractures...). Un élément

“ L'âge récent des failles *Sackung* peut être précisé grâce au développement des méthodes de datation de surfaces par isotopes cosmogéniques. ”

**Fig. 6 : Failles normales
découpant la montagne
du Rognier (Sackung des Grands-Moulins, Savoie).**

*Fig. 6: Normal faults standing
out the Rognier mountain
(the Grands-Moulins Sackung,
Savoie).*

© J.-C. Hippolyte.



commun à tous les *Sackungs* est l'existence d'un fort gradient topographique sous la zone en extension. En Maurienne, la présence de *Sackungs* sur les deux flancs de la vallée (Grands-Moulins et Lauzière, *figure 4*) conforte le modèle de déstabilisation des versants lors du retrait des glaciers. Dans le prolongement sud-ouest de la zone de fracture de l'accident médian, l'essentiel de la déformation disparaît lorsque l'appel au vide de la vallée de l'Arc n'existe plus (*figure 1*).

L'âge post-glaciaire des escarpements s'accorde avec l'hypothèse d'une déstabilisation des versants du fait du retrait des glaciers. Toutefois, des secousses sismiques peuvent déclencher et/ou entretenir ces mouvements gravitaires comme cela a été observé en Californie ou en Alaska (séisme de Denali en 2000...). C'est probablement le cas de quelques failles *Sackungs* observées dans les Alpes loin des vallées profondes (*Sackung* de l'Oule, *figure 1*). Ces *Sackungs* pourraient alors témoigner d'une activité sismique accrue liée à la déglaciation et au soulèvement de la chaîne.

“ Des secousses sismiques peuvent déclencher et/ou entretenir ces mouvements gravitaires. ”

Il est maintenant établi que la géodynamique des Alpes est dominée par les forces de volume et une convergence réduite [Delacou *et al.* (2004)]. Du fait du régime extensif des Alpes internes, la déglaciation n'y a pas provoqué l'activation de failles inverses par diminution de la contrainte verticale comme observée dans les régions nordiques. Cette déglaciation a surtout engendré les mouvements gravitaires profonds dénommés *Sackungs*. Il y a donc coïncidence dans les Alpes internes entre ces déformations extensives post-glaciaires et l'état de contrainte crustal extensif. Il est donc indispensable de démontrer qu'un escarpement récent n'est pas *Sackung* (critères établis ci-dessus) avant de conclure à une faille crustale et à un risque sismique. En revanche, la possible activité actuelle d'un *Sackung*, ou sa perméabilité (les fractures pouvant provoquer des circulations profondes), sont à prendre en considération lors des aménagements en montagne (stations de ski, tunnels...). ■



Post-glacial normal faults in the French Alps

Recent fault scarps can result either from tectonic forces, from glacial isostatic rebound, or from gravitational forces.

In the French Alps, detailed mapping showed that most of the recent fault scarps result from gravitational forces in areas of high topographic gradient. They are typical “Sackung” scarps (structures formed by deep-seated gravitational spreading).

They are either uphill-facing faults that parallel the slope contour lines and show pure normal movements, or open tension cracks. They form characteristic structures like ridge-top troughs, closed depressions and multiple-crested ridges. These scarps are generally numerous, short (less than 2.1 km), and organized in swarms called “Sackungen” (up to 9 km long in the Belledonne massif). They often cut scree and relict rock glaciers with a slow (commonly 1 mm/year) average slip rate.

Even if glacial debuttressing is the main factor for their formation,

their mechanism is still debated.

We use the ¹⁰Be dating method developed at the CEREGE to date the fault surfaces by determining the amount of Beryllium formed by cosmic ray exposure in the quartz contained in the rocks. This surface exposure dating shows that large slips can occur rapidly (5 m in less than 1 200 yrs), and that sagging can occur in a limited period (between 12 000 and 8 000 yrs BP for the Arcs Sackung). Rapid slips suggest that some Sackungs may have been triggered by strong earthquakes during the post-glacial rebound and probable enhanced seismicity of the Alps.