

LA VARIATION DU RAPPORT $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ DANS LES ROCHES GÉNÉTIQUEMENT ASSOCIÉES AU MAGMA PLAGIOCLASIQUE

PREMIERS RÉSULTATS (*)

par JEAN MICHOT (**) et PAUL PASTEELS (***)

(2 figures et 2 tableaux)

SUMMARY

Determinations of $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ in representative rocks of different units of the igneous, mainly anorthositic, complex of South Rogaland and its gneissic cover yield the following indications.

1. The anorthositic core of the Egersund-Ogna massif (considered as magmatic) is characterized by a low initial ratio (0,704-0,705) indicative of a mantle derivation without or with very little crustal contamination. The leuconoritic gneissic border of the same massif has however higher ratios.
2. The first (anorthosito-noritic) and second (monzonoritic) phases of the Bjerkrem-Sogndal lopolith are characterized by a higher ratio (0,707) in accordance with the assumed origin, by crustal contamination, of the plagioclasic magma.
3. Still higher ratios (0,711-0,713) are observed in the third (mangeritic) phase of the same massif, apparently pointing to a still higher contamination at this stage. The values observed may even be little different from that of the average wall gneiss. The data relative to these last rocks are still too scarce to allow the verification of that point.
4. The anatectic leuconorite, and paraanatectic anorthosite of the Haaland-Helleren massif, formed at the expense of the border of Egersund-Ogna and the first phase of Bjerkrem-Sogndal, have initial ratios in accordance to their accepted origin.

1. Introduction

Le domaine précambrien qui forme l'extrémité méridionale de la Norvège, comprend dans sa partie sud-ouest, dans le Rogaland méridional, un complexe éruptif anorthosito-norito-mangéritique (P. Michot, 1960a ; J. Michot, 1961 ; J. Michot et P. Michot, 1967) entouré d'un ensemble de gneiss métasédimentaires de type essentiellement charnockitique (P. Michot, 1960a ; J. Michot et P. Pasteels, 1968).

Ce complexe éruptif intrusif dans la partie inférieure de la couverture gneissique, s'étale sur plus de 2.000 Km². Il se compose principalement de roches anorthositiques,

(*) Ce travail a été réalisé dans le cadre des activités du Centre Belge de Géochronologie dont font partie les Laboratoires de Géologie et Géochimie Nucléaires et de Minéralogie et Pétrologie de l'Université de Bruxelles, et le Département de Géologie et Minéralogie du Musée Royal de l'Afrique Centrale. Il a été présenté à la séance du 29 avril 1969 de la Société géologique de Belgique et le manuscrit a été déposé le 13 mai 1969.

(**) Laboratoires de Minéralogie et de Pétrologie, Université Libre de Bruxelles.

(***) Chargé de Recherches du Fonds National de la Recherche Scientifique. Laboratoire de Minéralogie et de Pétrologie, 50, avenue F.-D. Roosevelt, Bruxelles 5.

leuconoritiques et noritiques, auxquelles sont associées en moins grande quantité des monzonites, des monzonorites et des mangérites quartziques ou non.

Bien que remanié plus ou moins fortement par endroits par des actions de caractère dynamométamorphique, migmatitique ou anatectique, le complexe éruptif apparaît essentiellement composé de trois unités qui sont dans l'ordre chronologique (Fig. 1) :

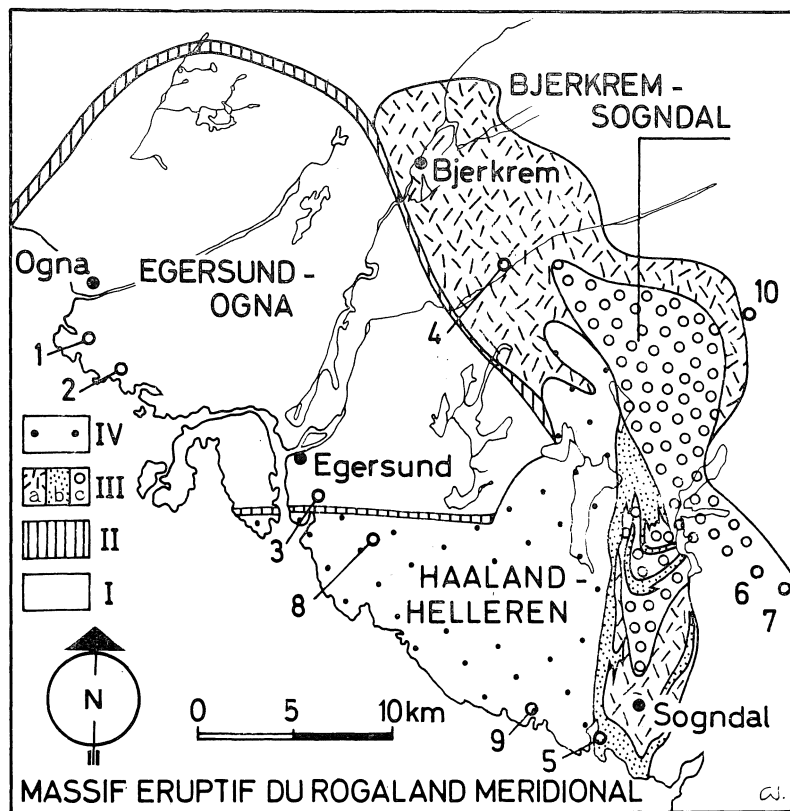


Fig. 1. — Le massif éruptif du Rogaland méridional (d'après P. MICHOT, 1960a).

- I. Le massif anorthositique d'Egersund-Ogna
- II. L'intrusion noritique du Lakssvelefjeld-Koldal
- III. Le massif de Bjerkrem-Sogndal
- IV. Le massif complexe anatectique d'Haaland-Helleren

1. — Le massif anorthositique d'Egersund-Ogna
2. — L'intrusion noritique du Lakssvelefjeld-Koldal
3. — Le massif de Bjerkrem-Sogndal

La première de ces unités est constituée d'anorthosite typique, grossièrement grenue, ne renfermant que de très faibles quantités de minéraux ferromagnésiens ; elle se présente sous la forme d'un large dôme dont la bordure, ultérieurement gneissifiée, s'enrichit en hypersthène et acquiert progressivement la composition leuconoritique, voire localement noritique.

La seconde est injectée suivant la surface de décollement séparant le massif anorthositique d'Egersund-Ogna d'une part et les gneiss de la couverture d'autre part ; initialement composée d'une norite fine équigranulaire, elle forme à présent une intercalation, de quelques centaines de mètres d'épaisseur, migmatitisée dans sa quasi totalité.

La troisième unité, la plus jeune (P. Michot, 1960a, 1960b ; J. Michot et P. Pasteels, 1968), réunit, sous l'aspect d'un lopolithe, une série de roches résultant d'une différenciation magmatique plus ou moins régulière dont la phase initiale est représentée par des roches surtout leuconoritiques, localement anorthositiques et dont les phases ultérieures comprennent successivement des roches de caractère monzonoritique, puis mangéritique et finalement mangéritique quartzique.

L'origine magmatique de ces trois unités a été suffisamment envisagée dans les travaux antérieurs (P. Michot, 1960a, 1960b, 1965a, 1965b) pour qu'il soit permis ici de ne pas en reprendre la démonstration. L'étude pétrologique qui en a été faite, a montré très clairement, qu'à l'inverse de la séquence des cristallisations que l'on peut observer dans les masses dérivant de l'évolution du magma basaltique normal, dont les premiers produits sont surtout constitués d'olivine et/ou de pyroxènes, les unités éruptives du Rogaland méridional révèlent toujours l'antériorité de formation du plagioclase par rapport aux minéraux ferromagnésiens, de même que la consolidation première des masses anorthositiques par rapport aux différenciés enrichis en minéraux foncés. Ainsi est née la conception que les magmas dont étaient issues les unités éruptives du Rogaland devaient être « caractérisés par un chimisme tel que le plagioclase s'y trouve suivant une proportion supérieure à l'eutectique plagioclase-minéraux ferromagnésiens (hypersthène) » (P. Michot, 1960b, p. 100).

C'est ce type de magma, résultat d'une fusion syntectique réalisée entre le matériau basaltique océanique et un matériau pélitique à arkosique dépendant de la couverture sédimentaire le surmontant, que P. Michot a proposé de désigner sous le nom de *magma plagioclasique* (P. Michot, 1960b, 1965a, 1965b). Dans le Rogaland méridional, il serait à l'origine de la formation des grandes masses anorthositiques constituant le tréfonds basique d'un segment orogénique qui dans l'hypothèse de l'accroissement latéral des continents, représenterait « à l'origine un domaine typiquement océanique, transformé en matériau typiquement continental à la faveur d'une orogénèse particulièrement intense » (P. Michot, 1965a, p. 59) imprimée sur un géosynclinal développé directement sur le fond océanique basaltique.

C'est cette conception et l'hypothèse qui en découle que nous nous sommes efforcés de confronter avec une étude du rapport ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ des roches concernées.

2. Signification génétique du rapport ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀

Le Strontium est un élément qui peut servir de traceur dans l'étude des processus pétrogénétiques qui ont présidé à la constitution de la croûte terrestre. En effet, des quatre isotopes du strontium, seul le ^{87}Sr est produit par désintégration radioactive à partir du ^{87}Rb dont la demi-vie est d'environ 5.10^{10} ans. Suivant leur rapport Rb/Sr et l'âge du phénomène envisagé, on observe ainsi dans les matériaux terrestres des variations très sensibles de la proportion du ^{87}Sr par rapport aux autres isotopes de cet élément (^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{88}Sr) non radiogéniques dans leur totalité. Conventionnellement, on exprime la variation de cette proportion par le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Dans les matériaux qui depuis l'origine du système solaire ont un rapport Rb/Sr extrêmement faible (certaines météorites) le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, conservé vraisemblablement tel quel depuis la nucléosynthèse, est de $0,698 \pm 0,01$.

Dans les matériaux terrestres on observe, par contre, des rapports plus élevés correspondant aux diverses valeurs du rapport Rb/Sr qui les caractérise et à l'accumulation au cours du temps de ^{87}Sr radiogénique.

On constate ainsi que les produits considérés comme provenant du manteau supérieur, de rapport Rb/Sr très faible lui aussi, se caractérisent actuellement par un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ compris entre 0,700 et 0,704 (basalte tholéitique océanique) (M. Tatsumoto, C. E. Hedge and A. E. J. Engel, 1965 ; C. E. Hedge, 1966). D'un autre côté, dans les produits dont l'origine se situe au sein même de l'écorce terrestre, enrichie en Rb par rapport au Sr dès les premières phases de sa constitution, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est sensiblement plus élevé, le plus souvent supérieur à 0,710 (Tableau I).

TABLEAU I

Rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans divers types de roche, à l'heure actuelle ()*

	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Basalte océanique tholéitique	0,702-0,703
Basalte océanique alcalin	0,702-0,705
Basalte continental	0,703-0,707
Calcaires très anciens (âgés de 3.000 m.a.)	0,700
Calcaires actuels, eau de mer	0,709
Schistes, pélites	0,704-0,739
Grauwackes en milieu eugéosynclinal	0,704-0,708
Granites	idem, ou plus élevé
Roches ultrabasiqes	0,704-0,713

Dans le cadre des études pétrogénétiques, la valeur du rapport à prendre en considération est celle qui caractérise le milieu géochimique au moment de la constitution de l'unité lithologique examinée. C'est cette valeur du rapport que l'on désigne comme « rapport à l'origine » ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀. C'est dès lors sur ce dernier que l'on se basera pour postuler l'origine crustale ou sous-crustale d'un complexe géologique déterminé et qu'en général on s'appuyera pour élaborer les hypothèses relatives à la formation des masses continentales et à leur accroissement éventuel.

C'est ainsi que Hurley et al (1962), défendant l'idée de l'adjonction d'un nouveau segment de l'écorce continentale en bordure des masses cratoniques, à l'occasion de chaque période orogénique importante, ont crû pouvoir expliquer sa constitution comme résultant essentiellement d'une différenciation d'un matériau neuf issu du manteau, sans nécessairement devoir envisager une contribution importante en éléments sialiques provenant de l'érosion des blocs continentaux voisins. Bien que, comme il l'a été souligné (J. Michot et P. Michot, 1967), cette interprétation soit excessive dans ses conclusions et ne tienne pas suffisamment compte des faits géologiques connus actuellement, elle a eu le mérite de poser le problème dans ses grandes lignes. En effet, depuis lors, plusieurs travaux ont contribué à apporter

(*) Compilation due à R. L. Armstrong (1968), complétée par des données extraites de P. M. Hurley (1967) et Z. E. Petermann et al. (1967).

des éléments nouveaux à ce sujet (K. S. Heier, 1964 ; A. M. Stueber et V. Rama Murthy, 1966 ; Z. E. Peterman et al., 1967 ; R. L. Armstrong, 1968), dont la synthèse apparaît sur le diagramme de la figure 2. Les flèches y indiquent les contributions, à l'élaboration de la croûte terrestre, océanique ou continentale, de chacune des zones composant la partie supérieure du globe. Les valeurs du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ s'y trouvent également figurées pour chacun des ensembles représentés.

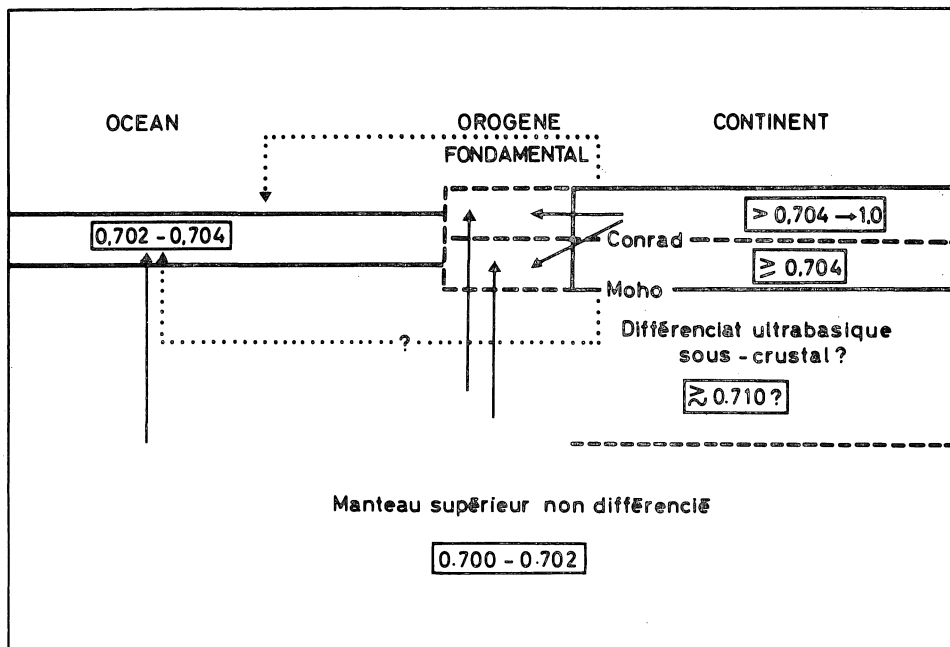


Fig. 2. — Diagramme synthétisant les différentes hypothèses relatives à l'élaboration de la croûte terrestre, océanique ou continentale (voir texte).

Les éléments les plus hypothétiques de ce schéma sont les suivants :

- l'existence sous les masses continentales d'une zone ultrabasique à rapport ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) relativement élevé, (A. M. Stueber et V. R. Murthy, 1966), zone qui se serait constituée très tôt dans l'évolution du globe.
- la contamination du manteau supérieur par du matériau sialique (R. L. Armstrong, 1968), le tout, au même titre que les produits du manteau indifférencié, contribuant à la formation de la croûte océanique.

Si l'on s'en réfère à la conception de P. Michot, basée sur des études en Norvège méridionale, le processus d'accroissement latéral de la croûte continentale par l'adjonction d'un nouveau segment orogénique (hachuré) impliquerait, dans les parties inférieures de ce segment, la formation d'un magma plagioclasiqque résultant d'un mélange de produits sialiques typiques et de produits issus du manteau. Le rapport ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ de ce magma et par conséquent celui des roches qui en découlent,

en particulier des anorthosites, devrait donc refléter l'origine hybride envisagée. C'est dans ce but que nous avons sélectionné une dizaine d'échantillons prélevés à différents endroits du complexe éruptif du Rogaland (Fig. 1).

3. Mesures du rapport ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ sur les roches génétiquement associées au magma plagioclasique

Parmi les échantillons étudiés, trois proviennent du massif anorthositique d'Egersund-Ogna et quatre du massif lopolithique de Bjerkrem-Sogndal. Deux échantillons ont été récoltés dans le massif anorthosito-leuconoritique de Haaland-Helleren, massif d'origine anatectique développé dans une portion du volume occupé antérieurement par les deux massifs précédents (J. Michot, 1961).

En outre, de façon à matérialiser, pour la région considérée, la valeur du rapport ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ des ensembles gneissiques dont l'assimilation aurait été à la base de la modification du chimisme du magma sous-crustal, deux échantillons représentant des gneiss acides ont également été prélevés.

Les mesures réalisées sur ces différents échantillons sont consignées dans le tableau II. L'étude de ce tableau permet de voir, bien que les résultats soient encore peu nombreux, qu'il existe des différences entre les rapports ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ déterminés dans le massif d'Egersund-Ogna d'une part, et dans le massif de Bjerkrem-Sogndal d'autre part.

En outre, au sein de ces massifs, il semble que l'on doive distinguer :

- pour le premier (Egersund-Ogna), la partie centrale anorthositique de sa bordure leuconoritique,
- pour le second (Bjerkrem-Sogndal), les phases I et II, anorthosito-noritique et monzonoritique, de la phase III, mangéritique.

Quant aux roches provenant du massif anatectique de Haaland-Helleren, elles montrent une valeur du rapport compatible avec leur origine, la première correspondant à un remaniement de la bordure du massif d'Egersund-Ogna, les deux autres provenant d'un ensemble dont les matériaux originels constituaient vraisemblablement en grande partie la base (phase I) du massif de Bjerkrem-Sogndal.

En ce qui concerne les mesures effectuées sur les roches gneissiques de la couverture, les deux seules valeurs que nous avons obtenues jusqu'à présent, témoignent d'une hétérogénéité qui ne permet pas, pour l'instant, de proposer une valeur moyenne pour l'ensemble métasédimentaire. Cependant, on peut considérer qu'en gros ces valeurs sont relativement élevées.

Compte tenu du caractère préliminaire de nos résultats, les conclusions qui peuvent être dégagées sur le plan pétrogénétique sont les suivantes :

1. Il semble que la contribution de matériaux sialiques à la formation du magma qui a donné naissance à la masse anorthositique d'Egersund-Ogna, soit faible ou nulle. Signalons que la même constatation a été faite pour d'autres massifs anorthositiques, ce qui a amené Heath (1967) à considérer une dérivation exclusivement sous-crustale.
2. Par contre la bordure du massif d'Egersund-Ogna présente des indices de contamination.
3. Cette contamination par des matériaux du sial est également perceptible pour les phases I et II du massif de Bjerkrem-Sogndal.

TABLEAU II — *Rapports (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₀ de roches du Rogaland méridional*

Unité géologique	Nature de la roche	Réf. Éch.	Minéral (1)	Rb ppm	Sr ppm (2)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) ₀ (3)
Massif anorthositique d'Egersund-Ogna, partie centrale idem partie externe	Anorthosite	L	RT	8,3	867	0,7052	0,7048
	Anorthosite	C ₂	RT	3,8	837	0,7040	0,7038
	Leuconorite gneissique	No 292/65	P1	3,6	(700 ± 250)	{ 0,7087 0,7096	{ 0,7085 0,7094
Massif de Bjerkrem- Sogndal	Norite (phase I)	Pa 66/3	P1	2,1	(1200 ± 200)	0,7073	0,7072
	Monzonorite (phase II)	Pa 66/0	Ap	n.m.	n.m.	0,7068	0,7068
	Mangérite (phase III)	Pa 66/N	Ap	n.m.	n.m.	0,7148	0,7148
	Mangérite gneissique (phase III)	Pa 66/M	Ap	0,9	n.m.	0,7118	0,7118
Massif anactectique d'Haaland-Helleren	Leuconorite gneissique Haaland	89	P1	7,7	(850 ± 150)	0,7067	0,7063
	Anorthosite grossière Helleren	No 291/65	P1	2,6	(850 ± 150)	0,7061	0,7060
	Idem	MIT 6129 (4)	RT	< 5 (4)	990 (4)	0,7056 (4)	0,7056 (4)
Couverture gneissique	Gneiss ceillé	Pa 66/L	Ap	0,6	n.m.	0,7059	0,7059
	Gneiss granitique fin	Pa 66/K	Ap	1,1	n.m.	{ 0,7210 0,7193	{ 0,7210 0,7193

(1) RT : Roche traitée dans sa totalité, Pl : plagioclase, Ap : apatite.

(2) Entre parenthèses, moyenne et marge de variation des teneurs en strontium pour l'unité considérée, d'après J. C. DUCHESNE (1968). Ces données approximatives permettent de déduire (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₀ à partir de (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) sans dosage du strontium.

(3) Déduit de ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr à partir de la teneur en Rb, en Sr, en admettant un âge de 1000 M.A. Pour les apatites, on peut admettre ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₀, étant donné les très faibles teneurs en Rb mesurées.

(4) Mesure du Massachusetts Institute of Technology (S. A. Heath, 1967).

Toutes les données figurant dans ce tableau ont été, après normalisation pour un rapport ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0,1194, alignées conventionnellement à la valeur de 0,7080 pour le standard Eimer and Amend du M.I.T. La précision expérimentale, sur la base de mesures répétées sur ce standard, est estimée à ± 0,001.

4. Dans l'optique de la filiation entre les phases I, II, III de ce massif, elle est particulièrement importante dans la dernière phase individualisée. Le lopolithe de Bjerkrem-Sogndal ne peut dès lors être envisagé comme produit d'une différenciation d'un magma basique normal. Une contamination par des matériaux crustaux a dû se produire antérieurement à cette différenciation et même se répéter au cours de celle-ci, en particulier, au stade représenté par la phase III.

Remarquons cependant que le rapport $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ de la phase mangéritique de Bjerkrem-Sogndal pourrait très bien ne pas se distinguer de celui de certains gneiss de la couverture.

En conclusion, si l'hypothèse de l'existence du magma plagioclasique, produit d'une contamination sial-sima, semble être applicable dans le cas du massif de Bjerkrem-Sogndal, elle ne paraît pas pouvoir être extrapolée au cas du massif d'Egersund-Ogna, du moins pour sa partie centrale anorthositique.

BIBLIOGRAPHIE

- ARMSTRONG, R. L., 1968. — A model for the evolution of strontium and lead isotopes in a dynamic earth. *Rev. Geophys.*, vol. 6/2, pp. 175-199.
- DUCHESNE, J. C., 1967. — Les relations Sr-Ca et Ba-K dans les plagioclases des anorthosites du Rogaland méridional. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 90, pp. B 643-656.
- HEATH, S. A., 1967. — $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ ratios in anorthosites and some associated rocks. *Progress report M.I.T.*, Déc. 1967, pp. 65-68.
- HEDGE, C. E., 1966. — Variations in radiogenic strontium found in volcanic rocks. *J. Geophys. Res.*, vol. 71, pp. 6119-6126.
- HEIER, K. S., 1964. — Rubidium/strontium and strontium 87/strontium 86 ratios in deep crustal material. *Nature*, vol. 202, p. 477.
- HURLEY, P. M., HUGHES, H., FAURE, G., FAIRBAIRN, H. W. and PINSON, W. H., 1962. — Radiogenic strontium-87 model of continent formation. *J. Geophys. Res.*, vol. 67, pp. 5315-5334.
- HURLEY, P. M., 1967. — Rb- $^{87}\text{Sr}^{87}$ relationships in the differentiation of the mantle. Ultramafic and related rocks. P. J. Wyllie, Ed., Wiley, p. 372.
- MICHOT, J., 1961. — Le massif complexe anorthosito-leuconoritique de Haaland-Helleren et la palinogénèse basique. *Mém. Acad. roy. de Belgique, Cl. des Sc.*, coll. in-4^o, 2^e sér., t. XV, fasc. 1, pp. 1-116.
- MICHOT, J. et MICHOT, P., 1967. — The problem of anorthosites : the South-Rogaland anorthosito-noritic complex (South-Western Norway). *Symposium on the Origin of Anorthosite, Plattsburgh 1966* (à paraître).
- MICHOT, J. et PASTEELS, P., 1968. — Étude géochronologique du domaine métamorphique du sud-ouest de la Norvège (note préliminaire). — *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 91, fasc. 1, pp. 93-110.
- MICHOT, P., 1960a. — La géologie de la catazone : le problème des anorthosites, la palinogénèse basique et la tectonique catazonale dans le Rogaland méridional (Norvège méridionale). — *Int. Géol. Congr.*, Norden 1960, XXI session, guide excursion A9, pp. 1-54.
- MICHOT, P., 1960b. — Le problème des intrusions marginales. *Geol. Rundschau*, Bd. 50, pp. 94-105.
- MICHOT, P., 1965a. — Les orogènes fondamentaux. *Freiberg Forschungshefte*, Hf C 190, pp. 49-62.
- MICHOT, P., 1965b. — Le magma plagioclasique. *Geol. Rundschau*, Bd. 54, pp. 956-976.
- PETERMAN, Z. E., HEDGE, C. E., COLEMAN, R. G. and SNAVELY, P. D., 1967. — $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in some eugeosynclinal sedimentary rocks and their bearing on the origin of granitic magma in orogenic belts. *Earth Planet. Sc. Letters*, vol. 2, pp. 433-439.
- STUEBER, A. M. and MURTHY, V. R., 1966. — Strontium isotope and alkali element abundances in ultramorphic rocks. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 30, pp. 1243-1259.
- TATSUMOTO, M., HEDGE, C. E. and ENGEL, A. E. J., 1965. — Potassium, rubidium, strontium, thorium, uranium and the ratio strontium-87 to strontium-86 in oceanic tholeiitic basalt. *Science*, vol. 150, p. 886.