



Tectonique

Modélisation géométrique 3D des granites stéphaniens du massif du Pelvoux (Alpes, France)

Pierre Strzeczynski^{a,*}, Stéphane Guillot^a, Gabriel Courrioux^b, Patrick Ledru^{a,b}

^a Laboratoire de sciences de la Terre, CNRS UMR 5570, UCB-ENS Lyon, bât. Géode, 2, rue Dubois, 69622 Villeurbanne cedex, France

^b CDG-MA, BRGM, av. Claude-Guillemin, 45060 Orléans, France

Reçu le 27 mai 2004 ; accepté après révision le 24 mai 2005

Disponible sur Internet le 18 août 2005

Présenté par Jacques Angelier

Résumé

L'étude structurale et la modélisation 3D de la géométrie des granites stéphaniens du massif du Pelvoux ont permis de mettre en évidence le contexte cisailant associé à leur mise en place. Dans les massifs cristallins externes français, ces cisaillements se répartissent selon deux directions, N25 et N135, respectivement dextre et sénestre. Ce système décrochant carbonifère s'intègre dans un contexte d'extension nord-sud, connu dans l'ensemble de la chaîne Varisque à cette époque. **Pour citer cet article : P. Strzeczynski et al., C. R. Geoscience 337 (2005).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

3D geometrical modelling of Stephanian granite from the Pelvoux Massif (French Alps). The structural analysis and the 3D modelling of Stephanian granites of the Pelvoux Massif characterize an emplacement along sinistral NW-SE- and dextral NE-SW-trending shear zones in the Pelvoux and in the Aiguilles Rouges-Mont Blanc Massifs, respectively. This Carboniferous shear system is consistent with a north-south extension direction known in the whole Variscan belt at this time. **To cite this article : P. Strzeczynski et al., C. R. Geoscience 337 (2005).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Alpes ; Granite ; Modélisation 3D ; Carbonifère ; France

Keywords : Alps; Granite; 3D modelling; Carboniferous; France

Abridged English version

1. Introduction

Mechanisms of granite emplacement are characteristic of the tectonic contexts that are active dur-

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : pierre.strzeczynski@univ-lyon1.fr
(P. Strzeczynski).

ing orogens, especially for the Variscan orogeny, fertile in granite. Their knowledge requires modelling of the geometry of the massifs and structural analysis of their relationship with their host rocks. Within eroded belts, as high-resolution geophysical surveys or deep drilling are rare, 3D modelling remains highly speculative. However, reactivation and exhumation of Palaeozoic basement during the Alpine orogeny provides access to about 2000 m in vertical cross-section within the External Crystalline Massif of the French western Alps (Fig. 1).

This paper describes 3D modelling of the Turbat, Étages and Bérarde granites located in the Pelvoux Massif. An analysis of their structural relationships with their host rocks is presented and their mode of emplacement is discussed. As a significant rotation of these massifs is excluded since the Triassic [1], the sinistral strike-slip component determined along NW–SE structures controlling granite emplacement is integrated in the Variscan scheme.

2. Granites of the Pelvoux Massif

2.1. Geological context

The Pelvoux Massif is located in the western Alps (France). It forms with the Mont Blanc, Aiguilles Rouges, Belledonne and Argentera Massifs, the so-called External Crystalline Massifs. They mainly consist of micaschists, paragneisses and orthogneisses intruded by Carboniferous granites and exhumed 15 Ma ago along major structural discontinuities (Fig. 1) [2,3].

Their structural and metamorphic evolutions are related to the Variscan orogeny and correlated to the French Massif Central, Vosges and Bohemian Massifs [18]. The tectonic evolution of these Palaeozoic domains begins with the formation of an ocean during the Cambrian and the Ordovician. A subduction activity is then recorded during the Lower Devonian [17] followed by a collision phase marked by nappe stacking [9,12] and emplacement of K–Mg-rich granites [6]. During Upper Carboniferous, extensional structures [9,12], high geothermal gradient [10] and emplacement of Fe–Mg granite [6] reflect post-collision evolution and mark the progressive return to normal thickness of the crust.

2.2. The Pelvoux External Crystalline Massif

The Pelvoux Massif has a sub-circular shape consisting of two different litho-structural units (Fig. 1): the eastern and central parts are mainly composed of migmatites and granites, while the western part presents low- to medium-grade metasediments. Two migmatitic stages are recognized [3], developed prior to the emplacement of granites. The studied granites are located in the centre of the Pelvoux Massif, intruding migmatitic orthogneisses (metagranites and amphibolites) and paragneisses.

2.3. The Turbat, Étages and Bérarde granites

On the basis of chemical criteria, these three granites belong to the Fe–Mg granite suite, emplaced during the Stephanian [6]. The Turbat granite is dated at 302 ± 2 Ma (U–Pb, zircon [11]). The granites have a NNW–SSE-elongated shape truncated on their northern margin by a tectonic limit: the Meije–Muzelle thrust that affects Mesozoic sedimentary sequences [4] (Fig. 1). Southward, the roof of the intrusion is exposed and primary intrusive contacts between the granites and their host rocks are preserved.

The feldspar, biotite and enclaves preferred orientation defines a vertical sub-solidus magmatic foliation oriented N160 (Fig. 2a), fairly constant within the three massifs. A horizontal mineral lineation (Fig. 2c) is visible on this plane. The foliation planes are locally grading into zones of intense deformation marked by vertical C–S shear zones oriented N135 (Fig. 2b), indicating a sinistral movement (Fig. 2d). Basalt dykes emplaced during the Triassic are not deformed and cross-cut the planar structure of the granite. These indicate that the internal fabric of the granite has been acquired during the emplacement.

3. 3D modelling

3.1. Principle

The 3D geometrical modelling software ‘Éditeur géologique’ has been developed in the framework of the BRGM research programs. This software, designed for geologists, allows us to build the 3D shape of geological objects on the basis of datasets introduced into an interface/buffer as maps or cross sections (Fig. 3a) and visualized in 2D (Fig. 3b) and 3D viewers (Fig. 3c). The data used (Fig. 4) to constrain the model are:

- the lithologies and lithological contacts defined by few points;
- the topological relationships between the different lithological units; the geometrical relationships like superposition, intrusion or cross-cutting relations can be integrated through the definition of the lithological pile;
- the orientation of planar structures like foliation, schistosity or stratification or linear structures such as fold axes.

The 3D geometrical modelling consists of an interpolation of a scalar field in space, where a lithological contact corresponds to an isovalue of this field and the orientation of the structure corresponds to the gradient of this field [13].

3.2. The 3D modelling of the Pelvoux granites

The 3D shape of the Turbat, Étages and Bérarde granites has been built using three kinds of surfaces, through three successive stages of modelling (Fig. 3):

- the N160-vertical foliation, developed during granite emplacement, is considered to be representative and sub-parallel to the initial intrusive contacts (Fig. 3b). Taking into account the vertical distribution of the measured structures, this first stage of modelling provides a well-constrained model of the eastern and western margin of the granites;
- the second stage of modelling takes into account the granite–gneiss contacts at the roof of the granites. The plunge of this contact remains low, respectively northward and southward on the northern and southern margins of the granite, respectively. The foliation within the granite presents a high obliquity with the contact at the roof of the granite. The modelling is performed through direct construction on the Digital Elevation Model, taking into account structural data measured on the contact and extrapolation following its regional extent;
- in the last stage, the Meije–Muzelle thrust zone is built (Fig. 3c). This Alpine tectonic zone represents the northward boundary of the granites cross-cutting the foliation within the granites. The modelling is performed by defining the trace and structural orientation of the fault.

4. Discussion

4.1. Alpine deformation of the Pelvoux Massif

The Meije–Muzelle thrust zone constitutes the main evidence of Alpine tectonics, marking the northern limit of the studied granites (Fig. 3c). Mesozoic sedimentary sequences pinched within this thrust fault attest of the Alpine age of this structure [4]. Local reactivations of primary magmatic contacts between the granites and their host rocks occur first during the Liassic extension event [16] and are inverted during the Alpine orogeny (Fig. 3b).

4.2. Mechanisms of granite emplacement

The Pelvoux granites have vertical eastern and western boundaries and display a N160 elongated shape corresponding to the development of a foliation synchronous of granite crystallisation. The association of this foliation to NW–SE sinistral shear zones favours the emplacement of the granites during a transcurrent tectonic context. This shearing context can also be observed in the host rocks or in the Peyre–Arguet unit, located in the southwest of the Pelvoux Massif (Fig. 1) [10]. At the scale of the external Alps, this NW–SE direction corresponds to the southern trend of the Alpine Arc, from the Pelvoux to the Argentera Massifs (Fig. 3b).

North of this area, emplacements of the Stephanian Vallorcine and Mont Blanc granites have been dated at 306 and 303 Ma, respectively [5]. This magmatic event is associated with a NE–SW dextral shear movement within a generalised extensional tectonic context [5]. The chemical analogy and synchronism of the Mont Blanc and Pelvoux granites suggest that these two strike-slip directions could be contemporaneous. Moreover, their N30 and N135 orientation and their dextral and sinistral sense of shear respectively suggest that this shear system is conjugated and developed during a bulk regional east–west shortening and north–south extension (Fig. 4). This strain field is also compatible with the east–west-trending Stephanian lamprophyre dyke system in the Pelvoux Massif, which postdates the emplacement and cooling of the granites [14]. This north–south direction of extension is attributed to the Stephanian post-collision stage of extension identified at the scale of the Variscan belt [7].

4.3. Integration within the European Palaeozoic belt

The External Crystalline Massifs and the French Massif Central have similar Palaeozoic evolutions [7]. However, this study highlights differences during the late stage of the Palaeozoic evolution. The French Massif Central granites are characterised by dome shape and laccoliths geometry emplaced during a north–south direction of extension in a context of crustal thinning [8,15], whereas granites of the External Crystalline Massifs were emplaced along strike-slip zones. Although the direction of extension is similar, shortening is vertical in the French Massif Central and horizontal (east–west) in the External Crystalline Massif. As the External Crystalline Massifs are located on the eastern margin of the European Palaeozoic belt, they may have been affected by the rotational translation of Africa relative to Europe [2], in association with the northwest oblique subduction of the Palaeo-Tethys during Carboniferous times [19].

5. Conclusion

The 3D modelling of the granites of the Pelvoux Massif reveals that the overall shape of the intrusion, determined from internal structures and relationships with their host rocks, is compatible with an emplacement along a sinistral NW–SE-trending strike-slip fault. At the scale of the External Crystalline Massifs, this context corresponds to a bulk regional east–west compression and north–south extension marked by N30 dextral and N140 sinistral conjugated shear zones, respectively in the Mont Blanc and Pelvoux Massifs.

1. Introduction

Au sein des orogènes, le mode de mise en place des granites nous renseigne sur le contexte tectonique global. Ceci est particulièrement vrai dans le cas de la chaîne paléozoïque européenne, fertile en granites. La connaissance des massifs granitiques nécessite l'établissement d'un modèle géométrique et l'analyse des relations structurales avec leur encaissant. Dans les chaînes anciennes et érodées et en l'absence de données géophysiques à haute résolution, la géométrie des corps granitiques est souvent difficile à définir en trois dimensions. La réactivation et la mise en relief du socle paléozoïque des massifs cristallins externes des

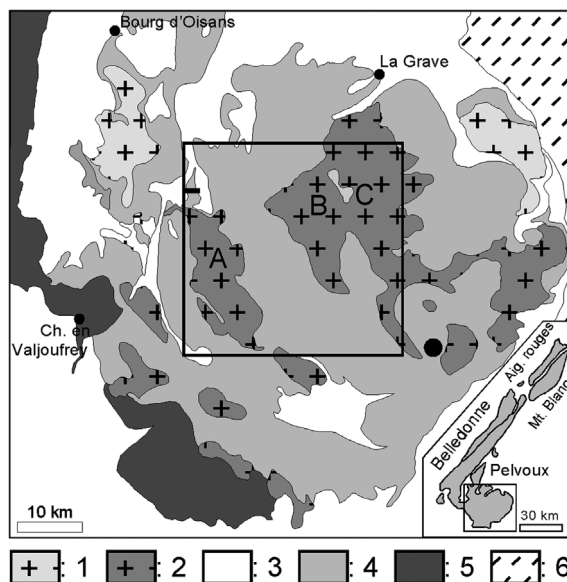


Fig. 1. Schéma structural du massif du Pelvoux [3] : 1, granites viséens ; 2, granites stéphaniens ; 3, couverture sédimentaire mésozoïque ; 4, gneiss migmatitique et amphibolites ; 5, cortex ; 6, Alpes internes. Le cadre correspond à la zone couverte par la carte 3D, avec (A) le granite du Turbat–Lauranoure, (B) le granite des Étages et (C) le granite de la Bérarde. Cercle noir : relique de granulite [10].

Fig. 1. Structural map of the Pelvoux massif [3]: 1, Viséan granites; 2, Stephanian granites; 3, Mesozoic sedimentary cover; 4, magmatic and amphibolite gneisses; 5, external zone, and 6, internal zone of the Alps. The black square represents the surface covered by the 3D map. (A) Turbat–Lauranoure, (B) Étages and (C) La Bérarde granites. Black circles: granulite relics [10].

Alpes occidentales (Fig. 1) offrent des conditions exceptionnelles d'analyse en trois dimensions. Des données structurales peuvent ainsi être acquises sur plus de 2000 m de dénivelé, donnant accès à la géométrie en profondeur du massif et aux grandes discontinuités géologiques.

Le mode de mise en place des massifs granitiques de Turbat Lauranoure, des Étages et de la Bérarde (massifs du Pelvoux et des Ecrins) est étudié dans le cadre d'une modélisation géométrique 3D d'un domaine de 18 km × 18 km × 8 km en X, Y et Z. Les données acquises et le modèle résultant fournissent des contraintes géométriques fiables sur la structure de la croûte supérieure. Les granites s'enracinent verticalement sur plusieurs kilomètres et définissent un contexte de mise en place dans un environnement décrochant sénestre, selon une direction N135E. En l'absence de rotation significative des massifs cristallins

externes depuis le Trias [1], ces résultats sont intégrés dans le schéma d'évolution de la chaîne paléozoïque européenne.

2. Le massif du Pelvoux

2.1. Contexte géologique régional

Le massif du Pelvoux occupe une position centrale dans les massifs cristallins externes des Alpes occidentales ; il est prolongé, au nord-est, par le massif de Belledonne et, au sud-est, par le massif de l'Argentera (Fig. 1). Ces terrains représentent des fragments de la chaîne paléozoïque européenne [18], réactivés lors des compressions alpines le long de grandes discontinuités structurales, puis exhumés il y a environ 15 Ma [20].

L'évolution paléozoïque des massifs cristallins externes débute par une phase d'océanisation cambro-ordovicienne, qui isole un bloc Armorica du Gondwana. Au Dévonien inférieur et moyen, cet océan entre en subduction [17]. Le Dévonien supérieur correspond à une phase de collision responsable de l'empilement de nappes crustales [9,12] et à la mise en place de granites potassiques [6]. L'évolution tardi-orogénique des massifs cristallins externes se marque au Carbonifère supérieur par des structures d'extension dans le massif de Belledonne [9,12], un gradient géothermique anormalement élevé dans le massif du Pelvoux [10] et un magmatisme important, auquel se rattachent les massifs granitiques étudiés [6].

2.2. Les granites du Turbat–Lauranoure, des Étages et de la Bérarde

Les granites du Turbat–Lauranoure, des Étages et de la Bérarde forment la partie centrale du Massif du Pelvoux. Ils sont intrusifs dans des gneiss migmatitiques et des amphibolites (Fig. 1) au sein desquels deux épisodes de métamorphisme haute température anté-granites sont reconnus [3]. Ces trois granites sont chimiquement rattachés à la même suite magmatique Fe–Mg, mise en place au Stéphanien [6]. La mise en place du granite du Turbat est datée à 302 ± 2 Ma [11] (U–Pb sur zircon). En carte (Fig. 1), ces granites montrent un allongement selon une direction N160. Ils sont limités au nord par le chevauchement Meije–Muzelle, qui implique des sédiments mésozoïques [4]. Au sud, les granites disparaissent sous

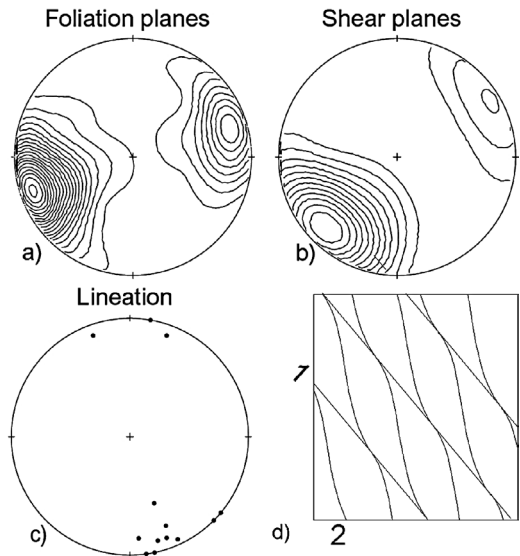


Fig. 2. (a) Représentation des pôles de plans de la foliation dans les granites de la Bérarde, des Étages et du Turbat (114 mesures) ; (b) mesures des plans de cisaillement (36 mesures) représentées sur des canevas de Wulff, hémisphère inférieure, contour Kamb ; (c) mesures de linéation d'étirement minéral (13 mesures) et (d) schéma illustrant les relations géométriques entre les plans de schistosité et de cisaillement. 1 : Plan de foliation, 2 : plans de cisaillement.

Fig. 2. (a) Poles of foliation planes (114 mesures) and (b) pole of shear planes (36 mesures) from Bérarde, Turbat and Étages Granites. (Wulff canevas, lower hemisphere, Kamb contouring); (c) lineation (13 mesures); (d) geometric relation between schistosity planes and shear planes. 1: foliation planes, 2: shear planes.

les gneiss migmatitiques. L'analyse structurale révèle la présence d'une foliation pénétrative orientée N160, sub-verticale. Cette foliation est marquée par l'allongement préférentiel des feldspaths, des biotites et des enclaves basiques ; elle affecte de façon homogène les trois massifs granitiques (Figs. 2 et 3a). Une linéation d'étirement sub-horizontale est localement observée dans le plan de foliation. Des bandes de cisaillement ductile d'orientation N135 et verticales sont visibles (Fig. 2). Les structures C–S apparaissent en continuité structurale avec la foliation dominante des granites et traduisent un mouvement décrochant sénestre. Enfin, des filons de basalte, orientés globalement est–ouest et mis en place au Trias, sont exempts de déformations et recoupent les structures plano-linéaires des granites. Ces caractères indiquent que la structuration des massifs granitiques a été acquise lors de leur cristallisation et peut donc être considérée comme un marqueur du mode de mise en place.

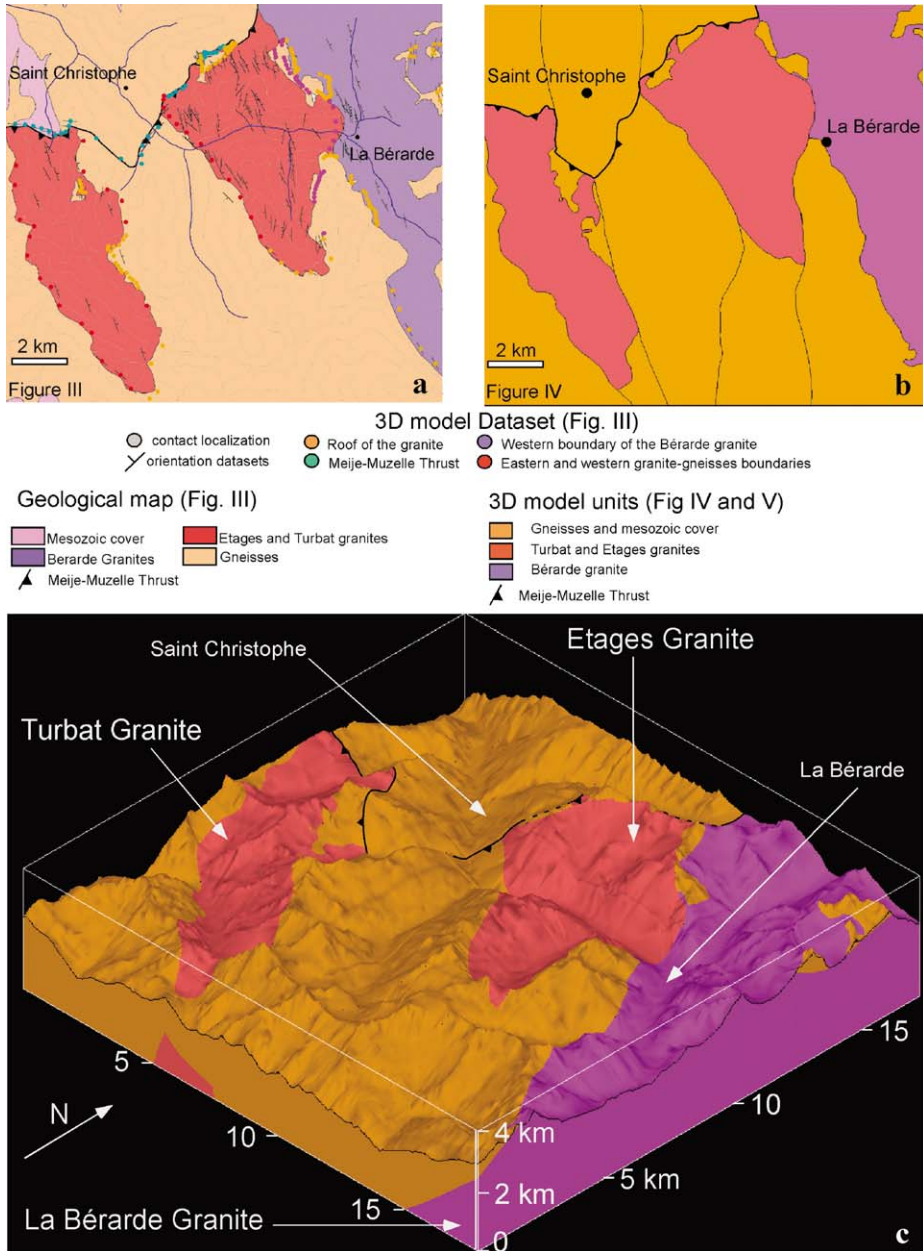


Fig. 3. (a) Carte géologique simplifiée et données prises en compte dans le modèle 3D. (b) Vue en carte du modèle 3D calculé. (c) Vue vers le nord-ouest de la carte 3D des granites du Turbat, des Étages et de la Bérarde.

Fig. 3. (a) Simplified geological map and dataset taking into account in the 3D model. (b) Map view of the 3D model. (c) Northwest-looking view of the 3D model.

3. Modélisation 3D

3.1. Principe de cartographie numérique 3D

L'éditeur géologique 3D a été développé au BRGM dans une perspective de cartographie 3D prenant en compte la géométrie des objets géologiques en profondeur. La construction des modèles est faite par le géologue à partir de cartes et de coupes géologiques visualisées en 2D (Fig. 3a), le modèle résultant étant visualisé à chaque étape de la construction sur ces mêmes supports 2D (Fig. 3b) et en 3D (Fig. 3c).

Les données utilisées sont :

- la localisation géographique des points de passage des interfaces, contacts lithologiques normaux ou faillés ;
- les mesures d'orientation de l'anisotropie principale, stratification ou foliation, d'une densité et répartition significative à l'échelle du domaine modélisé (Fig. 3a).

La construction du modèle 3D se fait par interpolation d'un champ scalaire dans l'espace, pour lequel les points de passage d'une même interface lithologique ont la même valeur et où les données d'orientation représentent le gradient [13]. La position des données d'orientation est indépendante de la localisation des interfaces. Les implications géométriques de la nature de certains contacts, telles que la superposition, l'érosion et l'intersection ou encore inclusion ou intrusion, sont prises en compte dans la modélisation (Fig. 3a).

3.2. Reconstruction de la géométrie des granites du Pelvoux

La procédure mise en œuvre pour la construction du modèle géométrique 3D des granites du Turbat–Lauranoure, des Étages et de la Bérarde est la suivante (Figs. 2, 3).

Un premier modèle résulte de l'interpolation d'un champ scalaire défini par les mesures de foliation des massifs granitiques. Ce modèle permet de définir, en profondeur, la géométrie des limites est et ouest des granites. Leur orientation est N160 et leur pendage est vertical sur au minimum 2 km de profondeur (Fig. 3c). Ces surfaces correspondent à des contacts granite–gneiss, à l'exception du contact entre les granites des

Étages et de la Bérarde. Ce sont des contacts magmatiques développés lors de la mise en place des granites. Ce premier modèle permet de mettre en évidence la géométrie allongée des granites selon une direction N160 ; cependant, les limites nord et sud ne sont pas prises en compte.

Un second modèle est calculé afin d'intégrer les contacts granites–gneiss qui couronnent certains sommets (tête du Rouget, aiguille du Plat de la Selle, tête du Salude) et la limite sud des granites. La morphologie exacte de ces contacts supérieurs est difficile à contraindre. En effet, le toit du granite est souligné sur le terrain par un réseau diffus de filons granitiques intrusifs dans les gneiss. De ce fait, le toit du granite a été construit en fournissant des données moyennes d'orientation de ce contact à l'échelle de la carte et du modèle. Ce contact présente un faible pendage vers le nord, au nord du massif, et vers le sud, au sud.

Un troisième modèle a été réalisé afin de rendre compte de la géométrie du chevauchement de Meije–Muzelle (Fig. 3a). Sur le terrain, ce contact est orienté N50E–50°SE. Il constitue la limite nord des granites du Turbat–Lauranoure et des Étages et il se prolonge dans les gneiss entre ces deux granites [4]. Ce contact est sécant sur la foliation du granite.

4. Discussion

4.1. Signification des contacts tardifs

La limite nord des granites correspond à des accidents chevauchants orientés NE–SW, dont le mouvement est alpin [4]. Observés sur plus de 1500 m de dénivelé, ces accidents montrent un pendage constant, d'environ 50° vers le sud-est. Sur les modèles 3D (Fig. 3c), ces accidents ont une géométrie plane et ils sont recoupés par des faisceaux de failles orientées N140 verticales [4]. Ces observations suggèrent que les anciens contacts magmatiques ont été probablement réactivés, tout d'abord lors de l'extension liasique, donnant naissance à des failles normales pentées vers le sud-est, puis inversées en régime compressif lors du cycle alpin [16].

4.2. Contexte de mise en place des granites du Pelvoux

Les bordures rectilignes et de pendage raide donnent aux granites du massif du Pelvoux une géométrie

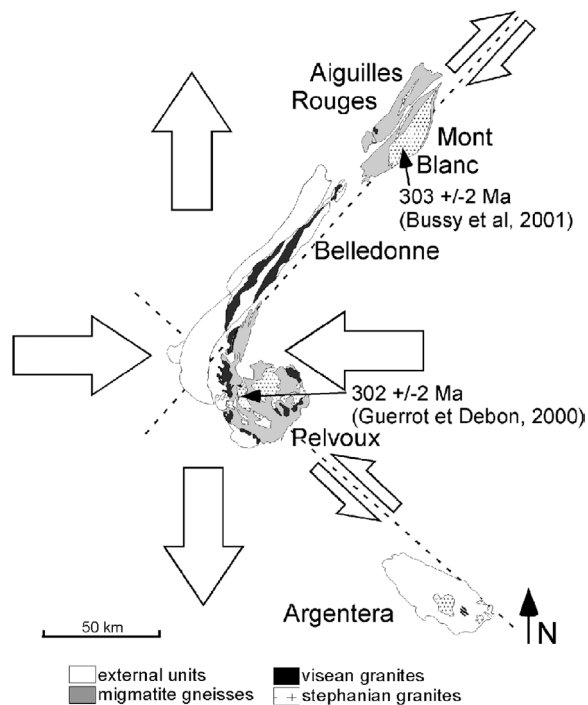


Fig. 4. Schéma structural des massifs cristallins externes français [6] montrant les directions de cisaillement liées à la mise en place des granites au Stéphanien dans le massif des Aiguilles-Rouges [5] et dans le massif du Pelvoux.

Fig. 4. Structural map of the French External Crystalline massifs [6]. Two shearing directions associated with Stephanian granites emplacement are distinguished: a dextral one located in the Aiguilles-Rouges Massif [5] and a sinistral one in the Pelvoux Massif.

allongée selon une direction N160 en bande verticale. Cette géométrie est en accord avec les données structurales, qui indiquent un contexte de mise en place dans des décrochements sénestres de direction N135. À l'échelle des Alpes, cette direction de cisaillement correspond à la direction de l'axe Pelvoux–Argentera (Fig. 4).

Plus au nord, dans les massifs cristallins externes du Mont-Blanc et des Aiguilles-Rouges, la mise en place des granites du mont Blanc et de Vallorcine (Fig. 4) a été datée au Carbonifère Supérieur, respectivement à 303 et 306 Ma [5]. Ces granites se mettent en place à la faveur de décrochements dextres de direction N20 à N30, dans un contexte transtensif [5]. À l'échelle des massifs cristallins externes, ces deux directions de décrochement (NW–SE et NE–SW) sont contemporaines. Leur sens opposé et la mise en place de granites de chimie analogue [6] font de

ces grands décrochements des structures conjuguées d'échelle crustale (plus de 300 km de long), compatibles avec une direction d'extension nord–sud et une direction de raccourcissement est–ouest. Ces mêmes directions d'extension et de raccourcissement ont été déterminées grâce à l'orientation est–ouest des filons de lamprophyres mis en place dans les massifs du Pelvoux [14] et de l'Argentera au Carbonifère supérieur. Enfin, cette direction d'extension est proche de celle décrite dans le massif de Belledonne pour la même période [9].

4.3. Intégration au sein de la chaîne paléozoïque

L'évolution paléozoïque des massifs cristallins externes est en de nombreux points comparable à celle connue dans le Massif central français [7] : les phases d'océanisation et de subduction [17], puis de collision suivies d'extension [9,12] ont été documentés dans les massifs de Belledonne et du Pelvoux.

Cependant, cette étude met en évidence des différences dans les dernières étapes du cycle Paléozoïque, au cours du Stéphanien. En effet, les granites du Massif central français, tel que le massif du Velay, sont caractérisés par des géométries de dômes et de laccolites s'inscrivant dans un contexte d'amincissement crustal, avec une direction d'extension principale orientée nord–sud et un raccourcissement vertical [8,15]. Dans les massifs cristallins, les décrochements conjugués dextre et senestre indiquent aussi une direction d'extension nord–sud, mais la direction de raccourcissement n'est plus verticale, mais horizontale et de direction est–ouest. Cette différence dans l'orientation de la composante de raccourcissement traduit la position plus marginale des massifs cristallins externes par rapport au cœur de la chaîne. Ils sont ainsi impliqués dans la rotation et la translation dextre de l'Afrique par rapport à l'Europe [2], qui ont été récemment interprétées comme résultant de la subduction oblique de la Paléo-Téthys vers le nord-ouest [19]. Ce contexte de subduction oblique pourrait être à l'origine de la mise en place de ces granites au sein d'une croûte préalablement épaissie dans un contexte tectonique décrochant [5].

5. Conclusion

Malgré une réactivation au cours du cycle alpin, l'analyse structurale et la cartographie 3D des granites

du massif du Pelvoux ont permis de mettre en évidence un contexte décrochant sénestre, responsable de leur mise en place au cours du Stéphanien. Dans les massifs cristallins externes, ces décrochements se répartissent selon deux familles : ils sont orientés N20–N30 et de composante dextre dans le massif des Aiguilles-Rouges et N135, avec une composante sénestre, dans le massif du Pelvoux. Ces directions de cisaillement sont compatibles avec un raccourcissement est–ouest et une extension nord–sud. La prédominance des systèmes décrochants dans les massifs cristallins externes au cours du Stéphanien est expliquée par leur situation en bordure de la chaîne paléozoïque européenne, à proximité de la zone de subduction oblique de la Paléo-Téthys.

Remerciements

Les auteurs remercient Arnaud Pêcher et Didier Marquer pour leur remarques constructives. Ce travail a été financé par le projet Insu–BRGM « GéoFrance-3D Alpes ».

Références

- [1] C. Aubourg, C. Chabert-Pelline, Neogene remagnetization of normal polarity in the Late Jurassic black shales from the southern subalpine chains (French Alps); evidence for late anticlockwise rotations, *Tectonophysics* 308 (1999) 473–486.
- [2] J.-P. Bard, Démembrement anté-mésozoïque de la chaîne varisque d'Europe occidentale et d'Afrique du Nord ; rôle essentiel des grands décrochements transpressifs dextres accompagnant la rotation–translation horaire de l'Afrique durant le Stéphanien, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila* 324 (1997) 693–704.
- [3] J.-C. Barféty, A. Pêcher, notice de la carte géologique au 50 000^e de Saint-Christophe-en-Oisans, Éditions du BRGM.
- [4] F. Bartoli, A. Pêcher, P. Vialon, Le chevauchement Meije–Muzelle et la répartition des domaines structuraux du massif de l'Oisans (partie du haut Dauphiné cristallin), *Géol. Alpine* 50 (1974) 17–26.
- [5] F. Bussy, J. Hernandez, J. von Raumer, Bimodal magmatism as a consequence of the post-collisional readjustment of the thickened Variscan continental lithosphere (Aiguilles Rouges–Mont Blanc massifs, Western Alps), *Geol. Soc. Am.* 350 (2001) 221–233.
- [6] F. Debon, M. Lemmet, Evolution of Mg/Fe ratios in Late Variscan plutonic rocks from the external crystalline massifs of the Alps (France, Italy, Switzerland), *J. Petrol.* 40 (1999) 1151–1185.
- [7] S. Di Paola, S. Guillot, P. Ledru, R.-P. Menot, A.-P. Montjoie, M.I. Spalla, G. Gosso, Evidence for a main Paleozoic suture zone in the Belledonne, Grandes-Rousses, Oisans Massifs (Western Alps) in the light of Geographical Information System mapping, *Tectonophysics* (in press).
- [8] M. Faure, Late orogenic Carboniferous extensions in the Variscan French Massif Central, *Tectonics* 14 (1995) 132–153.
- [9] A. Fernandez, S. Guillot, R.-P. Menot, P. Ledru, Late Paleozoic polyphased tectonics in the SW Belledonne massif (external crystalline massifs, French Alps), *Geodin. Acta* 15 (2002) 127–139.
- [10] V. Grandjean, S. Guillot, A. Pecher, Un nouveau témoin de l'évolution métamorphique BP-HT post-orogénique hercynienne, l'unité de Peyre-Arguet (haut Dauphiné), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila* 322 (1996) 189–195.
- [11] C. Guerrot, F. Debon, U–Pb zircon dating of two contrasting Late Variscan plutonic suites from the Pelvoux Massif (French Western Alps), *Schweiz. Min. Petr. Mitt.* 80 (2000) 249–256.
- [12] S. Guillot, R.-P. Menot, Nappe stacking and first evidence of Late Variscan extension in the Belledonne Massif (External Crystalline Massifs, French Alps), *Geodin. Acta* 12 (1999) 97–111.
- [13] C. Lajaunie, G. Courrioux, L. Manuel, Foliation fields and 3D cartography in geology; principles of a method based on potential interpolation, *Math. Geol.* 29 (1997) 571–584.
- [14] J.-C. Laurent, Les épisodes du magmatisme filonien basique du massif des Écrins-Pelvoux entre le Carbonifère et le Lias, thèse de 3^e cycle, université de Grenoble, 1992, 179 p.
- [15] P. Ledru, G. Courrioux, C. Dallain, J.-M. Lardeaux, J.-M. Montel, O. Vanderhaeghe, G. Vitel, The Velay Dome (French Massif Central); melt generation and granite emplacement during orogenic evolution, *Tectonophysics* 342 (2001) 207–237.
- [16] M.-T. Lemoine, A. Bas, H. Arnaud-Vanneau, H. Arnaud, T. Dumont, M. Gidon, M. Bourbon, P.-C. de Graciansky, J.-L. Rudkiewicz, J. Megard-Galli, P. Tricart, The continental margin of the Mesozoic Tethys in the Western Alps, *Mar. Pet. Geol.* 3 (1986) 179–199.
- [17] J.L. Paquette, R.-P. Menot, J.-J. Peucat, REE, Sm–Nd and U–Pb zircon study of eclogites from the Alpine external massifs (Western Alps); evidence for crustal contamination, *Earth Planet. Sci. Lett.* 96 (1989) 181–198.
- [18] J.F. von Raumer, The Palaeozoic evolution in the Alps, from Gondwana to Pangea, *Geol. Rundsch.* 87 (1998) 407–435.
- [19] G.M. Stampfli, G.D. Borel, A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrones, *Earth Planet. Sci. Lett.* 196 (2002) 17–33.
- [20] P. Tricart, S. Schwartz, C. Sue, G. Poupeau, J.-M. Lardeaux, La dénudation tectonique de la zone ultradauphinoise et l'inversion du Front Briançonnais au sud-est du Pelvoux (Alpes occidentales) : une dynamique miocène, *Bull. Soc. géol. France* 172 (2001) 49–58.