



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1091–1098



Geochemistry (Geochronology)

U–Pb emplacement and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ cooling ages of the eastern Mont-Louis granite massif (Eastern Pyrenees, France)

Olivier Maurel*, Jean-Patrick Respaut, Patrick Monié, Nicolas Arnaud, Maurice Brunel

Laboratoire « Dynamique de la lithosphère », UMR 5573, cc 058, université Montpellier-2, place Eugène-Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France

Received 12 November 2003; accepted after revision 19 April 2004

Available online 25 May 2004

Presented by Jacques Angelier

Abstract

Zircon U–Pb dating by SIMS of the Mont-Louis granite yields an age of 305 ± 5 Ma, interpreted to reflect the igneous emplacement age of the massif. It is in agreement with the Hercynian syntectonic character of Pyrenees granite. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ on hornblende, biotite and K-feldspar permit, to estimate the massif cooling. A rapid temperature decrease (≈ 30 °C/Ma) is revealed from Westphalian to Late Stephanian, coeval with the emplacement of a laccolithe in the upper crust. Then, the cooling rate decreases to ≈ 1 °C/Ma. This would be consistent with a long time residence for the pluton from the Late Palaeozoic to the Early Cainozoic at 6–8 km depth. **To cite this article:** O. Maurel et al., C. R. Geoscience 336 (2004).

© 2004 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Résumé

Âges U–Pb de mise en place et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de refroidissement de la partie orientale du pluton granitique de Mont-Louis (Pyrénées orientales, France). Un âge U–Pb sur zircon de 305 ± 5 Ma est déterminé sur le granite de Mont-Louis. Il confirme le caractère syntectonique de la mise en place des plutons pyrénéens. L'application de la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur hornblende, sur biotite et sur feldspath-K permet d'estimer les modalités de refroidissement du massif. On révèle ainsi une diminution rapide de la température d'environ 30 °C/Ma du Westphalien jusqu'à la fin du Stéphanien correspondant à la mise en place d'un laccolithe dans la croûte supérieure. Le taux de refroidissement diminue ensuite jusqu'à environ 1 °C/Ma. Ainsi, le pluton serait resté à 6–8 km de profondeur depuis la fin du Paléozoïque jusqu'au Cénozoïque sans être affecté par un événement thermo-tectonique. **Pour citer cet article :** O. Maurel et al., C. R. Geoscience 336 (2004).

© 2004 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Keywords: Eastern Pyrenees; Mont-Louis granite; U–Pb; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; Hercynian orogeny; France

Mots-clés : Pyrénées orientales ; granite de Mont-Louis ; U–Pb ; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; orogénèse hercynienne ; France

* Corresponding author. Present address: Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, UMR-CNRS 6112, Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes cedex 3, France.

E-mail address: maurel@chimie.univ-nantes.fr (O. Maurel).

Version française abrégée

1. Introduction

La datation des plutons granitiques et la caractérisation de leur refroidissement donnent des informations sur les phases thermo-tectoniques contemporaines du plutonisme durant un événement orogénique.

Le massif de Mont-Louis, à l'est de la zone axiale des Pyrénées (Fig. 1), est un pluton calco-alcalin de la chaîne hercynienne [5]. Longtemps considéré comme un pluton post-tectonique [4,35] d'âge Rb–Sr de 269 ± 12 Ma [36], il est maintenant admis que sa mise en place est contemporaine des déformations hercyniennes, soit tardives au Westphalien [15,18], soit précoces au Namurien [6].

Compte tenu de la sous-estimation des âges Rb–Sr des plutons pyrénéens (ca. 280–295 Ma) [11] et les âges U–Pb des granites de Bassiès et Quérigut respectivement à 312 ± 2 Ma et 307 ± 2 Ma [27, 29] comparables avec l'âge U–Pb de 305 ± 3 Ma sur des sphènes de l'auréole de contact du granite d'Andorre [30], il apparaît nécessaire de dater de façon plus fiable la mise en place du granite de Mont-Louis et de caractériser son refroidissement. Ceci permettra de préciser l'évolution hercynienne des Pyrénées. Pour cela, des analyses U–Pb sur zircon et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur hornblende, biotite et feldspath-K ont été réalisées.

2. Contexte géologique et échantillonnage

Le pluton de Mont-Louis [11] est un «massif supérieur» [4] de 660 km². Il présente une forme allongée est–ouest et peut être divisé en trois unités. La plus orientale, constituant le plancher du pluton, est un laccolithe de 1,5 à 3 km d'épaisseur mis en place entre des gneiss type Canigou et le Paléozoïque inférieur du Conflent [3]. La partie centrale est un prisme à vergence sud de 7 à 8 km d'épaisseur. La partie occidentale forme une «bulle» à vergence sud, intrusive dans la série sédimentaire montant jusqu'au Dévonien [31].

Deux échantillons cogénétiques ont été sélectionnés à l'est du pluton, aux points de coordonnées (Lambert zone II étendu) $x = 587,5$, $y = 1731,8$, et $z = 1400$ m pour ML1 et $x = 569,7$, $y = 1730,1$ et $z = 2320$ m pour ML6 (Fig. 1). ML1 est une granodiorite avec biotite ($X_{\text{Mg}} = 0,39\text{--}0,42$), plagioclase (An 43–57), feldspath-K, hornblende actinolitique ($X_{\text{Fe}} =$

0,41–0,47), zircon, apatite et opaque. ML6 est une granodiorite sans hornblende.

3. Résultats analytiques

3.1. Datation U–Pb sur zircon

Quatorze analyses réalisées sur des zircons de ML1 et dix sur ceux de ML6 sur la sonde ionique CAMECA IMS 1270 du CRPG (Nancy) dans le cadre du service national de l'INSU selon la technique décrite par [12], sont reportées dans le diagramme $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ [33], comme préconisé pour les roches du Phanérozoïque [10]. Pour ML1 (Fig. 2), l'intercept inférieur d'une droite ayant pour origine la composition du plomb commun à 300 Ma ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0,86 \pm 0,01$ [32]) donne un âge de $305,8 \pm 8,4$ Ma (MSWD = 0,38). Les zircons de ML6 (Fig. 2) donnent un âge de $305 \pm 6,3$ Ma (MSWD = 1,3). Étant donné la similarité des âges et le caractère cogénétique des échantillons, les analyses sont rassemblées dans un même diagramme où un âge moyen de 305 ± 5 Ma (MSWD = 0,73) est déterminé pour l'unité orientale du pluton (Fig. 2).

3.2. Datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Des monograins de hornblende et de biotite de ML1 ont été analysés à l'UMR Dynamique de la Lithosphère de Montpellier grâce à une sonde laser suivant le protocole décrit par [25]. Le chauffage progressif de la hornblende montre une augmentation des âges depuis ≈ 120 Ma jusqu'à un âge intégré de $299,8 \pm 2,9$ Ma pour six paliers et 80 % de ^{39}Ar total (Fig. 3). Le spectre d'âges de la biotite montre une augmentation des âges depuis $250,7 \pm 24,7$ Ma jusqu'à un âge plateau de $292,6 \pm 2,8$ Ma pour huit paliers et 90 % de ^{39}Ar total (Fig. 3).

L'analyse d'une population de feldspath-K de ML1 a été réalisée à l'UMR Magmas et Volcans de Clermont-Ferrand suivant la technique décrite par [2]. Le dégazage progressif donne un spectre discordant dont les âges augmentent plus ou moins régulièrement depuis $48,2 \pm 0,8$ Ma jusqu'à $300,4 \pm 3$ Ma, avec un pseudo-plateau à 295–300 Ma (Fig. 3).

4. Interprétation et discussion

Étant donné la température de fermeture élevée du système U–Pb sur zircon [9], l'âge de 305 ± 5 Ma est considéré comme l'âge de mise en place du pluton de Mont-Louis. Il est cohérent avec les âges U–Pb

d'autres plutons pyrénéens [27,29] et avec l'âge U–Pb sur zircon de 306 ± 4 Ma des plutons Aigoual–Saint-Guiral–Liron des Cévennes méridionales [8], qui comme les Pyrénées appartiennent au domaine externe de la chaîne hercynienne [21]. Ces résultats infirment les âges Rb–Sr qui conduisaient à considérer les plutons pyrénéens comme post-tectoniques. L'origine de la diminution des âges Rb–Sr est mal connue. Elle pourrait être la conséquence, soit de circulation fluide avec lessivage partiel du Sr, soit du caractère noncogénéétique des échantillons [13,14], soit de l'empreinte des événements alpins s.l.

D'après Hartevelt [17] et Laumonier [18], les premières phases de déformations hercyniennes dans les Pyrénées orientales sont viséo-namuriennes (ca. 325 Ma). L'âge de 305 ± 5 Ma est donc plus cohérent avec une mise en place lors des phases hercyniennes tardives transpressives à transtensives dextres [15,18], que lors des phases précoces [6].

Les températures de fermeture de la hornblende et de la biotite pour le système $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sont respectivement 550 ± 50 °C [34] et 325 ± 25 °C [16]. Les âges de $299,8 \pm 2,9$ Ma et $292,6 \pm 2,8$ Ma sont donc considérés comme des âges de refroidissement du granite de Mont-Louis. La comparaison des données thermo-chronologiques U–Pb et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ permet de calculer un taux de refroidissement d'environ 30 °C/Ma (Fig. 4) depuis la fin du Westphalien (ca. 305 Ma) jusqu'à la fin du Stéphanien (ca. 290 Ma). Ce refroidissement rapide résulte probablement de la mise en place d'un laccolithe peu épais dans les formations épizonales de la croûte supérieure.

Le spectre d'âges des feldspaths-K de ML1 montre le même profil discordant que les feldspaths-K des granites de Millas [1] et de Saint-Laurent [22]. Il enregistre une fermeture progressive des minéraux entre 300 et 150 °C [20], modélisée grâce à la théorie de la diffusion multi-domaine [19] (Fig. 4). La cohérence des âges maximums proches de 300 Ma avec ceux donnés par la hornblende et la biotite indique que le refroidissement rapide a duré jusque vers 290 Ma. Ensuite, le taux de refroidissement semble avoir diminué brusquement jusqu'à des valeurs inférieures à 1 °C/Ma pour la période 290 à 60 Ma (Fig. 4). Avec un gradient géothermique normal, la courbe de refroidissement suggère que les roches sont restées entre 8 et 6 km de profondeur durant cette période ayant commencé quand l'équilibre thermique entre les schistes

encaissants et le pluton a été atteint. L'exhumation du massif ne se produit que lors des événements alpins s.l. [22,23]. Ce type d'exhumation contraste avec celles des plutons des Cévennes qui sont recouverts en discordance par le Trias [7]. Cette différence entre des plutons ayant probablement une origine commune, dans deux zones externes de la chaîne hercynienne, devra être expliquée en fonction de leur évolution géodynamique différente.

1. Introduction

In the upper crust, granitic plutons can emplace at different stages of regional deformation and therefore can represent pre-, syn- or late intrusive bodies, with respect to an identified deformation phase. The precise dating of emplacement of these plutons and the restoration of their cooling history can therefore place important time constraints on the different thermo-tectonic phases coeval with plutonism during an orogeny.

The Pyrenean Hercynian belt [5] is outlined by an important calc-alkaline plutonism [11], of which the Mont-Louis granite massif, located in the eastern part of the Axial Zone (Fig. 1), represents one of the largest pluton in volume. Considered as an Early Permian post-tectonic pluton [4,35] on the basis of a previous 269 ± 12 Ma Rb–Sr whole-rock isochron [36], it is now accepted that the emplacement of Mont-Louis granite is coeval with the Hercynian deformation. However, two hypotheses are formulated. The first one suggests an emplacement during late deformation phases in Westphalian times [15,18], while the second one proposes that this emplacement took place during the Early Namurian tectonic phase [6].

Rb–Sr dates of Pyrenean plutons (review in [11]) yield too young ages (ca. 280–295 Ma) with respect to these observations. Moreover, recent U–Pb zircon studies yielded ages at 312 ± 2 Ma and 307 ± 2 Ma respectively on the Bassies and Querigut granite [27, 29], which can be compared with the U–Pb titanite age of 305 ± 3 Ma obtained on contact metamorphism from the Andorra granite [30]. It appears therefore necessary to date precisely the age of magmatic emplacement and the cooling of Mont-Louis granite, in order to better constrain the tectonic evolution of the Hercynian belt in the Pyrenees. Hence, U–Pb dating

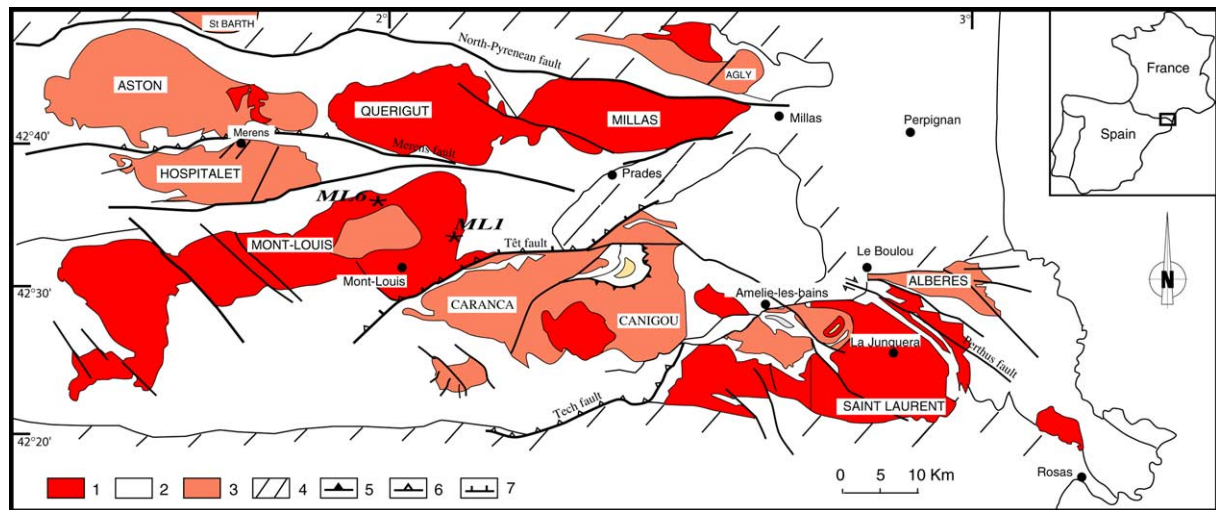


Fig. 1. Simplified geological sketch map of the eastern Axial Zone of Pyrenees (modified after [26]) with sampling location. 1. Hercynian granitoid. 2. Palaeozoic metasediments. 3. Palaeozoic gneiss. 4. Post-Hercynian rocks. 5. Hercynian thrusts. 6. Alpine thrusts. 7. Oligo-Miocene normal faults. ML1 and ML6 samples are located.

Fig. 1. Carte géologique simplifiée de la partie orientale de la zone axiale des Pyrénées (modifiée d'après [26]). 1. Granitoïdes hercyniens. 2. Métasédiments paléozoïques. 3. Gneiss paléozoïque. 4. Terrains post-hercyniens. 5. Chevauchements hercyniens. 6. Chevauchements alpins. 7. Failles normales oligo-miocènes. Les échantillons ML1 et ML6 sont localisés.

on zircons and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analyses on hornblende, biotite and K-feldspar were performed.

0.41–0.47), zircon, apatite and opaque. ML6 has a granodioritic composition without hornblende.

2. Geological setting and samples selection

The Mont-Louis granite is a composite east–west elongate calc-alkaline pluton [11] which covers an area of about 660 km² (Fig. 1), classified as a ‘massif supérieur’ [4]. It can be divided in three units. The eastern unit is a 1.5 to 3 km thick laccolith emplaced between a floor of Canigou type gneissic rocks (Dome of Bouillouse) and in Early Palaeozoic Confluent rocks [3]. The central part constitutes a north dipping, 7–8 km thick prismatic body. The western part forms a north dipping ‘bubble’ (named also Andorra granite), intrusive in a sedimentary sequence grading up to Devonian [31]. Leucogranites were emplaced later in east–west cracks.

Two cogenetic samples were selected in the eastern basal part of pluton at the coordinate points (extensive Lambert zone II) $x = 587.5$, $y = 1731.8$, and $z = 1400$ m for ML1 and $x = 569.7$, $y = 1730.1$ and $z = 2320$ m for ML6 (Fig. 1). ML1 is a granodiorite with quartz, biotite ($X_{\text{Mg}} = 0.39$ – 0.42), plagioclase (An 43–57), K-feldspar, actinolitic hornblende ($X_{\text{Fe}} =$

3. Analytical results

3.1. U–Pb dating on zircons

Analyses were performed on the CAMECA IMS 1270 ion-probe of CRPG (Nancy, France), following the technique outlined in [12], within the framework of the INSU national ion-probe service. Fourteen analyses were made on ML1 and ten on ML6 zircons. They are reported in a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ Tera–Wasserburg reverse Concordia diagram [33], as advocated for Phanerozoic rocks [10]. For ML1 (Fig. 2), the lower intercept of straight line with a common lead origin at 300 Ma ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.8618 \pm 0.01$ in the Stacey–Kramer model [32]) yields an age of 305.8 ± 8.4 Ma (MSWD = 0.38). Ten analyses on ML6 zircons (Fig. 2) yield an age of 305 ± 6.3 Ma (MSWD = 1.3), consistent, within error margins, with the age obtained on ML1 zircons. Given the similarity of these two ages and the cogenetic character of these two samples, the analyses were combined on a same diagram. An average zircon U–Pb age of 305 ± 5 Ma

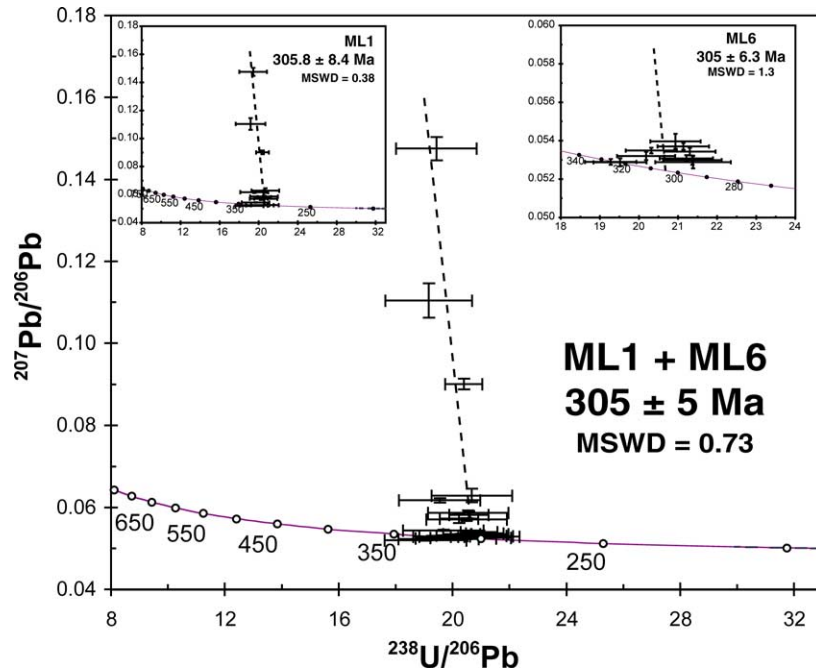


Fig. 2. Reverse Concordia diagram $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ [33] of ML1 (left insert) and ML6 (right insert) zircons. Errors are given at 1σ .

Fig. 2. Diagramme Concordia inverse $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ [33] des zircons de ML1 (encart gauche) et de ML6 (encart droit). Les erreurs sur les âges sont données à 1σ .

(MSWD = 0.73) is thus determined for the eastern unit of Mont-Louis pluton (Fig. 2).

3.2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating

Single grain $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analyses were performed on hornblende and biotite from ML1 at Montpellier (UMR Dynamique de la Lithosphère) using a continuous laser probe and a protocol described in [25]. The step heating of a ML1 hornblende yields ages increasing in the first five percent of degassing from about 120 Ma to an integrated age of 299.8 ± 2.9 Ma for six steps that represent about 81% of total ^{39}Ar released (Fig. 3). The age spectrum of ML1 biotite yields also an age increase in the first ten percent of degassing from 250.7 ± 24.7 Ma to a plateau age of 292.6 ± 2.8 Ma on eight steps for 90% of the ^{39}Ar release (Fig. 3).

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis of ML1 K-feldspar bulk separate was performed at UMR Magmas et Volcans of Clermont-Ferrand University (France) following the technique outlined in [2]. The progressive degassing yields a highly discordant spectrum (Fig. 3), as classi-

cally described for K-feldspar [24]. The ages are increasing more or less regularly from a minimum at 48.2 ± 0.8 Ma to a maximum at 300.4 ± 3 Ma with a sub-plateau at about 295–300 Ma.

4. Interpretation and discussion

Considering the high closure temperature for U–Pb in zircon [9], the age at 305 ± 5 Ma obtained on the Mont-Louis pluton probably reflects its igneous emplacement age in the Lower Palaeozoic sedimentary series. It is consistent with recent U–Pb zircon on the Pyrenean granitoids [27,29]. It is also in agreement with an U–Pb zircon age of 306 ± 4 Ma obtained on the Aigoual–Saint-Guiral–Liron pluton [8] in the southern Cevennes, which belongs, in the same way as the Pyrenees, to the southern flank of the Hercynian belt [21]. These results allow us to definitely reject the former Rb–Sr Permian ages that led us to consider the Pyrenean granites as post-tectonic intrusives. The origin of the rejuvenation of the Rb–Sr system remains conjec-

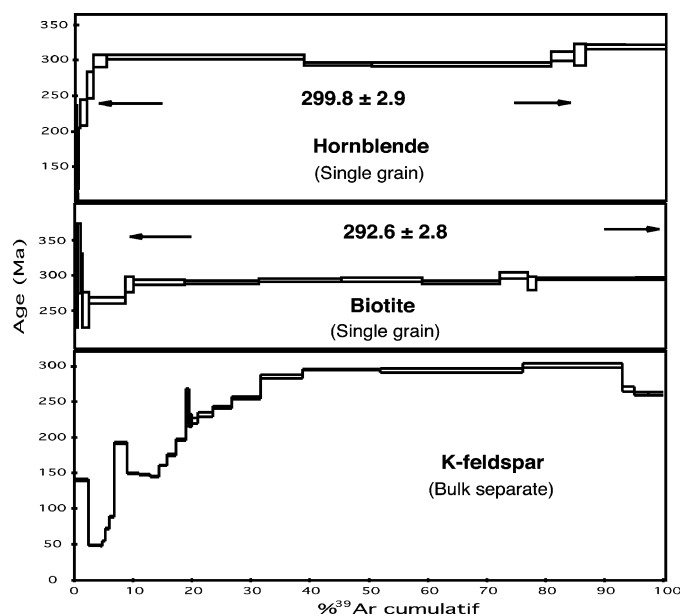


Fig. 3. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of hornblende and biotite single grains and K-feldspar bulk separate of ML1 sample. Errors are given at 1σ .
 Fig. 3. Spectre d'âges $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de monograins de hornblende et biotite et d'une population de feldspath-K de l'échantillon ML1. Les erreurs sur les âges sont données à 1σ .

tural. It could be the consequence of either the circulation of hydrothermal fluids and partial leaching of Sr, the non-cogenetic character of the samples plotted on whole-rock isochrons [13,14], or the overprint of Alpine metamorphism and deformation in the studied samples is also possible.

According to Hartevelt [17] and Laumonier [18], the Early Hercynian deformations in the eastern Pyrenees most probably occurred at the Viséan–Namurian boundary (ca. 325 Ma). Therefore, the 305 ± 5 Ma age of the Mont-Louis pluton does not fit the hypothesis of an Early Hercynian syntectonic granite [6]. It is mostly coeval with dextral-wrenching during Late Hercynian phases [15,18].

The hornblende and biotite closure temperatures for the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronometer are respectively close to 550 ± 50 °C [34] and 325 ± 25 °C [16]. The ages of 299.8 ± 2.9 Ma and 292.6 ± 2.8 Ma obtained on these two minerals are thus considered as cooling ages after the Mont-Louis granite intrusion. Comparing U–Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronological data yields a cooling rate of about 30 °C/Ma (Fig. 4) for a period extending from Late Westphalian (ca. 305 Ma) to Late Stephanian (ca. 290 Ma). A monazite U–Pb age ($T_c = 650$ – 700 °C [28]) of 302 ± 2 Ma (Alexandrov et al.,

pers. com.) is also consistent with that cooling history (Fig. 4). This fast cooling is probably related to the emplacement of a thin laccolithic body in upper crustal epizonal formations.

The ML1 K-feldspar age spectrum has the same discordant diffusion pattern as those previously given by K-feldspar collected in the northern part of the Millas granite [1], and in the central part of Saint-Laurent granite [22]. This age spectrum is interpreted as recording a progressive closure of the mineral from about 300 and 150 °C [20], which can be modelled by the Multi-Domain Diffusion theory [19] in order to obtain information on the thermal history of the granite in this temperature range. The consistency of maximum ages close to 300 Ma with those given by biotite and amphibole indicates that fast cooling prevailed after the magmatic emplacement until about 290 Ma (Fig. 4). Then, the granite experienced an important decrease in cooling rate for a period between 290 and 60 Ma, i.e. less than 1 °C/Ma (Fig. 4). Assuming a normal geothermal gradient, the cooling pattern suggests that the rocks stayed at a depth comprised between 8 and 6 km during this long period that started when the epizonal country schists reached thermal equilibrium with the Mont-Louis pluton. The final exhumation of

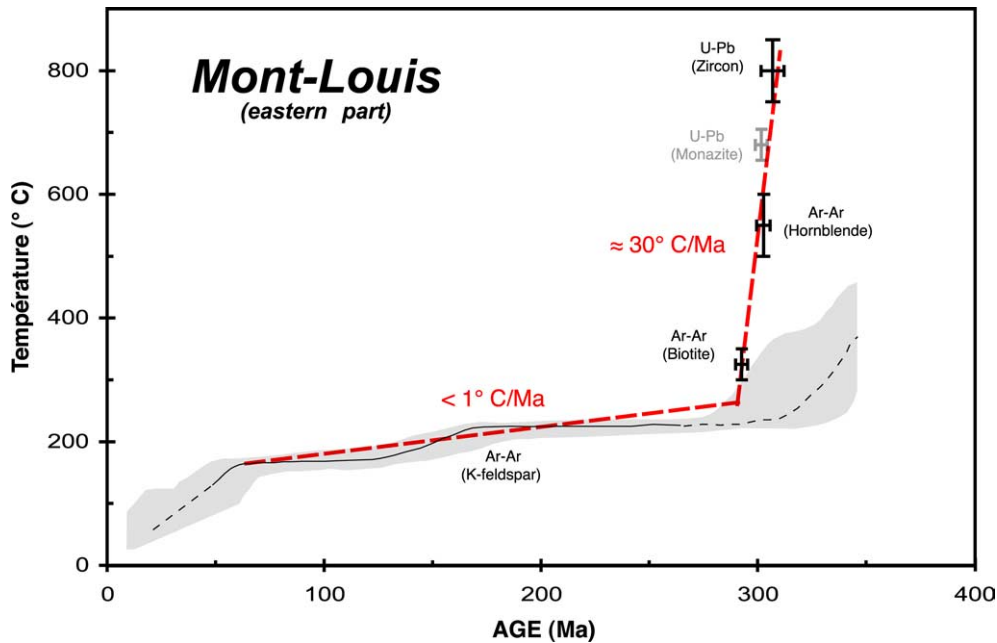


Fig. 4. Cooling curve of eastern Mont-Louis pluton. T–t points correspond to zircon U–Pb, monazite U–Pb (Alexandrov et al., pers. com.) and hornblende and biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates with respect to the respective closure temperatures and with the modelled thermal history of K-feldspar from ML1 between 300 and 150 °C as obtained by Multi-Domain Diffusion theory [19]. (The thin black line corresponds to the best-fit solution whereas the grey area corresponds to other possible cooling histories. Dashed parts of cooling curve correspond to poorly constrained portions of this thermal history). Dashed thick straight lines correspond to cooling episodes documented, and the associated rates are indicated.

Fig. 4. Courbe de refroidissement de la partie orientale du granite de Mont-Louis. Les points T–t correspondent aux âges U–Pb sur zircon, U–Pb sur monazite (Alexandrov et al., com. pers.) et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur hornblende et biotite en fonction de leur température de fermeture et avec la modélisation de l’histoire thermique des feldspaths-K de l’échantillon ML1 entre 300 et 150 °C, réalisée grâce à la théorie de la diffusion multi-domaine [19] (la ligne noire correspond à la meilleure solution, tandis que la zone grisée correspond aux autres histoires de refroidissement possibles ; les parties en pointillé de la courbe de refroidissement correspondent aux portions mal définies de cette histoire thermique). Les droites épaisses pointillées correspondent aux épisodes de refroidissement mis en évidence et les taux associés sont indiqués.

these rocks occurred only during the Alpine events s.l. as recorded by fission tracks and (U–Th)/He ages [22, 23]. This exhumation type contrasts with that recorded by the Cevennes granodioritic plutons which reached the surface before the Triassic, probably during Late Stephanian and Permian times [7]. This important difference of cooling histories between plutons probably sharing a common origin in two external zones of the Hercynian belt will have to be explained, as regarding their different geodynamical evolution.

Acknowledgements

Helpful comments from C. Pin and J.-L. Bouchez improved the presentation of this paper. The INSU National Service of Ion Probe staff (CRPG, Nancy) is acknowledged for their help during the U–Pb

analyses. Part of analyses was supported by BRGM (Orléans) within the framework of the France 1/50 000 geological map program.

References

- [1] F. Albarède, G. Ferraud, I. Kaneoka, C.J. Allègre, $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating: the importance of K-feldspars on multi-mineral data of polyorogenic areas, *J. Geol.* 86 (1978) 581–598.
- [2] N.O. Arnaud, M. Brunel, J.-M. Cantagrel, P. Tapponnier, High cooling and denudation rates at Kongur Shan, eastern Pamir (Xinjiang, China) revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ alkali feldspar thermochronology, *Tectonics* 12 (1993) 1335–1346.
- [3] A. Autran, G. Guitard, Observations sur le granite et les gneiss de Mont-Louis (Pyrénées orientales), *Bull. Soc. géol. France* 6 (1957) 245–270.
- [4] A. Autran, M. Fontelles, G. Guitard, Relations entre les intrusions de granitoïdes, l’anatexie et le métamorphisme régional, considérées principalement du point de vue du rôle

- de l'eau : cas de la chaîne hercynienne des Pyrénées orientales, *Bull. Soc. géol. France* 7 (1970) 673–731.
- [5] A. Barnolas, J.C. Chiron, Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées. Vol. I : Introduction. Géophysique. Cycle hercynien, Éditions BRGM–ITGE, 1996, 729 p.
- [6] J.L. Bouchez, G. Gleizes, Two-stage deformation of the Mont-Louis-Andorra granite pluton (Variscan Pyrenees) inferred from magnetic susceptibility anisotropy, *J. Geol. Soc. Lond.* 152 (1995) 669–679.
- [7] B. Briand, J. Négron, M. Viard, R. Combémourel, J.-P. Couturié, Carte géologique (1/50 000e), feuille Le Bleymard (863), BRGM, Orléans, 1994.
- [8] S. Brichau, Géochronologie $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ et U/Pb des plutons granitiques de l'Aigoual et du mont Lozère. Conséquences sur leur mode de mise en place, DEA université Montpellier-2, 2000, 41 p.
- [9] D.J. Cherniak, E.B. Watson, Pb diffusion in zircon, *Chem. Geol.* 172 (2000) 5–24.
- [10] J.C. Claoué-Long, W. Compston, J. Roberts, M.C. Fanning, Two Carboniferous ages: a comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis. *Geochronology Time Scales and Global Stratigraphic Correlation*, SEPM 54 (1995) 3–20.
- [11] F. Debon, P. Enrique, A. Autran, Le plutonisme hercynien des Pyrénées, in: A. Barnolas, J.-C. Chiron (Eds.), Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées, vol. I, Éditions BRGM–ITGE, 1996, pp. 361–499.
- [12] E. Deloule, M. Chaussidon, B.P. Glass, C. Koeberl, U–Pb isotopic study of relict zircon inclusions recovered from Muong Nong-type tektites, *Geochim. Cosmochim. Acta* 65 (2001) 1833–1838.
- [13] S. Fourcade, Géochimie des granitoïdes, thèse, université Paris-7, 1981, 211 p.
- [14] S. Fourcade, M. Javoy, Sr–Nd–O isotopic features of mafic microgranular enclaves and host granitoids from the Pyrenees, France: evidence for their hybrid nature and inference on their origin, in: J. Didier, B. Barbarin (Eds.), Enclaves and granite petrology, *Dev. Petrol.*, Elsevier, Amsterdam, 1991, pp. 345–364.
- [15] G. Guitard, J. Geyssant, B. Laumonier, Les plissements hercyniens tardifs dans le Paléozoïque inférieur du versant nord du Canigou : analyse géométrique, chronologie des déformations superposées, relations avec le granite de Mont-Louis et le métamorphisme régional, *Géologie de la France* 4 (1984) 95–127.
- [16] T.M. Harrison, I. Duncan, I. Mc Dougall, Diffusion of ^{40}Ar in biotite: Temperature, pressure and compositional effects, *Geochim. Cosmochim. Acta* 49 (1985) 2461–2468.
- [17] J.J.A. Hartevelt, Geology of the Upper Segre and Valira Valleys, Central Pyrenees, Andorra/Spain, *Leid. Geol. Med.* 45 (1970) 167–236.
- [18] B. Laumonier, La chaîne hercynienne de l'Est des Pyrénées : le massif du Canigou, Excursion du Groupe français du Paléozoïque, 1997, 76 p.
- [19] O.M. Lovera, F.M. Richter, T.M. Harrison, The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronometry for slowly cooled samples having a distribution of diffusion domain size, *J. Geophys. Res.* 94 (1989) 17917–17935.
- [20] O.M. Lovera, F.M. Richter, T.M. Harrison, Diffusion domains determined by ^{39}Ar release during step heating, *J. Geophys. Res.* 96 (1991) 2057–2069.
- [21] P. Matte, La chaîne varisque parmi les chaînes paléozoïques périalpines, modèle d'évolution et position des grands blocs continentaux au Permo-Carbonifère, *Bull. Soc. géol. France* 8 (1986) 9–24.
- [22] O. Maurel, L'exhumation de la zone axiale des Pyrénées orientales : une approche thermo-chronologique multi-méthodes du rôle des failles, thèse, université Montpellier-2, 2003, 218 p.
- [23] O. Maurel, M. Brunel, P. Monié, Exhumation cénozoïque des massifs du Canigou et de Mont-Louis (Pyrénées orientales, France), *C. R. Geoscience* 334 (2002) 941–948.
- [24] I. Mc Dougall, T.M. Harrison, *Geochronology and thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method*, Oxford University Press, New York, 1999, 212 p.
- [25] P. Monié, R. Caby, M.H. Arthaud, The Neoproterozoic Brazilian orogeny of Northeast Brazil. ^{40}Ar – ^{39}Ar ages and petrostructural data from Ceara, *Precamb. Res.* 81 (1997) 241–264.
- [26] P. Monié, J. Soliva, M. Brunel, H. Maluski, Les cisaillements mylonitiques du granite de Millas (Pyrénées, France). Âge Crétacé $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ et interprétation tectonique, *Bull. Soc. géol. France* 165 (1994) 559–571.
- [27] J.-L. Paquette, G. Gleizes, D. Leblanc, J.-L. Bouchez, Le granite de Bassiès (Pyrénées): Un pluton syntectonique d'âge Westphalien. Géochronologie U–Pb sur zircons, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 324 (1997) 387–392.
- [28] R.R. Parrish, U–Pb dating of monazite and its application to geological problems, *Can. J. Earth Sci.* 27 (1990) 1431–1450.
- [29] M.P. Roberts, C. Pin, J.D. Clemens, J.-L. Paquette, Petrogenesis of mafic to felsic plutonic rock associations: the calc-alkaline Quérigut complex, French Pyrenees, *J. Petrol.* 41 (2000) 809–844.
- [30] R.L. Romer, A. Soler, U–Pb age and lead isotopic characterization of Au-bearing skarn related to the Andorra granite (central Pyrenees, Spain), *Mineral. Deposita* 30 (1995) 374–383.
- [31] A. Soler, P. Enrique, La terminación sur-occidental del batolito de Andorra – Mont Lluís: características petrológicas y geoquímicas, *Acta Geol. Hisp.* 24 (1989) 139–146.
- [32] J.S. Stacey, J.D. Kramers, Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model, *Earth Planet. Sci. Lett.* 26 (1975) 207–221.
- [33] F. Tera, G.J. Wasserburg, U–Th–Pb systematics on lunar rocks and inferences about lunar evolution and the age of the Moon, *Proc. 5th Lunar Conf.*, *Geochim. Cosmochim. Acta (Suppl.)* 5 (1974) 1571–1599.
- [34] I.M. Villa, B. Grobéty, S.P. Kelley, R. Trigila, R. Wieler, Assessing Ar transport paths and mechanisms for McClure Mountains Hornblende, *Contrib. Mineral. Petrol.* 126 (1996) 67–80.
- [35] R.L.M. Vissers, Variscan extension in the Pyrenees, *Tectonics* 11 (1992) 1369–1384.
- [36] A. Vitrac-Michard, C.J. Allègre, Study of the formation and history of a piece of continental crust by ^{87}Rb – ^{86}Sr method: the case of the French Oriental Pyrenees, *Contrib. Mineral. Petrol.* 50 (1975) 257–285.