

LES RELATIONS Sr-Ca ET Ba-K DANS LES PLAGIOCLASES DES ANORTHOSITES DU ROGALAND MÉRIDIONAL

par J. C. DUCHESNE

Laboratoire de Géologie, Pétrologie et Géochimie, Université de Liège

RÉSUMÉ

Les teneurs en Sr, Ba, Ca et K des plagioclases de 88 anorthosites et roches directement apparentées du complexe éruptif du Rogaland méridional (Norvège) sont étudiées. Les conclusions géologiques, établies par P. Michot, servent de base à cette étude de géochimie dynamique. Les roches examinées appartiennent à trois grandes unités du complexe. Elles sont le résultat de processus (1) de différenciation du magma plagioclasic (massif de Bjerkrem-Sogndal et massif d'Egersund-Ogna) (2) de palinogenèse basique (massif de Håland-Helleren).

Après avoir établi les relations générales Sr-Ca et Ba-K, l'auteur interprète les analyses en fonction de l'appartenance des échantillons aux différents massifs. Il montre que des relations Sr-Ca et Ba-K différentes caractérisent les plagioclases de chaque massif. Le comportement du Sr vis-à-vis du Ca est complexe et ne peut pas être expliqué par un processus unique dont la relation générale serait l'expression.

Les méthodes de séparation minéralogique et d'analyse chimique (spectro-fluorescence X) sont brièvement décrites.

ABSTRACT

The Sr, Ca, Ba, et K contents of 88 plagioclase feldspars from anorthosites and related rocks are investigated. The samples are coming from the South-Rogaland igneous complex (South Western Norway). The geological conclusions set by P. MICHOT are the basis of the geochemical study. The rock samples belong to 3 large units of the igneous complex. They are the result of (1) a gravity differentiation of the plagioclasic magma (Bjerkrem-Sogndal and Egersund-Ogna bodies) (2) a basic palinogenesis process (Håland-Helleren body).

The general Sr-Ca and Ba-K relationships are defined. Then follows an interprétation of the chemical analysis in relation with the source of the sample. Different Sr-Ca and Ba-K relationships appear as the distinguishing features of the plagioclase feldspars belonging to each body.

The behaviour of Sr toward Ca is complex and cannot be explained by a single process which would reflect the general relationship.

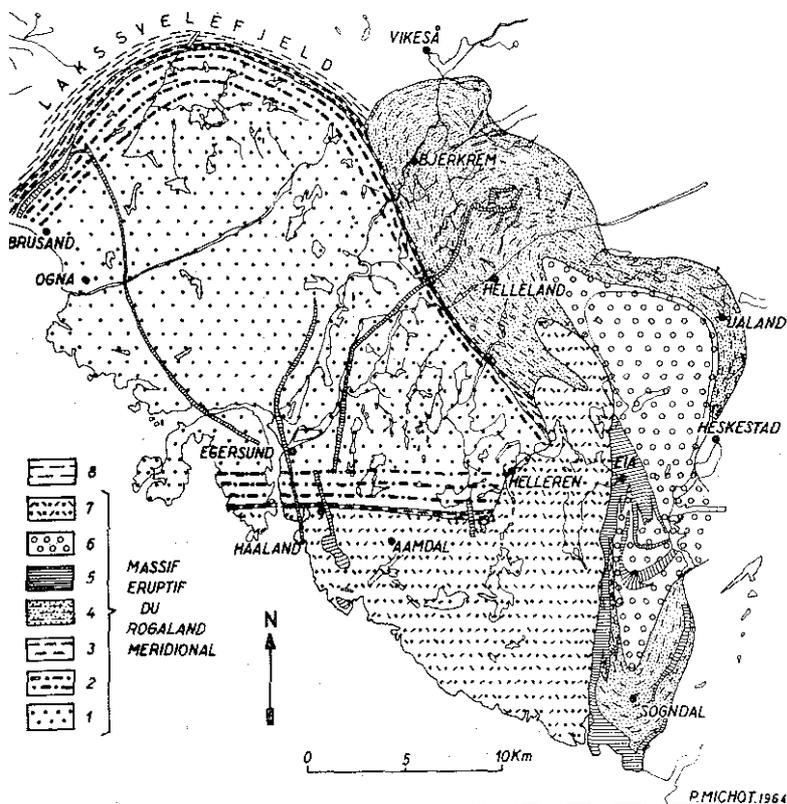
The methods for mineralogical separation and chemical analysis (X-ray emission spectrometry) are shortly described.

I. INTRODUCTION

Les roches anorthositiques qui constituent le complexe éruptif du Rogaland méridional ont été étudiées depuis 30 ans par P. Michot. Les conclusions géologiques sont résumées dans un article récent (P. MICHOT, 1968).

La présente note rassemble les premiers résultats de l'étude géochimique des plagioclases des roches appartenent à trois des unités majeures du complexe : les massifs de Bjerkrem-Sogndal, d'Egersund-Ogna et de Håland-Helleren (fig. 1).

Fig. 1. Esquisse géologique du complexe éruptif du Rogaland méridional. 1 et 2. Massif d'Egersund-Ogna. 1. Anorthosite massive. 2. Gneiss anorthositiques et leuconoritiques de la bordure interne. 3. Intrusion noritique du Lakssvelefjeld. 4, 5, 6. Massif de Bjerkrem-Sogndal. 4. Phase leuconoritique et anorthositique et phase monzonoritique au sommet. 5. Intrusion de Eia-Rekeffjord et dikes contemporains. 6. Phase mangéritique. 7. Massif complexe de Håland-Helleren. 8. Gneiss migmatitiques. (extrait de P. Michot, 1965, p. 962.)



II. GEOLOGIE ET PETROLOGIE DES MASSIFS

Ces massifs ont été décrits ailleurs ; aussi seule une description brève en est donnée ici.

A. Le massif de Bjerkrem-Sogndal

Il s'agit d'une intrusion lopolithique stratifiée de caractère plutôt basique (P. MICHOT, 1960, 1964, 1968) associant « une lignée de différenciés par gravité, comprenant à la base une anorthosite, ensuite des leuconorites, des norites et des monzonorites passant finalement à des termes plus acides, des mangérites et mangérites quartziques » (P. MICHOT, 1964, p. 858). L'analyse structurale de ce massif et l'étude pétrologique des différentes roches ont conduit au concept de *magma plagioclasique* dont le caractère chimico-minéralogique réside dans la cristallisation première d'un plagioclase et non d'une olivine ou d'un pyroxène comme dans les magmas basaltiques normaux.

Une phase essentiellement anorthositique et leuconoritique constitue la base du lopolithe. Elle s'étend, au Nord, de Bjerkrem à Helleland et au Sud, elle affleure dans la région de Sogndal. Les roches sont principalement constituées par un plagioclase non zone (andésine basique), par un pyroxène orthorhombique et par des minéraux noirs (ilménite et magnétite) postérieurs aux deux autres.

Au sommet de cette phase, les roches prennent, un caractère plus gabbroïque. Un pyroxène clinorhombique apparaît progressivement comme constituant principal (sans cependant atteindre le pourcentage d'hypersthène), tandis que le plagioclase se charge d'anti-perthites, que localement une olivine ferreuse (hortonolite) apparaît et que la magnétite s'enrichit en TiO_2 ¹. Ces roches annoncent la phase monzonoritique de la différenciation (P. MICHOT, 1964, p. 968).

B. *Le massif d'Egersund-Ogna*

Ce massif est l'unité la plus inférieure et la plus ancienne. Il est constitué dans sa majeure partie d'une anorthosite typique (andé-sinite basique) presque entièrement dépourvue de minéraux foncés (exception faite pour quelques rares macrocristaux d'hypersthène). Sa bordure interne est toutefois enrichie en pyroxène sur une épaisseur de 800 à 2000 m². Elle a subi des actions d'origine dynamométamorphique qui ont transformé les roches en gneiss anorthositiques et leuconoritiques (P. MICHOT, 1960, 1965).

L'anorthosite d'Egersund-Ogna est interprétée par P. Michot (1965, p. 972) comme « une accumulite dérivant d'un magma plagioclasiq ».

C. *Le massif complexe de Håland-Helleren*

P. Michot (1955) et J. Michot- (1960, 1961 a et b) y ont reconnu le développement d'un processus de *palingenèse basique* (anatexie leuconoritique d'échelle régionale). Ce processus conduit par fusion à l'individualisation d'un mobilisat leuconoritique dont l'expulsion laisse un résidu solide uniquement plagioclasiq. Le mobilisat peut constituer des masses leuconoritiques de caractère intrusif ; le résidu, des massifs importants d'anorthosite (paraanatectique). Entre ces 2 types extrêmes de roches, l'étude de terrain et l'examen pétrographique montrent qu'il existe toute une gamme de roches de transition constituées notamment par le mélange en proportions variables de plagioclases résiduels et de plagioclases d'origine anatectique (J. MICHOT, 1961 a et b).

Enfin, le substrat aux dépens duquel se fait l'anatexie est un matériau leuconoritique probablement apparenté aux gneiss de la bordure interne du massif d'Egersund-Ogna et aussi aux leuconorites et norites de la partie inférieure du lopolithe de Bjerkrem-Sogndal (J.MICHOT, 1961 b, p. 169).

III. MÉTHODE ANALYTIQUE

Les étapes de la recherche

Une étape d'orientation des méthodes a été menée sur un petit nombre d'échantillons comprenant les termes extrêmes des séries géologiques étudiées. Elle a permis de situer l'ordre de grandeur des teneurs et de leurs variations. Ces résultats combinés à ceux des essais de séparation minéralogique ont permis de choisir la méthode chimique.

Une seconde étape a été la mise au point des méthodes de séparation et d'analyse. Cette phase de la recherche a précédé le travail de routine.

La reproductibilité des analyses chimiques a été l'objet d'attentions particulières. La précision des analyses devait être suffisamment grande pour que les relations interéléments soient mises en évidence. Il a été nécessaire d'adapter la reproductibilité de la méthode chimique aux exigences du problème géochimique traité.

L'exactitude des résultats reste par contre difficile à contrôler à cause du manque de standards appropriés. Mais comme cette étude se place sur le plan de la géochimie dynamique, cette question n'a qu'une importance secondaire.

¹ Ces roches ont, minéralogiquement, beaucoup de points communs avec les ferrogabbros du Skaergaard.

² Le minéral noir n'est qu'exceptionnellement présent dans les roches de bordure comme à l'intérieur du massif.

La séparation minéralogique

Un schéma général de séparation adapté aux roches magmatiques du Rogaland a été décrit et justifié par l'auteur (DUCHESNE, J. C, 1966). Des variantes ont été prévues dans les cas où l'on envisage uniquement la séparation du plagioclase et non celle de tous les minéraux.

La roche est broyée à 100-150 μ , lavée puis séparée en deux fractions par le Bromoforme. La fraction légère est ensuite purifiée par plusieurs passages au séparateur Frantz Isodynamic dans des champs magnétiques croissants jusqu'au maximum. Quand le plagioclase est le seul feldspath de la roche, le produit obtenu a un très haut degré de pureté.

La méthode chimique

Le Ca, Sr, Ba et K sont dosés par spectrofluorescence X. Cette méthode donne entière satisfaction. Simple et rapide, elle ne détruit pas l'échantillon et convient pour les dosages des traces et des éléments majeurs.

La préparation de l'échantillon est réduite à un broyage et un pastillage. La mesure sur pastille est plus avantageuse que les méthodes de fusion au borax car il ne faut pas diluer l'échantillon et le dosage des éléments en trace reste possible. Il est cependant nécessaire de tenir compte de l'effet de matrice. Par contre, l'effet granulométrique est évité par l'adoption de conditions standardisées pour le broyage et le pastillage.

Le Ca et K sont dosés sous vide (excitation au Cr et cristal analyseur de quartz). La mesure de Ca est influencée par la teneur en K de l'échantillon. Néanmoins, dans les plagioclases étudiés, l'intervalle de variation du K est faible et la correction peut être négligée. Les courbes de dosage sont des droites dans les domaines de concentration étudiés. L'étalonnage a été réalisé en analysant 13 plagioclases par voie humide (Ca : titrage colorimétrique par l'EDTA en présence de murexide à pH 12, après extraction sous forme d'oxinate des ions gênants par le CHCl_3 à pH 5 ; K et Na : photo-métrie de flamme). La précision des mesures donne pour CaO , $s = 0,10 \%$ pour K_2O , $s = 0,02 \%$.

Le Sr est dosé dans l'air (excitation au Mo et cristal analyseur de LiF). La méthode a été décrite en détail (DUCHESNE, J. C, 1965). La mesure est fortement influencée par les teneurs en Ca et K du plagioclase. Il est nécessaire de corriger cette influence par l'adoption de courbes propres à chaque composition en Ca et K. L'étalonnage est réalisé par la méthode aux résidus fluorhydriques de P. Herman à l'aide de 22 standards synthétiques. La précision varie entre 14 et 10 ppm. L'exactitude est contrôlée par G-I et une série d'échantillons déterminés par dilution isotopique (DUCHESNE, J. C, 1968). Le Ba est dosé dans le vide par excitation au Cr et cristal de LiF (raie α). La méthode est identique à celle du Sr (étalonnage par la méthode aux résidus fluorhydriques et correction de l'influence de Ca et K). La précision est d'environ 20 ppm.

La détermination précise de la teneur en An du plagioclase sort des limites du présent travail- 13 plagioclases seulement ont été analysés du point de vue Ca, Na, K. Sur la base de ces résultats, il est possible de déterminer approximativement la teneur en An à partir des seules teneurs en Ca et K. L'accord avec les mesures optiques est satisfaisant.

IV. LES RELATIONS Sr-Ca ET Ba-K

Une partie des échantillons étudiés proviennent des collections de P. Michot (région de Sogndal) et de J. Michot (massifs de Eg-Og et de H.-H.). L'auteur y a aussi inclus des échantillons qu'il a prélevés principalement dans la région de Bjerkrem-Helleland, au cours d'une campagne en 1964.

Dans le massif de Bjerkrem-Sogndal, seule la phase leuconoritique et anorthositique a été étudiée (48 échantillons). Dans les autres massifs, le nombre d'échantillons est moins élevé (16 dans Eg-Og et 22 dans H.-H.). Quoique ces résultats soient encore assez fragmentaires, il est possible de tenter un début de synthèse. Les résultats sont rassemblés aux fig. 2 et 3.

Fig. 2. Les teneurs en Sr et Ca dans les plagioclases. 1. Phase leuconoritique et anorthositique du massif de Bjerkrem-Sogndal. 2. Partie centrale du massif anorthositique d'Egersund-Ogna. 3. Gneiss anorthositiques et leuconoritiques de la bordure interne du massif d'Egersund-Ogna. 4. Massif complexe anorthositique de Håland-Helleren (Leuc. : leuconorite d'Aseheia ; An : anorthosite de Selebo) 5. Gisements de minerai titanifère (S : Storgangen ; T : Tellness).

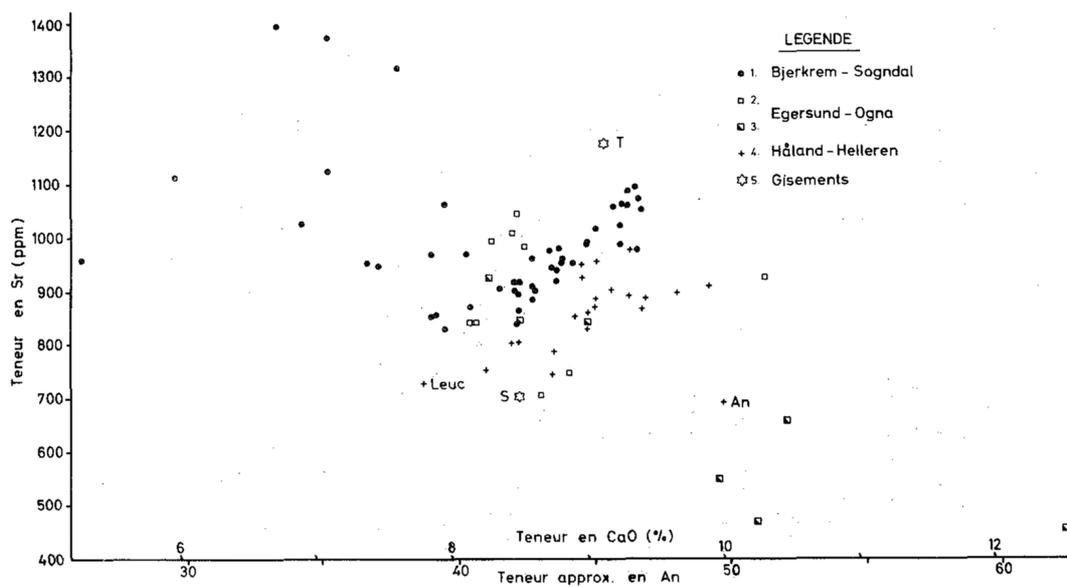
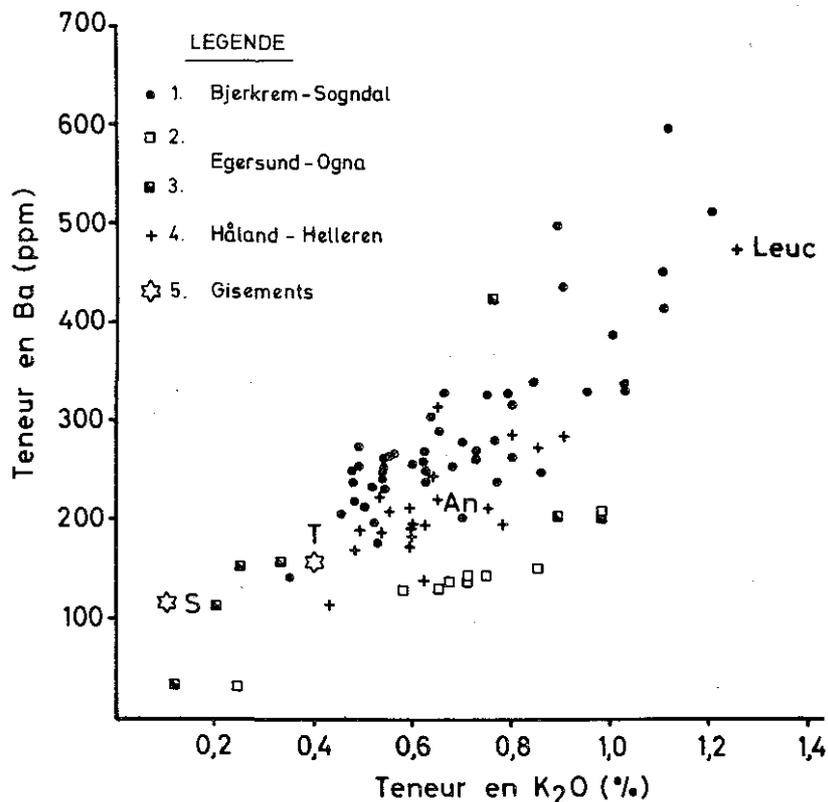


FIG. 3. Les teneurs en Ba et K dans les plagioclases. 1. Phase leuconoritique et anorthositique du massif de Bjerkrem-Sogndal. 2. Partie centrale du massif anorthositique d'Egersund-Ogna. 3. Gneiss anorthositique et leuconoritique de la bordure interne du massif d'Egersund-Ogna. 4. Massif complexe anorthositique de Håland-Helleren (Leuc : leuconorite d'Aaseheia ; An : anorthosite de Selebo). 5. Gisements de minerai titanifère (S : Storgangen ; T : Tellness).



Relations générales

L'examen de la fig. 2 montre clairement une relation de caractère général liant le Sr au Ca et correspondant à une augmentation du Sr pour une diminution du CaO³. Il faut noter également la grande concentration des points dans les gammes de 8.0 à 9.5 % de CaO (andésine basique) et de 800 à 1100 ppm Sr.

En ce qui concerne le Ba et le K (fig. 3), les 2 éléments augmentent simultanément.

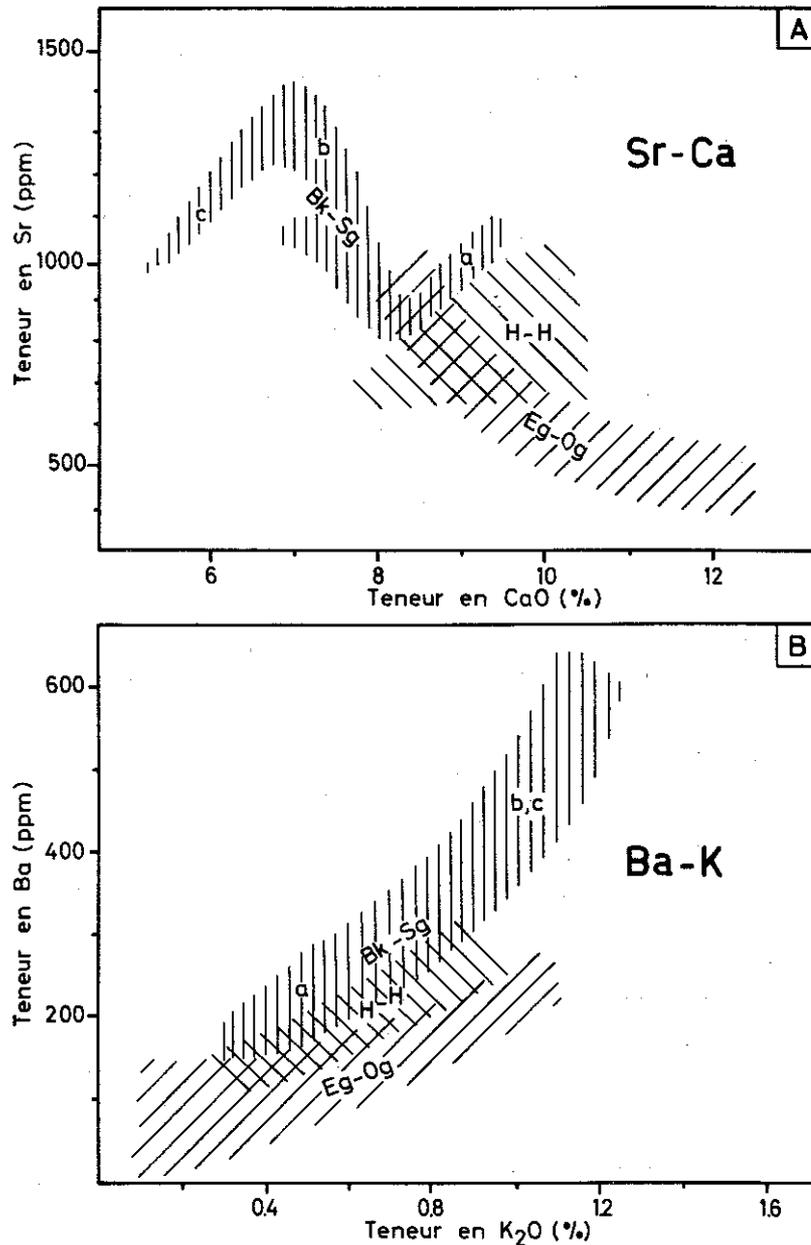
Relations dans chaque massif

A la fig. 4, les points représentatifs des plagioclases ont été regroupés en fonction de l'appartenance de l'échantillon aux trois massifs étudiés.

Dans le massif de Bjerkrem-Sogndal, une relation linéaire de décroissance du Sr avec le Ca caractérise la majeure partie de la phase anorthositique et leuconoritique (fig. 4 A-a) tant dans la partie nord de la différenciation (région de Bjerkrem-Helleland) que dans la partie sud (région de Sogndal). Toutefois, vers le sommet de cette phase, dans les roches de caractère plus gabbroïque qui marquent la transition vers la phase monzonoritique, la relation s'inverse brutalement — le Sr augmente très rapidement pour une faible diminution du Ca (fig. 4 A-b) — puis après une *culmination aux environ de 7 % de CaO* (An 35), elle se renverse de nouveau et le Sr diminue avec le Ca (fig. 4 A-c). En ce qui concerne le Ba et le K, la dépendance entre les 2 éléments est plus constante : on ne remarque qu'une légère augmentation de pente au sommet de la phase anorthositique et leuconoritique (fig. 4 B-b et c).

³ V. S. PAPEZIK (1965) signale une relation de même nature entre le Sr et le Ca des anorthosites canadiennes.

Fig. 4. Les relations Sr-Ca (A) et Ba-K (B) dans les plagioclases en fonction des massifs étudiés. Bk-Sg : phase anorthositique et leuconoritique du massif de Bjerkrem-Sogndal. a. partie inférieure et moyenne, b et e. partie supérieure. Eg-Og : massif d'Egersund-Ogna et sa bordure interne. H-H : massif complexe de Håland-Helleren.



Dans le massif d'Egersund-Ogna, la majorité des points se groupent autour de 900 ppm Sr et An_{42} et autour de 100 ppm Ba. Certaines roches appartenant à la bordure interne de gneiss leuconoritiques ont cependant un plagioclase plus riche en Ca ($CaO \geq 10\%$) et moins riche en Sr (env. 500 ppm). De plus, les analyses chimiques montrent que la teneur en An du plagioclase des roches les plus internes de la bordure est « normale » (An_{42}), tandis que, plus on se rapproche du contact extérieur, plus le pourcentage en An augmente et plus la teneur en Sr diminue. L'auteur sur ces bases, propose la relation représentée à la fig. 4. Un supplément d'analyses est cependant nécessaire car d'autres relations pourraient exister.

Dans le massif de Håland-Helleren, l'étude n'a pas mis en évidence l'existence de relations mais plutôt celle de domaines de variations. Du point de vue Sr-Ca, les plagioclases sont moins riches en Sr et, dans le diagramme Ba-K, ils occupent une zone intermédiaire entre celles des massifs d'Egersund-Ogna et de Bjerkrem-Sogndal.

Commentaires

Il est donc possible de définir une relation Sr-Ca et une relation Ba-K statistiquement valable pour la totalité des échantillons analysés quel que soit leur contexte géologique.

Cependant, le regroupement des analyses en fonction des données géologiques montre que chaque massif est caractérisé par des relations plus précises et souvent plus complexes que les relations générales.

Pour le Sr, il est par conséquent évident que le comportement de cet élément vis-à-vis du Ca ne peut pas être expliqué par le processus unique que traduirait la relation générale Sr-Ca puisque les relations particulières aux massifs ne montrent pas toutes une augmentation du Sr avec la diminution du Ca.

Ainsi, par exemple, dans le massif de Bjerkrem-Sogndal, où la différenciation du magma plagioclasiqne est la plus nettement exprimée, la relation Sr-Ca est compliquée. Les règles de substitution isomorphe de Goldschmidt, Ahrens, Jedwab (SHAW, 1964) qui s'accordent pour prédire un enrichissement en Sr dans le liquide résiduel, sont en défaut dans la majeure partie de la phase anortho-sitique et leuconoritique (fig. 4A-a). Ce n'est que dans la partie supérieure de cette phase que la relation présente des analogies avec celle qui caractérise les plagioclases des différenciations basaltiques (TUREKIAN et KULP, 1956 ; BULTER et SKIBA, 1962) et, en particulier, avec celle observée par Wager et Mitchell (1951) au Skaer-gaard où une culmination aux environs de An₃₅ apparaît également. Dans le massif de Håland-Helleren, la grande dispersion des points est évidemment à rapprocher de la complexité même des roches et des massifs. Le matériau aux dépens duquel l'anatexie se développe a une composition chimique variable, et, d'autre part, l'analyse porte sur un mélange de plagioclases de deux origines. Il est logique que le domaine des points de Håland-Helleren recouvre en partie les deux autres relations. Néanmoins, les analyses du plagioclase des roches de type extrême comme l'anorthosite paraanatectique de Selebö (fig. 2 et 3 : An) et la leuconorite de Åseheia (fig. 2 et 3 : leuc) montrent une nette différence dans les teneurs en CaO et K₂O : le plagioclase de la leuconorite anatectique est plus sodique et potassique que le plagioclase de l'anorthosite paraanatectique.

Enfin, quelques analyses des roches des massifs de Åna-Sira et de la lentille de Garsaknatt (MICHOT, J. et MICHOT, P., 1968) confirment leur appartenance à cette même famille géochimique. Par contre, la norite du gisement de Tellness ne se rattache (sur la base d'une seule analyse) à aucune des relations mises en évidence jusqu'ici.

V. CONCLUSIONS

Sur le plan fondamental, ce travail constitue une contribution à l'étude des distributions du Sr, Ca, Ba et K dans le plagioclase des anorthosites et des roches qui leur sont directement apparentées. Il met en évidence les particularités et la complexité du comportement dynamique de certains éléments en trace au cours de la cristallisation fractionnée du magma plagioclasiqne.

Sur le plan méthodologique, les résultats confirment la validité de la démarche adoptée suivant laquelle les études géochimiques sont placées dans le prolongement des travaux de géologie de terrain et de pétrologie. On doit constater, en effet, que l'interprétation des résultats ne peut tirer toute sa valeur que d'une confrontation étroite avec la conclusion de l'étude géologique classique. Cette méthode diffère donc essentiellement d'une approche purement chimique et statistique qui se voudrait indépendante de la géologie. C'est dans cet esprit que l'étude détaillée de chaque massif est envisagée dans une collaboration entre géologues, pétrologues et géochimistes.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie le Professeur P. MICHOT et le Dr. P. HERMAN, qui sont les promoteurs de cette recherche dans le cadre du Fonds de Recherche Fondamentale Collective. Toute sa reconnaissance va également au professeur J. MICHOT qui lui a cédé des échantillons et l'a aidé par de nombreuses suggestions et à Y. ROELANDTS pour son aide dans la mise au point des méthodes chimiques.

BIBLIOGRAPHIE

- BUTLER, J. R. and SKIBA, W., 1962. — Strontium in plagioclase feldspars from four layered basic masses in Somalia. *Min. Mag.* vol., 33, pp. 213-225.
- DUCHESNE, J. C, 1965. — Application de la Spectro-fluorescence X à la géochimie : dosage du Strontium dans les plagioclases. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 88, 1964-65, Bull. 9, pp. 526-541.
- DUCHESNE, J. C, 1966. — Séparation rapide des minéraux des roches. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 89, 1965-66, Bull. 8, pp. 347-356
- DUCHESNE, J. C, 1968. — Le dosage du Sr et du Rb dans les feldspaths et les roches acides. Application à quelques roches standards. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 90, 1966-67, pp. 657-667.
- MICHOT, J., 1960. — La palingénèse basique. *Acad. roy. Belgique, Bull. Clas. Sci.*, vol. 46, 5^e série, t. XLVI, pp. 257-268.
- MICHOT, J., 1961a. — The anorthositic complex of Håland-Helleren. *Norsk Geol. Tidsskr.*, vol. 41, pp. 157-172.
- MICHOT, J., 1961b. — Le massif complexe anorthosito-leuconoritique de Håland-Helleren et la Palingénèse basique. *Mémoires de Acad. roy. Belgique, Olas. Sci.*, 2^e série, t. XV, fasc. 1, pp. 1-116.
- MICHOT, J., 1962. — Composition des plagioclases résiduels et des plagioclases d'origine anatectique élaborés lors du phénomène de palingénèse basique. *Norsk Geol. Tidsskr.*, vol. 42 (Feldspar volume), pp. 467-476.
- MICHOT, J. et MICHOT, P., 1968. — The Problem of the anorthosites : the South Rogaland igneous complex (South Western Norway). *G. H. Hudson Symposium on the origin of anorthosite*. Plattsburg, N. Y., octobre 1966 (à paraître).
- MICHOT, P., 1955. — L'anatexie leuconoritique. *Bull. Acad. Roy. de Belg., Clas. des Sciences*, 5^e sér., t. XLI, pp. 374-385.
- MICHOT, P., 1960. — La géologie de la catazone : le problème des anortho-sites, la palingénèse basique et la tectonique catazonale dans le Rogaland méridional (Norvège méridionale). *Intern. Geol. Congress*, Norden 1960, XXI Session, Guide excursion A9, pp. 1-54.
- MICHOT, P., 1965. — Le magma plagioclasiq. *Geol. Rundschau*, Bd. 54, pp. 956-976.
- MICHOT, P., 1968. — The geological environment of the anorthosites in South Rogaland (Norway). *G. H. Hudson Symposium on the origin of anorthosite*. Plattsburg, N. Y., octobre 1966 (à paraître).
- PAPEZIK, V. S., 1965. — Geochemistry of some Canadian anorthosites. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 29, pp. 673-709.
- SHAW, D. M., 1964. — Interprétation géochimique des éléments en traces dans les roches cristallines. Éd. Masson et Cie, Paris, 237 pages.
- TUREKIAN, K. K. et KULP, L. J., 1956. — The geochemistry of Strontium. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 10, pp. 245 à 296.
- WAGEB, L. R. et MITCHELL, R. L., 1951. — The distribution of trace elements during strong fractionation of basic magma — a further study of the Skaergaard intrusion. East Greenland. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 1, pp. 129-208.