

## Le magma parental du lopolithe de Bjerkreim-Sokndal (Norvège méridionale)

Jean-Clair DUCHESNE et Jan HERTOGEN

*Résumé* — Le lopolithe stratiforme de Bjerkreim-Sokndal a été formé par remplissages multiples et cristallisation fractionnée donnant naissance à une série de cumulats depuis des anorthosites jusqu'à des mangérites. La découverte d'une monzonorite fine au contact de l'enveloppe dans une région proche de la base apporte la première indication directe sur la nature du magma parental. Cette roche est un liquide figé qui peut cristalliser à 1160°C une olivine Fo<sub>73</sub> identique à l'olivine la plus magnésienne de la série de cumulats. La distribution en terres rares de cette monzonorite ne montre aucune anomalie en Eu.

### The parental magma of the Bjerkreim-Sokndal lopolith (S. Norway)

*Abstract* — The Bjerkreim-Sokndal layered lopolith has been formed through multiple replenishments and fractional crystallization which have produced a series of cumulates ranging from anorthosites to mangerites. The occurrence of a fine-grained monzonorite at the contact with the envelope and near the base of the lopolith provides the first direct constraint on the nature of the parental magma of the massif. The rock is a chilled liquid which, at 1,160°C, can crystallize a liquidus olivine Fo<sub>73</sub> similar to the most magnesian olivine found in the series of cumulates. The REE distribution of the monzonorite has no Eu anomaly.

Le lopolithe stratiforme de Bjerkreim-Sokndal ([1], [2]) fait partie de la province anorthositique du Rogaland au Sud-Ouest de la Norvège. Le massif s'est mis en place dans les conditions du faciès des granulites de pression moyenne (6-7,5 kb) [3], il y a environ 950 M.a. [4].

Il est constitué d'une succession de couches de nature lithologique variable, définissant une structure synclinale dont l'axe s'ennoie fortement dans la partie septentrionale du massif. Il est ainsi possible d'observer la succession complète des roches depuis le plancher de l'intrusion jusqu'à son sommet. Celle-ci comprend tous les termes de la suite anorthositique : anorthosite, norite, monzonorite, mangérite et mangérite quartzique. Cette association intime de tous les termes de la suite dans une structure géologique simple conduisit Michot [2] à la conclusion que tous les termes étaient comagmatiques. Des études ultérieures, notamment de géochimie isotopique ([5], [6]), ont toutefois montré que les mangérites quartziques n'appartenaient pas à la série. Elles pourraient représenter soit le toit fondu de l'intrusion, soit un mélange de liquides anatectiques avec des liquides résiduels provenant de la cristallisation de la partie sous-jacente du massif ([7]-[9]).

Les roches allant des termes anorthositiques à mangéritiques montrent les caractères typiques des cumulats : lamination magmatique, rubannement, rythmes mineurs, etc. A grande échelle, cinq rythmes majeurs ont été définis dans la partie septentrionale du massif ([1], [2]). Chaque rythme majeur comprend une anorthosite ou une leuconorite à la base qui passe vers le haut à des roches plus mafiques. Plagioclase, orthopyroxène et ilménite sont les seuls minéraux des deux premiers rythmes. Une magnétite, un clinopyroxène et de l'apatite apparaissent dans la partie supérieure du rythme III, manquent dans la partie inférieure du rythme IV et réapparaissent définitivement dans la partie supérieure de ce même rythme. Une olivine magnésienne (Fo<sub>70</sub>) [10] est présente dans un horizon de leuconorite, d'une cinquantaine de mètres d'épaisseur, proche de la base du IV. Une

Note présentée par Jean WYART.

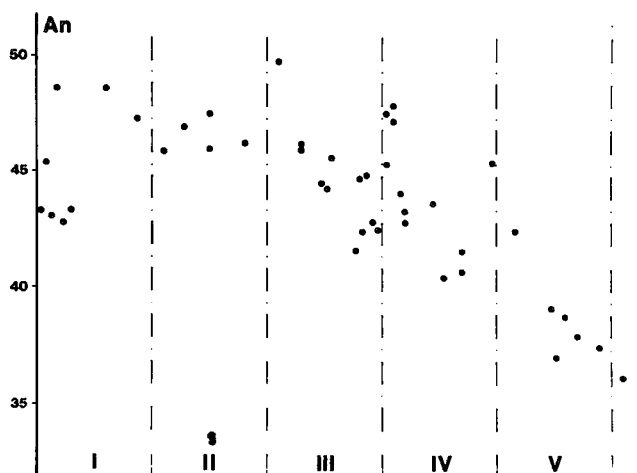


Fig. 1

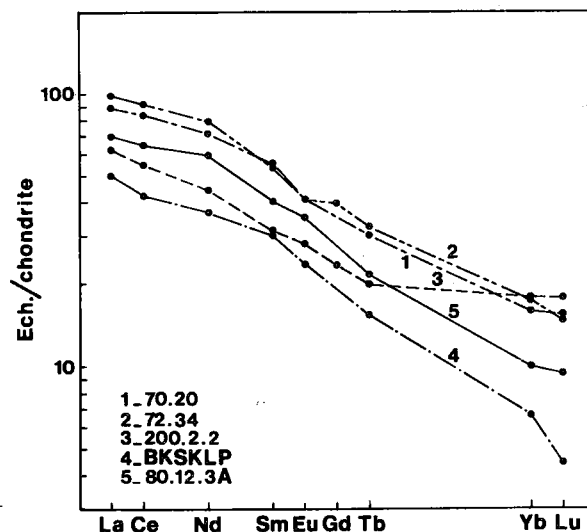


Fig. 2

Fig. 1. — Teneurs en An (% en poids) dans les plagioclases en fonction de leur position stratigraphique dans le lopolithe. Les différents rythmes sont représentés par des segments d'égales valeurs. La situation des échantillons et les analyses sont donnés dans [12].

Fig. 1. — An content (wt. %) in plagioclase versus stratigraphic height in the lopolith. The various rhythms are represented by segments of equal length. Location of samples and analyses are given in [12].

Fig. 2. — Terres rares (normalisées aux chondrites) dans les monzonorites de Tjörn (5 : éch. 80.12.3 A), de Hydra (1 : éch. 70.20; 2 : éch. 72.34; 3 : éch. 200.2.2) ([16], [17]) et dans le liquide obtenu par modélisation quantitative (4 : BKSCLP) [14].

Fig. 2. — Chondrite-normalized REE content in monzonorites from Tjörn (5: 80.12.3 A), Hydra (1: 70.20; 2: 72.34; 3: 200.2.2) ([16], [17]) and in the parental liquid calculated by trace element modeling (4: BKSCLP) [14].

brève apparition d'une olivine  $Fo_{73}$  a été également signalée dans un niveau métrique à la base du III [11].

En plus des variations modales à l'intérieur des rythmes majeurs, les minéraux montrent clairement des variations de composition chimique (cryptic layering). Le plagioclase (fig. 1) décroît globalement de  $An_{50}$  à  $An_{35}$  de la base du massif au sommet des norites et montre des récurrences bien marquées à la base des rythmes III et IV. Les autres minéraux montrent également des variations importantes de compositions ([8], [10], [12]-[14]). Les récurrences liées aux rythmes et l'évolution des compositions des minéraux cumulés résultent d'afflux répétés de magma frais dans la chambre magmatique pendant que se produit une cristallisation fractionnée gravitative, les afflux se mélangeant avec les liquides de plus en plus évolués [13]. Il faut noter que c'est à la base du rythme III que l'on trouve l'association minérale la moins évoluée de toute la série  $An_{50} + Fo_{73} + En_{75}$  et non dans les anorthosites de base du rythme I. Cette situation résulte probablement de l'expulsion complète des liquides résiduels de la formation du rythme II préalablement à l'afflux marquant la base du III. Par ailleurs, des roches anorthositiques proches de la base du I montrent des structures d'orthocumulats qui témoignent du piégeage d'une quantité relativement importante de liquide intercumulique, dont la cristallisation a conduit à diminuer le caractère basique de l'association minérale cumulée.

La nature du magma parental du lopolithe est jusqu'ici restée hypothétique. Michot [2] a souligné que l'absence de niveaux ultramafiques à la base de l'intrusion excluait une

TABLEAU

Composition chimique de la monzonorite de Tjörn.  
 Chemical composition of the monzonorite from Tjörn.

Éléments majeurs (%) (moyenne des échantillons 80.12.3 A et 83.17.2)		Norme (CIPW)	
SiO <sub>2</sub> . . . . .	49,7	Q . . . . .	2,7
TiO <sub>2</sub> . . . . .	3,63	Or . . . . .	6,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	15,78	Ab . . . . .	33,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	5,00	An . . . . .	22,6
FeO . . . . .	8,37	Di . . . . .	6,1
MnO . . . . .	0,15	Hy . . . . .	13,7
MgO . . . . .	4,44	Mt . . . . .	7,3
CaO . . . . .	6,81	Il . . . . .	6,9
Na <sub>2</sub> O . . . . .	3,88	Ap . . . . .	1,4
K <sub>2</sub> O . . . . .	1,05		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . . . . .	0,64		
TOTAL . . . . .	99,45		
Éléments en trace (ppm) (échantillon 80.12.3 A)			
Ba . . . . .	470	La . . . . .	23,9
Rb . . . . .	18	Ce . . . . .	58
Sr . . . . .	530	Nd . . . . .	39
K/Rb . . . . .	482	Sm . . . . .	8,5
K/Ba . . . . .	18	Eu . . . . .	2,86
Th . . . . .	0,5	Tb . . . . .	1,13
U . . . . .	<0,2	Yb . . . . .	2,0
Zr . . . . .	262	Lu . . . . .	0,33
Hf . . . . .	6,5	La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub> . . . . .	7,2
Ta . . . . .	1,31	Eu/Eu* . . . . .	1,05
Zr/Hf . . . . .	40	Y . . . . .	22
		Cr . . . . .	28
		V . . . . .	216
		Sc . . . . .	13,8
		Ni . . . . .	60
		Co . . . . .	49
		Zn . . . . .	144
		Ni/Co . . . . .	1,2
		V/Ni . . . . .	3,6
		Cr/Ni . . . . .	0,47

Éléments majeurs, Ba, Rb, Sr, Y, Zr, V, Ni et Zn par XRF; les autres éléments par I.N.A.A.

composition basaltique et suggérait un liquide de composition intermédiaire capable de donner finalement des quantités importantes de roches acides. Des études ultérieures dans la même province ([15]-[17]) ont révélé les similitudes minéralogiques du petit massif de Hidra avec le lopolithe et amenait la découverte d'un faciès de contact finement grenu, de composition monzonoritique [15] et présentant une distribution des terres rares sans anomalie de l'Eu [16] (*fig. 2*). Une modélisation quantitative [17] montrait que ce faciès pouvait être le magma parental du massif. Parallèlement, dans le lopolithe de Bjerkreim-Sokndal, une modélisation de Ca, K et des traces dans le plagioclase et l'apatite ([12], [14]) conduisait également à un liquide parental monzonoritique avec une distribution des terres rares semblable à celle de Hidra (même rapport La/Yb, absence d'anomalie de l'Eu) (*fig. 2*).

Aucun argument direct ne venait cependant étayer ce modèle car, curieusement, cet immense massif n'avait livré jusque là aucun faciès de contact. Récemment cependant, une monzonorite fine, localement chargée de phénocristaux centimétriques de plagioclase et contenant des enclaves anguleuses d'anorthosite, a été découverte à Tjörn, localité située dans la zone de contact du rythme I avec l'enveloppe [18]. Pétrographiquement, la roche présente les caractères d'un liquide refroidi rapidement, comme on en trouve communément à l'éponte des grands dykes monzonoritiques qui recoupent les anorthosites en massif de la province : structure équigranulaire, apatite petite, très allongée, et disséminée avec les oxydes dans tous les minéraux de la roche. Géochimiquement (tableau), ce liquide présente les caractères banaux des monzonorites [19] : riche en Ti et P, de rapport Fe/Mg élevé (0,62), teneur en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> moyenne, rapport La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> voisin de 7, absence d'anomalie de l'Eu. Il apparaît en particulier très semblable au faciès de bordure de Hidra, notamment par son contenu et sa distribution en terres rares (*fig. 2*). On note

également la similitude de cette distribution avec celle calculée à partir des éléments en trace dans les plagioclases et les apatites [14].

Il importe cependant de vérifier si ce liquide monzonoritique est capable de cristalliser au liquidus l'assemblage le plus basique trouvé dans les cumulats de Bjerkreim-Sogndal, à savoir  $\text{Fo}_{73} + \text{An}_{50}$ . Ford et coll. [20] ont établi des expressions permettant de calculer, moyennant une évaluation grossière de la pression, la composition de l'olivine qui cristallise dans un liquide donné et la température d'équilibre de cette olivine et du liquide. Les résultats pour Tjörn sont, à 6 kb,  $\text{Fo}_{73}$  à 1165°C (éch. 83.17.3) et  $\text{Fo}_{74}$  à 1157°C (éch. 80.12.3A), en complet accord avec les olivines trouvées à la base du rythme III. Une approche similaire a été tentée pour le plagioclase selon la méthode de Nielsen [21]. Elle conduit à un plagioclase  $\text{An}_{55}$  contre  $\text{An}_{50}$  observé. Cette différence peut être imputée en partie aux approximations du modèle thermodynamique utilisé pour le liquide et en partie au fait que les coefficients de partage sont sensibles à la pression et ne sont connus qu'à 1 atmosphère. Les travaux de Green [22] ont montré qu'une élévation de pression conduit, toutes choses étant égales, à la cristallisation d'un plagioclase plus acide, comme cela semble bien être le cas ici.

Le calcul de la densité du liquide de Tjörn par la méthode de Bottinga et Weill [23] conduit, à la température de 1160°C, à des valeurs de 2,65 et 2,62, pour des teneurs en eau du magma respectivement de 0 et 0,5%. Ces valeurs sont proches de celles calculées à 1200°C pour les plagioclases  $\text{An}_{40} = 2,62 \pm 0,01$  et  $\text{An}_{50} = 2,63 \pm 0,01$  [24]. Les différences de densité apparaissent faibles et on peut donc présumer que le plagioclase n'aura guère tendance à couler ou à flotter dans le liquide parental.

Note reçue le 12 octobre 1987, acceptée le 22 octobre 1987.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] P. MICHOT, *Norges Geol. Unders.*, 212 g, 1960, p. 1-54.
- [2] P. MICHOT, *Geol. Rundsch.*, 54, 1965, p. 956-976.
- [3] D. DEMAÏFFE et J. MICHOT, in A. C. TOBI et J. L. R. TOURET éd., *N.A.T.O. Adv. Study Inst.*, séries C 158, 1985, p. 411-434.
- [4] E. WILMART et J. C. DUCHESNE, *Norsk Geol. Tidsskr.* (sous presse).
- [5] D. DEMAÏFFE, J. C. DUCHESNE et J. HERTOGEN, in L. H. AHRENS éd., 1979, p. 417-429.
- [6] J. B. W. WIELENS, P. A. M. ANDRIESEN, N. A. I. M. BOELRIJK, E. H. HEBEDA, R. N. A. PRIEM, E. A. T. VERDURMEN et R. H. VERSCHURE, *Norges Geol. Unders.*, 359, 1980, p. 1-30.
- [7] R. A. WIEBE, *Lithos*, 17, 1984, p. 171-188.
- [8] J. C. DUCHESNE, B. DENOISEUX et J. HERTOGEN, *Lithos*, 20, 1987, p. 1-17.
- [9] J. C. DUCHESNE, R. CARUBA et P. IACCONI, *Lithos*, 20, 1987, p. 357-368.
- [10] J. C. DUCHESNE, *24th Intern. Geol. Congr.*, sect. 2, 1972 b, p. 320-328.
- [11] F. MOLLER NIELSEN et J. H. R. WILSON, Communication personnelle, novembre 1986.
- [12] J. C. DUCHESNE, *Contr. Mineral. Petrol.*, 66, 1978, p. 175-184.
- [13] J. C. DUCHESNE, *J. Petrol.*, 13, 1972, p. 57-81.
- [14] I. ROELANDTS et J. C. DUCHESNE, in L. H. AHRENS éd., Pergamon, 1979, p. 199-212.
- [15] D. DEMAÏFFE, J. C. DUCHESNE, J. MICHOT et P. PASTEELS, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 277, série D, 1973, p. 17-20.
- [16] J. C. DUCHESNE, I. ROELANDTS, D. DEMAÏFFE, J. HERTOGEN, R. GIJBELS et J. DE WINTER, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 24, 1974, p. 325-35.
- [17] D. DEMAÏFFE et J. HERTOGEN, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45, 1981, p. 1545-1561.
- [18] C. MAIJER, G. A. E. M. HERMANS, A. C. TOBI et J. B. H. JANSEN, in C. MAIJER éd., *Norges Geol. Unders.* (sous presse).
- [19] J. C. DUCHESNE, I. ROELANDTS, D. DEMAÏFFE et D. WEIS, *Contr. Miner. Petrol.*, 90, 1984, p. 214-225.
- [20] C. E. FORD, D. G. RUSSEL, J. A. CRAVEN et M. R. FISK, *J. Petrol.*, 24, 1983, p. 256-265.
- [21] R. L. NIELSEN et M. A. DUNGAN, *Contr. Mineral. Petrol.*, 84, 1983, p. 310-326.
- [22] T. H. GREEN, in Y. W. ISACHSEN éd., *N. Y. State Mus. Sci. Serv.*, mém. 18, 1969, p. 23-30.
- [23] Y. BOTTINGA et D. F. WEILL, *Amer. J. Sci.*, 1970, p. 169-182.
- [24] I. H. CAMPBELL, P. L. ROEDER et J. M. DIXON, *Contr. Mineral. Petrol.*, 67, 1978, p. 369-377.

J. C. D. : Géologie, Pétrologie et Géochimie, Université de Liège, 4000 Sart-Tilman, Belgique;  
J. H. : Afdeling fysico-chemische geologie, Katholiek Universiteit Leuven, 3000 Leuven, Belgique.