

PÉTROLOGIE. — *Le granite du Baltoro (batholite axial du Karakorum, nord Pakistan) : une intrusion subalkaline d'âge Miocène Supérieur.* Note de **François Debon, Jean-Louis Zimmermann et Jean-Michel Bertrand**, présentée par Maurice Roques.

Intrusive dans des formations métamorphiques d'âges encore très discutés formant la bordure méridionale de l'Eurasie cénozoïque, la ceinture plutonique du Baltoro représente une association typiquement aluminocafémique subalkaline (monzonitique) claire. Trois isochrones internes Rb-Sr et dix datations K-Ar lui confèrent un âge Miocène Supérieur, voisin de 9 M.a. Conséquence tardive de la collision Inde-Eurasie, sa genèse pourrait résulter d'une subduction de l'arc insulaire du Kohistan-Deosai-Ladakh sous la marge continentale eurasiatique.

PETROLOGY. — The Baltoro granite (Karakorum axial batholith, northern Pakistan): an Upper Miocene subalkaline intrusion.

The Baltoro granite [1], a WNW-ESE trending plutonic belt more than 100 km long and ca. 4 to 20 km wide, is located in the southern margin of Cenozoic Eurasia. It intrudes metamorphic formations of debated ages. Contacts are sharp, roughly concordant and, except near Paiu, outwards-dipping. There is a thermal aureole. Metasedimentary septa of various size may be included. It represents a typical aluminocafemic and light-coloured subalkaline (i.e. monzonitic) association dominantly made up of Ba-, Sr- (and U-) rich leucogranodiorites and adamellites with biotite ± muscovite ± garnet. Sphene, allanite and, exceptionally, amphibole occur in the darkest members. Apatite, sometimes conspicuously zoned, is frequent. The rocks are medium- or fine-grained, rather often porphyritic. A more or less obvious flow structure, a mild cataclasis but no recrystallization is observed. Locally, a rough magmatic layering, made up of a complex association of porphyritic and equigranular rocks, exists. Only very scarce microgranular igneous enclaves are present. A conspicuous network of leucocratic dykes, sometimes extending to more than five hundred meters beyond the contact, roots in the plutonic body and intrudes its surrounding rocks. Ten whole rock Rb-Sr isotope analyses of the Baltoro granite give scattered results. This dispersion may result from an isotope heterogeneity of the fluid-rich original magma. Three accurate internal isochrons (plagioclase, whole rock, biotite) give an Upper Miocene age (8.8 ± 0.3 M.a., on an average) and initial Sr isotope ratios of 0.7078 to 0.7089. Ten K-Ar dates (whole rock, biotite, muscovite, K-feldspar) yield a quite similar result (8.5 ± 0.8 M.a.). The authors consider that the Baltoro granite was emplaced before the mineral isotope closures, viz. ca. 9.2 M.a. ago (according to whole rock K-Ar dates), with an average Sr_i of 0.7084. The coherence of the dates here obtained by various methods contrasts with the strong dispersion of ages previously obtained by mineral Rb-Sr, K-Ar, ^{39}Ar - ^{40}Ar and fission-track dating elsewhere in northern Pakistan (Kohistan, Deosai, Karakorum, . . . ; e.g. [6] to [8]). The Baltoro granite probably represents the youngest major event of acidic plutonism in the Karakorum batholith. It has been preceded by two older plutonic stages, respectively of Mid Cretaceous and Lower Cenozoic age ([2], [3]). In particular, a Mid Cretaceous dark metagranodiorite unit, well known in the Hunza valley, some 150 km more to the west, continues up to the area here considered, as a belt running parallel to the Baltoro granite and north of it, all along the right bank of the Baltoro glacier (Peribatholithic plagioclase gneiss and Muztagh Tower gneiss of Desio and Zanettin [1]). The Baltoro granite is basically different from the Miocene leucocratic Himalayan granites. Magma was possibly generated as a result of northward subduction of the Kohistan-Deosai-Ladakh island arc beneath the Cenozoic Eurasia continental margin and involved both basic and sialic source-materials. Late-Tertiary ages in the Karakorum may be related not only to uplift and erosion phenomena [6] but also to a huge magmatism.

Le granite du Baltoro est l'une des principales unités plutoniques du batholite axial du Karakorum, vaste corps intrusif sur quelques 600 km au travers de séries métasédimentaires formant la bordure méridionale de l'Eurasie cénozoïque (fig. 1 a; [1]). Le caractère composite de ce batholite a été démontré seulement tout récemment [2]. Sa connaissance demeure cependant encore très fragmentaire en dépit de son intérêt pour la compréhension des phénomènes liés à la convergence Inde-Eurasie [3].

I. TYPOLOGIE ET AGE DU GRANITE DU BALTORO. — Le granite du Baltoro a été décrit et cartographié par Desio et Zanettin [1]. L'étude chimique (tableau a et données inédites, C.R.P.G.) et microscopique de 33 échantillons — prélevés en 1984, sur affleurements et blocs, entre le glacier Vigne et celui de Biafo⁽¹⁾ — le définit comme une association typiquement aluminocafémique et subalkaline (i.e. monzonitique) claire [4]. Celle-ci réunit, pour l'essentiel, des leucogranodiorites et des adamellites à biotite ± muscovite ±

grenat, riches en Ba, Sr (et U). Sphène, allanite et, exceptionnellement, amphibole caractérisent ses termes les plus colorés tandis que zircon et apatite, parfois remarquablement zonée, se rencontrent partout.

Dix analyses isotopiques Rb-Sr sur roches totales du granite du Baltoro ont été réalisées. Ces roches proviennent d'affleurements distribués sur plus de 35 km (de Paiu au glacier Vigne), situés à l'écart des puissants cisaillements affectant très localement le granite (e.g. base des tours de Thunmo; fig. 1 b). Les résultats obtenus révèlent la très forte hétérogénéité isotopique du granite, excluant toute possibilité de datation au travers d'une telle approche (fig. 2 a). Cette hétérogénéité est à mettre en parallèle avec le comportement « aléatoire » des alcalins K et Na; celui-ci se traduit par une absence de corrélation entre les variations du rapport K/Na — autrement dit feldspath potassique/plagioclase — et celles de la charge en minéraux colorés ou du rapport Mg/Fe. Le fait que ce rapport Mg/Fe soit un bon index de la différenciation, lié à l'absence de transformations post-magmatiques significatives, suggère que le comportement des alcalins (et des isotopes Rb, Sr?) dans le magma — riche en fluides comme en témoigne le

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 1. — (a) Grands domaines structuraux du nord Pakistan. MMT=Zone de Suture Sud, NSZ=Zone de Suture Nord. (b) Carte géologique schématique d'une partie du granite du Baltoro (d'après la carte de Desio et Zanettin [1], modifiée).

Fig. 1. — (a) Major structural domains of northern Pakistan. MMT=Main Mantle Thrust, NSZ=Northern Suture Zone. (b) Schematic geological map of part of the Baltoro granite, showing location of the three main samples (BD 45, 51, 52) used for Rb-Sr and K-Ar isotope dating. After the map of Desio and Zanettin [1], modified.

Fig. 2. — Analyses isotopiques Rb-Sr dans le diagramme de Nicolaysen. (a) Ensemble des échantillons (10 roches, 3 plagioclases, 3 biotites). BD 91 (filon leucocrate périplutonique) non pris en compte dans le calcul de l'« erreurchrone » (ligne en tiretés). (b, c, d) Isochrones internes (plagioclase, roche totale, biotite) des échantillons BD 45, 51 et 52 respectivement. Analyses représentées avec les marges d'erreur.

Fig. 2. — Rb-Sr isotope analyses in the Nicolaysen's diagram. (a) Whole of the samples (10 rocks, 3 plagioclases, 3 biotites). BD 91 (periplutonic leucocratic dyke) discarded from the errorchron (dashed line) calculation. (b, c, d) Internal isochrons (plagioclase, whole rock, biotite) of the BD 45, 51 and 52 samples respectively. Analyses shown with error margins. M.S.W.D.=mean weighted standard deviation.

TABLEAU. — Compositions chimiques et isotopiques d'échantillons-types. N°=numéro d'échantillon. BD 109 et 114=blocs de la Dumordo et du glacier de Biafo, respectivement. Autres échantillons=affleurements (voir fig. 1 b). BD 91=filon leucocrate périplutonique. B%=pourcentage de minéraux colorés. (a) Analyses par spectrométrie d'émission (K. Govindaraju, C.R.P.G., Nancy). Fe₂O₃=fer total; P.F.=perte au feu; Ba, Rb, Sr, U, Th (ppm). (b) Données isotopiques Rb-Sr (partielles). Analyses au spectromètre de masse (F. Debon, Thomson 206 S, C.R.P.G.). Bi biotite, Pl plagioclase+quartz, RT roche totale. (c) Données isotopiques K-Ar. K et Ar respectivement analysés par absorption atomique (M. Vernet) et spectrométrie de masse (J.-L. Zimmermann, THN 205 E, C.R.P.G.). Bi biotite, Kf feldspath potassique, Mu muscovite, RT roche totale.

TABLE. — Chemical and isotopic compositions of type-samples. N°=sample number. BD 109 and 114=boulders of the Dumordo river and Biafo glacier respectively. Other samples=outcrops (see Fig. 1 b). BD 91=periplutonic leucocratic dyke. B%=percentage of dark minerals. (a) Emission spectrometry analyses (K. Govindaraju, C.R.P.G., Nancy). Fe₂O₃=total iron; P.F.=loss on ignition; Ba, Rb, Sr, U, Th (ppm). (b) Rb-Sr isotope data (partial). Analyses by mass spectrometry (F. Debon, Thomson 206 S, C.R.P.G.). Analysed material: Bi=biotite, Pl plagioclase+quartz, RT whole rock. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios normalised to ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194 and adjusted to E and A=0.7080. (c) K-Ar isotope data. K and ⁴⁰Ar respectively analysed by atomic absorption (M. Vernet) and mass spectrometry (J.-L. Zimmermann, THN 205 E, C.R.P.G.). Bi biotite, Kf K-feldspar, Mu muscovite, RT whole rock. Ages calculated with $\lambda\beta=4.962 \times 10^{-10}/\text{year}$, $\lambda\gamma=0.581 \times 10^{-10}/\text{year}$, ⁴⁰Ar=0.01167% K.

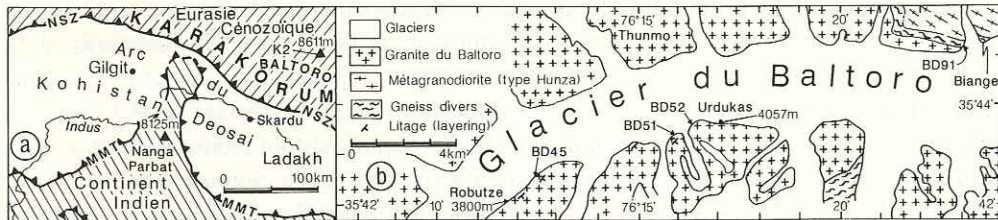


Fig. 1

TABLEAU

N°	B %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F. TOTAL	Ba	Rb	Sr	U	Th	
BD 114	14,8	66,91	15,83	3,19	0,05	1,31	2,95	3,95	4,51	0,68	0,34	0,62	100,34	1499	174	1145	11,0	35,6
BD 109	11,9	66,75	16,12	2,73	0,04	1,04	2,82	4,21	3,74	0,49	0,16	0,47	98,57	889	138	657	8,1	20,6
BD 45	9,5	69,38	16,03	2,49	0,06	0,67	2,24	4,46	3,29	0,36	0,09	0,55	99,62	1168	166	625	6,3	20,2
BD 52	6,7	71,69	14,68	1,82	0,03	0,41	1,84	4,09	3,55	0,31	tr	0,36	98,78	1106	123	541	10,3	7,8
BD 51	4,3	73,96	14,15	1,24	0,04	0,23	1,00	3,79	4,44	0,16	tr	0,29	99,30	703	193	339	3,4	15,3
BD 91	4,3	73,79	13,60	1,20	0,03	0,28	0,59	3,30	5,30	0,18	tr	0,40	98,67	495	280	253	10,7	7,6

N°	Matériel analysé	Rb ppm	Sr ppm	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr ± 2% (2σ)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ± 2σ	Isochrone		
						M.S.W.D.	Age (Ma) ± 2σ	Sr initial ± 2σ
BD 45	Bi	1099	19,6	162,0	0,72927 ± (4)	18,1	8,8 ± 0,8	0,70895 ± (2)
	RT	176	656	0,777	0,70895 ± (3)			
	P1	14,9	483	0,089	0,70906 ± (3)			
BD 51	Bi	1111	6,6	489,5	0,76890 ± (4)	1,4	8,7 ± 0,2	0,70819 ± (3)
	RT	183	341	1,553	0,70833 ± (6)			
	P1	2,9	43,9	0,190	0,70824 ± (4)			
BD 52	Bi	734	11,7	182,1	0,73123 ± (4)	1,0	9,0 ± 0,2	0,70781 ± (3)
	RT	121	583	0,603	0,70785 ± (4)			
	P1	6,9	284	0,070	0,70784 ± (3)			

N°	Matériel analysé (%)	K	⁴⁰ Ar radiogénique (10 ⁻⁶ cc/g)	⁴⁰ Ar atmosphérique (%)	Age (Ma) ± 2σ	
					conventionnel (2σ ≤ 0,5)	isochrone (Harper)
BD 45	RT	2,95	1,0175	56,4	8,85	7,8 ± 0,9
	Bi	7,28	2,1095	60,5	7,45	
	Fk	10,74	3,002	43,5	7,2	
BD 51	RT	3,50	1,2773	59,5	9,35	8,5 ± 0,7
	Bi	7,20	2,2458	61,6	8,0	
	Mu	7,72	2,661	59,2	8,85	
	Fk	11,41	3,4708	30,8	7,85	
	RT	2,85	1,026	54,3	9,25	
BD 52	Bi	6,76	2,3254	50,7	8,85	9,0 ± 0,2
	RT	2,85	1,026	54,3	9,25	
	Fk	11,61	4,0458	24,5	8,95	

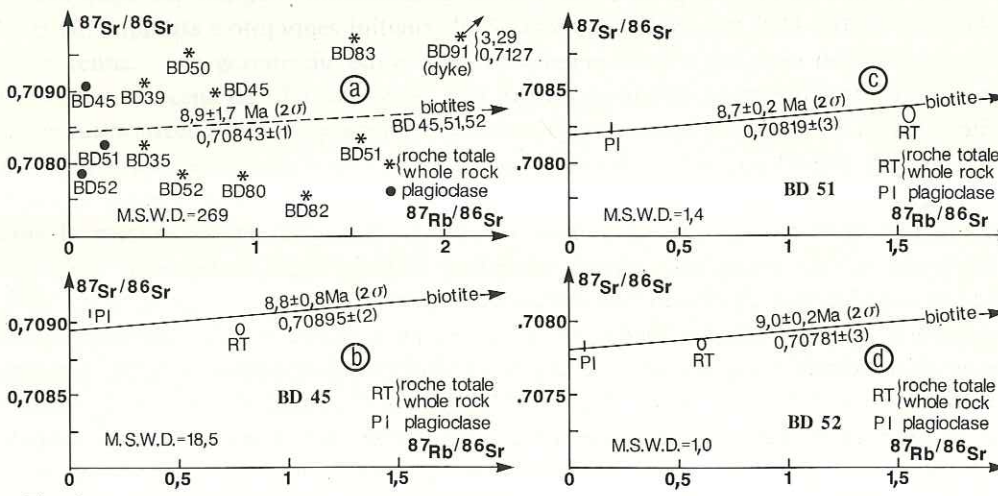


Fig. 2

spectaculaire réseau de filons leucocrates « s'échappant » du pluton — n'a pas été contrôlé par le processus majeur de différenciation. Ceci étant, trois isochrones internes (sur plagioclase, roche totale, biotite) ont été obtenues, définissant un âge Miocène Supérieur de $8,8 \pm 0,3$ M.a. (valeur moyenne; tableau *b*; fig. 2*b*, *c*, *d*). Par ailleurs, dix datations K-Ar (sur roche totale, biotite, muscovite, feldspath potassique; tableau *c*) se situent elles aussi dans une gamme d'âge très étroite, parfaitement concordante avec le résultat précédent : $8,5 \pm 0,8$ M.a. Un âge similaire avait été proposé dès 1961 [5] d'après une étude des halos pléochroïques de biotites. Les faits suivants nous ont conduits à considérer cet âge Miocène Supérieur comme étant celui de la mise en place du granite du Baltoro : absence de recristallisation/intensité faible ou nulle de la déformation et de l'altération/caractère tout à fait statique du métamorphisme de contact surimposé aux structures et au métamorphisme régional/remarquable convergence des âges obtenus au travers de méthodes différentes appliquées à des matériaux eux-mêmes différents/contraste entre la grande cohérence de ces résultats et le très fort étalement des âges obtenus partout ailleurs au nord Pakistan (Kohistan, Karakorum, ...) par datations Rb-Sr, K-Ar, ^{39}Ar - ^{40}Ar et traces de fission sur minéraux ([3], [6] à [8])/présence de sources chaudes dans l'encaissant. Plus précisément, cette mise en place doit être antérieure à la fermeture isotopique des minéraux; compte tenu des âges K-Ar obtenus sur roches totales, elle pourrait être intervenue vers 9,2 M.a. Le granite du Baltoro représente probablement la plus récente des principales intrusions plutoniques acides du batholite axial du Karakorum. Il succède à deux autres phases plutoniques d'âges respectivement Crétacé moyen et Paléogène ([2], [3]). La phase Crétacé existe elle aussi dans la région du Baltoro (fig. 1*b*). Elle y correspond, en tout ou partie, aux « Peribatholithic plagioclase gneiss » et « Muztagh Tower gneiss » [1] de la rive droite du Baltoro. Ces orthogneiss ont, en effet, des caractères chimiques et pétrographiques identiques à ceux de l'unité métagranodioritique sombre définie dans le Hunza ([2], [3]). Daté à $7,8 \pm 0,1$ M.a. au travers d'un « spectre ^{39}Ar - ^{40}Ar idéal » [7], le granite de Khorkundus au Cachemire pourrait prolonger celui du Baltoro.

II. GENÈSE DU GRANITE DU BALTORO. — Par divers caractères (vastes dimensions, emplacement dans une marge continentale, type alumino-caféémique et subalcalin, richesse en Ba et Sr, rapports isotopiques initiaux du Sr assez peu élevés : 0,7074 à 0,7095, 0,70845 en moyenne, ...) le granite du Baltoro est fondamentalement différent des leucogranites alumineux Miocène de l'Himalaya [9]. Ces mêmes caractères sont compatibles avec des matériaux-sources à la fois basiques et sialiques et pourraient s'accorder avec une genèse par subduction océanique sous une marge continentale active (en l'occurrence celle de l'Eurasie cénozoïque méridionale). Une telle hypothèse paraît *a priori* peu vraisemblable dans la mesure où la fermeture de l'océan Téthys qui séparait Inde et Eurasie est intervenue quelques 40 M.a. avant la genèse du granite. Ceci étant, on sait aussi que : (a) la convergence entre Inde et Eurasie s'est poursuivie au-delà de leur collision initiale; cette convergence post-collision a pu se réaliser en partie, au moins depuis le Miocène Inférieur [10], par subduction de l'Inde ou/et du plancher de petits bassins océaniques résiduels [11] sous l'Eurasie; (b) à un double titre, le granite du Baltoro occupe une situation géotectonique remarquable (fig. 1*a*) : il est situé au niveau d'un puissant arc insulaire séparant ici Inde et Eurasie (Kohistan-Deosai-Ladakh; e.g. [12], [13]); il se localise à proximité d'un très puissant promontoire du continent indien, celui du Nanga Parbat-Haramosh, dont l'enfoncement « en tunnel » sous les formations de l'arc est manifeste à l'échelle cartographique [14]. Dans la mesure où l'arc en question (ou/et la

lithosphère sous-jacente) aurait été entraîné dans la subduction intracontinentale Miocène ([14], [15]), il pourrait avoir joué un rôle analogue à celui du plancher de la Téthys au Crétacé-Paléogène.

(¹) Ces travaux, financés par le C.N.R.S. (GRECO Himalaya-Karakorum et C.R.P.G., Nancy) avec l'appui du Club alpin français, ont bénéficié du soutien logistique de « Terres d'Aventure ».

Contribution C.R.P.G. n° 649.

Reçue le 26 mai 1986.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. DESIO et B. ZANETTIN, *Geology of the Baltoro basin*, Brill, Leiden, 1970, 308 p.
- [2] F. DEBON, P. LE FORT, D. DAUTEL, J. SONET et J.-L. ZIMMERMANN, *Lithos*, 1986 (sous presse).
- [3] P. LE FORT, A. MICHARD, J. SONET et J.-L. ZIMMERMANN, in *Granites of Himalayas, Karakorum and Hindu Kush*, Punjab Univ., Lahore, 1983, p. 377-387.
- [4] F. DEBON et P. LE FORT, *Trans. R. Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, 73, 1982, p. 135-149.
- [5] A. DESIO et A. LONGINELLI, *Rend. Accad. Naz. Lincei*, 30, 1961, p. 437-448.
- [6] P. K. ZEITLER, *Tectonics*, 4, 1985, p. 127-151.
- [7] P. H. REYNOLDS, M. E. BROOKFIELD et R. H. MCNUTT, *Geol. Rundsch.*, 72, 1983, p. 981-1004.
- [8] M. P. COWARD, B. F. WINDLEY, R. BROUGHTON, I. W. LUFF, M. PETTERSON, C. PUDSEY, D. REX, et M. ASIF KHAN, in *Collision Tectonics*, *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 19, 1986, p. 203-219.
- [9] P. LE FORT, M. CUNNEY, C. DENIEL, C. FRANCE-LANORD, S. M. F. SHEPPARD, B. N. UPRETI et P. VIDAL, *Tectonophysics*, 1986 (sous presse).
- [10] C. T. KLOOTWIJK, P. J. CONAGHAN et C. MCA. POWELL, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 75, 1985, p. 167-183.
- [11] J. L. CHATELAIN, S. W. ROECKER, D. HATZFELD et P. MOLNAR, *J. Geophys. Research*, 85B3, p. 1365-1387.
- [12] R. A. K. TAHIRKHELI, M. MATTAUER, F. PROUST et P. TAPPONNIER, in *Geodynamics of Pakistan*, *Geol. Surv. Pakistan*, 1979, p. 125-130.
- [13] M. G. PETTERSON et B. F. WINDLEY, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 74, 1985, p. 45-57.
- [14] M. MATTAUER, in *Collision Tectonics*, *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 19, 1986, p. 37-50, *Bull. Soc. géol. France*, 8, II, 1986, p. 143-157.
- [15] P. TAPPONNIER, M. MATTAUER, F. PROUST et C. CASSAIGNEAU, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 52, 1981, p. 355-371.

Centre de Recherches pétrographiques et géochimiques (C.R.P.G., C.N.R.S.),
B.P. n° 20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy
et GRECO Himalaya, Karakorum.