



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 337 (2005) 1244–1249



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Géomatériaux (Pétrologie)

Évolution pression–température des amphibolites de la zone axiale au cours du métamorphisme hercynien des Pyrénées orientales

Claude Triboulet ^{a,*}, Gérard Guitard ^a, Ildiko Katona ^a, Marina Navidad ^b

^a *Pétrologie, modélisation des processus et matériaux, Jeune Equipe 2355 (UFR 928), université Paris-6, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France*

^b *Departamento de petrologia y geoquímica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, Espagne*

Reçu le 9 février 2005 ; accepté après révision le 8 juin 2005

Disponible sur Internet le 24 août 2005

Présenté par Jean Dercourt

Résumé

Nous avons étudié des amphibolites provenant des massifs du Canigou, des Albères et du cap de Creus dans le but d'établir leur évolution pression–température au cours du temps (chemins P – T – t). Les valeurs de P et T ont été calculées à l'aide du thermobaromètre amphibole–plagioclase–quartz à l'équilibre. Si on connaît Si, Al, Mg et Fe à partir d'analyses ponctuelles à la microsonde électronique du coeur à la périphérie d'amphiboles zonées, l'évolution P – T – t complète peut être établie en reliant les analyses obtenues à partir de chaque cristal. Dans le massif du Canigou, les amphibolites ont enregistré des chemins P – T – t anti-horaires autour d'un pic du métamorphisme qui se situerait à environ 650 °C et 6,1 kbar. Dans le massif des Albères, les chemins P – T – t des amphibolites proches des paragneiss sont seulement rétrogrades, de 600 °C–5 kbar à 450 °C–2,5 kbar. Une amphibolite à cummingtonite a enregistré une évolution anti-horaire autour de 650 °C–4,5 kbar. Dans le massif du cap de Creus, l'évolution est rétrograde entre 650 °C–6 kbar et 400 °C–1 kbar. **Pour citer cet article : C. Triboulet et al., C. R. Geoscience 337 (2005).**

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

Abstract

Pressure–temperature evolution of amphibolites from the axial zone during the Hercynian metamorphism of the eastern Pyrenees. Thin levels of amphibolites from the Canigou, Albères and Cap de Creus massifs have been studied in order to investigate their pressure and temperature evolution during time. P and T values have been calculated using the amphibole–plagioclase–quartz thermo-barometer. Si, Al, Mg and Fe of zoned amphiboles have been analysed from core to rim by microprobe. By combining the results obtained from several (or different) crystals, P – T – t paths have been determined

* Auteur correspondant.

using the amphibole-plagioclase-quartz equilibria. In the Canigou Massif, the amphibolites have recorded anti-clockwise $P-T-t$ paths around a peak of metamorphism located at about 650 °C–6.1 kbar, whereas in the Albères Massif, the calculated $P-T-t$ paths of amphibolites near the paragneisses are retrograde only, from 600 °C–5 kbar to 450 °C–2.5 kbar, but one cummingtonite-bearing amphibolite has also recorded an anti-clockwise evolution around 650 °C–4.5 kbar. The retrograde $P-T-t$ paths recorded for amphibolites from the ‘Cap de Creus’ Massif are retrograde only, from 650 °C–6 kbar and 400 °C–1 kbar. **To cite this article:** C. Triboulet et al., C. R. Geoscience 337 (2005).

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

Mots-clés : Pyrénées ; Canigou ; Albères ; Cap de Creus ; Amphibolites ; Anti-clockwise $P-T-t$ paths

Keywords : Pyrenees ; Canigou ; Albères ; Cap de Creus ; Amphibolites ; Chemins $P-T-t$ anti-horaires

1. Introduction

On dispose de nombreux géothermomètres et géobaromètres faisant appel aux équilibres minéralogiques dans les métapélites [1].

Dans cette étude, les données P et T ont été établies à partir des amphiboles calciques d’amphibolites (ortho- ou para) intercalées dans des métasédiments, parfois dans des orthogneiss acides. Les échantillons utilisés proviennent de la zone axiale des Pyrénées orientales : d’ouest en est, massif du Canigou, massif des Albères et massif du cap de Creus.

Les amphiboles ont été analysées à la microsonde électronique Camebax de l’université Paris-6 (Camparis).

Les valeurs de T et P ont été calculées à l’aide du thermobaromètre amphibole–plagioclase–quartz \pm épidote, chlorite, calcite [2]. Ce dernier est basé sur la corrélation qui existe entre Si et Al dans l’amphibole, et sur le rapport $X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe^{2+})$ de celle-ci.

À partir d’analyses ponctuelles de Si, Al et Mg par microsonde électronique, on détermine alors directement, à l’aide d’un programme informatique, les conditions P et T qu’a enregistrées cette portion de minéral à un instant t donné. Les valeurs de P et T sont alors réunies sur un diagramme $P-T$.

La direction globale de l’évolution $P-T$ au cours du temps (chemins $P-T-t$) est définie en réunissant les analyses ponctuelles obtenues sur différents cristaux (zonations chimiques), et le sens de cette évolution est défini à partir d’analyses effectuées du coeur vers la périphérie des cristaux d’amphiboles (voir [3]).

2. Les amphiboles des amphibolites et des gneiss amphiboliques du Canigou

Elles ont été analysées dans les zones de l’andalousite et de la sillimanite, zones définies à partir des métapélites [4,5].

Cent quarante analyses ponctuelles d’amphiboles (essentiellement primaires) ont été réparties en deux groupes : amphiboles magnésiennes et amphiboles ferreuses [6]. Dans cette convention, une amphibolite peut renfermer à la fois les deux types d’amphiboles. C’est le cas de l’échantillon 7601 : les amphiboles magnésiennes étant dominantes, il a été classé avec ces dernières.

2.1. Amphiboles ferreuses (Fig. 1)

Sur un diagramme $P-T$, ces amphiboles suivent un trajet anti-horaire, qui passe par un point que l’on peut considérer comme proche du pic thermique (environ 650 °C), correspondant à la pression maximum calculée : 6,1 kbar. Le chemin prograde évolue d’abord à température quasiment constante, entre 3 et 6,1 kbar (quasi adiabatique). En dessous de 3 kbar, P et T varient de façon conjuguée dans le chemin rétrograde.

Plus précisément, les orthogneiss amphiboliques de Quazemi (Q1) [7] donnent des pressions entre 3 et 4 kbar. Dans les amphibolites du cortex et les « skarnoïdes amphiboliques » développés au contact des orthogneiss Q1 et des métapélites, les pressions se situent entre 3 et 2 kbar. Dans les orthogneiss, les amphiboles sont surtout des ferrohornblendes ; dans les amphibolites et skarnoïdes corticaux, on rencontre aussi des hornblendes hastingsitiques et des hornblendes ferro-pargasitiques.

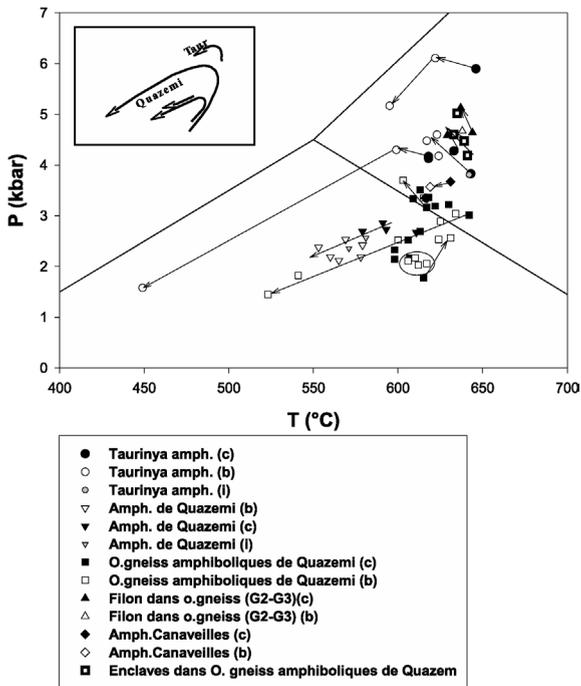


Fig. 1. Amphiboles ferreuses.

Fig. 1. Ferrous amphiboles.

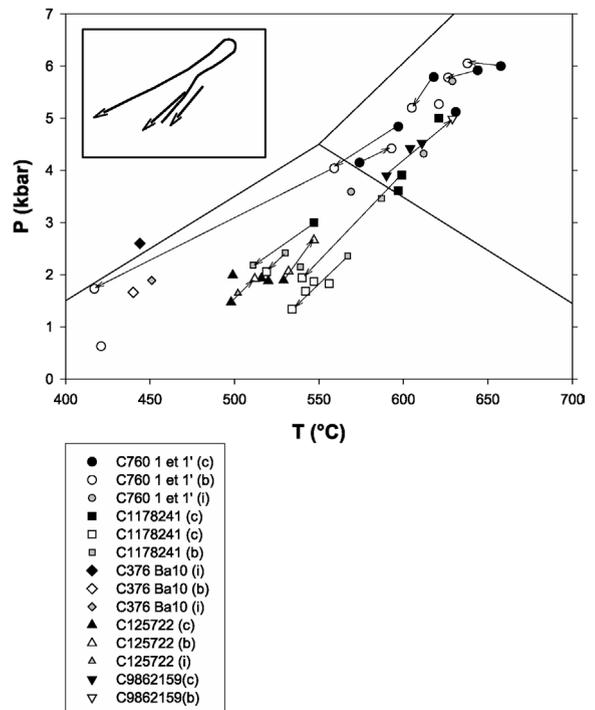


Fig. 2. Amphiboles magnésiennes.

Fig. 2. Magnesian amphiboles.

Deux particularités sont remarquables :

- dans une enclave psammitique à hornblende ferro-pargasitique et grenat, incluse dans les orthogneiss Q1, les pressions enregistrées sont supérieures à celles de l'encaissant (4 à 5 kbar) ;
- dans une lentille d'exsudation de quartz à Fe-hornblende et sphène, située dans les orthogneiss Q1, la pression chute à 2 kbar (points entourés dans une ellipse de la Fig. 1).

Cependant, les pressions les plus fortes (6 kbar) ont été obtenues pour des amphibolites à grenat et cummingtonite du secteur de Taurinya : il s'agit d'une écaille tectonique remontée sur le versant nord du Canigou (écaille de Saint-Étienne), appartenant à la zone sillimanite–feldspath potassique [7]. Elles se situent entre 4 et 6 kbar. Les hornblendes sont surtout ferro-pargasitiques ou ferro-tschermakitiques, fournissant des pressions autour de 6 kbar, associées à de la ferro-hornblende et de la ferro-actinote tardive.

2.2. Amphiboles magnésiennes (Fig. 2)

Le chemin prograde est défini dès les basses pressions, entre 1,5 et 2,5 kbar, dans l'échantillon (5722), à hornblende actinolitique au centre et magnésio-hornblende au bord, puis entre 3 et 5 kbar dans l'amphibolite 2159 à Mg-hornblende et hornblende tschermakitique. Nous détaillons le cas des échantillons 7601 et 241 dans la zone de la sillimanite, pour lesquels le nombre de points analysés est important. L'amphibolite 7601 est à grenat, hornblende, cummingtonite, actinote, anorthite et quartz, où la nature des hornblendes est variée (Fe- ou, le plus souvent, Mg-hornblende, hornblende ferro-tschermakitique et tschermakite). Elle fournit à la fois les deux chemins prograde et rétrograde entre 3 et 6 kbar.

En revanche, l'échantillon 241 est une amphibolite à Mg-hornblende et cummingtonite, à l'exception d'un centre de hornblende tschermakitique, biotite, anorthite, quartz et opaque : il ne donne que le chemin rétrograde entre 5 et 1,5 kbar.

Dans le Canigou, les Figs. 1 et 2 définissent une courbe $P-T-t$ anti-horaire.

En outre, si l'on compare les valeurs de P et T obtenues à partir des amphiboles avec celles données par les géothermobaromètres appliqués aux métapélites, la corrélation est assez satisfaisante. Avec ces derniers, les températures varient entre 450 et 675 °C, et les pressions entre 3,5 et 5,7 kbar, avec une moyenne de 4,3 kbar [8]. Selon [9], la pression dans le Canigou est de 4 kbar.

3. Les amphiboles des Albères et du cap de Creus

3.1. Le massif des Albères

Trois échantillons ont été étudiés :

- une amphibolite de la couverture paléozoïque (série de Canaveilles) du socle paragneissique, située dans la zone de l'andalousite. Les points représentatifs s'alignent suivant un chemin rétrograde entre 5 et 2 kbar (Fig. 3), empiétant largement sur le domaine de la sillimanite. Cette roche est une hornblendite à anorthite renfermant 2,14 % d'olivine normative. La sous-saturation en SiO_2 peut expliquer la surestimation des valeurs de pression. La position de la courbe évolutive coïncide avec celle des amphibolites de Sant-Baldiri, dans le massif du cap de Creus ;

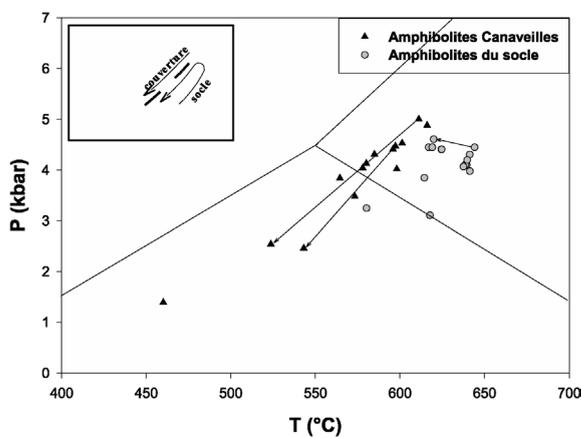


Fig. 3. Amphiboles de la couverture paléozoïque du socle paragneissique et de ce dernier.

Fig. 3. Amphiboles from the Paleozoic cover of the paragneissic basement and from the latter.

- deux échantillons pris dans les paragneiss du socle : l'un, au début de la formation, est une amphibolite à grenat, hornblende ferro-tschermakitique et ferro-hornblende, cummingtonite, andésine, biotite et quartz ; l'autre, à la base de la série, est à ferro-hornblende, oligoclase, biotite et quartz. L'ensemble des points fournit un chemin prograde, puis rétrograde, entre 3 et 4,6 kbar, et permet de définir un chemin $P-T-t$ anti-horaire. La corrélation avec les thermobaromètres pour les métapélites est bonne [8] : les pressions étant de 3,7 kbar dans la couverture et de 4,1 kbar dans le socle, pour $T_{\text{max}} = 700$ °C dans les kinzigites. On peut rapprocher les conditions $P-T-t$ proposées pour les Albères de celles obtenues dans les gneiss et métapélites de Catalogne (massif des Guilleries) : 660 °C maximum dans la zone de la sillimanite, et 3,5 à 5 kbar [10], selon un cheminement $P-T-t$ de type anti-horaire.

Sur la Fig. 3, l'ensemble des points s'inscrit dans une évolution de type BP/HT.

3.2. Les amphiboles des amphibolites du cap de Creus

On dispose de deux groupes d'échantillons : les metabasites de Port de la Selva (El Port) dans la zone de la sillimanite, et ceux de Sant-Baldiri dans les zones de la sillimanite et de l'andalousite [1,11].

Sur la Fig. 4, les premiers fournissent une courbe $P-T-t$ rétrograde bien définie entre 650 °C–6,2 kbar et 475 °C–2 kbar. Les points entre 6,2 et 5,7 kbar correspondent à des hornblendes dont les centres sont ferro-tschermakitiques ou tschermakitiques, avec cummingtonite. L'un de ces points est proche de la limite séparant les domaines de la sillimanite et du disthène. Les seconds définissent une courbe rétrograde, entre 620 °C–5,7 kbar et 500 °C–1 kbar, un peu décalée par rapport à la précédente, et qui coïncide bien avec les chemins $P-T-t$ rétrogrades des Albères. L'ensemble des points ne donne pas accès au chemin prograde.

La comparaison avec les données obtenues par les thermobaromètres pour les métapélites est très bonne. Selon [12], le métamorphisme de basse pression/haute température du cap de Creus dans les zones de l'an-

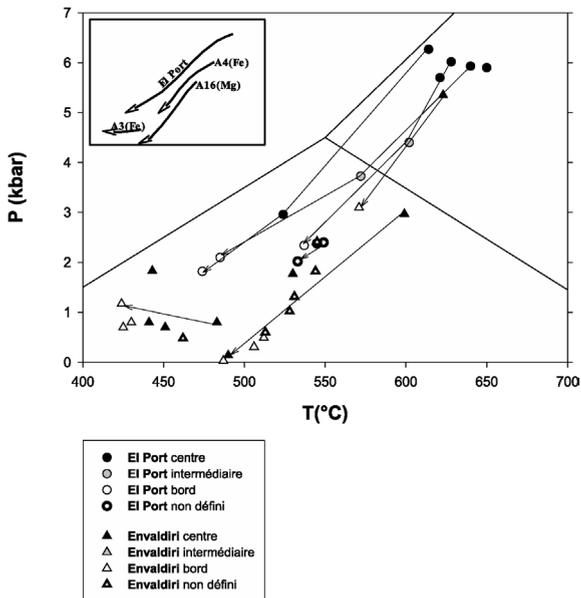


Fig. 4. Amphiboles provenant de métabasites de la zone à sillimanite d'une part, de la zone à sillimanite–andalousite d'autre part.

Fig. 4. Amphiboles from metabasites of the sillimanite zone and of the sillimanite–andalousite zone respectively.

dalousite et de la sillimanite évolue selon une courbe rétrograde entre 700 °C–6,4 kbar et 400 °C–1 kbar.

4. Conclusion

Une évolution du métamorphisme régional en trois épisodes a été récemment proposée pour la zone axiale des Pyrénées orientales [1] : épisode 1 initial de moyenne pression à disthène 1 et staurotide 1, définis dans le Canigou sous forme de reliques blindées ; épisode 2, le plus important, de type HT/BP à andalousite et staurotide 2 dans le Canigou, sans staurotide 2 dans les Albères ; un épisode 3 tardif à disthène 3 et staurotide 3 connus dans les Albères et surtout dans le cap de Creus [12–14]. Le schéma typologique est donc : disthène–andalousite–disthène.

L'ensemble des points reportés sur les Figs. 1 à 4 tombe intégralement dans les domaines de l'andalousite et de la sillimanite, et mettent en relief l'importance de l'épisode 2. Cet épisode principal montre une évolution P – T – t de type anti-horaire, en contradiction apparente avec les données de Gibson [9,15].

Cette évolution se poursuit à l'identique à travers l'épisode 3.

Cependant, le passage de l'épisode 1 à l'épisode 2 est bien de sens horaire [1,8]. Il est possible que l'épisode 1 soit relativement distinct dans le temps des épisodes 2–3.

Selon [16], l'épisode 3 ressort très bien dans le cap de Creus et les Albères, le chemin rétrograde tombant dans le domaine du disthène.

Les pressions de l'ordre de 6 kbar enregistrées dans le Canigou et le cap de Creus correspondent à une épaisseur de croûte de 20 kilomètres, qui sont incompatibles avec le degré de métamorphisme enregistré par les roches basiques correspondantes et avec la nature du métamorphisme de type BP/HT. Les amphiboles renfermant plus de 13 % d'alumine tendent à surévaluer les pressions. Cette surestimation des pressions par les géothermobaromètres en général a été soulignée par Barbosa et Fontelles [17].

Références

- [1] B. Azambre, G. Guitard, Disthène et staurotide reliques dans les métapélites du Canigou (Pyrénées orientales) : relations avec les épisodes hercyniens de basse et de moyenne pression, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA 333 (2001) 601–609.
- [2] T.V. Gerya, L.L. Perchuk, C. Triboulet, C. Audren, A.I. Sezko, Petrology of the Tumanshet zonal metamorphic complex, eastern Sayan, Petrology 5 (6) (1997) 503–533.
- [3] M. Zenk, B. Schulz, Zoned Ca-amphiboles and related P – T evolution in metabasites from the classical Barrovian metamorphic zones in Scotland, Mineral. Mag. 68 (5) (2004) 769–786.
- [4] G. Guitard, Le métamorphisme hercynien mésozonal et les gneiss ocellés du massif du Canigou (Pyrénées orientales), Mém. BRGM, tome 63, 1970, 333 p.
- [5] (a) G. Guitard, Le métamorphisme hercynien des métapélites (et métagrauwackes) du massif des Albères et métamorphisme hercynien des métapélites dans le massif du Canigou–Carança, in : G. Guitard, D. Vielzeuf, F. Martinez (coordonnateurs), Métamorphisme hercynien (10) ; (b) A. Barnolas, J.-C. Chiron, Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées, tome I, Cycle hercynien, Éditions du BRGM–ITGE, 1995, pp. 530–555.
- [6] B.E. Leake, Nomenclature of amphiboles, Mineral. Mag. 42 (1978) 533–563.
- [7] G. Guitard, B. Laumonier, A. Autran, Y. Bandet, G.M. Berger, Notice explicative, carte géol. France (1:50 000°), feuille Prades (1095), BRGM, Orléans, 1998, 198 p. (carte géologique par G. Guitard et al., 1995).
- [8] G. Guitard, A. Mozgawa-Krutow, Géothermobarométrie du socle catazonal des Albères, Pyrénées orientales à l'aide des

- paragenèses kinzigitiques, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 302 (1986) 87–89.
- [9] R.L. Gibson, Hercynian low-pressure–high-temperature regional metamorphism in the Canigou massif, Pyrénées, France. Evidence for crustal extension, *Geology* 19 (1991) 380–383.
- [10] J. Reche-Estrada, F.J. Martinez, Evolution of bulk composition, mineralogy, strain style and fluid flow during an HT–LP metamorphic event: sillimanite zone of the Catalan Coastal Ranges Variscan basement, NE Iberia, *Tectonophysics* 348 (2002) 111–134.
- [11] G. Guitard, Coexistence de la paragonite et de la muscovite dans les métamorphites hercyniens des Pyrénées orientales franco-espagnoles, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 305 (1987) 783–786.
- [12] J. Reche-Estrada, J. Carreras, E. Druguet, Le massif du cap de Creus (métamorphisme), in: A. Barnolas, J.C. Chiron (Eds.), *Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées*, tome I, BRGM, ITGE, 1995, pp. 524–530.
- [13] J. Ramirez, Zonación metamórfica de las rocas metapelíticas y metapsamíticas del litoral norte del Cap de Creus (Port de la Selva-Cala Taballera), *Revista d'invest. geol.* 36 (1983) 7–24.
- [14] M. Navidad, J. Carreras, Pre-hercynian magmatism in the eastern Pyrénées (cap de Creus and Albera Massifs) and its geodynamical setting, *Geol. Mijnbouw* 74 (1995) 65–77.
- [15] R.L. Gibson, M.J. Bickle, Thermobarometric constraints on the conditions of metamorphism in Canigou Massif (Pyrenees): implications for Hercynian gradients, *J. Geol. Soc.* 151 (1994) 987–997.
- [16] D. Vielzeuf, La croûte hercynienne des Pyrénées : une synthèse, in : G. Guitard, D. Vielzeuf, F. Martinez (coordonnateurs), *Métamorphisme hercynien* (10) ; A. Barnolas, J.-C. Chiron, *Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées*, tome I, Cycle hercynien, Éditions du BRGM–ITGE, 1995, pp. 568–577.
- [17] J. Barbosa, M. Fonteilles, Examen critique des résultats fournis par certains baromètres couramment utilisés en terrains granulitiques. Exemples des granulites de Bahia (Brésil) et du massif de l'Agly (France), *Bull. Minéral.* 1090 (1986) 359–376.