

Tectonique

Les failles récentes des Grands-Moulins (Savoie) : un *Sackung* (tassement gravitaire) majeur dans les Alpes françaises

Jean-Claude Hippolyte^{a,*}, Marc Tardy^a, Gérard Nicoud^b

^a Laboratoire de géodynamique des chaînes alpines, UMR CNRS 5025, université de Savoie, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France

^b Laboratoire environnements, dynamiques et territoires de la Montagne, UMR CNRS 5204, université de Savoie, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France

Reçu le 22 octobre 2005 ; accepté après révision le 3 avril 2006

Disponible sur Internet le 19 juin 2006

Présenté par Jacques Angelier

Résumé

L'analyse des escarpements de failles des Grands-Moulins, parfois considérés comme d'origine sismotectonique, conduit à les rattacher à un *Sackung* (tassement gravitaire) majeur des Alpes françaises (9 km de long). Plus de 60 escarpements récents (l'un d'eux de 1330 m de long et de 30 m de haut) ont été cartographiés sur une surface de 11 km². Ces failles normales à contre-pente arrêtent les éboulis actifs et décalent jusqu'à 16 m d'anciens glaciers rocheux probablement du Dryas. Leurs traits géomorphologiques témoignent de leur origine gravitaire. Ce *Sackung*, fonctionnant avec des failles antithétiques et génétiquement lié à la relaxation des contraintes ayant suivi la déglaciation de la vallée de l'Arc, pourrait avoir été favorisé par des secousses sismiques. *Pour citer cet article : J.-C. Hippolyte et al., C. R. Geoscience 338 (2006).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Recent fault scarps at the Grands-Moulins (Savoy) reveal a major deep seated gravitational spreading (*Sackung*) in the French Alps. In Savoy, the Grands-Moulins recent fault scarps, previously interpreted as seismic fault ruptures, are in fact part of a major *Sackung* (deep seated gravitational spreading) of the French Alps (9 km long). We mapped more than 60 *sackung* scarps, some of them reaching 1330 m long and 30 m high. These antislope scarps stop the active screes and offset relict Dryassic rock glaciers by 16 m. We present geomorphologic observations attesting for their gravitational origin. This *Sackung* is primarily due to glacial debuttressing, while seismic shaking could be a triggering mechanism. *To cite this article: J.-C. Hippolyte et al., C. R. Geoscience 338 (2006).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Escarpement récent ; Double crête ; *Sackung* ; Mouvement gravitaire profond ; Tectonique ; Alpes ; France

Keywords : Recent scarp ; Double crest ; 'Sackung' ; Deep seated gravitational spreading ; Tectonics ; Alps ; France

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : jean-claude.hippolyte@univ-savoie.fr (J.-C. Hippolyte).

Abridged English version

1. Introduction

The term ‘Sackung’ [24] refers to deep seated gravitational deformation [12,17,24] characterized by its slowness (0.4–5 mm/yr, [22]) and typical features like double crests, ridge-top through, antislope scarps [15]. While they have long been studied in most of the Alps [2,11,12], in the French Alps they were only mentioned in the South [8], and several recent scarps interpreted as evidence for active tectonics in France [3,5,10] could be ‘Sackung’ scarps. In this paper we present geomorphologic data demonstrating that the Grand-Moulins recent fault scarps, in the Belledonne external crystalline massif (Fig. 1), are part of the largest Sackung of the French Alps (9 km long).

2. Previous studies

In 1970, four scarps observed from helicopter in the Belledonne external crystalline massif were interpreted as active reverse faults [5]. While it was suggested that they could be Sackung scarps [9,18], a more recent reappraisal [3] concluded that they are strike-slip normal faults of clear tectonic origin.

3. Mapping and morphology of the Grand Moulins scarps

In 2002, we were in the area photographed by [5] and found only pure normal faults, the lower one being 1330 m long and offsetting vertically by 30 m the slope of the Rognier Mountain (Fig. 2). Moreover we found more than sixty other recent fault scarps mainly along the Rognier crest and on the other slope of the range (Fig. 3). They form a scarp swarm, which is more usual in the case of ‘Sackungen’ than of active faults. The following observations confirm this gravitational interpretation.

All the scarps result from normal slip or tension opening, like in gravitational movements. No recent striation was observed on the scarps like the strike-slip movements mentioned by [3]. The only slip indicators observed are strike-slip reverse quartz-chlorite lineations, whose inversion [1] gives an ESE–WNW compression (Fig. 3). In the North of Belledonne the quartz-chlorite association has been dated by U/Pb on monazite of 14 to 5 Ma [4].

The scarps are very recent since they create troughs that are still not completely filled by the falling blocks. Moreover, the fault F1 cuts and offsets vertically a relict

rock glacier by 16 m. In the northern Alps, these rock glaciers result from cryogenic movement of a scree during a cold Lateglacial period, thus during the Dryas. We could observe that the fault F3 (Fig. 3) cuts the outer lobe of a rock glacier, but not its inner lobe, indicating a probable syn-Dryas (post-glacial) movement.

According to [18], the throw (T) to length (L) ratio of the Grands-Moulins scarps is too large to fit those of seismic fault ruptures [23]. However the T/L ratio we obtained (between 0.006 and 0.020) fits well with the values known on multiple displacement scarps (0.004 to 0.070, [13]) and this mechanical criterion does not allow to distinct the origin of the scarps. More characteristic of a Sackung is that the scarps are short (less than 2 km) and form a swarm.

Moreover, deformation seems more controlled by topography than by crustal fault because it is more important along the crest of the range than along the Belledonne Median fault. This relationship with topography is also demonstrated by the orientation of the fault scarps that follow the main crest, and by their plunge symmetrical relative to this crest.

The location of the 9 km scarp swarm, just above the steep flank of the Arc valley, and its southern end, where no deep valley is present, suggest that glacial debulking of the valley flanks is the main cause of these movements. This is further confirmed by the presence of other tensional recent scarps on the other side of the Arc valley to the southeast of Épierre (Fig. 1 and 3b). On the contrary, no recent fault scarp was found on this valley side along the Belledonne Median fault as could be expected for a tectonic fault (Fig. 1).

The location of the ‘Sackung’, at the extremity of the Grands-Moulins range, allows the observation that antithetic faults are connected. According to their plunge, the faults connect at depth reaching 1600 below the Rognier, but always above the valley floor in agreement with a gravitational model.

4. Conclusions

The Grands-Moulins recent fault scarps, even if in agreement with the NW–SE extension recently evidenced by GPS measurements [6] (Fig. 1) and fault plane mechanisms of earthquakes [19] can hardly be interpreted as tectonic fault ruptures because they do not cross-cut the valley. On the contrary, geomorphologic observations demonstrate their relationship with the topography and therefore their gravitational origin.

The Rognier–Grands-Moulins ‘Sackung’ results from the reactivation of antithetic alpine faults down to 1600 m beneath the crest. This large depth and the

existence of other scarps far from the deep glacial valleys suggest that even if glacial debuttressing have enhanced the deformation, this later may have been triggered by earthquake shaking like observed in California and Alaska [14,16] (cf. McCalpin's web site, <http://www.geohaz.com>). Their Dryassic age could therefore reflect a Lateglacial period of high seismicity resulting from the post glacial rebound of the Alps, as also suggested by lacustrine palaeoseismicity [7,21].

1. Introduction

Les reliefs montagneux peuvent présenter, sur un ou deux de leurs versants, des déformations gravitaires cassantes de grande ampleur, qui résultent de mouvements lents (0,4–5 mm/an, [22]) et profonds d'une à plusieurs centaines de mètres, [12,17,24]. À la suite de [24], ce type de mouvement gravitaire est nommé *Sackung* (tassement en allemand, voir [15]). Cette distinction est justifiée, non seulement par la taille et la vitesse du phénomène, mais aussi par les morphostructures spectaculaires qui en résultent. Un *Sackung* se manifeste à proximité des sommets par l'apparition de crêtes dédoublées, de fossés de crêtes, et d'escarpements de failles généralement à contre-pente et parallèles aux crêtes.

Des *Sackungen* ont été décrits dans l'arc alpin, notamment en Italie, Autriche, Allemagne et Suisse [2,11,12]. Dans les Alpes françaises, des crêtes dominant le bassin de la Tinée en montrent les traces [8]. Mais ce phénomène reste encore peu connu et plusieurs indices de déformation récente dans les Alpes et les Pyrénées (les Arcs [10], les Grands-Moulins [5], Val d'Aran [3]) peuvent être réinterprétés comme des *Sackungen*. C'est ce que nous nous proposons de faire ci-après, pour les escarpements récents des Grands-Moulins situés dans le massif cristallin externe de Belledonne, entre la vallée de la Maurienne et la faille active bordière de Belledonne [20] (Fig. 1).

2. Les failles récentes des Grands-Moulins : travaux antérieurs

En Savoie, le massif des Grands-Moulins appartient au rameau interne du massif de Belledonne (Fig. 1). D'allongement NE–SW, il est constitué d'un granite à biotite en contact à l'ouest, le long de l'accident médian de Belledonne, avec les séricitoschistes du rameau externe ; à l'est, le granite passe à des micaschistes et gneiss à deux micas, puis à des schistes verts (foliation généralement subméridienne et subverticale) profondément entaillés par la vallée de l'Arc.

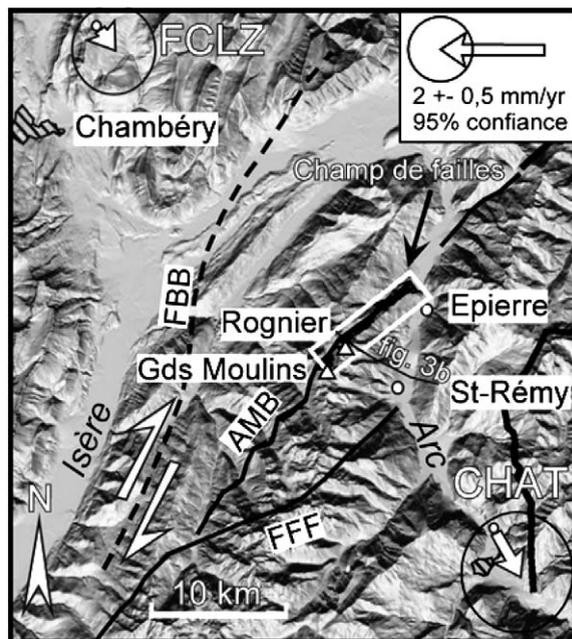


Fig. 1. Localisation du champ de failles des Grands-Moulins. **FBB**, faille bordière de Belledonne aveugle et active [20] ; **AMB**, accident médian de Belledonne ; **FFF**, faille de Fond-de-France. Vecteurs GPS d'après [6].

Fig. 1. Location of the Grands-Moulins recent scarps. **FBB**, active Belledonne Border Fault [20] ; **AMB**, Belledonne Median Fault (AMB) ; **FFF**, Fond-de-France Fault. GPS vectors according to [6].

Sur le versant oriental de l'échine granitique, au Plan du Lai, quatre escarpements récents ont d'abord été observés par hélicoptère [5] (Fig. 2b). L'auteur [5] les interprète comme des failles actives, dont le pendage sud-est impliquerait qu'elles soient compressives. Leur rejet, considéré inverse, et leur apparente indépendance de la topographie le conduisent à conclure qu'elles ne peuvent pas résulter de mouvements gravitaires.

En 1995, sept failles normales à escarpement récent sont relevées sur les deux versants du massif [9], sans pour autant être prises en compte parmi les failles potentiellement actives du Sud-Est de la France, car pouvant résulter de processus gravitaires comme des *Sackungen* ou être déclenchées par des réajustements post-glaciaires [18].

En 2002, des auteurs [3] signalent des décalages senestres (de quelques mètres à 50 m) largement supérieurs aux décalages verticaux (quelques décimètres à 2 m) sur la faille la plus basse et sur deux nouvelles failles (F1 et F2 dans [3]) situées dans les glaciers rocheux de la combe du Lacha, au sud des failles photographiées par [5]. Ces auteurs [3] concluent alors que les failles des Grands-Moulins sont des « décrochements d'origine tectonique incontestable ».



Fig. 2. Escarpements récents observés près du Rognier (localisations sur la Fig. 3). Noter les failles F4 et F5 (a et c), qui découpent le sommet 2223 m, la faille F1 (d), qui décale un glacier rocheux et l'escarpement F4 (e), résultat d'une ouverture en tension.

Fig. 2. Views of recent scarps near the Rognier Mountain (locations in Fig. 3). Note faults F4 and F5 (a and c) that cut the ridge 2223 m, fault F1 (d) that cuts a relict rock glacier, and the tensional opening at scarp F4 (e).

3. Cartographie et analyse morphostructurale des escarpements des Grands-Moulins

L'analyse des trois failles principales photographiées par [5] (F1, F2 et F3, Fig. 3; la faille la plus haute signalée n'a pas d'expression morphologique claire) a été reprise sur le terrain. Elle révèle qu'il s'agit de failles à rejets verticaux nettement supérieurs à ce qui avait été évoqué [3] (Fig. 2b et d). Ce sont des failles normales à pendage amont, ce que montrent les miroirs localement préservés (Fig. 2a et c) et les traces de leurs intersections avec les combes (Fig. 2c et d), dont les compartiments affaissés (où sont piégés les éboulis) sont les compartiments amont (Fig. 2b et d).

Si la faille la plus basse (F1, Fig. 3) est peu visible sur les photographies de [5], c'est qu'au plan du Lai son rejet vertical ne dépasse pas 3,5 m. Mais l'accident, long de 1330 m, se prolonge au nord-est dans la combe suivante (Bellecombe) où la surface d'un ancien glacier rocheux est décalée verticalement de 16 m et où le décalage total du versant dépasse 30 m sans qu'une composante latérale de mouvement ne soit visible (Fig. 2d). Les escarpements amont des photographies de 1970 [5] (F2 et F3, Fig. 3) se suivent sur 870 m et 1550 m, avec

un rejet vertical dépassant 5 m pour F2 (Fig. 2b; le remplissage d'éboulis ne permet pas une mesure du rejet total).

Un autre fait marquant est que, sur l'autre versant du massif, de nombreuses failles similaires sont présentes (Figs. 2c et 3). Nous avons cartographié plus de 60 escarpements récents (qui affectent éboulis ou anciens glaciers rocheux) entre le sommet des Grands-Moulins et Épierre (Figs. 1 et 3). Les failles des Grands-Moulins ne sont donc pas isolées, mais forment un champ de fractures, ce qui est plus commun pour les mouvements gravitaires de type *Sackung* que pour les failles actives [14]. Les observations suivantes confortent cette interprétation.

3.1. Nature des mouvements de failles

L'analyse géomorphologique, sur le terrain et sur les photographies aériennes, indique que les escarpements résultent, soit de glissements purement normaux, soit d'ouvertures, comme attendu dans les phénomènes gravitaires. Quelques ouvertures en tension sont présentes, comme dans la moitié orientale de la faille F4 (entre les points 2223 m et 2101 m, Figs. 2e et 3) et sur le plateau

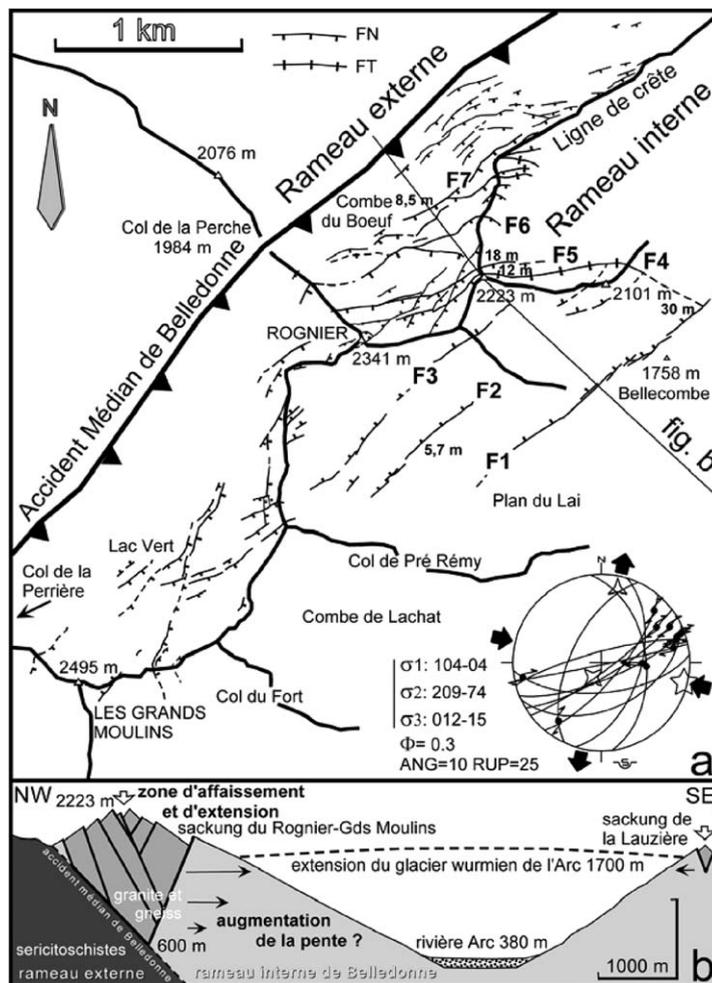


Fig. 3. Carte des escarpements récents près du Rognier et coupe schématique de la vallée de l'Arc (exagération verticale des rejets de failles, localisation sur Fig. 1). FN, faille normale; FT, fente de tension; **chiffres en gras**, rejets verticaux. Les escarpements photographiés par [5] sont F1, F2 et F3. $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$; ANG, angle moyen en degrés entre contrainte cisailante calculée et stries observées; RUP, critère de qualité ($0 \leq RUP \leq 200$) [1].

Fig. 3. Map of the recent sacking scarps near the Rognier and schematic cross-section (location on Fig. 1). FN, normal fault; FT, tension crack; **numbers in bold**, vertical throws. The scarps photographed by [5] are F1, F2 and F3. $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$; ANG, average angle between computed shear stress and observed lineation (in degrees); RUP, quality estimator ($0 \leq RUP \leq 200$) [1].

situé à l'est de la combe du Bœuf, dans les deux cas près des crêtes. Cette distribution suggère une influence de la topographie sur les mouvements.

Une interprétation tectonique précédente repose sur la présence de « moraines déformées en crochons de décrochement » dans la combe de Lachat et de stries décrochantes senestres [3]. Nous n'avons pas pu différencier ces crochons des déformations cryogéniques des anciens glaciers rocheux de cette combe. Par ailleurs, sur les escarpements étudiés, nous n'avons jamais trouvé de stries liées aux mouvements récents normaux, peut-être à cause d'une composante d'ouverture comme le suggèrent les spectaculaires pertes d'eau de surface le long des escarpements. En revanche, on ob-

serve souvent, sur ces failles NE–SW, des plaquages avec linéations de quartz et de chlorite, dont la cristallisation indique des mouvements inverses à dextres (Fig. 2f). Une reconstruction de paléocontraintes [1] précise que ces stries correspondent à une compression ESE–WNW (Fig. 3), enregistrée dans des conditions profondes ($> 200^\circ$) et sont donc plus anciennes que les escarpements. Dans ce secteur nord de Belledonne, des remplissages de fractures avec cette paragenèse quartz-chlorite ont été datés de 14 à 5 Ma par la méthode U/Pb sur monazite [4]. Les escarpements des Grands-Moulins correspondent donc à une réactivation normale *dip-slip* de failles alpines. Ces dernières font partie de la zone de fracture de l'accident médian de Belledonne

qui avait donc joué en sens inverse dextre, en réponse à une compression ESE–WNW, au Miocène moyen–supérieur. Cette préfracturation du massif granitique explique l’orientation et la densité des escarpements près de cet accident majeur (Fig. 3).

3.2. L’âge des mouvements

Il est approché par rapport aux marques de phénomènes postérieurs à la dernière glaciation du Würm comme les glaciers rocheux. Les glaciers rocheux que nous avons observés sont inactifs, comme en témoignent leur décalage par des failles et leur front végétalisé (Fig. 2d). Ils sont pour l’essentiel dérivés d’éboulis mis en mouvement par fluage de la glace interstitielle durant des épisodes froids, le dernier important, et précédant le réchauffement holocène, étant le Dryas récent. La faille F3 décale le bourrelet externe de l’un de ces anciens appareils, sans que le bourrelet immédiatement interne ne soit affecté, montre que la fracturation du massif était déjà active pendant le Dryas. Par ailleurs, des escarpements de failles sont toujours « frais » dans ce haut massif aux pentes fortes, où l’érosion est active. Ils décalent les éboulis vifs, lesquels n’ont généralement pas encore totalement rempli les dépressions créées par les failles dont l’activité est, de ce fait, très récente à actuelle (Fig. 2b).

3.3. Les rejets de failles

L’argument mis en avant par [18] pour ne pas attribuer ces escarpements à des ruptures de surface d’une faille sismogène, est que leur faible longueur relative à leur hauteur n’entre pas dans les valeurs de ruptures sismiques [23]. Nous ne retenons pas cet argument comme décisif, car les abaques référencés [23] sont basés sur une rupture sismique unique, alors que les escarpements observés peuvent résulter de plusieurs glissements cumulés. Dans ce cas, le rejet maximum d’une faille normale est en moyenne 0,020 fois la longueur de l’escarpement, et, pour toute faille, ce facteur reste compris entre 0,004 et 0,070 [13]. Pour les failles F1, F2, F4, F5 et F7 (Fig. 3), de longueurs respectives 1330, 870, 1630, 1000 et 1100 m, et de rejets respectifs 26, 5, 10, 16 et 8 m, le rapport rejet sur longueur (0,020 ; 0,006 ; 0,006 ; 0,016 ; 0,007) entre dans les valeurs d’une faille sismique à plusieurs événements. Ce critère rhéologique ne peut donc pas être utilisé comme discriminant de l’origine des mouvements. Cependant, le fait que les escarpements sont nombreux et courts (Fig. 3a) paraît plus symptomatique de mouvements gravitaires de type *Sackung*.

Il est à noter que l’accident médian de Belledonne ne montre pas de tels escarpements récents, à l’except-

tion de trois mineurs (moins de 7 m de rejet au total) sur 150 m au col de la Perrière (Fig. 3). Au contraire, les plus forts rejets du champ de fractures sont ceux des escarpements éloignés de l’accident (F4, F5 et F1, Figs. 2a, c, d et 3), ceux des escarpements les plus proches n’étant que de 1 à 2 m. Cette répartition de la déformation récente, plutôt dans la partie haute du massif qu’à proximité de l’accident médian de Belledonne (lequel suit une ligne basse de cols ; Fig. 3), suggère un contrôle de la topographie sur cette déformation, plutôt qu’un éventuel jeu inversé en faille normale de cet accident.

On note aussi que la plupart des failles ont un pendage vers le sud-est, c’est-à-dire vers la vallée de l’Arc (Fig. 3). Le cumul des rejets verticaux des failles à pendage sud-est (48 m) n’est qu’en partie compensé par celui des failles à pendage nord-ouest (36 m). Ceci traduit un affaissement vertical, mais aussi, puisque les failles sont inclinées (60–70°), un mouvement d’ensemble du sommet vers le sud-est. Ce déplacement, qui peut résulter de l’appel au vide vers la vallée, est en accord avec l’hypothèse gravitaire.

3.4. L’organisation des escarpements

Le contrôle topographique est aussi attesté par le fait que les escarpements sont parallèles à la crête du massif et changent de direction avec elle (F4, Fig. 3). Lorsque l’azimut de la ligne de crête varie brusquement, deux directions de failles (chacune parallèle à un segment de la crête) sont réactivées en se recoupant (entre les points 2341 et 2223, failles NE–SW recoupées par les failles NNE–SSW de plus faible rejet). En outre, le fait que des failles récentes découpent les arêtes latérales, démontre que leur contrôle gravitaire se fait à l’échelle du massif, et que les mouvements sont plus profonds que dans le cas d’un glissement de terrain classique.

Le pendage des failles est aussi révélateur. Nous n’avons observé que des failles à contre-pente dont le pendage est oriental sur le flanc occidental du massif et occidental sur le flanc oriental. Cette symétrie par rapport à la crête sommitale (Fig. 3) est également révélatrice du contrôle topographique et gravitaire de ces mouvements. La crête est toujours en affaissement, car c’est à son aplomb que la charge lithostatique est maximale.

3.5. La localisation de la déformation

La situation du champ de failles des Grands-Moulins apporte d’autres arguments en faveur de son origine gravitaire. Il se manifeste en partie aval de la Maurienne, profonde entaille empruntée autrefois par les glaciers

quaternaires (Fig. 1). Il en résulte un fort appel au vide, avec des versants à forte déclivité et un dénivelé de près de 2000 m (Fig. 4). Une relation existe entre l'altitude et la fracturation. Le long du massif des Grands-Moulins, les déformations extensives les plus fortes se situent au niveau du Rognier, alors qu'elles sont plus faibles (quelques mètres de rejet) vers 700 m d'altitude, près d'Épierre, et que, finalement, aucun escarpement n'est visible en fond de la vallée (Fig. 4). De plus, nous n'avons pas relevé d'escarpement de faille le long de l'accident médian de Belledonne sur l'autre rive de l'Arc, ce qui aurait plaidé en faveur d'une origine tectonique. Quelques escarpements récents apparaissent bien sur ce versant, mais ils sont situés le long de la crête du massif de La Lauzière au sud-est d'Épierre (Fig. 1); avec le *Sackung* du Rognier–Grands-Moulins, ils témoignent aussi de la décompression postglaciaire des versants opposés de la vallée (Fig. 3b).

Le long de l'accident médian, l'essentiel de la déformation extensive disparaît au sud du sommet des Grands-Moulins (Fig. 1), où l'appel au vide de la vallée de l'Arc n'existe plus. Plus loin, nous avons trouvé quelques autres escarpements avec les mêmes caractéristiques, mais aucun n'appartient à un champ de fractures aussi développé.

3.6. Apports du *Sackung* du Rognier–Grands-Moulins

La géométrie profonde et le mécanisme des *Sackungen* sont sujets de débats. Le *Sackung* du massif des Grands Moulins, avec son extrémité plongeante vers Épierre, qui en donne une vue transversale (Fig. 4), permet de faire des observations originales qui précisent leur connaissance. En cet endroit, F2 et F3 se connectent à F4 qui, pour sa part, se connecte à F1 (Fig. 4). Les mouvements de ces failles antithétiques étant liés, on propose que le mécanisme à l'origine de ce *Sackung* est similaire à celui du mouvement des failles tectoniques antithétiques (Fig. 3b). Par ailleurs, on a confirmation que la déformation est relativement profonde. En tenant compte de pendages mesurés sur le terrain, l'intersection des failles sous le sommet du Rognier se situerait à près de 600 m d'altitude (Fig. 3b), ce qui impliquerait une déformation sur 1600 m d'épaisseur. Cette altitude reste compatible avec le modèle gravitaire, où l'extension est accommodée par une augmentation de la pente du versant, puisque la déformation est au-dessus du fond de la vallée de l'Arc (380 m à Épierre).

4. Conclusions

Les escarpements récents du massif des Grands-Moulins, bien qu'indiquant une extension NW–SE, en

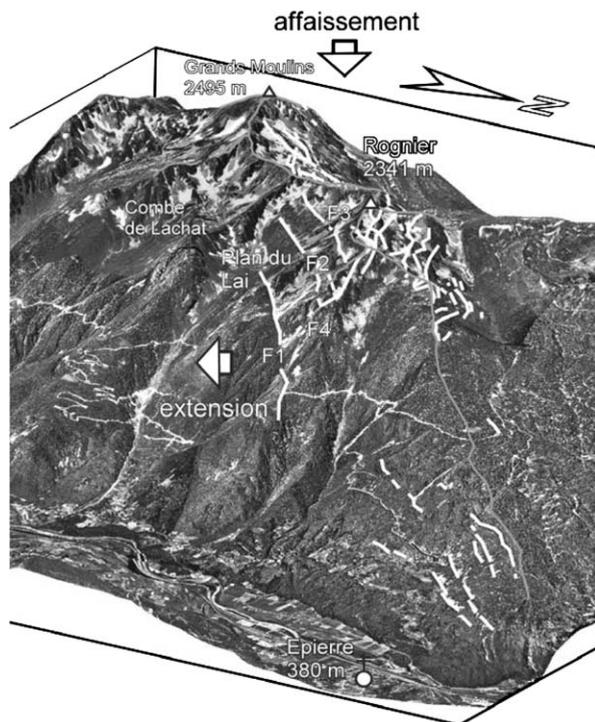


Fig. 4. Vue en bloc diagramme du *Sackung* du Rognier–Grands-Moulins (photographies aériennes drapées sur un modèle numérique de terrain).

Fig. 4. General view of the Rognier–Grands-Moulins 'Sackung' (aerial photos draped on a DEM).

accord avec les mesures GPS [6] (Fig. 1) et la micro-sismicité des Alpes de Savoie [19], peuvent difficilement être interprétés comme des escarpements de failles tectoniques actives. En effet, l'essentiel de la déformation, au lieu d'être localisé sur un accident majeur, suit les crêtes, et les failles récentes ne recoupent pas le fond de la vallée de l'Arc.

En revanche, les observations géomorphologiques concourent à privilégier une origine gravitaire. Les morphostructures observées sont typiques des *Sackungen* : ouvertures sommitales en tension, failles normales à contre-pente, escarpements courts et organisation en champ de failles. Leur lien étroit avec la topographie (escarpements parallèles aux crêtes et symétriques par rapport à la crête sommitale) atteste un contrôle gravitaire profond, à l'échelle du massif. Le *Sackung* du Rognier–Grands-Moulins résulte de la conjonction de conditions favorables : développement d'une vallée profonde et d'une crête, toutes deux subparallèles à un champ de fractures préexistant.

Le fort creusement de la vallée de l'Arc, l'âge Postglaciaire des escarpements de failles, et les déplacements récents à la fois verticaux et vers la vallée at-

testent que, comme pour la plupart des *Sackungen*, l'origine première de la déstabilisation a été le retrait glaciaire (Fig. 3b). Toutefois, la proximité d'une faille active [20] et la présence d'autres escarpements récents, dans Belledonne, mais loin de vallées glaciaires aussi profondes (par exemple, la partie centrale de la faille de Fond-de-France, Fig. 1), suggèrent que des secousses sismiques postglaciaires ont pu déclencher et/ou entretenir ces mouvements gravitaires, comme ceci a été observé en Californie [14,16], ou lors du séisme de Denali en 2000 (cf. site internet de McCalpin, <http://www.geohaz.com>). Ces mouvements, en particulier au Dryas, pourraient témoigner alors d'une activité sismique accrue liée à la déglaciation et au rebond isostatique des Alpes, comme suggéré également par les archives lacustres régionales [7,21].

Il faut souligner enfin que la perméabilité démesurée du *Sackung* permet une infiltration des précipitations et une circulation profonde vraisemblablement à l'origine des sources chaudes de Saint-Rémy-de-Maurienne, dans ce secteur de Belledonne visé par le projet de tunnel LGV.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier de l'université de Savoie. Nous sommes également reconnaissants à Mustapha Meghraoui et à James McCalpin pour leurs discussions constructives, et à Jacques Angelier et Stéphane Baize pour la relecture attentive du manuscrit.

Références

- [1] J. Angelier, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress – III. A new rapid direct inversion method by analytical means, *Geophys. J. Int.* 103 (1990) 363–376.
- [2] F. Agliardi, G. Crosta, A. Zanchi, Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics, *Eng. Geol.* 59 (2001) 83–102.
- [3] S. Baize, M. Cushing, F. Lemeille, T. Granier, B. Grellet, D. Carbon, P. Combes, C. Hibsich, Inventaire des indices de rupture affectant le Quaternaire en relation avec les grandes structures connues en France métropolitaine et dans les régions limitrophes, *Mém. Soc. géol. France, Mém. h.s. n° 175*, 2002 (142 p.).
- [4] J.-M. Bertrand, J.-L. Paquette, D. Gasquet, J. Lehmann, G. Ratkov, R. De Ascensão Guedes, A.-M. Boullier, Ages U–Pb sur monazite de la déformation et de l'hydrothermalisme alpin du massif de la Lauzière (Savoie), *RST 10 Strasbourg*, 2004.
- [5] P. Bordet, Les failles vivantes du massif des Grands-Moulins (massif cristallin externe de Belledonne), *Géol. Alpine* 46 (1970) 43–47.
- [6] E. Calais, J.-M. Nocquet, F. Jouanne, M. Tardy, Current strain regime in the western Alps from continuous Global Positioning System measurements, 1996–2001, *Geology* 30 (2002) 651–654.
- [7] E. Chapron, P. Van Rensbergen, C. Beck, M. De Batist, A. Paillet, Lacustrine sedimentary records of brutal events in Lake Le Bourget (northwestern Alps–southern Jura), *Quaternaire* 7 (1996) 155–168.
- [8] J.-C. Flageollet, *Les Mouvements de terrain et leur prévention*, Masson, Paris, 1989 (221 p.).
- [9] A. Ghafiri, Paléosismicité de failles actives en contexte de sismicité modérée : application à l'évaluation de l'aléa sismique dans le Sud-Est de la France, thèse, université Paris-Sud–Orsay, 1995.
- [10] J. Goguel, Des failles d'âge Quaternaire à Peisey (Savoie), *Bull. Soc. géol. France* 7 (1969) 35–39.
- [11] A. Jahn, Slope morphological features resulting from gravitation, *Zeitschr. Geomorphol.* 5 (Suppl.) (1964) 59–72.
- [12] T. Mahr, Deep-reaching gravitational deformations of high-mountain slopes, *Int. Assoc. Eng. Geol. Bull.* 16 (1977) 121–127.
- [13] I. Manighetti, G.C.P. King, Y. Gaudemer, Slip accumulation and lateral propagation of active normal faults in Afar, *J. Geophys. Res.* 106 (2001) 13667–13696.
- [14] J.P. McCalpin, E.W. Hart, Ridge-top spreading features and relationship to earthquakes, San Gabriel Mountains Region, Southern California, in: E.W. Hart (Ed.), *Ridge-Top Spreading in California*, California Geological Survey Open-File Report, 1 CD-ROM (2003).
- [15] J.P. McCalpin, J.R. Irvine, Sackungen at Aspen Highlands Ski Area, Pitkin County, Colorado, *Environ. Eng. Geosci.* 1 (1995) 277–290.
- [16] D.J. Ponti, R.E. Wells, Off-fault ground ruptures in the Santa Cruz Mountains, California – ridge-top spreading versus tectonic extension during the 1989 Loma Prieta earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 81 (1991) 1480–1510.
- [17] D. Radbruch-Hall, D.J. Varnes, W.Z. Savage, Gravitational spreading of steep-sided ridges ('Sackung') in Western United States, *Int. Assoc. Eng. Geol. Bull.* 14 (1976) 23–35.
- [18] S. Sébrier, A. Ghafiri, J.-L. Bles, Paleoseismicity in France: fault trench studies in a region of moderate seismicity, *J. Geodyn.* 24 (1997) 207–217.
- [19] C. Sue, F. Thouvenot, J. Fréchet, P. Tricart, Earthquake analysis reveals widespread extension in the core of the Western Alps, *J. Geophys. Res.* 104 (1999) 25611–25622.
- [20] F. Thouvenot, J. Fréchet, L. Jenatton, J.F. Gamond, The Belledonne Border Fault: identification of an active seismic strike-slip fault in the Western Alps, *Geophys. J. Int.* 155 (2003) 174–192.
- [21] P. Van Rensbergen, M. De Batist, C. Beck, E. Chapron, High-resolution seismic stratigraphy of glacial to interglacial fill of a deep glacial lake: Lake Le Bourget, Northwestern Alps, France, *Sediment. Geol.* 128 (1999) 99–129.
- [22] D.J. Varnes, D.H. Radbruch-Hall, K.L. Varnes, W.K. Smith, W.Z. Savage, Measurement of ridge-spreading movements (sackungen) at Bald Eagle Mountain, Lake County, Colorado, 1975–1989, U.S. Geological Survey Open-File Report 90–543, 1990 (13 p.).
- [23] D.L. Wells, K.J. Coppersmith, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84 (1994) 974–1002.
- [24] U. Zischinsky, Über Sackungen, *Rock Mech.* 1 (1969) 30–52.