

LE RAPPORT Sr/Ca DANS LES PLAGIOCLASES DU MASSIF DE BJERKREM–SOGNDAL (NORVEGE MERIDIONALE) ET SON ÉVOLUTION DANS LA CRISTALLISATION FRACTIONNEE DU MAGMA PLAGIOCLASIQUE

J.C. DUCHESNE

Laboratoire de Géologie, Pétrologie et Géochimie, Université de Liège (Belgique).

(Reçu le 7 juillet, 1971)

ABSTRACT

Duchesne, J.C., 1971. Le rapport Sr/Ca dans les plagioclases du massif de Bjerkrem–Sogndal (Norvège méridionale) et son évolution dans la cristallisation fractionnée du magma plagioclasiq. (Sr/Ca ratio in plagioclases from the Bjerkrem–Sogndal massif (southwest Norway) and its evolution in fractional crystallisation of plagioclasic magma). *Chem. Geol.*, 8: 123–130.

The igneous layered lopolith of Bjerkrem–Sogndal is made up of cumulates of the anorthosite–mangerite suite and results from gravity differentiation of the plagioclasic magma. The evolution of the Sr/Ca ratio in plagioclases shows that: (1) the Sr/Ca ratio decreases with Ca in the lower part of the body, in which plagioclase and orthopyroxene are the only silicate minerals; (2) the trend is reversed higher in the body in clinopyroxene- and apatite-bearing rocks; (3) still higher in the sequence, appearance of the potassium feldspar brings about a new reversal in the trend. The behavior in the lower part of the body shows that the partition coefficient for Sr/Ca between plagioclase and liquid ($D_{Pl}^{Sr/Ca}$) is higher than unity. This conclusion, on the other hand, is confirmed through direct measurement of the phenocryst-matrix partition coefficient in a porphyritic anorthosite from the same igneous province. Values of $D^{Sr/Ca}$ for other minerals are estimated and their control upon the Sr/Ca evolution discussed.

RÉSUMÉ

Le massif de Bjerkrem–Sogndal est un lopolithe stratiforme constitué par des accumulites de la série anorthosite–mangérite et formé par différenciation du magma plagioclasiq. L'évolution du rapport Sr/Ca dans les plagioclases présente les caractères suivants: (1) le rapport Sr/Ca diminue avec le Ca dans la partie inférieure du massif où plagioclase et orthopyroxène sont les seuls constituants silicatés des roches; (2) cette tendance s'inverse plus haut dans le massif, dans des roches où clinopyroxène et apatite sont présents; (3) plus haut encore, l'apparition du feldspath potassique détermine un retour à la tendance initiale. Le comportement dans la partie inférieure du massif montre que $D_{Pl}^{Sr/Ca}$ est > 1 . Cette déduction est par ailleurs confirmée par la mesure de la distribution du Sr et Ca entre phénocristaux et matrice dans un facies porphyrique d'une anorthosite de la même province magmatique. Les valeurs de $D^{Sr/Ca}$ des autres minéraux sont évaluées et leur influence relative sur l'évolution du Sr/Ca est examinée.

INTRODUCTION

Lorsqu'il s'agit de déterminer lequel de deux éléments chimiques diadochiques tend à occuper préférentiellement un site dans un minéral, il est classique d'étudier l'évolution de

ces deux éléments dans ces excellents exemples de différenciation magmatique que sont les intrusions stratiformes. Plusieurs auteurs (Brooks, 1968; Berlin et Henderson, 1968) ont cependant fait très judicieusement remarquer que, dans un minéral déterminé de ces séries de roches, l'augmentation du rapport X/Y avec la progression de la différenciation ne signifie pas nécessairement que l'élément Y entre préférentiellement à l'élément X dans ce minéral.

Un exemple très typique est fourni par l'évolution du rapport Sr/Ca dans les magmas basaltiques. Dans les massifs stratiformes du Skaergaard (Wager et Mitchell, 1951; Brooks, 1968), du Stillwater (Turekian et Kulp, 1956) et de Somalie (Butler et Skiba, 1962), le Sr varie en sens inverse du Ca. Le rapport Sr/Ca augmente donc dans la cristallisation fractionnée. En d'autres termes, le coefficient de partage du rapport Sr/Ca entre l'ensemble des phases solides et le liquide en équilibre avec elles ($D_{\text{tot}}^{\text{Sr/Ca}}$) garde constamment une valeur inférieure à l'unité.

Ce coefficient vaut:

$$D_{\text{tot}}^{\text{Sr/Ca}} = \frac{(\text{Sr/Ca})_S}{(\text{Sr/Ca})_L} = \sum D_i^{\text{Sr/Ca}} X_i \frac{\text{Ca}_i}{\text{Ca}_{\text{tot}}} \quad (1)$$

et dépend ainsi des coefficients de partage $D_i^{\text{Sr/Ca}}$ entre les différents minéraux i et le liquide, ainsi que des proportions des différents minéraux X_i et de leur teneurs relatives en Ca par rapport à la teneur totale de la roche.

Il est par conséquent légitime de concevoir que si un minéral – par exemple le plagioclase – avait un $D_{\text{pl}}^{\text{Sr/Ca}} > 1$, la cristallisation simultanée d'une quantité suffisante d'un autre minéral suffisamment riche en Ca et pauvre en Sr pour que son $D^{\text{Sr/Ca}}$ soit inférieur à l'unité, puisse annuler ou même inverser la tendance déterminée par le plagioclase en conférant au $D_{\text{tot}}^{\text{Sr/Ca}}$ une valeur < 1 .

On en arriverait ainsi à une situation apparemment paradoxale où le Sr s'enrichirait par rapport au Ca dans les liquides résiduels alors qu'il est incorporé préférentiellement au Ca dans le plagioclase, phase pourtant la plus riche en Sr et dont la soustraction continue est déterminante dans l'évolution fractionnée des liquides.

Une telle situation dans laquelle la précipitation d'une augite joue un rôle dominant est cependant admise (Berlin et Henderson, 1968; Brooks, 1968) pour expliquer l'augmentation du rapport Sr/Ca dans les cumulats gabbroïques, formés à partir des magmas basaltiques.

À l'appui de cette hypothèse, on doit faire état des mesures et des estimations directes de $D_{\text{pl}}^{\text{Sr/Ca}}$ qui donnent des valeurs > 1 . Ces estimations sont néanmoins peu nombreuses et leurs valeurs assez dispersées. De plus, comme l'ont rappelé Philpotts et Schnetzler (1970), elles ne peuvent pas être adoptées sans certaines restrictions, la principale étant que les méthodes de mesures employées postulent l'existence problématique d'un équilibre complet entre les (phéno)cristaux et la mésostase..

La présente note confirme les estimations précédentes du $D_{\text{pl}}^{\text{Sr/Ca}}$ notamment par l'examen de l'évolution du rapport Sr/Ca dans une différenciation magmatique où, durant une partie de l'évolution, le plagioclase coprécipite avec un orthopyroxène, minéral pauvre en Sr et en Ca. En outre, l'incidence sur cette évolution de l'apparition du clinopyroxène, de l'apatite et du feldspath potassique est aussi étudiée. Une valeur de $D_{\text{pl}}^{\text{Sr/Ca}}$ est enfin proposée sur la base d'une mesure de distribution entre phénocristaux et mésostase dans les conditions de pression et de température caractérisant les roches de la série anorthositique

LE MASSIF DE BJERKREM-SOGNDAL

Une série continue de roches allant depuis des anorthosites jusqu'à des mangérites constitue le massif de Bjerkrem-Sogndal (Région d'Egersund-Rogaland, Norvège) (Michot, 1960, 1964, 1970) qui se présente comme un lopolithe syncinématique stratiforme et s'est formé par différenciation par gravité du magma plagioclasiqne défini par Michot (1955).

Dans sa partie inférieure, les roches sont des anorthosites passant vers le haut à des leuconorites puis à des norites rubanées. La différenciation y présente un caractère récurrent (Duchesne, 1970, 1971) s'exprimant par la superposition de cinq rythmes majeurs (Michot, 1960, 1964, 1970). Cet ensemble passe ensuite vers le haut à des monzonorites auxquelles succèdent des mangérites puis des mangérites quartziques, qui forment la partie supérieure du massif. L'évolution schématique (Michot, 1964; Duchesne, 1969) de l'association minéralogique est la suivante: dans les anorthosites, les leuconorites et la partie inférieure des norites, un plagioclase (andésine basique) coexiste avec un orthopyroxène; dans la partie supérieure des norites, apparaissent le clinopyroxène et l'apatite; ensuite, le plagioclase devient une antiperthite, le feldspath potassique apparaît et sa quantité augmente progressivement, les roches passant ainsi à des monzonorites. Une olivine ferreuse commence à cristalliser dans les roches de cette transition. Plus haut, dans le massif, l'association des deux feldspaths fait place à un feldspath unique, mésoperthitique. Ces roches ne seront pas envisagées ici. Signalons que des oxydes de Fe et Ti sont présents dans toutes les roches du massif (Duchesne, 1971).

EVOLUTION DU RAPPORT Sr/Ca

L'évolution du Sr et du Ca dans les plagioclases du massif de Bjerkrem-Sogndal est donnée à la Fig. 1, qui rassemble des résultats acquis précédemment (Duchesne, 1968) ainsi que quelques données nouvelles.

La tendance générale est schématisée par une ligne brisée passant par les points 1 à 4 dont les coordonnées sont données au Tableau I.

TABLEAU I

Représentation schématique de l'évolution du Sr/Ca en fonction du Ca

Point	Ca (%)	Sr/Ca ($\times 10^3$)
1	7.12	16.4
2	6.08	14.1
3	4.82	31.9
4	4.25	27.0

La fonction liant Sr/Ca montre donc deux points d'inflexion. Ceux-ci apparaissent liés dans l'évolution minéralogique à l'apparition de minéraux additionnels. Après avoir diminué dans les roches de la partie inférieure du massif, où plagioclase et orthopyroxène sont les seuls silicates, le rapport montre une augmentation très nette dans les roches qui contiennent

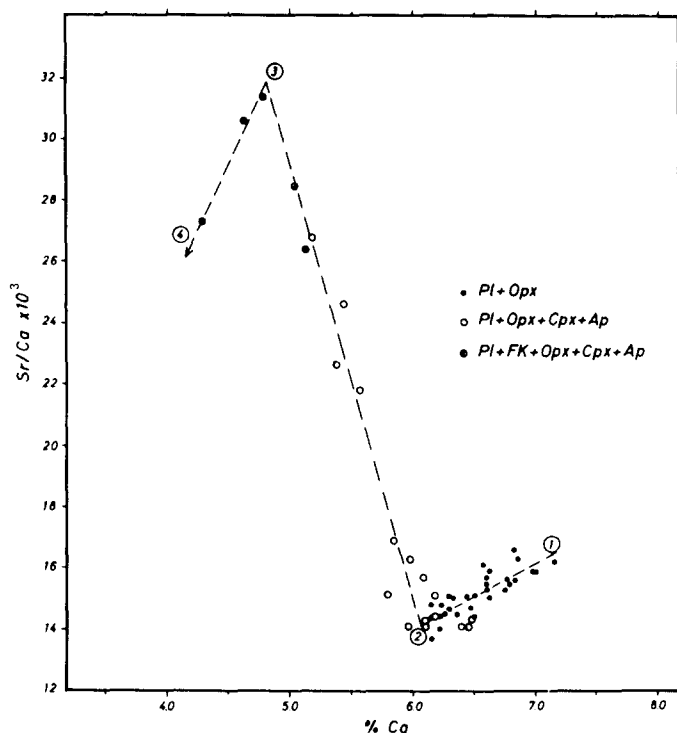


Fig. 1. Relation entre le rapport Sr/Ca et le Ca dans les plagioclases du massif de Bjerkrem–Sogndal. Les symboles utilisés ont trait à l'association des minéraux silicatés des différentes roches. Légende: Pl = plagioclase; Opx = orthopyroxène; Cpx = clinopyroxène; Ap = apatite; FK = feldspath potassique.

Fig. 1. Relationship between Sr/Ca and Ca in plagioclases from the Bjerkrem–Sogndal massif. Symbols used concern the association of silicate minerals in the different rocks. Legend: Pl = plagioclase; Opx = orthopyroxene; Cpx = clinopyroxene; Ap = apatite; FK = potassium feldspar.

en outre le clinopyroxène et l'apatite comme minéraux d'accumulation. Ensuite la tendance s'inverse et le rapport diminue dans les roches où le feldspath potassique coexiste avec le plagioclase.

Il faut préciser que l'apparition de ces minéraux précède légèrement les changements de la relation qu'ils déterminent. Ceci peut s'expliquer par le caractère progressif de l'augmentation de leur proportion, ce qui détermine une modification également progressive de la valeur de $D_{\text{tot}}^{\text{Sr/Ca}}$ (voir plus loin). Comme l'orthopyroxène est pauvre en Ca et en Sr (Tableau III), son influence sur le $D_{\text{tot}}^{\text{Sr/Ca}}$ peut être négligée. La décroissance du rapport Sr/Ca dans les roches de la partie inférieure du massif est donc une conséquence de la diminution du rapport Sr/Ca du plagioclase. Selon la loi de Rayleigh, développée notamment par Neumann et al. (1954) et Ryabchikov (1960), cette diminution dans la cristallisation fractionnée implique que la valeur du coefficient de partage $D_{\text{Pl}}^{\text{Sr/Ca}}$ soit supérieure à l'unité.

COEFFICIENT DE PARTAGE ENTRE PHÉNOCRISTAUX ET MÉSOSTASE

Le massif anorthositique de Hidra (Barth, 1960), localisé à la bordure sud-est du complexe éruptif du Rogaland, présente localement au contact avec son enveloppe de mangérites gneissiques un faciès porphyrique: des phénocristaux de plagioclase de 3 à 4 cm sont emballés dans une mésostase de composition noritique à grains plus fins (600 μm). Les relations de terrain * montrent une transition continue entre cette roche et l'anorthosite grossière qui constitue la masse centrale du massif. Cette dernière peut donc s'interpréter comme résultant de la solidification relativement rapide d'un liquide magmatique transportant des phénocristaux de plagioclase. Ceux-ci, parfaitement frais et non zonés, ne présentent ni corrosion ni bordure de réaction à leur contact avec la mésostase. Rien ne permet donc d'infirmer l'existence d'un équilibre entre ces phénocristaux et la matrice.

TABLEAU II

Partage de Sr et Ca entre phénocristaux et mésostase

	Sr (p.p.m.)	Ca (%)	Sr/Ca ($\times 10^3$)	$D_{\text{Pl}}^{\text{Sr}}$	$D_{\text{Pl}}^{\text{Sr/Ca}}$
Phénocristaux	770	6.40	12.0	} 1.71	1.38
Mésostase	450	5.16	8.7		

Les teneurs en Sr et Ca et les valeurs des différents coefficients de partage qui en découlent sont rapportées au Tableau II. $D_{\text{Pl}}^{\text{Sr}}$ est en bon accord avec les valeurs s'étendant de 1.27 à 2.84 rapportées par Philpotts et Schnetzler (1970); toutefois, à égalité de teneurs en Ca du plagioclase, notre valeur est plus basse. $D_{\text{Pl}}^{\text{Sr/Ca}}$ est ici légèrement plus bas que les valeurs (1.5 à 1.8) de Berlin et Henderson (1968) et que la valeur de 1.8 proposée par Brooks (1968). Des mesures supplémentaires seront cependant nécessaires pour établir si cette différence est significative et si elle peut être attribuée aux conditions d'environnement particulières aux anorthosites.

Mises à part ces légères différences et la question de leur origine, le fait significatif que ces mesures apportent est la confirmation de valeurs supérieures à l'unité pour $D_{\text{Pl}}^{\text{Sr}}$ et $D_{\text{Pl}}^{\text{Sr/Ca}}$.

DISTRIBUTION DU Sr ET DU Ca ENTRE MINÉRAUX

Les teneurs en Sr et en Ca des minéraux constituant une accumulite noritique à diopside et apatite du massif Bjerkrem—Sogndal ont été mesurées (Tableau III). Les valeurs $D_{\text{Pl}}^{\text{Sr}}$ et $D_{\text{Pl}}^{\text{Sr/Ca}}$ du Tableau II permettent de calculer les teneurs en Sr et Ca du liquide magmatique originellement en équilibre avec l'ensemble de ces phases et, de là, les valeurs D^{Sr} et $D^{\text{Sr/Ca}}$ propres à chaque minéral.

* Ces observations de terrain ont été faites en collaboration avec les Professeurs J. Michot et P. Pasteels (Université libre de Bruxelles et Vrije Universiteit Brussel) que nous remercions d'en autoriser l'utilisation.

TABLEAU III

Répartition de Sr et Ca dans les minéraux silicatés d'une norite

	Sr (p.p.m.)	Ca (%)	Sr/Ca ($\times 10^3$)	D_1^{Sr}	$D_1^{\text{Sr/Ca}}$
Plagioclase	950	6.28	15.1	1.71	1.38
Clinopyroxène	32	15.5	0.20	0.058	0.018
Apatite	390	39.4 *	0.99	0.70	0.09
Orthopyroxène	< 10	0.76	< 1.4	< 0.018	< 0.13

* Calculée en supposant un minéral stoechiométrique. Pour les autres teneurs en Ca et Sr, voir annexe.

Les faibles teneurs du Sr dans le clinopyroxène confirment * que la substitution Sr--Ca est plus difficile dans ce minéral que dans le plagioclase, comme l'a rappelé Mason (1966). Les valeurs de $D_{\text{Cpx}}^{\text{Sr}}$ et de $D_{\text{Cpx}}^{\text{Sr/Ca}}$ du clinopyroxène sont du même ordre de grandeur que celles rapportées dans la littérature (Berlin et Henderson, 1968; Brooks, 1968; Philpotts et Schnetzler, 1970).

En utilisant les valeurs de $D_1^{\text{Sr/Ca}}$ et les compositions chimiques des minéraux du Tableau III, on peut calculer par eq. 1 que, dans l'hypothèse où une roche ne contiendrait que plagioclase et clinopyroxène, la coprécipitation d'une quantité de clinopyroxène supérieure à 14% en poids suffit à conférer au $D_{\text{tot}}^{\text{Sr/Ca}}$ une valeur inférieure à l'unité. En outre, il est intéressant de noter que dans l'hypothèse où l'association comprend seulement plagioclase et apatite, 6% d'apatite suffisent pour déterminer le même effet. Il ressort donc que, toutes choses étant égales, l'apatite joue un rôle plus important que le clinopyroxène dans le contrôle de l'évolution du Sr/Ca. Dans le cas présent, les deux minéraux apparaissant ensemble et leurs effets s'additionnant, il n'est cependant pas possible, sans un traitement quantitatif plus approfondi, de déterminer celui qui a l'influence prédominante.

En ce qui concerne le feldspath potassique, l'étude d'une monzonorite du même massif montre qu'il contient plus de Sr (400 p.p.m.) que le plagioclase de la même roche (340 p.p.m.). Cette répartition entre les deux feldspaths est en accord avec les données de Heier (1962) et indique que le feldspath potassique, riche en Sr, peut jouer un rôle déterminant dans la diminution du Sr/Ca, en soustrayant au liquide beaucoup de Sr sans influencer notablement sa teneur en Ca. C'est vraisemblablement cette action conjointe des deux feldspaths qui est à l'origine de la décroissance du Sr/Ca dans les roches acides du batholithe du Sud de la Californie (Sen et al., 1959).

CONCLUSIONS

L'étude du Sr/Ca dans les plagioclases des roches anorthositiques montre donc que:

(1) le massif de Bjerkrem--Sogndal peut s'expliquer par un phénomène de cristallisation fractionnée dans laquelle l'évolution du rapport Sr/Ca des liquides successifs est contrôlée

* et infirment complètement la teneur élevée (680 p.p.m.) avancée par Noll (Rankama et Sahama, 1950) p. 473) pour une roche de la même province magmatique.

par la cristallisation non seulement du plagioclase mais également du clinopyroxène, de l'apatite et du feldspath potassique;

(2) quand le plagioclase cristallise avec un seul pyroxène de type orthorhombique, le rapport Sr/Ca diminue. Ce fait montre que le coefficient de partage $D_{Pl}^{Sr/Ca}$ est supérieur à l'unité;

(3) dans un faciès porphyrique de l'anorthosite de Hidra, la distribution de Sr et Ca entre phénocristaux et mésostase indique que $D_{Pl}^{Sr/Ca}$ est supérieur à l'unité; cette mesure directe confirme ainsi la conclusion précédente;

(4) dans le contrôle de l'évolution du rapport Sr/Ca, l'effet de la cristallisation de l'apatite est plus important que celui du clinopyroxène.

ANNEXE

Ca et Sr ont été dosés dans le plagioclase par fluorescence X (Duchesne, 1965). Dans la mésostase, les pyroxènes, l'apatite et le feldspath potassique, la méthode de Norrish et Chappell (1967) a été utilisée pour le dosage du Sr. Ca dans les pyroxènes a été déterminé par microanalyse à la sonde électronique. Les différents constituants des roches ont été séparés en combinant les liqueurs denses et le séparateur magnétique (Duchesne, 1966).

BIBLIOGRAPHIE

- Barth, T.F.W., 1960. Precambrian of Southern Norway. In: O. Holtedahl (Editor), *Geology of Norway. Nor. Geol. Unders.*, 208: 6–44.
- Berlin, R. et Henderson, C.M.B., 1968. A reinterpretation of Sr and Ca fractionation trends in plagioclases from basic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 4: 79–83.
- Brooks, K.C., 1968. On the interpretation of trends in element ratios in differentiated igneous rocks, with particular reference to strontium and calcium. *Chem. Geol.*, 3: 15–20.
- Butler, J.R. et Skiba, W., 1962. Strontium plagioclase feldspars from four layered basic masses in Somalia. *Miner. Mag.*, 33: 213–225.
- Duchesne, J.C., 1965. Application de la spectrofluorescence X à la géochimie: dosage du strontium dans les plagioclases. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 89: 347–356.
- Duchesne, J.C., 1966. Séparation rapide des minéraux des roches. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 89: 347–356.
- Duchesne, J.C., 1968. Les relations Sr–Ca et Ba–K dans les plagioclases des anorthosites du Rogaland méridional. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 90: 643–656.
- Duchesne, J.C., 1969. *Les minerais noirs dans le massif magmatique stratiforme de Bjerkrem–Sogndal (Rogaland) et leur évolution dans la différenciation*. Thèse, Univ. de Liège, 210 pp.
- Duchesne, J.C., 1970. Sur la provenance de xénolithes anorthositiques dans le massif de Bjerkrem–Sogndal (Norvège). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 93: 523–526.
- Duchesne, J.C., 1971. Iron–titanium oxide minerals in the Bjerkrem–Sogndal massif, Southwestern Norway. *J. Petrol.*, sous presse.
- Heier, K.S., 1962. Trace elements in feldspars – a review. *Nor. Geol. Tidsskr.*, 42 (2): 415–454.
- Mason, B., 1966. *Principles of Geochemistry*, Wiley, New York, N.Y., 3 éd., 329 pp.
- Michot, P., 1955. Anorthosites et anorthosites. *Bull. Acad. R. Belg., Cl. Sci., 5e Sér.*, 41: 275–294.
- Michot, P., 1960. La géologie de la catazone: le problème des anorthosites, la palingénèse basique et la tectonique catazonale dans le Rogaland méridional (Norvège méridionale). *Nor. Geol. Unders.*, 212 g: 1–54.
- Michot, P., 1964. Le magma plagioclasiq. *Geol. Rundschau*, 54: 956–976.
- Michot, P., 1970. The geological environment of the anorthosites in South Rogaland (Norway). In: Y.W. Isachsen (Éditeur), *Origin of anorthosite and related rocks*, N.Y. State Mus. Sci. Serv. Mem., 18: 411–423.

- Neumann, H., Mead, J. et Vitaliano, C.J., 1954. Trace element variation during fractional crystallization as calculated from the distribution law. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 6: 90–99.
- Norrish, K. et Chappell, B.W., 1967. X-ray fluorescence spectrography. In: J. Zussman (Editor), *Physical methods in determinative mineralogy*. Academic Press, Londres, 514 pp.
- Philpotts, J.A. et Schnetzler, C.C., 1970. Phenocryst–matrix partition coefficients for K, Rb, Sr, and Ba, with applications to anorthosite and basalt genesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34: 307–322.
- Rankama, K. et Sahama, Th.G., 1950. *Geochemistry*. Univ. of Chicago Press, Chicago, Ill., 912 pp.
- Ryabchikov, I.D., 1960. Effect of the degree of disequilibrium during crystallization on the behaviour of a trace element. *Geochemistry*, 5: 412–423.
- Sen, N., Nockolds, S.R. et Allen, R., 1959. Trace elements in minerals from rocks of the S. California batholith. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 16: 58–78.
- Turekian, K.K. et Kulp, L.J., 1956. The geochemistry of strontium. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 10: 245–296.
- Wager, 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. Cosmochim. Acta*, 1: 129–208.