

Variabilité géochimique des métapélites dans l'auréole métamorphique d'Oulmès (Maroc central)

Amar DAHMANI¹ & Edward W. SAWYER²

1. Université Ibn Tofaïl, Faculté des Sciences, Département de géologie, Laboratoire d'étude des minéraux et géomatériaux, Kénitra, Maroc.
2. Université du Québec à Chicoutimi, Département des Sciences appliquées, Chicoutimi, Québec G7H 2B1, Canada.

Résumé. L'auréole métamorphique générée par le granite syntectonique d'Oulmès, englobe des roches métapélitiques cambro-ordoviciennes généralement homogènes, qui enregistrent des variations géochimiques durant le métamorphisme de contact au niveau de la distribution des oxydes majeurs, des éléments traces, et des terres rares. L'aspect en "zig-zag" des patrons des oxydes majeurs et des traces, ainsi que l'absence de fractionnement des terres rares, montrent l'influence de la composition initiale de la roche sur le comportement de ces éléments chimiques qu'elle englobe. Aussi, le rapport $FeO_T/(FeO_T+MgO)$ met en relation positive les minéraux ferromagnésiens (notamment la staurolite et la cordiérite) apparus sporadiquement dans les zones IIIb et IIIc, à proximité du contact granite encaissant, et les métapélites qui les renferment. Les alcalins Na_2O et K_2O , en corrélation positive, particulièrement avec Ba, Rb et Cs, se montrent relativement mobiles. Leur distribution semble être contrôlée par l'altération hydrothermale et les phénomènes métasomatiques, ainsi que par le grade métamorphique. Par l'effet prédominant de la composition de la roche sur le comportement des éléments chimiques, l'auréole de contact d'Oulmès montre un métamorphisme isochimique avec un système intrinsèque généralement fermé.

Mots clés. Maroc central, granite d'Oulmès, auréole métamorphique, métapélites, métamorphisme isochimique.

Geochemical variability of metapelites within the Oulmès metamorphic aureole (central Morocco)

Abstract. The metamorphic aureole associated with the syntectonic Oulmes granite is characterised by generally homogeneous Cambrian to Ordovician metapelite rocks. During the contact metamorphism, the latter show geochemical variations indicated by a specific distribution of major oxydes, trace elements and rare earth elements. The "zig-zag" shape of the major oxydes and trace element profiles, and the lack of REE fractioning show the influence of the initial rock composition on the behavior of these chemical elements. Furthermore, the $FeO_T/(FeO_T+MgO)$ ratio indicate a positive correlation between the metapelite rocks and the ferromagnesian minerals (especially staurolite and cordierite), which are sporadically encountered near the granite contact within the IIIb and IIIc zones. The Na_2O and K_2O alkalis, which are positively correlated with Ba, Rb and Cs, are relatively mobile. Their distribution seems to be controlled by hydrothermal alteration, metasomatic processes and the metamorphic grade. The behavior of chemical elements controlled practically by the initial composition of the rocks within the Oulmes metamorphic aureole, indicate an isochemical metamorphism and a closed intrinsic system.

Key words. Central Morocco, Oulmès granite, metamorphic aureole, metapelites, isochemical metamorphism.

INTRODUCTION

Si de nombreuses recherches ont été effectuées sur les phénomènes métasomatiques et sur l'abondance et la distribution des éléments chimiques dans les roches sédimentaires et ignées, la littérature offre peu d'informations concernant l'étude de l'évolution chimique des roches (particulièrement les métapélites) durant le métamorphisme de contact. A ce propos, une étude géochimique a été menée sur les métapélites de l'auréole métamorphique d'Oulmès (Fig. 1). Celle-ci, située dans le Maroc central septentrional, est générée dans une série grésopélitique cambro-ordovicienne (Termier *et al.* 1950), déjà affectée par un métamorphisme régional à faciès schistes verts (Michard 1976, Cailleux 1981). D'une largeur de 2 à 2,5 km, l'auréole d'Oulmès est créée le long de l'axe de l'anticlinorium Khouribga – Oulmès, dans une zone de cisaillement ductile, par le pluton granitique d'Oulmès, syntectonique, de diamètre d'environ 5 km et d'âge 280-300 Ma (Mrini 1985). Afin de connaître la variation géochimique des roches métapélitiques

rencontrées dans les trois zones métamorphiques constituant l'auréole de contact (Fig. 1), il est impératif d'étudier d'abord le comportement des éléments chimiques, de déterminer ensuite les principaux paramètres ayant un contrôle sur la distribution de ces éléments, et de montrer enfin la nature du système chimique intrinsèque de l'auréole métamorphique.

Pour cerner au mieux chacun des points précités, un total de 38 échantillons prélevés le long de cinq coupes radiales (Fig. 1 et Tabl. I), ont été analysés à la fluorescence des rayons X (XRF) pour les oxydes majeurs, et à l'activation neutronique instrumentale (AANI) pour les éléments traces et les terres rares (Tabl. II), selon la méthode décrite par Bédard & Barnes (1990). Afin de mieux percevoir les relations existantes entre la composition chimique des roches et les séquences des assemblages minéralogiques, les échantillons de roches qui ont été analysés à l'XRF et à l'AANI sont les mêmes que ceux destinés à l'observation des minéraux au microscope optique polarisant, et à l'analyse de leur composition chimique à la microsonde électronique.

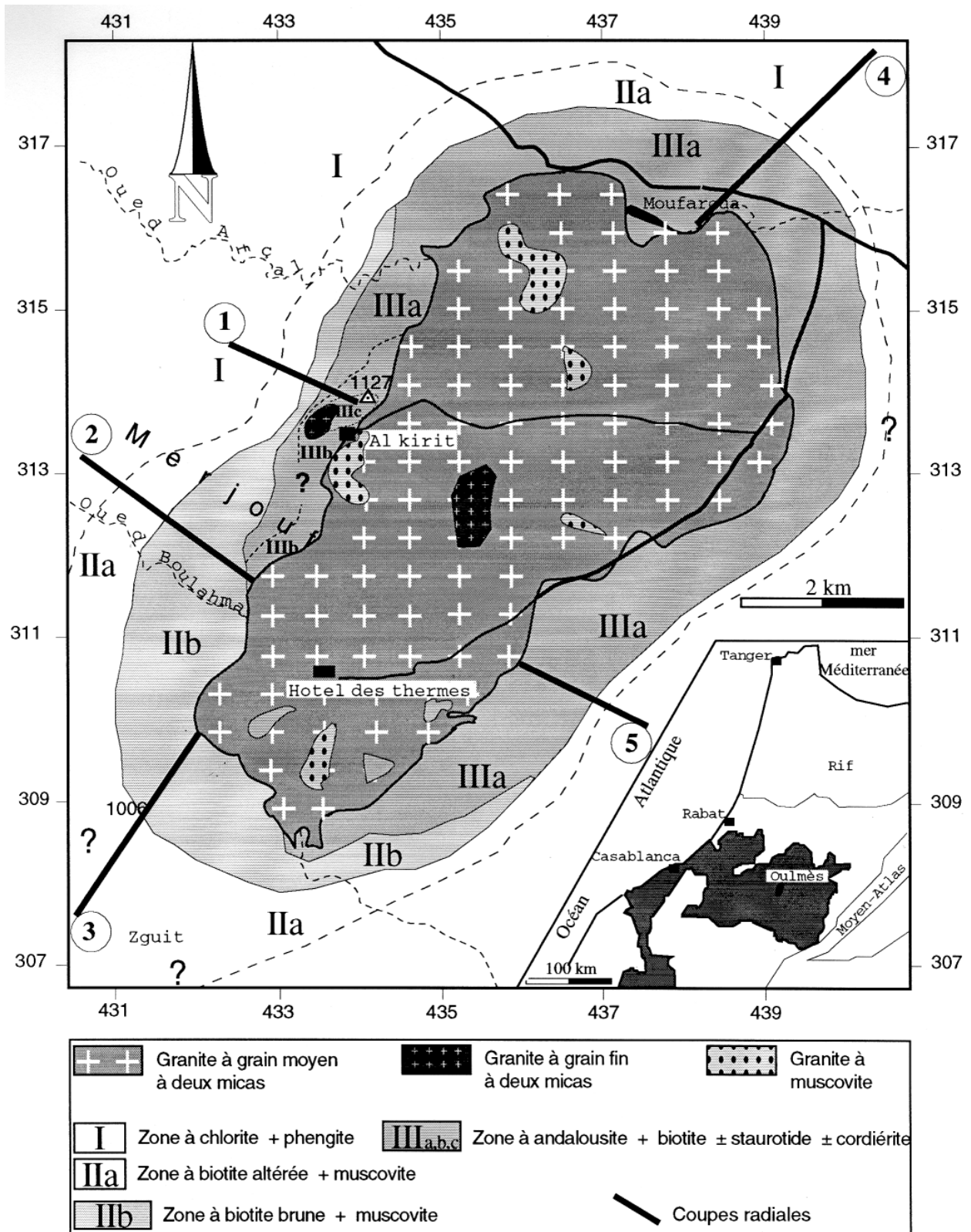


Figure 1. Carte géologique du massif d'Oulmès illustrant les faciès granitiques (Termier *et al.* 1950, Aït Omar 1986) et les zones métamorphiques de l'auréole de contact (Dahmani 1985, 1995).

Tableau I. Liste des échantillons des roches analysées à la fluorescence des rayons X (XRF) et à l'activation neutronique (AANI)

	Echantillon N°	Distance (m) à partir du granite
Coupe 1	87 AO	1
	86 AO	30
	49 AO	350
	48 AO	550
	45 AO	1750
	42 AO	2500
Coupe 2	40 AO	1
	39 AO	100
	37 AO	250
	36 AO	750
	35 AO	1000
	34 AO	1300
	33 AO	1700
	31 AO	2500
30 AO	3250	
Coupe 3	81 AO	1
	73 AO	2
	72 AO	100
Coupe 3	69 AO	400
	71 AO	550
	67 AO	900
	66 AO	1300
Coupe 4	13 AO	5
	16 AO	70
	9 AO	700
	11 AO	900
	12 AO	1250
	1 AO	1750
Coupe 5	62 AO	15
	61 AO	100
	59 AO	510
	58 AO	750
	57 AO	1250
	56 AO	1750
	55 AO	1900
	54 AO	2350
53 AO	2750	
	52 AO	3100

RESULTATS ET DISCUSSION

Considérant la nature généralement homogène des métapélites d'Oulmès (Dahmani 1995), il est plus aisé de suivre leur évolution chimique durant le métamorphisme de contact à faciès cornéennes à hornblende (Dahmani 1985, Aït Omar 1986, Boutaleb 1988). Cette évolution se traduit

normalement par la variation chimique des métapélites qui est étroitement liée au comportement des oxydes majeurs, des éléments traces et des terres rares.

Les oxydes majeurs

L'immobilité de Al_2O_3 est souvent admise dans l'étude du métamorphisme allochimique durant lequel les roches enregistrent des pertes et des gains de leur constituants chimiques (Fisher 1973, 1977, Brady 1975, 1977, MacLean & Kranodiotis 1987, MacCaig & Knipe 1990). C'est pour cette raison que Al_2O_3 est souvent utilisé par certains auteurs (Ferry 1982, 1984, Labotka *et al.* 1988) comme élément de référence auquel sont normalisés les autres oxydes majeurs. Cependant, il est imprudent de parler d'immobilité au sens strict car, tant que les réactions métamorphiques continuent de se produire, il existe toujours quelques éléments chimiques qui se trouvent disponibles pour la mobilité. L'immobilité relative des oxydes majeurs dans les métapélites de l'auréole d'Oulmès est exprimée par les valeurs du coefficient de variation présentées dans le tableau III.

Avec une valeur du coefficient de variation relativement faible (11%), TiO_2 est considéré comme élément relativement immobile qui peut être pris comme élément de référence, auquel seront normalisés les autres oxydes majeurs dans les métapélites de l'auréole de contact d'Oulmès.

La distribution des oxydes majeurs en fonction de la distance à partir du contact granite-encaissant (Fig. 2) montre des patrons en zig-zag. Ce mode de distribution signifie selon Haack *et al.* (1984) le contrôle étroit de ces éléments par la composition chimique initiale des roches. Par référence à la distribution de TiO_2 dans l'ensemble de l'auréole, Fe_2O_3 (fer total FeO_T) et MgO n'enregistrent aucune variation notable dans leur distribution en fonction de la distance à partir du contact granite-encaissant. Il est probable que le grade métamorphique n'a dans ce cas aucune influence sur le comportement de ces deux éléments. Outre l'aspect en zig-zag des patrons de Fe_2O_3 et MgO , l'augmentation de leur teneur dans les zones IIIb et IIIc à proximité du contact granite – encaissant (Fig. 2), qui coïncide avec l'apparition locale de la staurotite, de la cordiérite, ainsi que le rapport $FeO_T/(FeO_T+MgO)$ qui met bien en relation positive les roches et les minéraux précités et, dans une moindre mesure la biotite (Dahmani 1995), montrent bien le rôle primordial joué par la composition initiale des roches dans la distribution de ces deux éléments. La valeur quasi constante (0.84) du rapport $FeO_T/(FeO_T+MgO)$ témoigne de la faible diversification des minéraux ferromagnésiens rencontrés dans l'auréole métamorphique d'Oulmès, comme cela a été observé par Dahmani (2001).

Les patrons des alcalins Na_2O et surtout K_2O qui montrent un comportement en zig-zag lié à la composition initiale de la roche, enregistrent aussi une légère augmentation de leur teneur en fonction de la distance à partir du granite. Ce mode de distribution signifie probablement le contrôle du comportement de ces deux éléments par le grade métamorphique et la circulation du fluide hydrothermal.

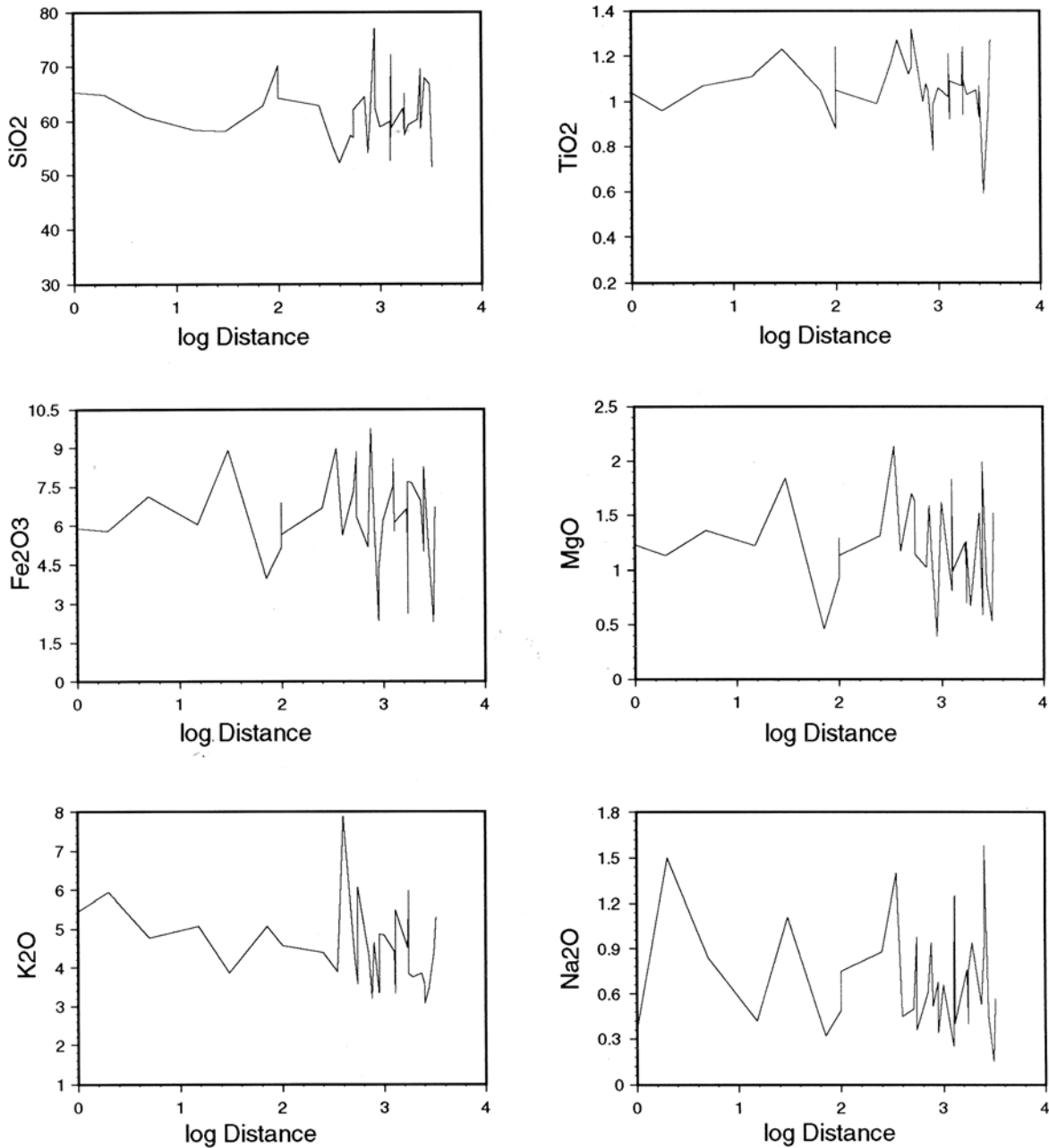


Figure 2. Variation de la concentration des oxydes majeurs (en % poids) dans les métapélites de l'auréole métamorphique d'Oulmès en fonction du logarithme de la distance à partir du contact granite–encaissant.

Tenant compte des travaux de Shaw (1956), demeurant comme référence jusqu'à nos jours, consistant en l'analyse chimique des schistes siluriens de Littleton (USA), il y a lieu de souligner que les métapélites cambro-ordoviennes d'Oulmès sont relativement riches en Al_2O_3 et K_2O , et pauvres en CaO et Na_2O . Aussi, l'indice d'altération $[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)]$ tel qu'il a été proposé par Nesbitt & Young (1982) et repris par Sawyer (1986), est plus élevé dans les métapélites

cambro-ordoviennes d'Oulmès (75) que dans les schistes siluriens de Littleton (63). Toutes ces caractéristiques géochimiques permettent de suggérer que les métapélites d'Oulmès proviennent d'un environnement sédimentaire affecté par une altération chimique très intense. Mis à part le comportement de H_2O exprimé par une perte au feu maximale dans la zone IIa à biotite altérée (Fig. 1) et, dans une moindre mesure la légère variation des alcalins (Na_2O

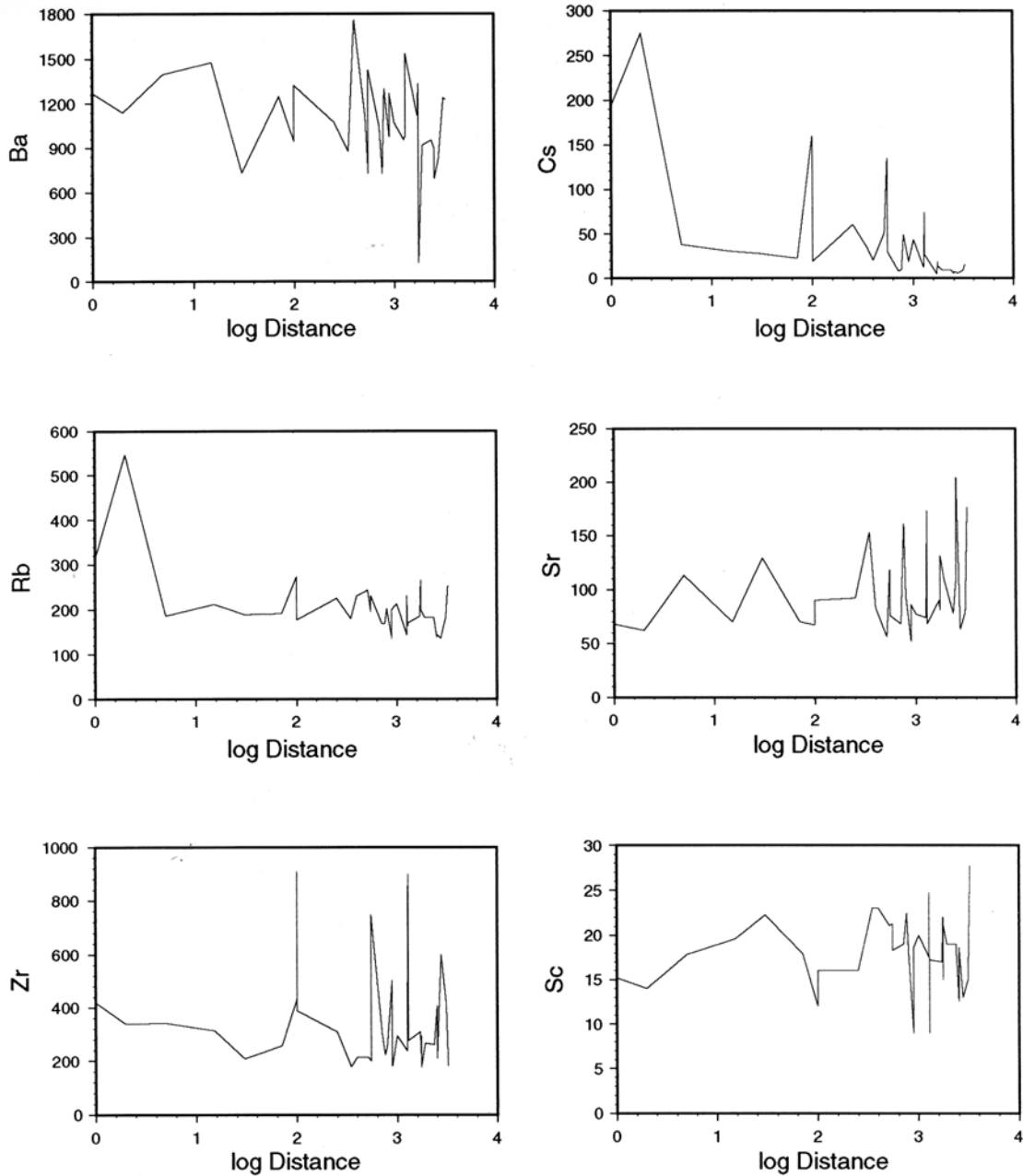


Figure 3. Variation de la concentration des éléments traces (en ppm) dans les métapélites de l'aurèle métamorphique d'Oulmès en fonction du logarithme de la distance à partir du contact granite–encaissant chimique très intense.

et K_2O), il s'avère que les réactions (pour les oxydes majeurs) produites dans chaque zone métamorphique de l'aurèle d'Oulmès sont généralement isochimiques, comme l'ont observé ailleurs Ferry (1982), Labotka *et al.* (1988) et Yardley (1989).

Les éléments traces

Les éléments choisis sont rangés en trois groupes; le groupe des alcalins est représenté par Ba, Rb, et Cs, le groupe des alcalino-terreux par Sr, et le groupe des éléments de transition

par Sc et Zr. L'examen des diagrammes de variation de la concentration des éléments traces en fonction de la distance à partir du contact granite – encaissant (Fig. 3), montre que l'abondance de ces éléments traces est liée à celle des oxydes majeurs auxquels ils sont géochimiquement similaires. La présence rare du feldspath potassique dans les métapélites de l'aurèle d'Oulmès, laisse suggérer la localisation du

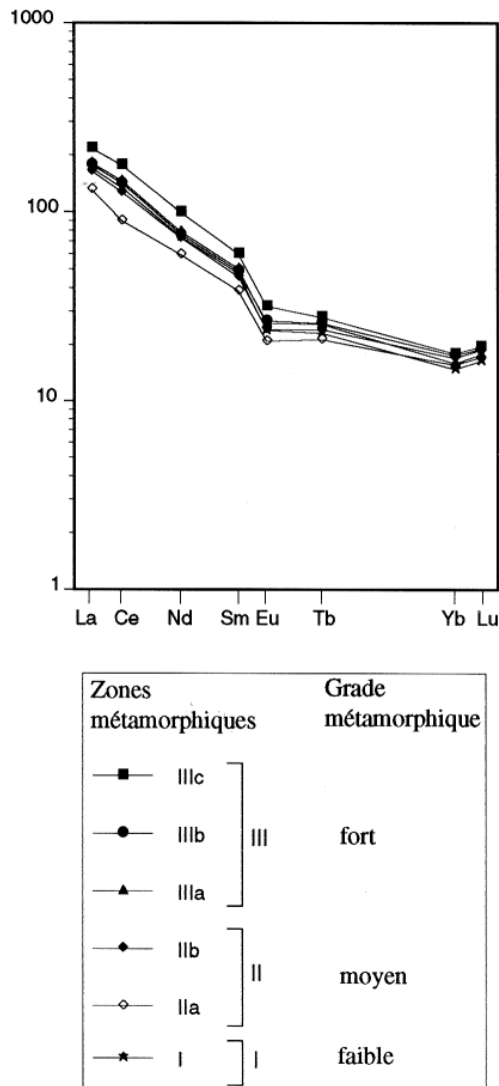


Figure 4. Patrons de la concentration moyenne des terres rares normalisées aux chondrites dans les différentes zones métamorphiques de l'auréole de contact du granite d'Oulmès.

Ba (en corrélation remarquable avec K_2O) dans les micas. Étant donné que la biotite a une excellente structure pour accepter la diffusion des cations larges, il est supposé que le Ba soit concentré dans ce mica, et peut donc s'adapter dans les mêmes positions que K_2O (Haack *et al.* 1984). Autrement dit, tout le Ba libéré par la réaction métamorphique est plus facilement accommodé dans la biotite nouvellement formée que dans les autres minéraux.

Le Sr qui est en corrélation positive avec Na_2O montre par endroits, des concentrations élevées reflétant ainsi la présence des plagioclases sodiques d'origine détritique.

Le Sc qui est corrélé positivement avec Fe_2O_3 et MgO présente des patrons en zig-zag indiquant sa dépendance étroite de la composition initiale de la roche.

Le Zr qui n'est pas souvent associé aux minéraux argileux est considéré dans le cas des métapélites d'Oulmès comme partie intégrante du zircon. La variabilité de sa concentration dépend étroitement de la composition chimique initiale de la roche. Les valeurs extrêmement élevées de sa concentration reflètent la richesse en zircon (détritique) des roches présentes particulièrement dans la partie sud de l'auréole métamorphique. La corrélation positive du Zr avec SiO_2 et particulièrement avec Hf (Dahmani 1995) indique que le quartz (SiO_2), comme le zircon (Zr et Hf), constitue la phase primaire (détritique) dans les roches métapélitiques d'Oulmès.

Les terres rares

Les interprétations sur la mobilité ou l'immobilité des terres rares qui ont été rigoureusement discutées (Bartley 1986, Grauch 1989) restent toujours conflictuelles. Certains auteurs comme Rollinson & Windley (1980) ont montré que les terres rares présentes dans les roches métamorphiques sont mobiles, alors que d'autres comme Green *et al.* (1972) ont démontré qu'il n'y a pas de mobilité apparente des terres rares dans les gneiss depuis le faciès amphibolites jusqu'au faciès granulites. La présente étude permet alors de montrer si les terres rares dans les métapélites cambro-ordoviciennes d'Oulmès peuvent se ranger dans le camp des éléments mobiles ou dans celui des immobiles.

Les terres rares sont normalisées aux chondrites selon les données de Taylor & McLennan (1985), et les diagrammes de leur distribution relative (Fig. 4) ont été établis, selon la convention commune, en fonction de leur numéro atomique. Les métapélites d'Oulmès se montrent plus riches en terres rares légères (La, Ce, Nd et Sm) qu'en terres rares lourdes (Yb et Lu), avec une légère anomalie négative en Eu. La forme analogue des patrons des terres rares aussi bien légères que lourdes, témoignent de l'absence du fractionnement de ces terres rares durant le métamorphisme de contact dans l'auréole d'Oulmès.

Les terres rares légères qui sont en bonne cohérence géochimique, et qui présentent une corrélation positive avec TiO_2 et aussi avec Cr, Sc et Y (Dahmani 1995), laissent suggérer leur abondance dans les phases mafiques, principalement la biotite. Étant donné sa prépondérance dans les métapélites d'Oulmès, la biotite semble participer en grande partie au budget des terres rares qui paraissent généralement incorporées dans le matériel argileux. Dans ses travaux, Sawyer (1986) avait d'ailleurs montré que la biotite pourrait contenir jusqu'à 60% des terres rares présentes dans les métapélites. Étant donné son abondance dans les métapélites d'Oulmès et sa richesse en TiO_2 (en corrélation positive avec les terres rares légères), l'ilménite a probablement contribué au budget des terres rares. La tourmaline qui se développe aussi bien dans les minéraux détritiques des roches sédimentaires (Pettijohn *et al.* 1973), qu'authigéniquement durant les derniers stades de la diagénèse (Awasthi 1961), occupe une large étendue dans l'auréole métamorphique d'Oulmès où elle présente une grande ubiquité dans les métapélites. D'après ces

caractéristiques et selon les travaux établis ailleurs par King *et al.* (1988), il semble que la tourmaline a également participé à l'abondance des terres rares dans les métapélites d'Oulmès.

Les terres rares lourdes qui sont en corrélation positive avec les éléments de faible mobilité TiO₂, Y, Hf et Th ne montrent pas de variation notable avec le grade métamorphique. Les patrons des terres rares légères montrent globalement un comportement similaire, à l'exception de celles présentes dans les métapélites des zones IIIc (à proximité du contact granite – encaissant), et IIb à biotite altérée (limite externe de l'auréole). La zone IIIc est caractérisée par la pseudomorphose de la chiasolite par de grosses lames de muscovite, alors que la zone IIb se distingue par l'altération de la biotite. Il semble, d'après ces caractéristiques géochimiques, que la distribution des terres rares légères est influencée dans ces deux zones par les phénomènes métasomatiques et la circulation du fluide hydrothermal.

CONCLUSION

Le comportement des oxydes majeurs, des éléments traces et des terres rares a révélé une légère variation géochimique enregistrée dans les métapélites de l'auréole de contact d'Oulmès. Les oxydes majeurs et les éléments traces montrent *grosso modo* un mode de distribution quasi constant en fonction de la distance à partir du contact granite - encaissant.

Les terres rares n'enregistrent dans l'ensemble de l'auréole, aucun fractionnement durant le métamorphisme de contact. La variabilité géochimique des métapélites enregistrée durant le métamorphisme de contact, semble être contrôlée par les principaux facteurs cités ici par ordre d'importance :

- 1) la composition initiale des roches ;
- 2) l'altération hydrothermale et les phénomènes métasomatiques qui ont joué un rôle important dans l'évolution chimique des métapélites, notamment dans la zone IIa à biotite altérée à la périphérie de l'auréole, et aussi dans la zone IIIc à proximité du contact granite – encaissant ;
- 3) l'effet du grade métamorphique qui reste relativement minime, ne semble pas jouer de rôle important dans la distribution des éléments chimiques.

Mis à part le comportement de H₂O, et dans une moindre mesure, la légère mobilité de certains alcalins (notamment K₂O, Rb et Cs), le métamorphisme de contact lié au granite d'Oulmès est caractérisé par des réactions isochimiques, et un système chimique intrinsèque de l'auréole généralement fermé.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement Dr S.-J. Barnes, Dr. Gérard Woussen et les deux lecteurs anonymes pour leurs remarques et commentaires. Les frais des analyses chimiques à l'XRF et à l'activation neutronique ont été couverts par Dr E.W. Sawyer.

Références

- Aït Omar S. 1986. *Modalité de mise en place d'un pluton granitique et ses relations avec la déformation régionale : l'exemple du granite hercynien d'Oulmès (Maroc central)*. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Rennes, France, 224 p.
- Awasthi J. 1961. Authigenic tourmaline and zircon in the Vindhyan formations of Sone Valley, Mizapur District, Uttar Pradesh, India. *J. Sedim. Petr.*, 31, 482-484.
- Bartley J.M. 1986. Evaluation of REE mobility in low grade metabasalts using mass-balance calculations. *Norsk Geol. Tidssk.*, 66, 145-152.
- Bédard L.P. & Barnes S.-J. 1990. Instrumental neutron activation analysis by collecting only one spectrum: results for international geochemical reference samples. *Geostandards Newsletter*, 14, 3, 479-489.
- Boutaleb M. 1988. *Reconstitution de l'évolution tectono-métamorphique, magmatique et hydrothermale du district stannio-wolframifère de Walmès (Maroc central). Implications métallogéniques*. Thèse ès-sciences, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 269 p.
- Brady J.B. 1975. Reference frames and diffusion coefficients. *Am. J. Sci.*, 275, 957-983.
- Brady J.B. 1977. Metasomatic zones in metamorphic rocks. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 41, 113-125.
- Cailleux Y. 1981. Une carte du métamorphisme hercynien dans l'Ouest du Maroc central; structures thermiques syntectoniques du socle et phénomènes de retard à la cristallisation des illites. *Sci. Geol. Bull.*, Strasbourg, 34, 2, 89-95.
- Dahmani A. 1985. *Le métamorphisme dans l'auréole du granite d'Oulmès (Maroc central). Etude pétrologique et relations avec les déformations hercyniennes*. Thèse 3^{ème} cycle, Université Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 87 p.
- Dahmani A. 1995. *Développement des auréoles de contact d'Oulmès et de Ment (Maroc central): Etendue, zones métamorphiques et histoire de réchauffement et de refroidissement*. Ph.D, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, Canada, 324 p.
- Dahmani A. 2001. Variation chimique des assemblages minéralogiques dans les zones métamorphiques de l'auréole de contact d'Oulmès. *XVIème Colloque des Bassins sédimentaires marocains*, Université Moulay Ismaïl, Fac. Sci. Meknès, 28 - 30 sept. 2001.
- Ferry J.M. 1982. Characterization of metamorphism through mineral equilibria. *Reviews in Mineralogy, Mineral. Soc. Am.*, 10, 397 p.
- Ferry J.M. 1984. A biotite isograd in the South-central Maine, USA: mineral reactions, fluid transfer, and heat transfer. *J. Petr.*, 25, 4, 871-893.
- Fisher G.W. 1973. Nonequilibrium as a model for diffusion - controlled metamorphism processes. *Am. J. Sci.*, 273, 897-924.
- Fisher G.W. 1977. Nonequilibrium thermodynamics in metamorphism. In *"Thermodynamics in Geology"* (Fraser, D.G. Editor). Reidel, Dordrecht, 381-403.
- Grauch R.I. 1989. Rare earth elements in metamorphic rocks. In *"Geochemistry and mineralogy of rare earth elements"* (Lipin, B.R. et McKay, G.A. Editor). *Reviews in Mineralogy, Mineral. Soc. Am.*, 21, 147-168.
- Green T.H., Brunfelt A.O. & Heier K.S. 1972. Rare earth element distribution and K/Rb ratios in granulites, mangerites and anorthosites, Lofton, Vesteraalen, Norway. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 36, 241-257.

- Haack U., Heinrichs H., Boneš M. et Shneider A. 1984. Loss of metals from pelites during regional metamorphism. *Contrib. Min. Petrol.*, 85, 116-132.
- King R.W., Kerrick R.W. & Daddar R. 1988. REE distributions in tourmaline: an INAA technique involving pretreatment by volatilization. *Am. Mineral.*, 73, 424-431.
- Labotka T.C., Nabelek P.I. et Papike J.J. 1988. Fluid infiltration through the Big Horse Limestone Member in the Notch Peak contact - metamorphic aureole, Utah. *Am. Mineral.*, 73, 1302-1324.
- MacCaig A.M. & Knipe R.J. 1990. Mass-transport mechanisms in deforming rocks: recognition using microstructural and microchemical criteria. *Geology*, 18, 824-827.
- Maclean W.H. et Kranidiotis P. 1987. Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Québec. *Econ. Geol.*, 82, 951-962.
- Michard A. 1976. Eléments de géologie marocaine. *Notes Mém. Serv. géol. Maroc*, Rabat, 252, 408 p.
- Mrini Z. 1985. *Age et origine des granitoïdes hercyniens du Maroc: rapport de la géochronologie et de la géochimie isotopique (Sr, Nd, Pb)*. Thèse 3ème cycle, Université Clermont-Ferrand II, France, 156 p.
- Nesbitt H.M. & Young G.M. 1982. Early Proterozoic climate and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715-717.
- Pettijohn F.J., Potter P.E. & Siever R. 1973. *Sand and sandstones*. Springer-Verlag, New York.
- Rollinson H.R. et Windley B.F. 1980. Selective element depletion during metamorphism of Archean granulites, Scourie, NW Scotland. *Contrib. Min. Petrol.*, 72, 257-263.
- Sawyer E.W. 1986. The influence of source rock type, chemical weathering and metasedimentary belt, Superior province, Canada. *Chem. Geol.*, 55, 77-95.
- Shaw D.M. 1956. Geochemistry of pelitic rocks: III. Major element and general chemistry. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76, 919-934.
- Taylor S.R. et McLennan S.M. 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford, Blackwell Sci. Pub., 312 p.
- Termier H., Owodenko B. & Agard J. 1950. Les gîtes d'étain et de tungstène de la région d'Oulmès (Maroc central). Etude géologique, pétrographique et métallogénique. *Notes Mém. Serv. géol., Maroc*, Rabat, 82, 328 p.
- Yardley B.W.D. 1989. *An introduction to metamorphic petrology*. Longm. Earth Sci. Series, 248 p.

Manuscrit reçu le 10 juillet 2001

Tableaux des analyses

Tableau II. Composition chimique totale des roches prélevées le long des cinq coupes (localisation à la figure 1).

Zones	Coupe 1					
	IIIc	IIIc	IIIb	IIIb	I	I
Echantillons	87	86	49	48	45	42
SiO ₂ (% pds)	57,92	58,07	54,93	56,87	57,28	69,54
TiO ₂	1,28	1,23	1,17	1,15	1,24	0,93
Al ₂ O ₃	24,1	22,64	23,05	22,46	23,64	15,62
Fe ₂ O ₃ *	7,53	8,91	8,98	8,86	5,38	4,99
MnO	0,06	0,07	0,06	0,06	0,03	0,03
MgO	1,44	1,84	2,13	1,63	1,04	0,59
CaO	0,59	0,58	0,31	0,40	0,05	0,15
Na ₂ O	0,92	1,11	1,4	0,98	0,5	0,94
K ₂ O	3,54	3,86	3,89	3,56	5,45	3,55
P ₂ O ₅	0,22	0,18	0,10	0,12	0,08	0,13
p.f.	2,83	2,30	4,70	4,54	5,50	3,40
Total	100,4	100,8	100,7	100,6	100,2	99,87
V (ppm)	156	154	138	158	144	95
Cr	161	156	132	133	135	76,70
Sc	23,87	22,25	23	21,26	22,02	12,52
Ni	51	56	34	39	31	39
Co	18,40	21,70	16	16	10,90	7,30
Y	40	37	35	33	34	27
Zr	190	209	178	201	221	408
Hf	5,80	6	5,10	5,70	6,60	12,20
Nb	20	16	19	14	20	16
Ta	1,70	2	1,80	1,80	2,20	1,40
Ba	841	732	876	727	1331	892
Cs	83	27,90	34,70	135	17,70	5,20
Rb	188	189	180	195	262	138
Sr	114	129	153	118	81	113
Th	25	22,80	23	23,30	25,90	21,50
U	4,20	3,50	3,87	3,90	3,90	2,40
Pb	25	27	30	25	18	18
W	1,60	3,90	1	2	6,60	3,30
La (ppm)	80,80	77,30	63,10	67,10	69,90	51,90
Ce	171,30	164,60	131,60	144,30	134,20	110,90
Nd	72,60	68,20	52,60	58,10	61,30	41,40
Sm	14,47	13,23	11,29	12,42	12,98	9,33
Eu	2,80	2,73	2,36	2,67	2,32	1,92
Tb	1,76	1,46	1,38	1,65	1,8	1,26
Yb	4,67	4,19	3,84	3,94	4,58	3,58
Lu	0,76	0,71	0,61	0,64	0,7	0,62
Distance**	1	30	350	550	1750	2500

Fe₂O₃*: fer total

Distance**: distance (m) à partir du contact granite - encaissant

l.d.: limite de détection.

Tableau II (suite)

Coupe 2									
Zones	IIIb	IIIb	IIIb	IIb	IIb	IIb	IIa	I	I
Echantillons	40	39	37	36	35	34	33	31	30
SiO ₂ (% pds)	60,13	70,13	62,84	59,79	58,84	72,2	62,38	58,48	51,31
TiO ₂	1,09	0,88	0,99	1,05	1,06	0,92	1,07	1,07	1,27
Al ₂ O ₃	21,61	15,72	18,55	20,19	21,62	12,27	19,26	20,26	26,93
Fe ₂ O ₃ *	6,91	5,16	6,67	7,28	6,20	5,76	6,63	8,26	6,70
MnO	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05	0,06	0,05
MgO	1,22	0,93	1,31	1,18	1,62	1	1,25	1,99	1,52
CaO	0,12	0,28	0,14	0,04	0,09	0,42	0,13	0,76	0,3
Na ₂ O	0,63	0,49	0,88	0,52	0,66	1,25	0,76	1,58	0,57
K ₂ O	5,42	4,58	4,39	4,65	4,84	3,33	4,52	3,07	5,3
P ₂ O ₅	0,11	0,21	0,10	0,12	0,07	0,14	0,10	0,14	0,13
p.f.	4,08	2,05	3,18	4,39	4,09	1,40	3,82	4,07	5,42
Total	101,40	100,50	99,09	99,24	99,14	98,73	99,97	99,74	99,50
V (ppm)	106	89	75	102	102	59	77	105	141
Cr	144	79	97	114	117	58	101	110	160
Sc	24	12	16	18	20	9	17	18,61	27,70
Ni	18	34	21	21	29	21	25	27	23
Co	14	12	15	13	15,60	11	10	11,60	9,50
Y	34	18	32	30	35	45	27	23	42
Zr	302	433	310	256	295	898	310	210	183
Hf	11,30	12,60	9,10	7,80	8,60	25,80	9,40	6,40	5,70
Nb	25	15	22	23	22	22	22	22	22
Ta	2	1,90	1,80	1,60	1,90	1,60	1,80	1,50	2,40
Ba	1542	944	1074	1300	1071	975	1118	694	1227
Cs	69,40	160	60,30	49,50	43,50	74,10	5	7,60	15,70
Rb	295	273	225	201	213	163	185	144	252
Sr	76	67	92	93	77	173	90	204	176
Th	27,70	19	19,30	20,60	22,30	33,70	22,40	19,10	25,70
U	5,10	3,90	4,10	3,70	3,90	6,50	3,70	3,10	3,70
Pb	23	l.d.	23	60	106	24	17	27	29
W	8,70	4,20	l.d.	7,60	5,90	3,20	3,30	2,60	7
La (ppm)	88,60	47,90	56,60	60,90	49,80	59,60	40,90	66,70	108,30
Ce	177,10	99,60	119,70	129	109,90	121,80	95,40	143	216,80
Nd	70,20	39,70	48,40	52,60	44,80	55,30	37,30	58,20	92,80
Sm	13,57	8,45	10,05	10	9,03	12,32	8,18	11,62	19,33
Eu	2,97	1,46	1,85	2,12	1,85	2,08	1,9	2,28	3,64
Tb	1,96	1,09	1,40	1,16	1,26	1,58	1,02	1,33	2,11
Yb	6,85	2,58	4,84	3,80	4,20	5,47	3,75	3,40	5,07
Lu	1,09	0,47	0,84	0,61	0,72	0,99	0,61	0,58	0,86
Distance**	1	100	250	750	1000	1300	1700	2500	3250

Tableau II (suite).

Coupe 3							
Zones	I Ib	I Ib	I Ib	I Ib	I Ib	I Ia	I Ia
Echantillons	81	73	72	69	71	67	66
SiO ₂ (% pds)	65,34	64,87	68,03	52,15	62,09	76,96	58,67
TiO ₂	1,04	0,96	1,24	1,27	1,32	0,78	1,09
Al ₂ O ₃	18,03	18,17	15,21	26,49	19,63	12,75	21,54
Fe ₂ O ₃ *	5,89	5,78	6,87	5,62	6,31	2,32	6,11
MnO	0,02	0,06	0,05	0,03	0,03	1.d.	0,02
MgO	1,23	1,13	1,29	1,17	1,14	0,41	0,99
CaO	0,12	0,19	0,15	0,01	0,09	0,02	0,26
Na ₂ O	0,36	1,50	0,57	0,45	0,36	0,68	0,40
K ₂ O	5,45	5,94	4,58	7,88	6,07	3,34	5,49
P ₂ O ₅	0,13	0,17	0,15	0,08	0,13	0,03	0,11
p.f.	2,82	2,46	2,46	4,8	3,08	2,34	5,73
Total	100,30	101,20	100,53	99,95	100,26	99,62	100,40
V (ppm)	104	99	119	161	125	75	104
Cr	106	86	89,9	132	117	60	106
Sc	15,20	13,99	13,90	23	18,31	9	17,23
Ni	42	29	37	27	41	18	37
Co	15,60	15,70	19,40	11	11,30	5	10,60
Y	34	28	48	35	37	29	29
Zr	419	339	909	215	749	503	277
Hf	12,80	9,70	28,50	5,80	24,30	15,30	7,90
Nb	19	16	18	18	19	14	19
Ta	3	3,30	1,90	2,40	2	1,10	2,10
Ba	1269	1140	1175	1761	1424	976	1536
Cs	193	275	28,90	20,20	30,20	19,30	26,50
Rb	313	547	204	230	231	136	170
Sr	68	62	74	83	76	52	68
Th	23,50	19,30	39,80	25,10	38,70	20,30	21,30
U	5,40	4,30	7,80	5,10	7,10	3,70	3,60
Pb	18	14	22	101	105	126	17
W	4,40	1.d.	3	7,20	5,10	30	6,90
La (ppm)	63,20	53,60	66,10	83,10	58,30	51,10	67,40
Ce	133,90	112,80	132,10	118,90	117,90	83,50	74,40
Nd	57,80	44,60	54,10	64	53,10	50,40	53,90
Sm	11,80	9,48	12,05	12,16	12,20	10,74	10,67
Eu	2,34	2,15	2,01	2,31	2,12	1,82	2,03
Tb	1,62	1,30	1,73	1,47	1,69	1,10	1,32
Yb	4,04	3,56	5,58	3,98	4,70	3,64	3,56
Lu	0,69	0,61	0,96	0,65	0,83	0,63	0,60
Distance**	1	2	100	400	550	900	1300

Tableau II (suite)

Zones	Coupe 4					
	IIIa	IIIa	IIIa	IIIa	IIa	I
Echantillons	13	16	9	11	12	1
SiO ₂ (% pds)	60,77	62,79	64,47	62,54	59,86	65,06
TiO ₂	1,07	1,05	1	0,99	1,02	0,94
Al ₂ O ₃	20,84	21,34	18,83	21,2	20,39	19,89
Fe ₂ O ₃ *	7,12	3,98	5,16	4,19	7,54	2,62
MnO	0,05	0,01	0,05	l.d.	0,01	l.d.
MgO	1,36	0,46	1,02	0,39	0,81	0,7
CaO	0,1	l.d.	0,26	l.d.	0,06	0,01
Na ₂ O	0,84	0,32	0,61	0,34	0,25	0,4
K ₂ O	4,77	5,07	4,3	4,87	4,41	5,98
P ₂ O ₅	0,13	0,12	0,1	0,07	0,11	0,07
p.f.	3,46	5	4,5	5,48	5,74	4,47
Total	100,53	100,17	100,32	100,03	100,2	100,10
V (ppm)	103	127	118	141	116	101
Cr	113	107	101	114	114	94
Sc	17,84	17,95	19	18,64	17,60	15
Ni	44	26	27	30	54	12
Co	14,6	6,10	10	3,70	13,10	2
Y	30	32	33	26	30	23
Zr	342	258	300	180	238	295
Hf	10,20	7,30	8,90	5,60	6,73	8,90
Nb	17	18	17	17	17	15
Ta	1,60	1,70	1,60	1,20	1,80	1,40
Ba	1397	1247	1047	1266	950	1127
Cs	38	22,40	7,70	18,40	12,10	18,50
Rb	186	191	169	200	143	265
Sr	113	70	68	86	74	99
Th	23,80	20,80	20,10	20,20	21,10	15,30
U	4,50	7,70	3,40	3,20	3,70	2,80
Pb	31	22	10	30	10	318
W	l.d.	6,70	7,30	12,30	5,10	19,80
La (ppm)	65,80	66,70	64,40	57,40	34,40	51,80
Ce	133,70	133,80	152,50	120,50	75,70	107,90
Nd	52,90	53,40	62,20	50,80	31,70	41,70
Sm	11,34	11,44	12,28	10,54	7,19	8,52
Eu	2,24	2,15	2,45	1,86	1,29	1,47
Tb	1,46	1,46	1,37	1,42	1,30	0,97
Yb	3,75	4,09	3,61	3,72	3,86	2,63
Lu	0,64	0,67	0,59	0,62	0,66	0,46
Distance**	5	70	700	900	1250	1750

Tableau II (suite)

Coupe 5

Zones	IIIa	IIIa	IIIa	IIIa	IIa	IIa	I	I	I	I
Echantillons	62	61	59	58	57	56	55	54	53	52
SiO ₂ (% pds)	58,31	64,2	57,25	54,01	52,51	57,38	59,25	60,21	67,9	66,71
TiO ₂	1,11	1,05	1,12	1,08	1,21	1,1	1,03	1,05	0,59	0,98
Al ₂ O ₃	21,53	18,75	22,15	23,15	25,02	22,19	20,57	21,8	15,64	19,56
Fe ₂ O ₃ *	6,04	5,65	7,34	9,74	8,57	7,68	7,66	6,94	5,49	2,29
MnO	0,40	0,05	0,03	0,05	0,06	0,03	0,05	0,04	0,03	0,01
MgO	1,22	1,13	1,70	1,59	1,83	1,26	0,67	1,52	0,87	0,53
CaO	0,07	0,18	0,09	0,15	0,05	0,04	0,39	0,07	0,16	0,05
Na ₂ O	0,42	0,75	0,50	0,94	0,73	0,74	0,94	0,53	0,46	0,15
K ₂ O	5,07	4,57	4,27	3,20	4,44	3,84	3,75	3,85	3,46	4,4
P ₂ O ₅	0,08	0,06	0,08	0,17	0,07	0,06	0,13	0,05	0,12	0,03
p.f.	4,66	3,08	4,84	5,89	5,75	5,61	4,46	4,77	4,01	4,95
Total	98,91	99,47	99,37	99,97	100,24	99,93	98,9	100,83	98,73	99,66
V (ppm)	97	78	110	123	135	117	110	111	67	83
Cr	113	98	123	131	143	129	111	114	80	89
Sc	19,60	16	21,07	22,44	24,73	21,39	19	19	13	15
Ni	14	22	23	48	22	21	22	24	17	10
Co	11	11	17,90	53,50	18,70	14,60	15	11	10	2
Y	28	29	33	36	30	29	28	25	36	22
Zr	314	389	214	223	269	176	267	262	601	417
Hf	9,30	11,90	6,40	7	8,30	5,80	8,10	7,70	18,20	12,78
Nb	24	23	23	20	23	22	20	22	19	21
Ta	2	1,90	1,90	2,10	2	201	1,50	1,70	1,40	1,50
Ba	1475	1321	1114	728	971	124	918	953	8,23	1237
Cs	30,60	18,90	50,90	9,80	17,90	14	8,90	9,30	5,50	8,30
Rb	212	177	243	169	230	200	182	182	136	183
Sr	70	90	56	161	84	131	109	78	63	79
Th	24,50	22	23,60	24	24	23,20	22,50	22,20	27	23,10
U	11,60	4,10	3,30	3,90	3,50	3	3,70	4	4	3,30
Pb	29	18	81	31	27	69	26	34	14	14
W	7,80	6,70	6,10	3,90	5,70	6,10	4	3,40	1.d.	10,80
La (ppm)	67	65,40	72,20	71,90	45,90	52,74	51,70	46,80	57,30	40,80
Ce	138,70	135,90	149	147,50	75,90	118,10	118,60	107,70	109,20	66,10
Nd	52,70	52	58,40	63,10	44,80	46,70	46,70	40,80	50,40	26,80
Sm	11,80	10,11	12,41	12,96	8,24	10,71	10,10	8,52	10,22	6,01
Eu	2,12	1,93	2,41	2,80	1,74	2,27	1,94	1,80	1,93	1,07
Tb	1,31	1,29	1,69	1,78	1,11	1,40	1,13	1,08	1,4	0,74
Yb	3,71	4,26	4,07	4,23	4,54	3,89	3,8	3,37	4,34	3,05
Lu	0,69	0,73	0,67	0,73	0,78	0,65	0,64	0,57	0,74	0,56
Distance**	15	100	510	750	1250	1750	1900	2350	2750	3100

Tableau III. Composition chimique moyenne et coefficient de variation des oxydes majeurs dans les métapélites de l'aurole métamorphique du granite d'Oulmès

oxydes	c.m.	e.t.	c.v.
(% poids)	(n = 38)		
SiO ₂	61,37	5,65	9,20
TiO ₂	1,08	0,12	11,10
Al ₂ O ₃	20,33	3,31	16,30
Fe ₂ O ₃ *	6,34	1,77	27,90
MnO	0,05	0,06	120
MgO	1,21	0,43	35,50
CaO	0,18	0,18	100
Na ₂ O	0,70	0,34	48,60
K ₂ O	4,55	0,99	21,80
P ₂ O ₅	0,11	0,04	36,40
p.f.	4,10	1,21	29,50
Total	100,02		

c.m.: concentration moyenne (en % poids)

e.t.: écart type

c.v.: coefficient de variation

Fe₂O₃*: fer total