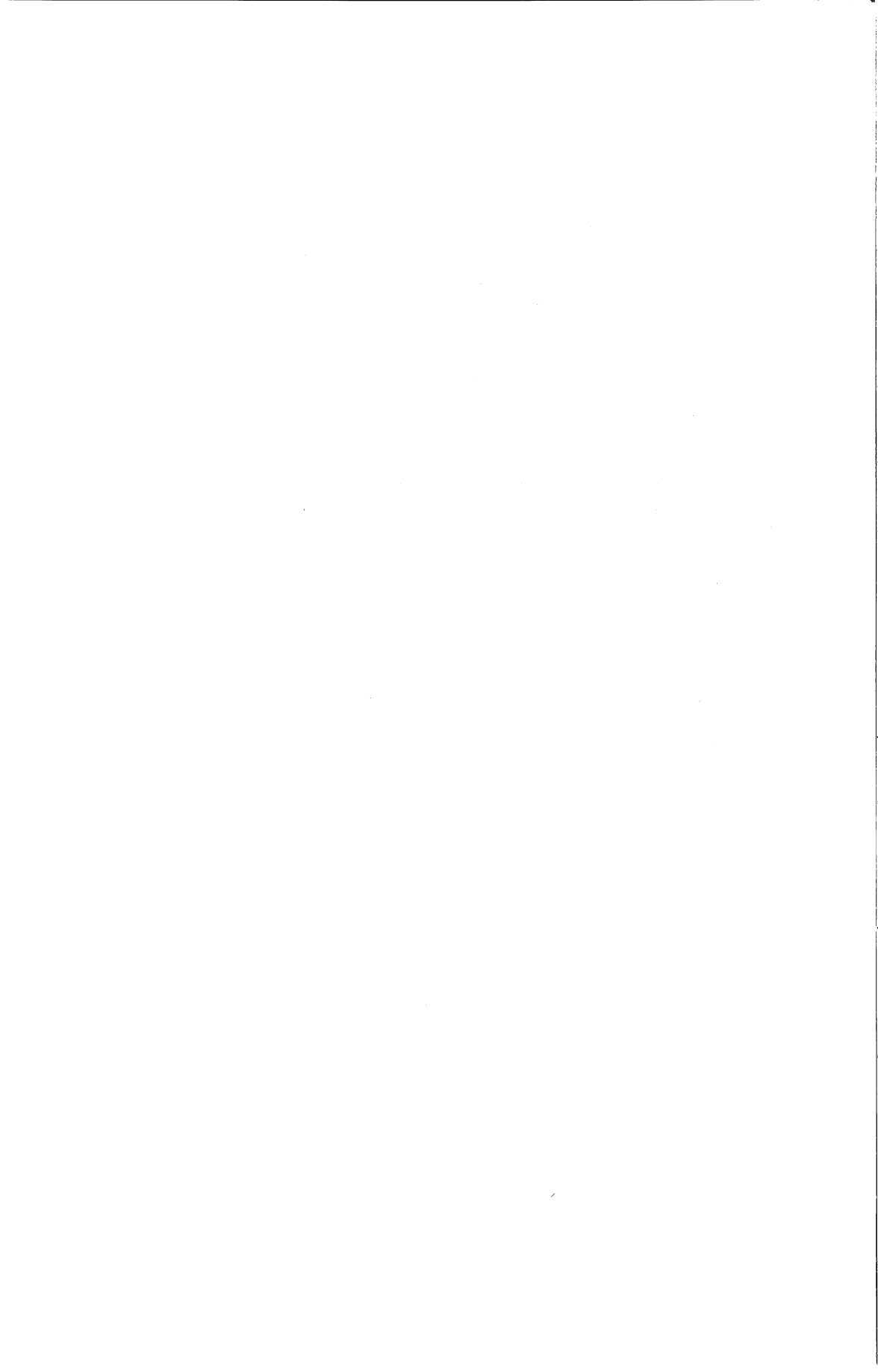


Anorthosite — vue microscopique générale, nicols + , 15 ×.



ANORTHOSITE ET RECHERCHE PLURIDISCIPLINAIRE (*)

par J. MICHOT (**)

(19 figures dans le texte et 1 planche)

ABSTRACT

In his Address on completing his term as President of the Geological Society of Belgium, the author first emphasises the part which should be played today by the Society in stimulating research in the Earth Sciences. He notes that the Society has always extensively published the results of its members' scientific work and suggests that it should now also aim at helping in the diffusion of comprehensive information essential to the development of integrated research programmes.

He then develops one of the numerous subjects concerning the Earth Sciences where recent advances in knowledge clearly confirm the value of multidisciplinary research, namely : the genesis of anorthositic rocks in the context of the building-up of the continental masses. Interest in the problem of the origin of anorthositic bodies has been reawakened by recent observations of lunar samples, and by research on ocean-floor spreading and continental drift.

The author describes the general features of the great anorthositic bodies, and stresses the similarities which exist between them. The types of rock-association of the anorthosite-charnockite suite constituting these bodies are then detailed. From among the different hypotheses which have been advanced to explain their formation two are selected as providing the best fit with the observations : (1) fractional crystallisation and development of plagioclase crystals as the first solid phase from a magma of distinct composition, or (2) melting of rocks producing, together with a mobile component, a concentration of residual plagioclase.

These two hypotheses, which take into account the three fundamental elements of the problem :

- nature of parent magma,
 - early differentiation of plagioclase crystals, and
 - kinds of association of the anorthositic-norite rocks with the more acid charnockitic products
- are discussed in the light of the results of researches in experimental petrology, trace elements and isotope geochemistry.

RÉSUMÉ

L'auteur, au terme de son mandat de Président de la Société Géologique de Belgique, analyse tout d'abord le rôle que devrait jouer actuellement la Société Géologique dans l'impulsion à donner aux recherches concernant les Sciences de la Terre. Il souligne l'action que la Société a toujours menée quant à la diffusion des résultats des recherches effectuées par ses membres dans ce domaine et insiste sur le fait qu'elle devrait se compléter par celle, tout aussi importante, qui concerne la diffusion de l'ensemble des informations indispensables à la réalisation de programmes de recherche intégrés.

(*) Lecture présidentielle présentée le 5 octobre 1971. Manuscrit déposé le 1^{er} décembre 1972.

(**) Université Libre de Bruxelles. Laboratoire de Minéralogie et de Pétrologie. Avenue F. D. Roosevelt, 50, B-1050 Bruxelles.

Il développe ensuite l'une des questions intéressant les Sciences de la Terre, où les progrès récents des connaissances sont l'illustration des efforts entrepris au niveau de la recherche pluridisciplinaire : la genèse des roches anorthositiques dans le cadre de l'édification de l'infrastructure des masses continentales.

Remise à l'ordre du jour grâce aux observations réalisées sur les échantillons du sol lunaire et aux recherches liées entre autres à l'expansion du fond des océans et à la dérive continentale interprétées dans le cadre de la théorie récente de la tectonique des plaques, la question de l'origine des masses anorthositiques est l'objet d'une étude de plus en plus poussée. Les caractéristiques générales qui définissent les grands massifs anorthositiques sont énumérées, permettant ainsi d'en saisir les différents points de similitude. Le style et les modes d'association des roches de la suite anorthosite-charnockite qui composent ces massifs sont ensuite exposés et amènent à proposer parmi les différentes hypothèses explicitant leur genèse, celles qui correspondent le mieux aux observations réalisées : (1) la cristallisation fractionnée permettant l'individualisation première des cristaux de plagioclase à partir d'un magma de composition particulière, ou (2) l'anatexie de certaines roches aboutissant, lors de l'expulsion du mobilisat, à la concentration du résidu plagioclasique.

Ces deux hypothèses génétiques, qui intègrent les trois éléments fondamentaux du problème : nature du magma parental, différenciation en première phase des plagioclases et style d'association de l'ensemble anorthosite-norite avec les produits les plus acides charnockitiques, sont discutées à la lumière des résultats de la pétrologie expérimentale, de la géochimie des éléments en traces et de la géochimie isotopique.

Mes Chers Confrères,

Au terme de ses fonctions, le Président de la Société Géologique de Belgique, se prêtant de bonne grâce à la tradition, se présente devant vous pour l'exposé de l'adresse présidentielle. En effet, depuis une trentaine d'années, le Président sortant se doit de procéder à une lecture sur un sujet d'intérêt général susceptible de retenir l'attention de la majorité des membres. Au fil du temps, ceux qui m'ont précédé à la direction de notre Société ont ainsi développé leurs conceptions sur l'évolution de tel ou tel domaine des Sciences de la Terre et ont été amenés à en fixer les frontières, à en définir les grandes tendances, à en prévoir l'importance dans le cadre de l'étude du Globe terrestre.

Qu'il me soit permis avant d'aborder le sujet dont je voudrais vous entretenir aujourd'hui, d'adresser mes remerciements les plus chaleureux à tous ceux qui m'ont efficacement secondé, sinon remplacé, au cours des deux années écoulées, et en particulier, à notre Secrétaire Général et à notre Vice-Président sortant que vous venez d'ailleurs d'appeler à la Présidence.

Qu'il me soit permis également de rappeler que notre Société a eu le regret de perdre le 20 janvier 1970, son Secrétaire honoraire et ancien Président, Paul FOURMARIER Sr. N'ayant pas pu assister à la séance au cours de laquelle hommage a été rendu à sa mémoire, je souhaite redire ici, combien il fut dévoué à notre Société et combien il représente pour ceux qui l'ont connu un des maîtres de la Géologie belge et internationale.

L'objet de mon propos est double et porte sur deux plans essentiels qui, je le pense, devraient retenir l'attention de tous ceux dont l'action vise au soutien des Sciences de la Terre.

En tant que Membre d'une Société géologique, il me semble utile de prendre position quant au rôle de cette Société dans le développement futur des Sciences de la Terre en Belgique.

En tant que géologue, mon intérêt me porte à synthétiser les recherches qui sont entreprises dans les Laboratoires que je dirige. Il s'agit là de deux préoccupations

qui, si elles paraissent distinctes, ne sont en réalité aucunement éloignées l'une de l'autre. La première surtout, concerne au plus haut point la plupart d'entre nous.

Je développerai donc tout d'abord, très succinctement, quelques considérations sur le rôle qu'à notre époque devrait jouer la Société Géologique dans l'impulsion à donner aux recherches concernant notre domaine.

Depuis plusieurs années, les différents Laboratoires et Centres de recherches qui s'occupent de géologie dans ses aspects les plus divers, se heurtent à une tradition de cloisonnement dont les effets sont difficilement surmontés. Il faut reconnaître, néanmoins, qu'à l'occasion de certaines études et à l'initiative de chercheurs isolés, des collaborations fructueuses ont vu le jour. Ce ne sont que quelques cas, nés d'affinités personnelles.

Par contre, les efforts tentés il y a une dizaine d'années pour mettre sur pied des Centres de recherches interuniversitaires ont, dans leur majorité, été voués à l'échec. Créés artificiellement, sans qu'au préalable un besoin ne s'en soit fait sentir, guidés par l'espoir d'une subsidiation, ces Centres n'ont jamais trouvé le ciment qui leur aurait permis de travailler de manière harmonieuse, d'inciter et de soutenir des collaborations efficaces.

Si, plus tard, la création du Fonds de la Recherche Fondamentale Collective a remédié pour une grande part à la défaillance des Centres nationaux, elle n'est pas parvenue, jusqu'à présent, à organiser au niveau des Sciences de la Terre une concertation pouvant aboutir à une collaboration suffisamment large pour que puissent être intégrés, pour chaque discipline, les différents programmes en voie de développement.

Il paraît évident que, dans le cadre de la politique gouvernementale actuellement envisagée en matière de recherche — politique qui ne prévoit pas de subsidiation explicite des Universités sous cette rubrique — seuls des groupes de chercheurs suffisamment puissants et motivés, ayant à leur disposition des moyens adéquatement regroupés, pourront continuer à fonctionner et à s'étendre.

Dans le domaine qui est le nôtre, il est certain que de tels groupes ne peuvent se constituer dans une seule et même Institution; ils doivent nécessairement se construire sur la base d'une association à l'échelon national. De telles associations, plus étoffées que celles qui se sont formées jusqu'à présent, représentent la seule possibilité pour les chercheurs belges de participer et de s'intégrer de façon réelle et efficace dans les programmes de recherches élaborés dans le cadre des Unions internationales.

C'est notre seule chance aussi de pouvoir prétendre un jour collaborer à l'échelle européenne au développement d'un « centre d'excellence » dans l'une ou l'autre des disciplines qui sont à la base de nos activités.

Au moment où le « Geodynamics Project » s'élabore, il serait opportun de tirer les leçons de nos hésitations passées et de veiller à éviter l'isolement dans lequel nous risquons finalement de nous trouver. Ne serait-il pas urgent d'unifier, dans ce cadre, les efforts déployés par des équipes de chercheurs imparfaitement constituées et souvent incomplètement outillées?

Au moment où le « Committee on the Silurian-Devonian Boundary and Stratigraphy » va déposer ses conclusions parmi lesquelles seront vraisemblablement soulevés des problèmes en rapport avec la définition d'étages du Dévonien Moyen et Supérieur de Belgique, il serait opportun de faire le point sur ce que nous considérons comme susceptible d'être efficacement défendu.

Récemment, l'un des chercheurs intéressés à ce problème a fait appel au Président de la Société Géologique pour qu'il favorise la rencontre de tous ceux qui, dans

notre pays, ont abordé ces questions. Si l'espoir est grand de voir cette concertation s'établir, n'est-il pas par contre préjudiciable que des études en commun et des contacts plus nombreux, voire même des programmes intégrés, n'aient pu se développer avant qu'une urgence ne les rende nécessaires. Il serait néanmoins dommage que ces consultations prises fort tardivement n'aboutissent pas au but souhaité.

L'intégration des programmes de recherches en géologie, la création et le développement de liens multilatéraux entre les groupes de chercheurs venant des diverses Institutions où s'effectuent ces programmes ne peuvent résulter que d'un désir commun de concertation dans un esprit de collaboration largement ouvert.

Ces conditions ne sont réalisables qu'au sein d'une communauté géologique parfaitement informée, dans laquelle est profondément ressentie la nécessité d'une participation à tous les niveaux.

S'il est inopportun de s'étendre ici sur ce que doit être cette participation, il est par contre indispensable de préciser le contenu de cette information et les moyens de sa diffusion.

En ce qui concerne le contenu, il paraît hautement souhaitable que tous ceux qui s'intéressent au développement des Sciences de la Terre puissent obtenir régulièrement et dans les délais les plus brefs un tableau des différentes activités entreprises par l'ensemble de la communauté géologique.

Ce tableau continuellement mis à jour devrait comprendre 3 volets :

1) Le premier présenterait :

- l'inventaire des équipes scientifiques ou des chercheurs isolés groupés par discipline,
- l'inventaire des programmes les plus importants mis en œuvre,
- l'inventaire des moyens dont disposent les divers groupes sur le plan instrumental,
- le relevé des besoins existant dans certaines équipes pour mener à bien le ou les programmes envisagés.

2) Le second volet reprendrait la liste des problèmes qui méritent de retenir l'attention des chercheurs dans le cadre de la géologie de la Belgique, voire des régions limitrophes. Ils pourraient être posés à l'initiative des Commissions nationales, du Service Géologique ou de toute personne intéressée par les Sciences de la Terre et leur application dans notre pays. Il n'est pas exclu, en outre, que des recherches en cours soulèvent des questions qu'il serait intéressant de faire connaître en dehors du groupe qui les étudie.

3) Le troisième volet concernerait les projets élaborés à l'échelle internationale et en présenterait la politique générale ainsi que les lignes directrices essentielles.

A l'heure actuelle, les moyens de diffusion parmi la communauté géologique belge de l'information dont il vient d'être question n'existent pas. L'importance de cette diffusion pour le développement des Sciences de la Terre dans notre pays impose cependant que l'un ou l'autre organisme prenne en main la réalisation de cette tâche.

La Société géologique de Belgique peut être cet organisme. Ses statuts stipulent en effet à l'article 2 que le but de notre Société est de « Propager l'étude du règne minéral, de faire connaître le sol de la Belgique, particulièrement dans ses rapports avec l'industrie et l'agriculture, et de concourir par tous les moyens au progrès de la Science ».

C'est donc dans la ligne générale que s'est tracée notre Société que s'intègre l'activité dont l'intérêt vient d'être souligné. A l'action qu'elle a toujours menée quant à la diffusion des résultats des recherches effectuées par ses membres, devrait aussi s'ajouter celle, tout aussi importante, qui consiste à informer largement les chercheurs et à faciliter ainsi la préparation de leur travail.

Une telle entreprise occasionnera vraisemblablement un léger surcroît de prestations pour le Secrétariat, mais rien n'empêche le Secrétaire Général de se faire seconder dans cette matière par un ou plusieurs adjoints.

Il y a, dans les propositions qui viennent d'être faites, sujets à réflexion et les critiques éventuelles ne pourront être que fructueuses. Pour notre Société, qui déjà dans les dernières années a réadapté certaines de ses structures et son fonctionnement, il s'agit une nouvelle fois de rencontrer une série de besoins qui progressivement se sont fait jour suite aux transformations rapides qui caractérisent notre époque.

Mes Chers Confrères, qu'il me soit permis, au terme de mon mandat, de former le vœu que les questions que je viens de soulever fassent l'objet d'un des thèmes à méditer à l'occasion de la préparation du centième anniversaire, très proche maintenant, de la création de la Société Géologique de Belgique.

Après cet exposé qui j'espère ne vous aura pas paru trop long, j'en arrive à la seconde partie de cette lecture.

Avant d'aborder plus particulièrement un des sujets d'étude où les progrès récents de nos connaissances sont l'illustration des efforts entrepris dans le cadre de la recherche pluridisciplinaire, j'envisagerai brièvement l'optique dans laquelle les travaux de recherches se développent dans les Laboratoires de Minéralogie et de Pétrologie de l'Université Libre de Bruxelles.

Ces travaux concernent essentiellement les phénomènes géologiques dont dépend la formation des complexes cristallophylliens de degré de métamorphisme variable. Ils s'attachent ainsi à définir dans le temps et dans l'espace, l'histoire de l'infrastructure des masses continentales.

L'étude poursuivie emprunte deux voies complémentaires.

La première relève de la géologie classique, de la pétrologie et de la minéralogie théoriques et expérimentales, de la tectonique et de la pétrofabrique. Elle envisage les phénomènes dans leurs relations mutuelles en fonction du niveau bathymétrique de l'écorce terrestre dans lequel ils se sont développés. Il s'agit donc essentiellement d'analyses comparées portant d'une part sur les minéraux et les associations minérales des roches magmatiques et métamorphiques, en relation avec les conditions pression-température du domaine encaissant, d'autre part sur les structures qui y apparaissent et sur les textures qui y sont imprimées à la suite des déformations tectoniques subies.

Pour être complètes, ces analyses doivent être entreprises parallèlement dans des zones de l'écorce terrestre qui ont évolué à des profondeurs différentes et, pour bien faire, au cours d'un seul et même cycle. Il est évidemment assez rare que ces différentes zones se succèdent sans discontinuité dans un domaine géographique restreint. C'est donc plus généralement en divers lieux des domaines continentaux qu'elles pourront être abordées. Diverses conditions ont fait que nos recherches se sont trouvées axées dans les régions suivantes :

— La première est située en Belgique méridionale, sur l'axe métamorphique Bastogne-Paliseul. Les données recueillies concernent un segment superficiel de l'écor-

ce terrestre et reprennent du point de vue macroscopique les caractéristiques lithologiques et texturales des différents ensembles sédimentaires, tandis que sur le plan microscopique elles contribuent à l'inventaire minéralogique et structural des roches les composant. Les levés dans ce domaine sont systématisés et font l'objet d'un enregistrement sur ordinateur. Divers programmes permettent l'obtention de cartes lithologiques, de cartes minéralogiques et de cartes de structure.

— La seconde région étudiée se trouve en Bretagne septentrionale où sont réalisées des observations concernant les processus actifs dans un segment plus profond de l'écorce, en particulier ceux qui résultent de la superposition d'événements tectoniques divers. L'étude de l'évolution du système U/Pb dans des Zircons d'origine détritique prélevés dans une série de formations lithologiques à métamorphisme variable (flanc sud du dôme cristallophyllien du Pays de Léon affecté par les orogènes cadomienne et varisque) a permis de mettre en valeur le comportement de ce minéral dans des conditions de développement orogénique complexe et de montrer l'intérêt qui en découle dans le cadre des recherches sur le polycyclisme qui définit certaines régions du globe.

— La troisième région est située en Norvège méridionale. Elle s'est constituée au point de vue géologique dans les parties les plus profondes de l'écorce terrestre, vraisemblablement au contact du manteau, et permet d'étudier les processus dans lesquels sont impliquées des interactions entre le manteau supérieur et la croûte continentale.

La seconde voie, suivant laquelle se développent nos recherches et qui s'appuie sur la précédente, utilise les résultats que fournissent la géochronologie et la géochimie isotopique. La première de ces disciplines permet de vérifier et de compléter l'ordre de succession des phénomènes géologiques les plus importants par la datation absolue des formations lithologiques qu'ils ont contribué à édifier; elle est essentielle dans les cas où la répartition de ces formations dans l'espace empêche toute possibilité de corrélation. Quant à la géochimie isotopique, elle fournit des arguments qui, dans la synthèse finale, permettent de proposer une hypothèse génétique pour la série des formations envisagées et par là de faire un choix parmi les conceptions qui se sont exprimées au sujet de la nature des processus qui sont à la base de la constitution des divers segments de l'écorce terrestre.

ANORTHOSITE ET RECHERCHE PLURIDISCIPLINAIRE

Dans la suite de cet exposé, un des thèmes évoqués plus haut retiendra notre attention : il sera question des processus liés à la genèse des anorthosites des domaines profonds de l'écorce terrestre.

Les découvertes les plus importantes concernant l'évolution du globe terrestre ont été réalisées dans les dix ou vingt dernières années à la suite de recherches pluri- et inter-disciplinaires dans lesquelles se trouvaient impliqués non seulement des géologues, mais aussi des géophysiciens et des géochimistes, non seulement des praticiens du terrain ou des prospecteurs, mais également des expérimentateurs et des théoriciens. L'étape majeure de cette collaboration se développe et s'amplifie d'ailleurs à l'heure actuelle alors que les Sciences de la Terre s'élargissent à l'étude de la surface lunaire et à l'histoire des planètes. Disons en passant que c'est sur la Lune, au moins en partie, que nous aurons la chance de retrouver les traces des tous premiers épisodes de l'histoire du système solaire. L'étude du globe terrestre, structuré et différencié au cours de son évolution, largement modifié dans sa partie périphé-

que, n'aurait pu prétendre remonter aussi loin dans le temps. Ainsi, les recherches centrées sur notre satellite, mais aussi celles qui ont pour cadre les domaines océaniques de notre globe et en particulier les recherches géophysiques sur l'expansion du fond des océans et la dérive continentale, se présentent-elles comme essentielles dans les problèmes qui nous intéressent ici (LE PICHON, 1968, 1969; W. J. MORGAN, 1968; DE VUYST, 1969). Si l'on s'en tient à la croûte terrestre, la théorie récente de la tectonique des plaques ou tectonique globale (LE PICHON, 1971) a eu pour effet de remettre en question certaines idées explicitement ou implicitement intégrées dans le concept du cycle géologique. Cette nouvelle théorie, qui voit la croûte terrestre comme constituée d'une série de plaques rigides en mouvement les unes par rapport aux autres, a le mérite de la simplification et introduit dans la pensée géologique une caractéristique d'unification entre divers domaines auparavant plus ou moins nettement cloisonnés qui vont de la volcanologie à la magmatologie et à la sédimentologie, de la sismologie à l'océanographie physique et à la tectonique.

Elle implique entre-autres,

— la création périodique de croûte océanique le long des crêtes médio-océaniques,

— la constitution de nouvelles portions de croûte sialique le long de certaines limites des plaques lithosphériques,

et éclaire d'un jour nouveau l'un ou l'autre des processus géologiques qui structurent les domaines profonds de l'édifice continental.

C'est ainsi que les données récemment recueillies, nécessitent la révision de certaines de nos conceptions. Dans cette voie, le problème posé par la formation et le développement des grandes masses d'anorthosite fait l'objet de recherches de plus en plus poussées. Il s'agit là, de roches qui par leurs positions géographiques, par leur composition quasi monominérale et la taille des massifs qu'elles constituent par endroits, ont depuis longtemps éveillé l'intérêt des géologues.

L'important travail de BUDDINGTON sur le massif des Adirondacks (1939) est à l'origine de la subdivision introduite parmi les ensembles lithologiques comprenant des roches anorthositiques (*). D'une façon générale, ces dernières y apparaissent (**):

— soit comme constituant une partie plus ou moins importante d'un ensemble lité, formé d'une alternance de bancs de composition contrastée (l'intrusion du Skaergaard : L. R. WAGER and W. A. DEER, 1939; L. R. WAGER, 1953; L. R. WAGER and G. M. BROWN, 1957; l'intrusion du Bushveld : W. R. DALY, 1928; B. V. LOMBAARD, 1935; le Stillwater complex : W. R. JONES et al, 1960) ou comme constituant secondaire dans des sills ou des sheets de composition gabbroïque (gravity-stratified anorthosites de Bérangé, 1966);

— soit en masses d'extension importante, à texture généralement en forme de dôme (le massif des Adirondacks; R. BALK, 1931; A. F. BUDDINGTON, 1939; le massif d'Egersund-Ogna, P. MICHOT, 1939a, 1960a; le massif du Allard Lake, Québec :

(*) D'autres systèmes de classification ont été proposés depuis (A. T. ANDERSON, 1966; J. P. BERRANGE, 1966). Il apparaît cependant que celui de BUDDINGTON correspond le mieux aux critères distinctifs reconnus jusqu'à présent.

(**) Les roches anorthositiques constituant des bancs, des lits ou des masses lenticulaires intercalés dans des ensembles métasédimentaires composés de gneiss alumineux et de gneiss à silicates de Ca (A. HIETANEN, 1968) n'ont pas été prises en considération dans ce travail.

R. B. HARGRAVES, 1962; le massif de Morin, Québec : J. MARTIGNOLE and K. SCHRIJVER, 1970; les San Gabriel Mountains, Californie : D. V. HIGGS, 1954; etc...) (orogenic-plutonic anorthosites de Bérangé, 1966).

Cette distinction se marque de façon plus nette encore lorsqu'on s'en réfère au processus de mise en place et au domaine de l'écorce terrestre dans lequel l'unité s'est développée. Les roches anorthositiques du premier type participent à des intrusions de caractère relativement peu profond, épizonal surtout, et résultent, dans la majeure partie des cas, d'une histoire magmatique liée à l'évolution du magma basique au cours des différents stades des phases isostatique et géosynclinale du cycle géologique (Fig. 1, I).

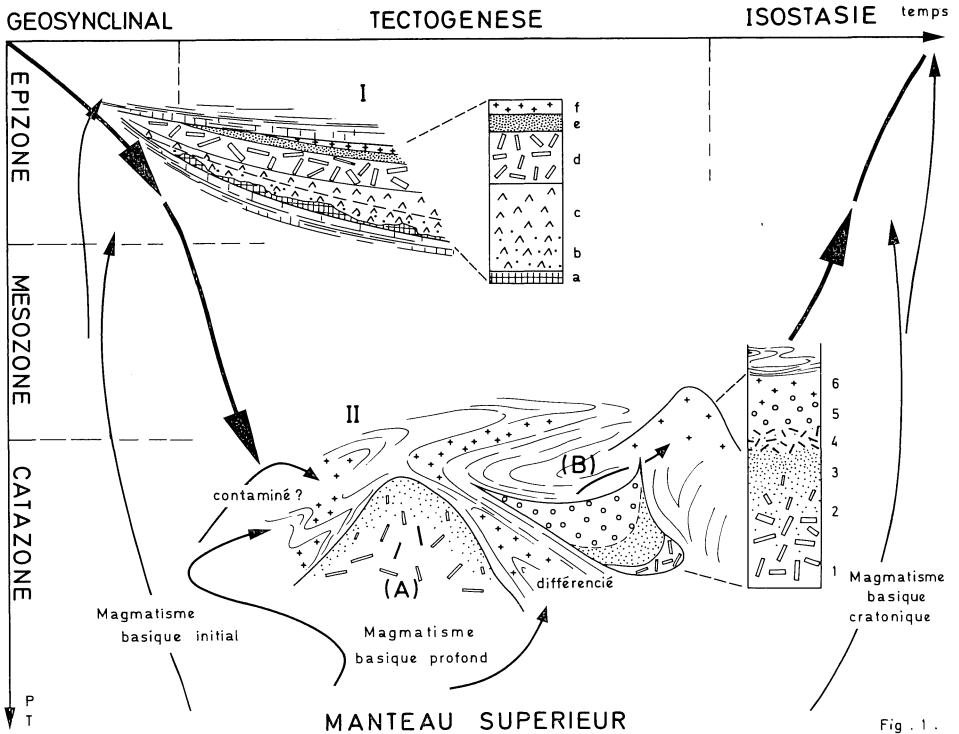


Fig. 1.

Fig. 1. — Tectogramme schématique figurant les deux catégories importantes d'anorthosite situées dans leur zone bathymétrique et reflétant le style de la différenciation dont elles résultent.

- I. Intrusion stratiforme à différenciation contrastée (ex : Mineral Lake Intrusion, Northwestern Wisconsin; J. F. OLMSTED, 1968). a) roches ultrabasiques, b) gabbro anorthositique à olivine, c) gabbro anorthositique, d) anorthosite, e) diorite riche en fer, f) granite.
- II. Massifs à structure en dôme (A) et intrusions à différenciation étendue (B) (ex : Complexe éruptif du Rogaland méridional). 1) Anorthosite, 2) leuconorite, 3) norite, 4) monzonorite, 5) mangérite, 6) granite.

Les anorthosites de la seconde catégorie se différencient avant tout des précédentes par l'importance en volume des massifs, souvent bien individualisés, qu'elles constituent. Les processus génétiques dont elles dépendent se révèlent nettement

plus complexes et relèvent d'une évolution au cours de laquelle des actions d'échange de matières se sont développées de manière plus ou moins intense. Ils ont leur siège dans les zones où s'élaborent les roches métamorphiques auxquelles les anorthosites sont associées, roches dont le faciès minéral est l'expression d'une transformation réalisée dans un milieu profond, essentiellement catazonal (Fig. 1, II).

Il faut en outre ajouter que le style de différenciation du magma gabbroïque normal dont dérivent finalement les anorthosites de la première catégorie, se caractérise par la formation en première cristallisation d'une série de roches renfermant une forte proportion de minéraux ferromagnésiens, telles des dunites, des péridotites, des troctolites, etc...

A l'opposé, le magma à partir duquel les grandes masses anorthositiques se séparent ne produit généralement aucune de ces roches en quantité importante. De plus, le premier minéral qui y cristallise est le plagioclase et non l'un ou l'autre ferromagnésien. Les anorthosites de la seconde catégorie apparaissent donc contrairement aux autres au début de la différenciation magmatique.

Si ces deux catégories d'anorthosite se distinguent nettement l'une de l'autre, des études récentes ont permis cependant de mettre en valeur l'existence de massifs d'aspect intermédiaire qui, en fait, possèdent des caractéristiques appartenant tantôt à la première catégorie, tantôt à la seconde. On peut citer à cet égard les intrusions de Michikamau (Labrador) (R. F. EMSLIE, 1968) et de Flakstadøy (Lofoten, Norvège) (J. C. DUCHESNE, comm. orale, 1971).

LES GRANDS MASSIFS ANORTHOSITIQUES. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

Une étude comparative des divers massifs anorthositiques importants appartenant à la seconde catégorie distinguée fait clairement apparaître leurs points de similitude. Tant en ce qui concerne les relations de terrain que la pétrologie et le chimisme des roches composant ces massifs, les caractéristiques essentielles suivantes peuvent être dénombrées.

1. La plupart des grandes masses anorthositiques sont réparties dans le nord-est de l'Amérique du Nord, en Scandinavie et dans l'est de la Sibérie. D'autres apparaissent en Inde, à Madagascar et dans l'est de l'Afrique. Cette distribution géographique mérite d'être soulignée et doit être saisie dans le cadre des reconstitutions actuelles liées à la théorie de la dérive des continents (Fig. 2).

2. Les massifs reconnus se situent dans les domaines précambriens. Les mesures d'âge absolu, réalisées sur une gamme de types lithologiques assez vaste par les méthodes U, Th-Pb, K-Ar et Rb-Sr, s'encadrent entre 1.300 m.a. et 920 m.a.; ce dernier chiffre caractérisant les toutes dernières manifestations supposées associées à l'évolution des massifs anorthositiques (L. T. SILVER, 1968; J. MICHOT et P. PAS-TEELS, 1968).

3. D'une façon générale, les roches constitutives se définissent dans une gamme de composition qui va de l'anorthosite, formée essentiellement de plagioclase andésitiques, à des norites, puis à des roches granitiques, voire syénitiques (mangérites, charnockites, etc.), et forment ainsi ce que GOLDSCHMIDT (1922) a proposé d'appeler la suite anorthosite-charnockite.

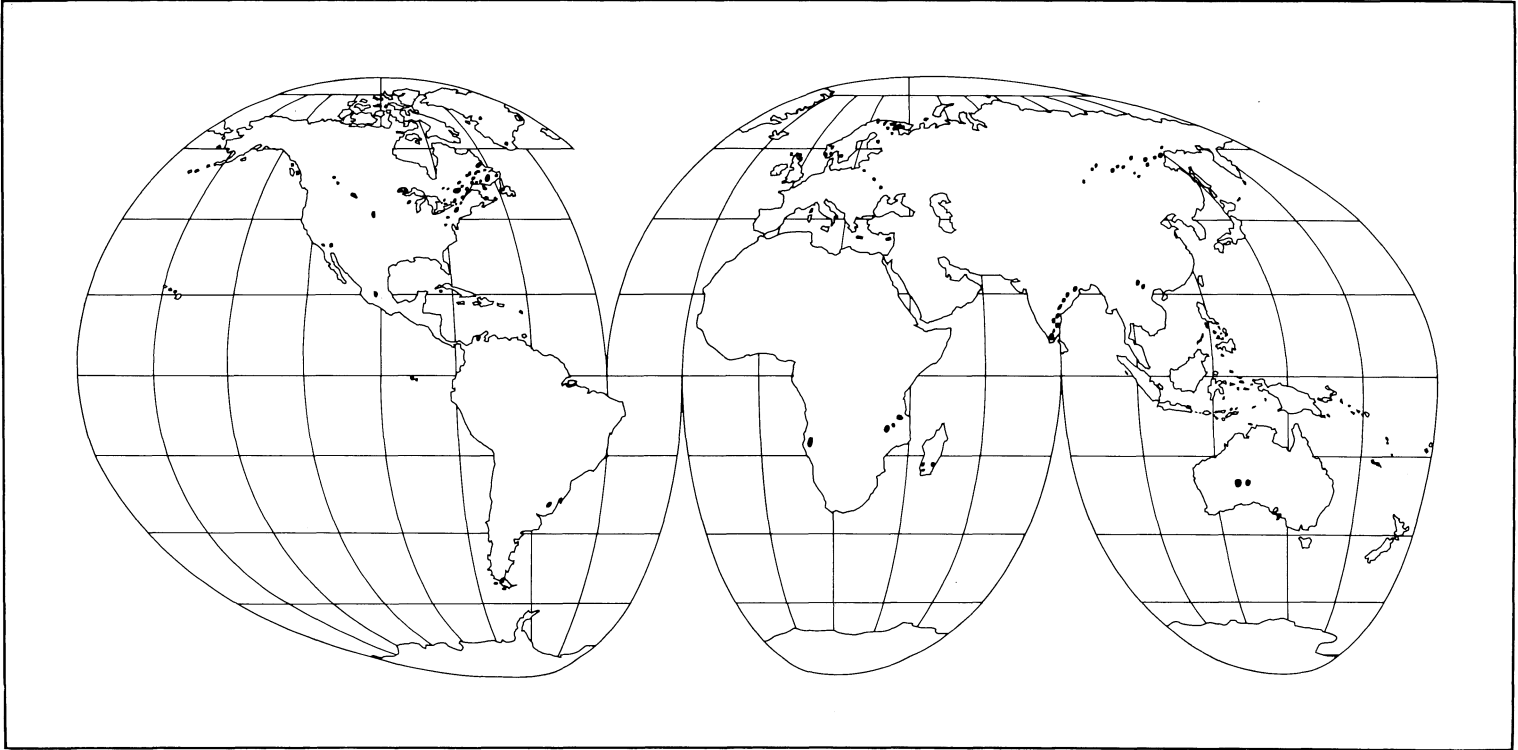


Fig. 2. — Distribution géographique des grands massifs anorthositiques.

4. Là où aucune action métamorphique ne s'est surimposée, l'anorthosite apparaît essentiellement comme un agglomérat de gros cristaux de plagioclase, souvent xénomorphes, de structure généralement cataclastique (c/o microphoto hors texte), entre lesquels se répartit une mésostase de composition leuconoritique à noritique, peu importante dans les régions centrales des massifs, mais devenant de plus en plus abondante au fur et à mesure où l'on se rapproche des zones périphériques.

5. Les différentes roches de la suite anorthosite-charnockite se succèdent habituellement de manière régulière et passent plus ou moins graduellement de l'une à l'autre. L'anorthosite apparaît comme l'élément le plus ancien, entouré ou surmonté par les leuconorites et norites; les composants acides apparaissent en dernier lieu et font intrusion localement dans les ensembles préalablement constitués.

6. Ces roches sont minéralogiquement définies par la présence de plagioclase antiperthitique, de perthite et d'hypersthène, localement par l'association fayalite + quartz.

Leur faciès minéral est typique du domaine catazonal profond (faciès granulite). Occasionnellement, les granitiques terminaux comportent une minéralogie quelque peu modifiée, de type catazone supérieure (2 feldspaths, biotite et hornblende). Le plagioclase se caractérise par une composition en anorthite assez uniforme variant en général entre les teneurs extrêmes An_{85} et An_{45} (Fig. 3). Le pyroxène orthorhombique présente une gamme de composition allant généralement de En_{75} à En_{60} . Les minerais noirs associés sont du type soit de la magnétique titanifère, soit de l'hémo-ilménite (A. T. ANDERSON, 1968).

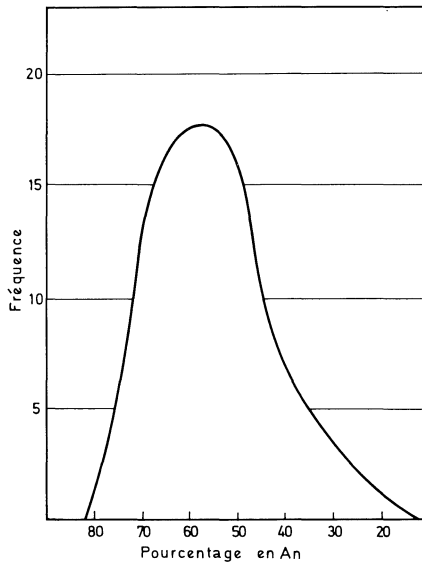


Fig. 3. — Fréquence de la teneur en An. des plagioclases des massifs d'anorthosite (D'après A. T. ANDERSON, 1968).

7. Sur le plan chimique, bien que les tendances générales soient semblables d'un massif à l'autre, de légères différences peuvent apparaître entre des suites

anorthosite-charnockite appartenant à des massifs différents (de WAARD, 1968). C'est le cas en ce qui concerne les massifs anorthositiques de Marcy (Adirondacks), de Morin (Québec) et du Nain (Labrador). On y observe des variations dans les teneurs en silice et potassium avec pour conséquence la modification des rapports Q-FK-P lors du calcul du mode (Fig. 4) et des différences assez nettes dans les rap-

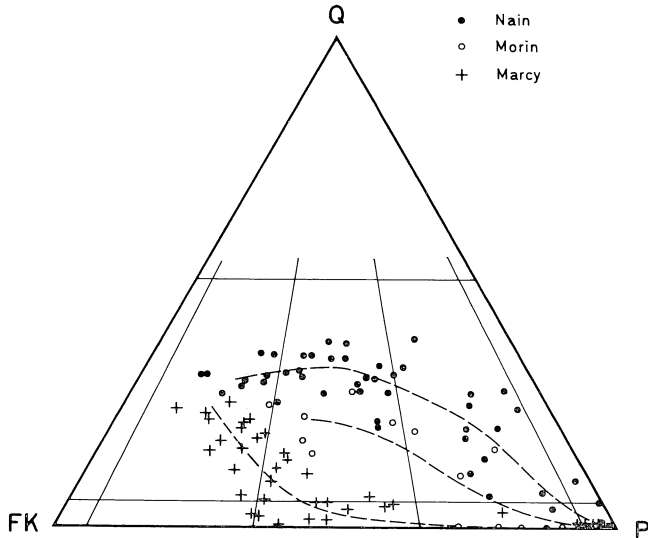


Fig. 4. — Diagramme triangulaire Q-FK-P reprenant les compositions modales des différentes roches composant trois massifs anorthositiques de l'Amérique du Nord (D'après D. DE WAARD, 1968).

ports FeO/MgO justifiant la présence de fayalite dans certaines roches du massif du Nain, tandis que celles des deux autres massifs contiennent de l'hypersthène (Fig. 5).

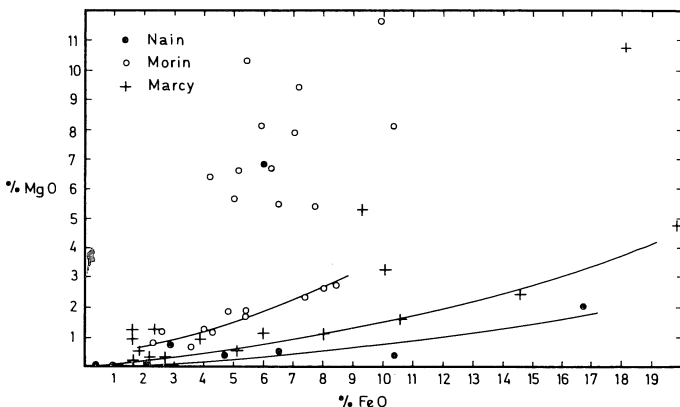


Fig. 5. — Rapports FeO/MgO définissant la série des roches différencées des Massifs du Nain, de Morin et de Marcy (Adirondacks). (D'après D. DE WAARD, 1968).

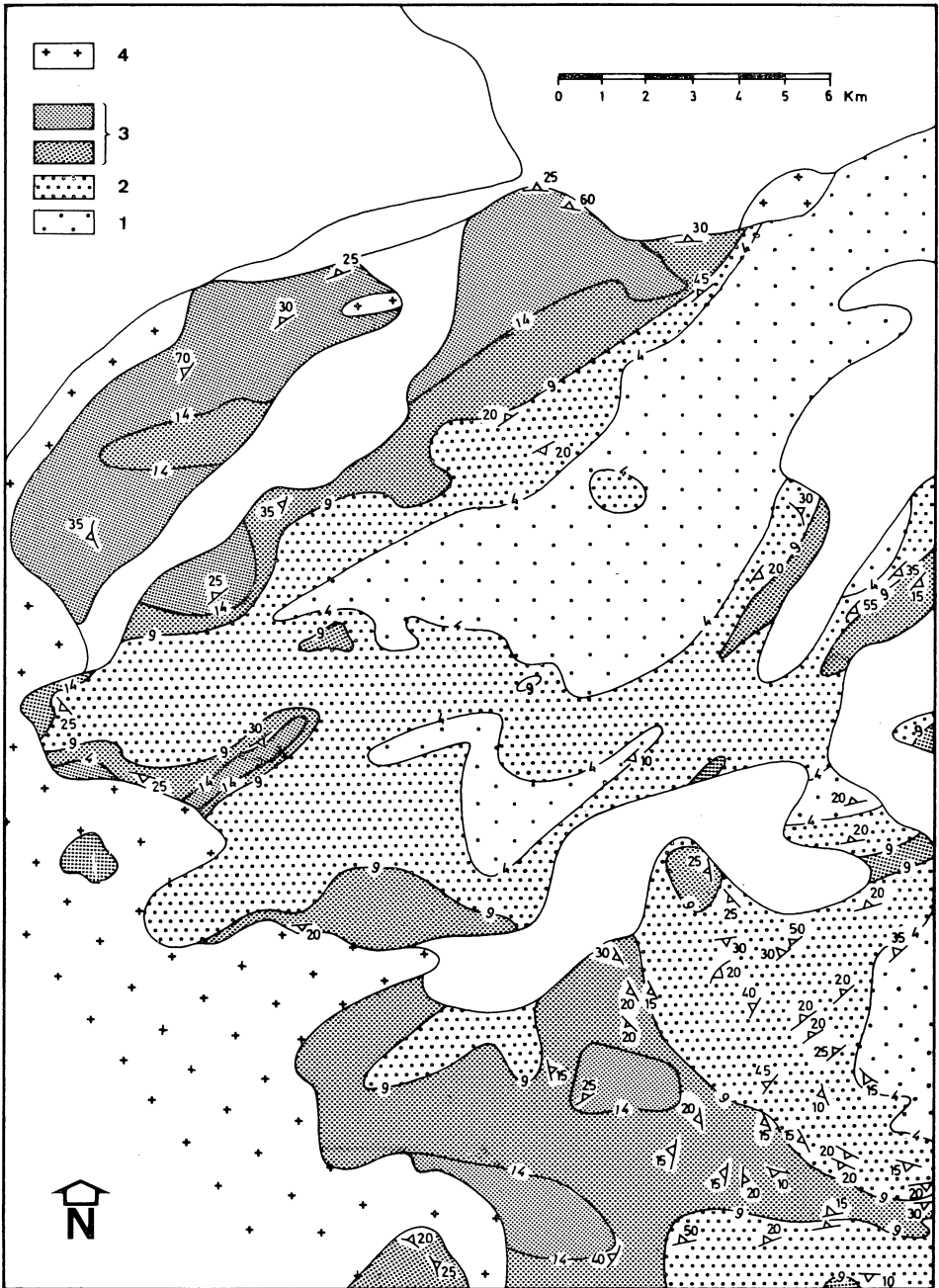


Fig. 6. — Distribution spatiale des roches anorthositiques et des faciès (leuco) noritogabbroïques dans le Nord-Ouest du massif des Adirondacks, St-Regis quadrangle (D'après B. T. C. DAVIS, 1968).

1) Anorthosite, 2) Leuconorite, 3) Norite ou Gabbro anorthositique, 4) Série gneissique encaissante.

MODES D'ASSOCIATION DES ROCHES DE LA SUITE ANORTHOSITE-CHARNOCKITE

Les différentes hypothèses proposées quant à la genèse des grands massifs d'anorthosite s'appuient en général sur les divers aspects que peuvent revêtir les associations lithologiques auxquelles cette roche particulière participe.

Ces associations se regroupent en quatre types généraux :

1. Le premier qui ait été décrit, et qui paraît le plus généralement répandu, caractérise la majorité des ensembles anorthositiques dont il est question ici. Il se présente sous la forme d'une succession régulière d'unités lithologiques, d'épaisseur parfois considérable, superposées les unes aux autres pour constituer un massif d'extension régionale importante. Dans certains cas, l'anorthosite massive, grossièrement grenue, constitue le centre d'un massif en forme de dôme et passe vers sa bordure de façon progressive à une couronne de roches plus riches en ferromagnésiens, à granularité plus fine et à texture souvent orientée parallèlement aux contacts. Cette disposition s'observe dans les Adirondacks, dans la masse principale comme dans diverses petites masses intrusives extérieures (A. F. BUDDINGTON, 1939; R. BALK, 1931), dans les San Gabriel Mountains, Californie (D. V. HIGGS, 1954), dans les massifs anorthositiques de lignée pure du sud-ouest de Madagascar (J. BOULANGER, 1957), dans le massif d'Egersund-Ogna, Norvège méridionale (P. MICHOT, 1957, 1960a) — (Fig. 6).

Dans d'autres cas, la série lithologique débute par des roches surtout leuconoritiques, localement anorthositiques, se poursuit par des roches noritiques et monzonoritiques et se termine par des roches mangéritiques devenant plus ou moins riches en quartz. On en trouve des exemples dans le massif anorthositique de Morin (J. MARTIGNOLE and K. SCHRIJVER, 1970), dans le sud Québec (A. R. PHILPOTTS, 1966), dans le massif du Allard Lake, Québec (R. B. HARGRAVES, 1962), dans le Snowy Mountain Dome (D. de WAARD and W. D. ROMÉY, 1968), ainsi que dans le lopolithe de Bjerkrem-Sogndal, Norvège méridionale (P. MICHOT, 1960a, 1960b) — (Fig. 7).

2. Le deuxième type d'association auquel participent les roches anorthositiques, consiste en une alternance de bancs, de lits, de rubans ou lentilles plus ou moins épais, dont la composition varie de l'anorthosite pure à des norites ou gneiss noritiques. C'est le cas par exemple de l'ensemble lité apparaissant dans le massif du lac St-John, Québec, Canada, ou encore dans la partie sud-est du massif de Haaland, Egersund, Norvège méridionale (J. MICHOT, 1957, 1961) (Fig. 8).

Par endroits, cette association comprend en outre des intercalations parfois nombreuses de lits et de rubans de nature granitique dont la genèse est liée à un processus de migmatitisation.

L'exemple le mieux étudié actuellement s'observe dans la zone norito-granitique ceinturant au sud le massif d'Egersund-Ogna, Norvège méridionale (P. MICHOT 1939b, 1960a).

3. Dans le troisième type d'association, l'anorthosite constitue des enclaves de forme quelconque disposées de façon anarchique, sans orientation aucune, au sein d'une masse très homogène de composition généralement leuconoritique. Cette association (« block structure ») a été décrite par divers auteurs en de nombreux points des grands massifs d'anorthosite (R. BALK, 1931; T. F. W. BARTH, 1952; J. et P. MICHOT, 1953; J. MICHOT, 1955) (Fig. 9).

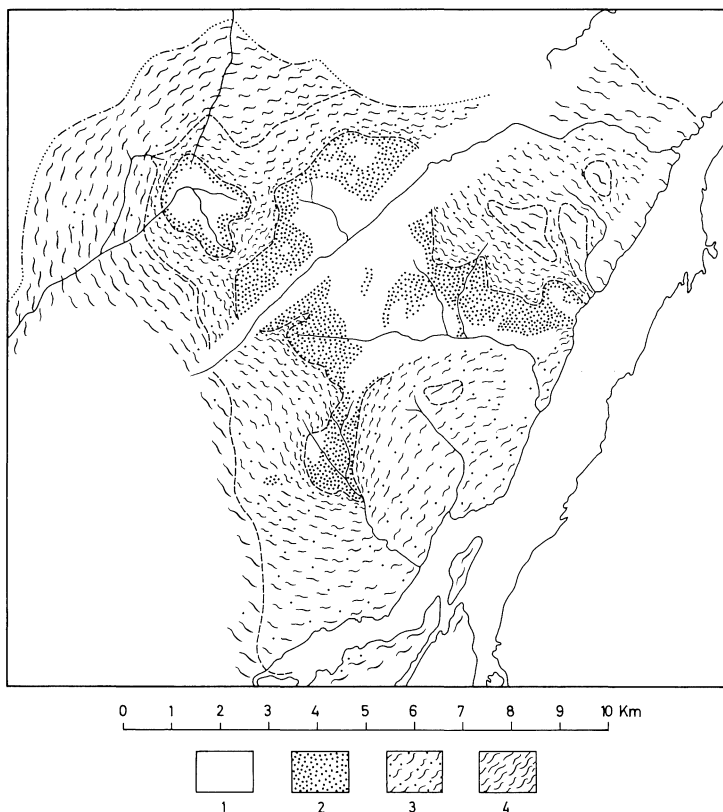


Fig. 7. — Distribution spatiale des roches anorthosito-noritiques (ou gabbroïques) et des ensembles acides qui leur sont associés dans le Snowy Mountain dome, centre des Adirondacks (D'après D. DE WAARD et W. D. ROMÉY, 1968).

1) Anorthosite; 2) Norite, Jotunite, Mangérite; 3) Norite, Jotunite, Mangérite gneissifiées, avec phénocristaux de plagioclase; 4) idem, sans phénocristaux.

4. Enfin, le quatrième type d'association donne naissance à un complexe au sein duquel l'anorthosite et la leuconorite (ou la norite) se caractérisent par un système de relations spatiales réciproques. Suivant la prédominance de l'une ou l'autre de ces roches, apparaît soit une anorthosite à « pseudo-enclaves » de leuconorite, soit une leuconorite à « enclaves » d'anorthosite (Fig. 10 et 11).

Dans le premier cas, il s'agit en majeure partie d'une masse anorthositique enserrant des poches lenticulaires de leuconorite de petite taille, allongées toutes suivant une même direction parallèle à la disposition d'ensemble des textures. Dans la leuconorite, les pyroxènes et minerais noirs forment des agrégats dessinant de minces filets de 1 à 2 cm de long, orientés parallèlement les uns aux autres, non seulement dans une même poche mais également dans toutes les poches d'une même zone, leur conférant un aspect gneissique fin. De son côté, la leuconorite à « enclaves » d'anorthosite se caractérise par une texture gneissique soulignée par l'allongement des minéraux foncés : elle englobe des lentilles d'anorthosite très allongées, diaclassées, s'effilant aux deux extrémités. Ces lentilles, pouvant atteindre 3 à 4 m de long, 0,40 à 0,50 m de large, sont orientées suivant la texture de la roche enrobante; leurs contacts avec la leuconorite sont en règle générale très nets.

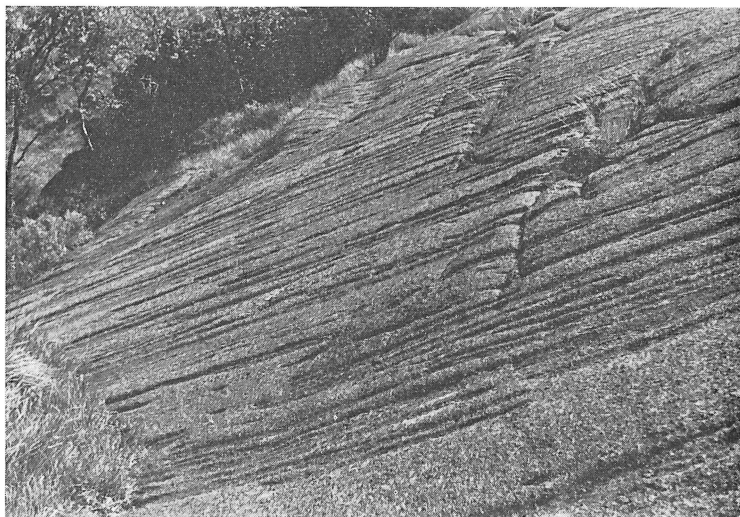


Fig. 8a. — Complexe rubano-lité anorthosito-noritique. En relief : anorthosite; en dépression : leuconorite et norite. (Massif de Haaland, Egersund, Norvège Méridionale).



Fig. 8b. — Complexe rubano-lité, anorthosito-noritique : détail. Les lits noritiques sont localement parsemés de cristaux d'hypersthène étirés et granulés. (Massif de Haaland, Egersund, Norvège Méridionale).

Fig. 9a.

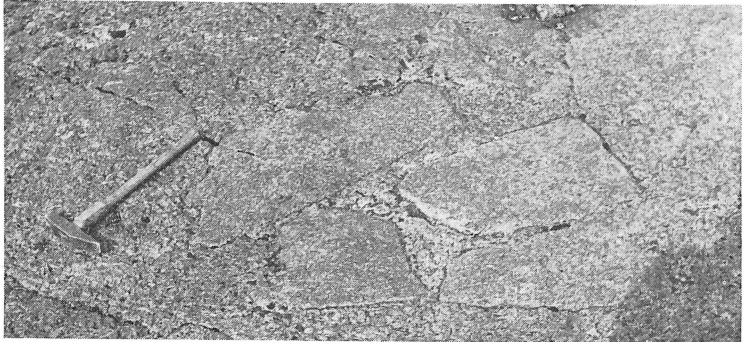


Fig. 9b.

Fig. 10.

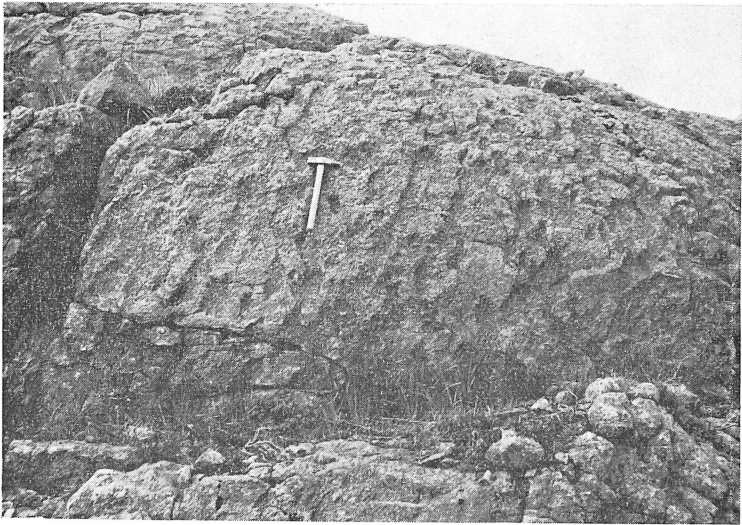


Fig. 9a. — « Block structure ». Des enclaves d'anorthosite à contours assez nets et réguliers sont dispersées sans orientation dans un ciment leuconoritique. (Massif de Haaland, Egersund, Norvège Méridionale).

Fig. 9b. — « Block structure », détail. Les enclaves d'anorthosite présentent diverses textures : massive (Fig. 9a; cette figure, enclave inférieure), rubano-litée, ou encore finement gneissique (cette figure, enclave supérieure). (Massif de Haaland, Egersund, Norvège Méridionale).

Fig. 10. — Anorthosite (en relief) à « pseudo-enclaves » de leuconorite (en dépression). Dans les poches leuconoritiques, toutes allongées parallèlement à la texture d'ensemble, les minéraux ferromagnésiens présentent une orientation identique. (Massif de Haaland, Egersund, Norvège Méridionale).

Fig. 11. — Bancs d'anorthosite étirés, tronçonnés, constituant des « enclaves » allongées parallèlement les unes aux autres dans un ciment leuconoritique. (Massif de Haaland, Egersund, Norvège Méridionale).

Fig. 12a. — Association de bancs et lits d'anorthosite et de leuconorite en proportions égales. (Massif de Haaland, Egersund, Norvège Méridionale).

Fig. 12b. — Idem, détail lithologique.

Fig. 11.

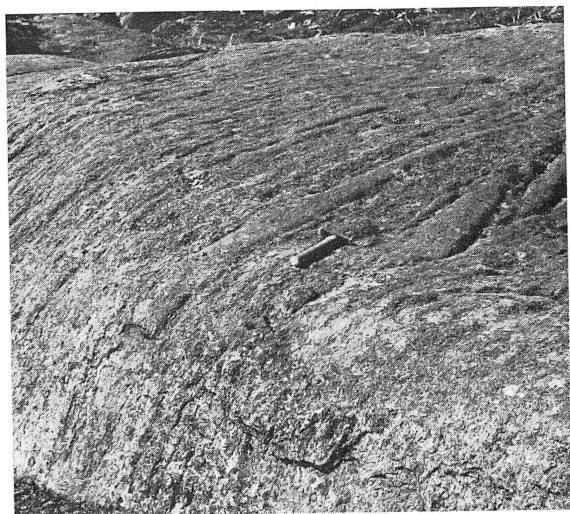
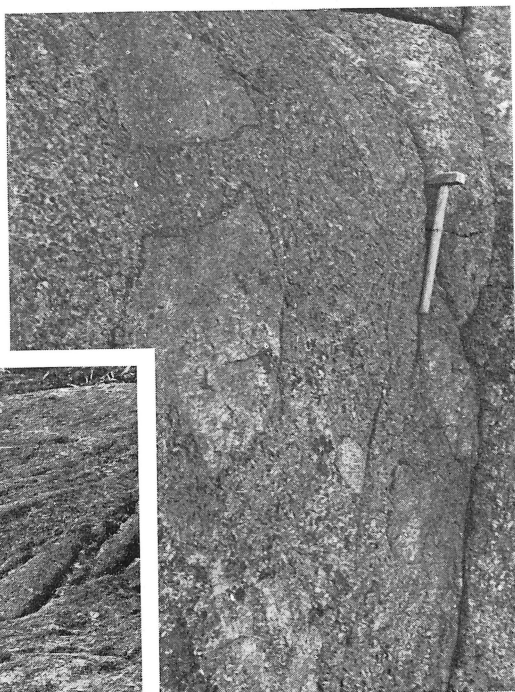
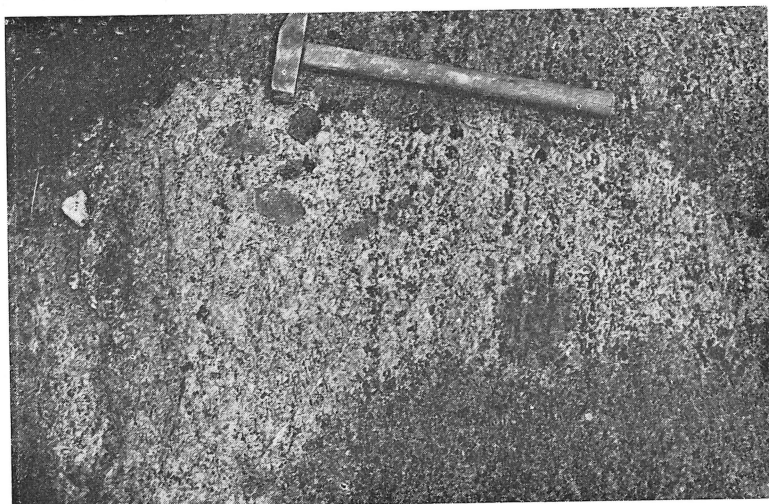


Fig. 12a.

Fig. 12b.



Entre ces deux types extrêmes, l'anorthosite à « pseudo-enclaves » de leuconorite d'une part et la leuconorite à « enclaves » d'anorthosite d'autre part, on peut observer tous les termes intermédiaires, en particulier une association dans laquelle les deux roches se trouvent en masses lito-lenticulaires, suivant des proportions égales (Fig. 12 et 13). Ce type d'association d'anorthosite-leuconorite (ou norite) a été rencontré et interprété dans diverses régions, en particulier dans le massif de Haaland, Egersund (P. MICHOT, 1955a, 1957; J. MICHOT, 1960, 1961).

Il constitue par ailleurs la caractéristique structurale d'unités géologiques de très grande étendue et de texture massive et a été décrit sous le terme de « cumulate texture » (L. R. WAGER, G. M. BROWN and W. J. WADSWORTH, 1960), par exemple dans le Snowy Mountain Dome (D. de WAARD and W. J. ROMÉY, 1963, 1968), dans l'Oregon Dome et la Giant Mountain (G. M. BOONE, W. D. ROMÉY and D. S. THOMPSON, 1968). Il définit le massif de Hellenen, Egersund (J. MICHOT, 1960, 1961) et celui d'Aana-Sira situé un peu plus à l'est (Fig. 14).

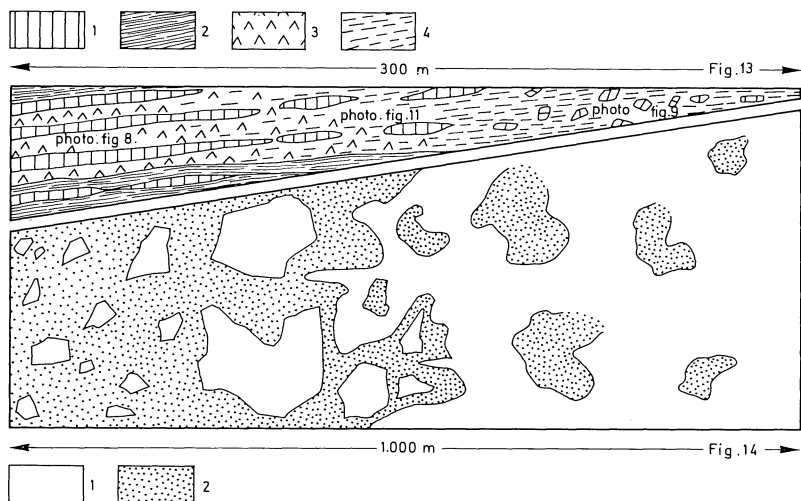


Fig. 13. — Complexe rubano-lité anorthosito-noritique passant à une leuconorite gneissique à « enclaves » lenticulaires d'anorthosite, puis à une association formée d'enclaves d'anorthosite dispersées sans orientation dans une leuconorite légèrement orientée. 1) Anorthosite; 2) Gneiss leuconoritique; 3) Leuconorite rubanée; 4) Leuconorite gneissique. (Massif de Haaland, Egersund, Norvège Méridionale).

Fig. 14. — Passage de l'anorthosite massive à la leuconorite et norite constituant la couronne périphérique du massif de Hellenen (Egersund, Norvège Méridionale).

1) Anorthosite; 2) Leuconorite et norite.

HYPOTHÈSES SUR L'ORIGINE DES ANORTHOSITES

Les types d'association lithologique qui viennent d'être rapidement rappelés dépendent tous, à l'exception du type 2, en particulier dans son faciès migmatitique, de processus de caractère magmatique. C'est cette constatation qui, liée à la composition monominérale des masses anorthositiques proprement dites et à l'absence d'équivalent effusif, a constitué depuis longtemps l'essence même du problème que pose l'étude des anorthosites. De là, les différentes hypothèses qui ont été proposées. Elles visent les unes comme les autres, mais à des degrés divers, à l'intégration

des trois éléments essentiels du problème : la nature du magma parental, le processus de différenciation en première phase des plagioclases et le style d'association de l'ensemble anorthosite-norite avec les produits plus acides charnockitiques : mangérite, granite ou syénite.

C'est ainsi que trois groupes d'hypothèses se sont progressivement élaborés. Les unes postulent une origine magmatique; cinq possibilités y ont été envisagées :

— les anorthosites résulteraient de la cristallisation d'une masse liquide de composition très particulière anorthositique (F. D. ADAM, 1893; C. F. KOLDERUP, 1896; F. LOEWINSON-LESSING, 1901, 1923; J. H. L. VOGT, 1908, 1924; W. J. MILLER, 1918);

— plus classiquement elles représenteraient les produits d'accumulation de plagioclases issus d'un magma de composition gabbroïque (N. L. BOWEN, 1917; V. M. GOLDSCHMIDT, 1922; A. F. BUDDINGTON, 1939; J. HØDAL, 1944);

— sur une base plus large, elles appartiendraient à la même série magmatique que les mangérites ou syénites avec lesquelles elles sont souvent associées et proviendraient plutôt de la différenciation d'un magma de type granodioritique, monzonitique quartzique, dioritique ou dioritique quartzique (R. A. DALY, 1914; R. BALK, 1931; T. F. W. BARTH, 1936; A. R. PHILPOTTS, 1966; T. H. GREEN, 1968);

— ou encore, elles dériveraient de la cristallisation d'un liquide riche en plagioclases, formé à des températures inférieures à 1300° sous des conditions de P_{H_2O} de plusieurs kb (A. F. BUDDINGTON, 1961);

— enfin, elles pourraient correspondre aux premiers produits accumulés au cours de la cristallisation d'un magma hybride, d'origine basaltique, contaminé par assimilation de roches de la série pélitique et dont les dernières phases seraient représentées par des monzonorites et des mangérites (P. MICHOT 1955b, 1960b, 1965a).

D'autres hypothèses font appel à des processus génétiques, excluant tout état magmatique, se développant par contre à l'état solide :

— il s'agirait d'un processus d'anorthositisation agissant sur un complexe noritique ou leuconoritique (T. F. W. BARTH, 1952), particulièrement à l'intervention d'action migmatitisante (P. MICHOT, 1955b, 1956),

— ou encore, à l'échelle de la planète, d'une anorthositisation qui s'exercerait dans les parties profondes de l'écorce terrestre, les conditions thermodynamiques ayant pour effet de chasser l'oxygène, le silicium, le potassium et le sodium, laissant ainsi sur place une masse formée d'un plagioclase intermédiaire associé à du pyroxène du grenat, de l'olivine et du minerai noir (H. RAMBERG, 1952).

Enfin un troisième groupe d'hypothèses envisage une origine anatectique :

— les anorthosites représenteraient la phase solide résiduelle après expulsion du mobilisat résultant d'une anatexie développée à partir d'un ensemble de composition globale leuconoritique ou andésitique (P. MICHOT, 1955a, J. MICHOT, 1960, 1961; T. H. GREEN, 1968) ou à partir de roches sédimentaires (H. G. F. WINKLER and H. von PLATEN, 1960);

— ou encore, à l'inverse, seraient le produit cristallisé d'un liquide obtenu par fusion partielle de roches éruptives ou sédimentaires de compositions diverses (H. S. YODER and C. E. TILLEY, 1962; J. P. BERRANGE, 1966; A. T. ANDERSON and M. MORIN, 1968).

Dans l'état actuel de nos connaissances, les nombreuses recherches de terrain jointes aux études pétrographiques diverses permettent de faire un choix parmi tous les processus proposés et les limitent en fait à deux d'entre eux : (1) *la cristallisation fractionnée permettant l'individualisation première des cristaux de plagioclase à partir d'un magma de composition particulière, ou* (2) *l'anatexie de certaines roches aboutissant, lors de l'expulsion du mobilisat, à la concentration du résidu plagioclasique.*

Il s'agit, dans l'un et l'autre cas, de processus liés à l'évolution d'un bain magmatique, processus qui seuls rendent compte des structures caractéristiques des grands massifs anorthositiques. Les distinguer génétiquement l'un de l'autre n'est cependant possible, ni sur la base des données de terrain, ni sur celle des observations pétrographiques. En effet, qu'il s'agisse d'une origine magmatique primaire ou d'une origine de caractère anatectique, les relations mutuelles, les structures et les textures des roches anorthositiques et des masses qui leur sont associées restent semblables. Dans le premier cas, l'anorthosite dérive de cristallisation et différenciation découlant de la baisse de température enregistrée par le magma; dans le second, elle s'élabore sous forme d'un résidu para-anatectique à l'intermédiaire d'un phénomène qui par température croissante provoque la fusion d'un bain eutectical. D'un côté comme de l'autre, dans l'étape majeure de l'édification de la masse anorthositique, une phase solide, l'anorthosite, se trouve associée à une phase plus ou moins liquide qui suivra une évolution dépendant des conditions de chimisme et de température qui la définissent.

Devant l'impossibilité pour la géologie et la pétrologie classiques d'aller plus avant dans l'étude de ce problème, force est de faire appel à d'autres disciplines : la pétrologie expérimentale d'une part et la géochimie isotopique et des éléments en trace de l'autre.

C'est ici qu'intervient la recherche pluridisciplinaire.

APPORT DE LA PÉTROLOGIE EXPÉRIMENTALE

Les études expérimentales récentes concernant le problème des anorthosites ont porté à la fois sur les systèmes synthétiques simples et sur certaines roches naturelles; elles se sont limitées aux cas où intervient essentiellement une phase liquide. En effet, les considérations génétiques envisagées plus haut demandent que soient vérifiées les conditions dont doit dépendre,

— ou bien la concentration et la séparation des cristaux de plagioclase dans une phase liquide,

— ou encore la concentration des composants plagioclasiques en une phase liquide qui isolée, aboutirait à la cristallisation d'anorthosite.

Il ne s'agit pas par là de fournir la solution au problème posé par le géologue, mais de renseigner ce dernier sur la validité physico-chimique des processus qu'il invoque dans l'hypothèse génétique présentée. Les résultats expérimentaux ont jusqu'à présent confirmé la possibilité d'existence de deux des processus proposés : cristallisation fractionnée et fusion partielle avec individualisation d'un résidu plagioclasique.

En premier lieu, les expériences entreprises sur des roches éruptives naturelles ont permis de vérifier que pour la série des basaltes calc-alcalins, le plagioclase correspond régulièrement à la première phase de cristallisation. Les recherches effectuées

par TILLEY, YODER et SCHAIRER (1966) sur les basaltes et les andésites du Paricutin (Mexico), et par YODER et TILLEY (1962) sur les basaltes des Medicine Highlands (Californie) en sont des exemples. L'accumulation des plagioclases à partir de ces magmas riches en alumine, pourrait donc très bien correspondre à un type d'édification des grandes masses anorthositiques, mais ne peut se concevoir d'après l'expérimentation que sous des conditions de pression d' H_2O très faible.

Un élément s'oppose toutefois à cette conception. La teneur en anorthite du plagioclase ainsi constitué atteint en principe des valeurs nettement plus élevées que celles qui caractérisent les roches anorthositiques en question. Sur ce point, les résultats récents obtenus par GREEN (1968) lors d'études expérimentales sur la cristallisation fractionnée dans des liquides de composition dioritique quartzique, montrent que les plagioclases au niveau du liquidus, présentent une augmentation très nette du rapport Ab/An en fonction de la pression. Ainsi, il est possible d'obtenir des plagioclases de type andésine au dessus de 9 kb, et ceci par opposition, dans le cas étudié, au plagioclase de type labrador qui s'obtiendrait à 0 kb.

D'un autre côté, bien qu'encore imparfaitement élucidées, des accumulations de plagioclases par flottation dans des magmas alcalins pourraient également se produire (H. S. YODER, 1968) et donner lieu ainsi à la formation de cumulats anorthositiques.

D'autres recherches expérimentales s'appuyant sur les associations fréquentes de roches syénitiques, mangéritiques ou grandioritiques avec les complexes anorthositiques ont visé à tester le lien génétique entre ces deux ensembles lithologiques. Les auteurs qui ont favorisé cette conception (T. F. W. BARTH, 1936; A. R. PHILPOTTS 1966, 1968, par exemple) ont estimé la composition du magma originel comme devant se situer approximativement au niveau d'une diorite quartzique, voire d'une andésite.

Les travaux de GREEN (1968) sur un verre synthétique de composition semblable ont confirmé la possibilité d'existence du lien génétique présumé. Des roches de composition anorthositique, leuconoritique et noritique, peuvent donc être considérées comme des produits différenciés à partir d'un magma de caractère andésitique soumis à des pressions variant entre 5 et 14 kb, le liquide résiduel produisant ensuite la série des roches acides qui leur sont associées et vers lesquelles elles passent plus ou moins graduellement.

Cette conception n'est pas en opposition avec les observations relevées dans les Adirondacks par BUDDINGTON (1939), qui indiquent que les ensembles syénitiques et granitiques sont intrusifs dans le complexe d'anorthosite gabbroïque. Il est vraisemblable, qu'une fois les plagioclases séparés, et sous l'effet d'actions tectoniques plus ou moins intenses, le liquide résiduel se soit injecté non seulement dans des niveaux plus élevés de l'écorce terrestre, mais également au sein des roches dont la consolidation venait de s'opérer.

L'association anorthosite-syénite pouvait se déduire de l'étude du système Anorthite-Albite-Sanidine- H_2O à 5 kb (H. S. YODER, D. B. STEWART and J. R. SMITH, 1957).

En effet, compte tenu de la richesse en alcalis des liquides en équilibre avec le plagioclase et le feldspath alcalin, on y voit nettement la possibilité d'une séparation initiale de plagioclases qui agglomérés pourraient former une masse anorthositique associée à un liquide résiduel de caractère syénitique (Fig. 15).

Cependant, il n'explique pas l'interposition, entre l'anorthosite et les roches acides, du composant leuconoritique, noritique ou gabbroïque, condition qui est rencontrée dans la discussion des expériences de GREEN. Ces dernières apportent

en outre des éléments intéressants quant au second processus génétique envisagé dans l'élaboration des masses anorthositiques, à savoir la fusion partielle, ou anatexie différentielle, permettant l'individualisation d'un résidu plagioclasiq. En effet, les résultats obtenus par GREEN (1968) peuvent également expliquer la genèse des anorthosites sur la base d'une séparation, au sein d'un ensemble crustal de composition globale andésitique, entre une fraction liquide eutecticale de composition acide et une phase solide résiduelle formée de cristaux de plagioclase associés à du pyroxène et à des minerais noirs. Comme dans le modèle de la différenciation magmatique rappelé plus haut, la profondeur, c'est-à-dire la pression, à laquelle le phénomène se produit, sera le paramètre déterminant de la teneur en An du plagioclase. De même, l'établissement d'un gradient de température dans l'ensemble affecté par l'anatexie, la possibilité d'une différenciation secondaire par gravité et l'action éventuelle des agents tectoniques, aboutissent à créer les multiples dépendances de consanguinité et les relations spatiales que l'on observe habituellement entre les diverses roches des complexes anorthositiques.

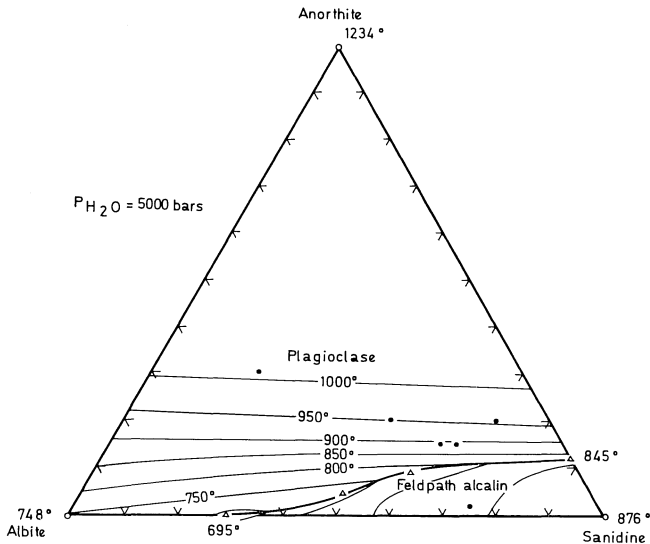


Fig. 15. — Système Albite-Anorthite-Sanidine- H_2O à 5 kb. (D'après H. S. YODER, D. B. STEWART and J. R. SMITH, 1957).

Il faut souligner qu'un processus similaire avait été expérimenté dès 1960 par WINKLER et von PLATEN (1960). Ces deux auteurs avaient en effet démontré la possibilité d'obtenir une phase résiduelle en majeure partie plagioclasiq par fusion différentielle d'une argile à laquelle ils avaient ajouté 15 % de $CaCO_3$ et 3 à 6 % de $NaCl$.

Ainsi, d'une façon générale, les travaux expérimentaux ont apporté une série de données qui ont permis de vérifier la réalité des processus proposés sur la base des études géologiques et pétrologiques. Ils ont en outre permis d'affiner, sur le plan physico-chimique, les modèles qui avaient été imaginés.

Ils ont fait apparaître également que d'autres hypothèses qui n'avaient pas été retenues jusqu'à présent par les géologues, pouvaient elles aussi être réenvisagées. En particulier, celles de la formation d'un magma de type anorthositique.

Les expériences de CLARK et al (1962) et YODER (1965) sur le système Anorthite-Diopside, avec ou sans H_2O , ont montré que les composants plagioclasiques pouvaient être concentrés dans une phase engendrée dans un matériau basique à forte pression, quelles que soient les conditions de pression d' H_2O existantes, permettant ainsi la cristallisation d'une roche anorthositique (Fig. 16).

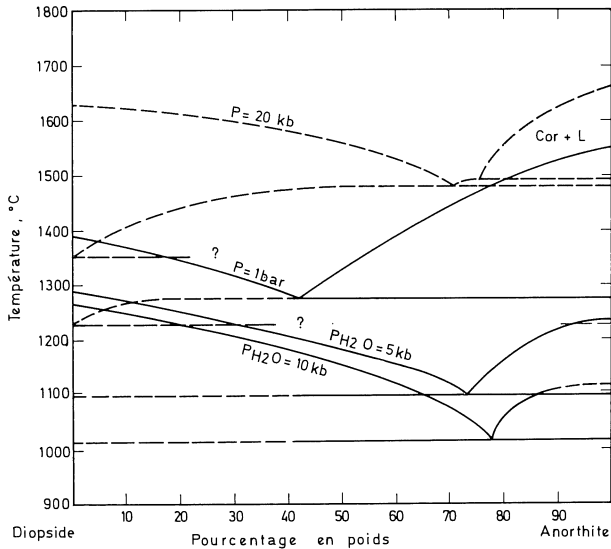


Fig. 16. — Système Diopside-Anorthite à 1b et 20 kb et Diopside-Anorthite- H_2O à 5 kb et 10 kb de P_{H_2O} (D'après E. F. OSBORN, 1942; S. P. CLARK, J. F. SCHAIRER et J. DE NEUFVILLE, 1962; H. S. YODER, 1965; repris de H. S. YODER, 1968).

Il faut noter que les températures élevées ($\pm 1400^\circ C$), nécessaires à l'obtention de la phase liquide en question dans des conditions où seules interviennent de fortes pressions statiques, ne paraissent pas géologiquement défendables.

Il en va autrement si l'on admet que la fusion se produit dans un matériau hydraté. Dans ces conditions, en effet, les liquides saturés en eau peuvent être engendrés, sous des pressions de 5 et 10 kb, à $1090^\circ C$ et $1015^\circ C$ environ (Fig. 16). Des liquides à caractère anorthositique pourraient donc être constitués par fusion partielle de matériau gabbroïque hydraté, localisé dans la partie inférieure de la croûte terrestre (H. S. YODER, 1968). Cette conclusion est confirmée par les expériences de LUTH et SIMMONS (1968) qui ont déterminé les températures auxquelles un liquide silicaté apparaît dans un matériau naturel, l'anorthosite faciès Marcy (Adirondacks), sous différentes conditions de pression d' H_2O . Les valeurs obtenues, $985 \pm 10^\circ C$ à 1 kb, $935 \pm 10^\circ C$ à 2 kb et $815 \pm 10^\circ C$ à 5 kb sont en gros comparables à celles qui découlent de l'étude des systèmes synthétiques.

APPORT DE LA GÉOCHIMIE ISOTOPIQUE

L'approche expérimentale a permis de fixer de manière plus ou moins précise les conditions physiques essentielles à la genèse et au développement des complexes anorthositiques, permettant ainsi de vérifier le bien fondé des processus génétiques

proposés sur la base des études géologiques. La géochimie isotopique pour sa part, va intervenir surtout dans le problème que pose le choix du ou des matériaux originaux à partir desquels auraient pu s'édifier les roches anorthositiques et le cortège lithologique qui s'y trouve associé.

Nous ne retiendrons ici que deux aspects de ce problème : le premier lié au rapport initial ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$), l'autre au rapport $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$. Ces deux rapports géochimiques sont-ils compatibles avec les origines présumées des roches dans lesquelles ils sont mesurés?.

Le rapport isotopique ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$)₀

On sait que des quatre isotopes du strontium, seul le Sr^{87} est produit par désintégration radioactive à partir du Rb^{87} et peut servir, par conséquent, de traceur dans l'étude de certains processus pétrogénétiques. Les matériaux terrestres en effet, compte tenu de leur rapport Rb/Sr et de l'âge du phénomène qui leur a donné naissance, présentent des variations très sensibles dans la proportion de leur Sr^{87} comparée aux autres isotopes non radiogéniques : Sr^{84} , Sr^{86} , Sr^{88} . On peut dès lors exprimer conventionnellement la variation de cette proportion dans le rapport $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$.

Dans les matériaux qui depuis l'origine du système solaire ont un rapport Rb/Sr extrêmement faible, le rapport $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ est vraisemblablement resté inchangé. C'est ainsi que l'on considère que le rapport ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$) à l'origine dans les météorites pierreuses ($0,698 \pm 0,001$) peut être l'image de celui qui caractérisait le globe terrestre au moment de sa formation (P. W. GAST, 1961; C. E. HEDGE and F. G. WALTHALL, 1963) (*).

Depuis cette époque, les divers processus géologiques qui ont modelé notre planète ont initié des variations dans les rapports Rb/Sr de ses matériaux constitutifs, en particulier entre le manteau et le matériau crustal. Les roches de l'écorce terrestre présentent ainsi des rapports $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ généralement élevés, dépendant de la valeur de leur rapport Rb/Sr respectif et de la durée durant laquelle le Sr^{87} radiogénique a pu s'accumuler. Les produits considérés comme provenant du manteau supérieur de rapport Rb/Sr très faible, se caractérisent actuellement par un rapport $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ légèrement supérieur à celui des météorites pierreuses. C'est ainsi qu'il se situe entre 0,702 et 0,704 pour les basaltes océaniques (G. FAURE and P. M. HURLEY, 1963; C. E. HEDGE and F. G. WALTHALL, 1963; M. TATSUMOTO et al, 1965; C. E. HEDGE 1966) et entre 0,703 et 0,705 pour la majorité des basaltes continentaux (G. FAURE and P. M. HURLEY, 1963; C. E. HEDGE and F. G. WALTHALL, 1963).

Par opposition, dans les produits lithologiques dont la formation se réalise dans le cadre de l'écorce terrestre, enrichis en Rb vis-à-vis du Sr , les rapports $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ apparaissent sensiblement plus élevés, le plus souvent supérieurs à 0,710. Pour les granites, les valeurs obtenues par divers auteurs varient entre celles des basaltes et 0,730 (C. E. HEDGE and F. G. WALTHALL, 1963; P. M. HURLEY et al, 1965; H. W. FAIRBAIN et al, 1964a, 1964b); pour les roches sédimentaires, des schistes surtout, à l'exclusion des roches carbonatées, ces valeurs oscillent entre 0,710 et 0,720, certains sédiments océaniques récents montrant des variations comprises entre 0,709, valeur du rapport dans l'eau de mer, et 0,730 (Tableau I).

(*) La détermination de ce rapport sur des échantillons lunaires ramenés par les missions Apollo 11 et 12 a donné une série de valeurs identiques à celle qui caractérise les météorites pierreuses : $\pm 0,699$ (G. W. WETHERILL, 1971).

TABLEAU I

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

	Sr^{87} / Sr^{86}
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 ultrabasiques	0,704 — 0,713

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

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. Il s'agit alors du rapport que l'on désigne comme « rapport à l'origine » : $(Sr^{87}/Sr^{86})_0$.

C'est sur ce rapport que l'on doit se baser pour vérifier les hypothèses relatives à la formation des complexes anorthositiques.

Comme nous l'avons vu plus haut, ces hypothèses peuvent se regrouper en deux séries : différenciation magmatique ou produits d'anatexie. Quelle devrait dès lors être la valeur des rapports $(Sr^{87}/Sr^{86})_0$ des différentes roches constituées dans l'une ou l'autre de ces conditions.

Dans le premier cas, on sait que les roches anorthositiques pourraient dériver d'une cristallisation fractionnée au sein d'un magma dont l'origine vraisemblable se situe au niveau du manteau supérieur, que ce magma provienne ou non d'une fusion différentielle des roches basaltiques comme le suggèrent les expériences de YODER et TILLEY (1962), ou de la remobilisation d'une couche anorthosito-gabbroïque préexistante (A. F. BUDDINGTON, 1939; A. T. ANDERSON and M. MORIN, 1968). Elles pourraient aussi trouver leurs éléments dans l'évolution d'un magma de composition dioritique quartzique ou andésitique engendré à la base de l'écorce terrestre (T. F. W. BARTH, 1936; A. R. PHILPOTTS, 1966).

On doit s'attendre, par conséquent, à y mesurer un rapport $(Sr^{87}/Sr^{86})_0$ semblable à celui qui caractérise les basaltes continentaux (0,703 à 0,705) (S. A. HEATH and H. W. FAIRBAIRN, 1968).

Dans le second groupe d'hypothèses deux possibilités peuvent être retenues. Ou bien les ensembles anorthositiques sont liés à une anatexie développée sur des matériaux dans lesquels le rapport Rb/Sr faible implique un rapport Sr^{87}/Sr^{86} également peu élevé. Ces conditions s'appliquent en fait au phénomène de palingénèse décrit au sein de certaines formations anorthositiques et leuconoritiques du complexe éruptif du Rogaland méridional (J. MICHOT, 1961) pour lesquelles le rapport $(Sr^{87}/Sr^{86})_0$ devrait dès lors être vraisemblablement voisin de 0,705.

Ou bien les ensembles anorthositiques correspondent à des produits résiduels d'une anatexie développée à partir de roches sédimentaires, suivant en cela le processus expérimenté par WINKLER et von PLATEN (1960), la fusion d'une roche argileuse ayant donné un résidu anorthositique d'une part et une phase liquide comparable à une roche acide d'autre part. Les anorthosites ainsi constituées devraient dans ce cas être caractérisées par un rapport $(\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_0$ correspondant au rapport $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ des roches au dépens desquelles elles ont pris naissance, en fait un rapport en général variable, mais substantiellement plus élevé que la valeur 0,705.

Les déterminations du rapport $(\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_0$ réalisées au M.I.T. (S. A. HEATH and H. W. FAIRBAIRN, 1968) sur des échantillons provenant des gisements anorthositiques d'Amérique du Nord et de Norvège donnent de manière répétée des valeurs comprises entre 0,703 et 0,706, valeurs identiques à celles qui caractérisent les basaltes continentaux. Cette série de mesures est parallèle à celle qui à été entreprise aux Laboratoires de Minéralogie et Pétrologie de l'U.L.B. sur des roches du Rogaland méridional : les rapports $(\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_0$ des roches anorthositiques qui n'ont subi aucune action métamorphique ou ultramétamorphique ultérieure se situent dans la même gamme de valeurs (J. MICHOT et P. PASTEELS, 1969). L'hypothèse de la constitution des ensembles anorthositiques au départ d'un magma d'origine sous-crustal peut trouver là un argument sérieux. Le remaniement anatectique de roches édifiées suivant ce processus, donnant naissance à des massifs anorthositiques rajeunis (paranatectiques), n'est toutefois pas exclu. Les valeurs du rapport $(\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_0$ des produits élaborés au cours de la néoformation des massifs anatectiques de Haaland et d'Helleren se situent en effet également autour de 0,706 (J. MICHOT et P. PASTEELS, 1969).

En l'absence de valeurs élevées du rapport en question, on peut cependant écarter, pour les massifs étudiés, l'hypothèse d'une formation par fusion anatectique de roches sédimentaires.

L'autre volet, lié au problème des anorthosites, concerne les relations génétiques entre ces dernières roches et les ensembles acides (syénites, mangérites...) au voisinage desquels elles se présentent régulièrement.

Les études de HEATH et FAIRBAIRN (1968) ont montré par la méthode de l'isochrone Rb-Sr en roche totale, appliquée à deux massifs, les Adirondacks d'une part le Nain de l'autre, que dans la première région l'ensemble de la succession lithologique paraissait comagmatique, tandis que dans la seconde une telle conclusion ne pouvait être proposée.

En ce qui concerne le Rogaland méridional, les mesures du rapport $(\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_0$ caractérisant les différents types lithologiques du lopolithe différencié de Bjerkrem-Sogndal (J. MICHOT et P. PASTEELS, 1969) montrent des valeurs qui s'étagent de 0,7072 pour la norite de la phase I à 0,7068 pour la monzonorite de la phase II, et à 0,7118 et 0,7148 pour la mangérite de la phase III, dernier produit de la différenciation qui caractérise ce massif. Cette évolution, dans l'optique de la filiation entre les phases I, II et III du lopolithe, ne peut se concevoir que dans le cadre d'une contamination du magma originel par des matériaux sialiques et apporte dans ce cas un argument tendant à prouver la réalité de l'existence du magma plagioclasi-que, tel que défini par P. MICHOT (1965a, 1965b).

Ainsi, en conclusion de cette partie de notre étude, peut-on dire que la considération du rapport isotopique $(\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86})_0$ des roches constituant la majeure partie des grands complexes anorthositiques permet sur le plan génétique d'écarter, parmi les processus proposés à partir d'autres données, ceux d'entre eux qui ne cadrent pas

avec le fait géochimique discuté ici. On est ainsi amené à classer parmi les hypothèses peu vraisemblables, la formation d'importantes masses d'anorthosite par anatexie de matériaux essentiellement d'origine sédimentaire. En outre, on y trouve la justification d'un phénomène qui sur le plan pétrologique paraissait contesté et dont le principe se trouve maintenant renforcé, celui de la contamination du magma parental sous-crustal par un matériau d'origine crustal, qu'il s'agisse de pélites, d'arkoses (P. MICHOT) ou comme l'a suggéré ultérieurement PHILPOTTS (1968) d'un matériau anatectique acide.

Le rapport isotopique O^{18}/O^{16} ()*

Depuis quelques années, des mesures sur la proportion des isotopes O^{18} et O^{16} dans les minéraux et les roches ont été réalisées en assez grand nombre (H. P. TAYLOR and S. EPSTEIN, 1962a, 1962b; G. D. GARLICK and S. EPSTEIN 1967). Jumelées à des études expérimentales sur le coefficient de répartition de ces deux isotopes entre divers minéraux et l'eau, elles ont permis d'aborder des problèmes pétrologiques importants, en particulier celui qui nous occupe ici sur l'origine des masses anorthositiques.

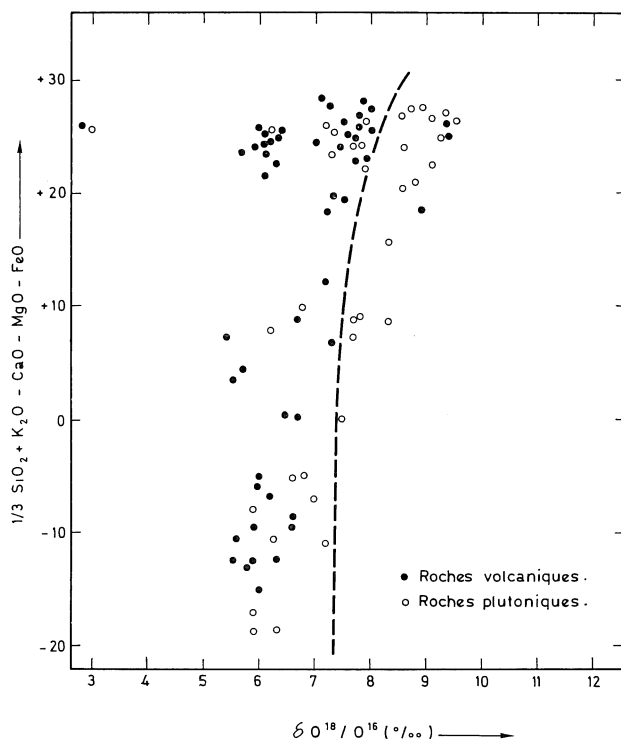


Fig. 17. — Rapports O^{18}/O^{16} (sur roches totales) caractérisant les roches magmatiques, portés en fonction de l'Index de Larsen (% en poids de $1/3 SiO_2 + K_2O - CaO - MgO - FeO$). (D'après H. P. TAYLOR, 1968b).

(*) Les éléments sur lesquels nous nous appuyons ici sont repris essentiellement des travaux de H. P. TAYLOR, en particulier ceux dont les résultats ont été présentés au Symposium sur l'origine des anorthosites et des roches associées, Plattsburgh, 1966 (H. P. TAYLOR, 1968b).

Les données concernant le rapport O^{18}/O^{16} des minéraux et roches étudiées dans ce cadre sont fournies sous la forme δO^{18} pour mille, suivant la formule :

$$\delta O^{18} = 1000 \times \left[\frac{O^{18}/O^{16} \text{ échantillon}}{O^{18}/O^{16} \text{ standard}} - 1 \right]$$

où le standard correspond à un échantillon moyen d'eau océanique.

D'une manière générale, les résultats obtenus sur les minéraux des roches magmatiques ont montré que leur rapport O^{18}/O^{16} reste relativement constant quels que soient l'âge, le lieu géographique et la configuration géologique des ensembles dont ils font partie. En outre, ils indiquent nettement que les roches plutoniques basiques sont caractérisées par un rapport des isotopes légèrement plus faible que celui qui définit les roches plutoniques acides, caractère qui ne se marque pas dans la série des roches volcaniques (Fig. 17) (H. P. TAYLOR, 1968a). Ainsi, si l'on fait abstraction des plutons granitiques et des faciès pegmatitiques divers, trouve-t-on que l'ensemble des roches magmatiques terrestres, non métamorphisées ou altérées, est défini par une série de rapports O^{18}/O^{16} qui situe la valeur de δ entre 5,5 et 8,0 ‰. En particulier, TAYLOR et EPSTEIN ont mis en évidence que les plagioclases des roches gabbroïques et des basaltes présentent des valeurs de δ comprises entre 6,0 et 7,5 ‰ (Fig. 18).

L'ensemble de ces données, comparées à celles qui ont été obtenues sur un échantillonnage très large de plagioclases de roches anorthositiques, indique une identité étroite entre les valeurs obtenues (Fig. 18). A peu près tous les plagioclases étudiés par TAYLOR (1968b) et provenant de massifs différents, à l'exclusion des Adirondacks, révèlent des valeurs de δ oscillant entre 5,8 et 7,6 ‰. On peut donc y voir, sur la base de ce caractère isotopique, la confirmation du lien génétique existant entre les anorthosites et les magmas basaltiques, voire les magmas de type andésitique, leur plagioclase étant sur ce plan semblable à ceux des roches gabbroïques (TAYLOR 1968a).

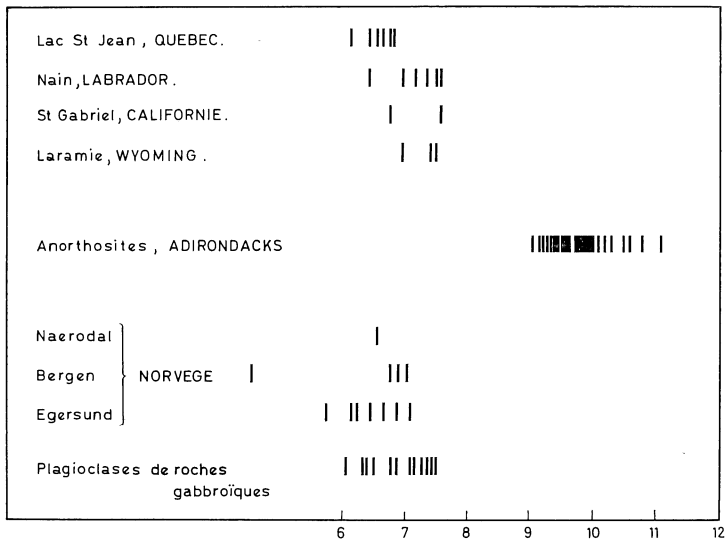


Fig. 18. — Rapports O^{18}/O^{16} caractérisant les plagioclases de divers complexes anorthositiques (D'après H. P. TAYLOR, 1968b).

Le cas particulier qui apparaît dans la distribution des valeurs se rapportant aux plagioclases des anorthosites des Adirondacks s'interprète sur la base des processus métamorphiques qu'ont subis ces roches postérieurement à leur formation.

En conclusion, les données isotopiques qui viennent d'être rappelées permettent d'écartier, comme dans le cas précédent, l'hypothèse de l'origine des masses anorthositiques liée à un phénomène anatectique développé sur des ensembles sédimentaires, en particulier si ceux-ci renferment des roches carbonatées pour lesquelles les valeurs de δ sont particulièrement élevées. En ce qui concerne la réalité d'une contamination d'un magma basaltique ou andésitique par du matériau sialique et le développement d'un magma plagioclasiqne, il semble que contrairement à l'opinion de TAYLOR, les données isotopiques relevées jusqu'à présent ne permettent pas de l'infirmier.

APPORT DE LA GÉOCHIMIE DES ÉLÉMENTS EN TRACE

D'une manière succincte, on peut dire que les quelques travaux réalisés dans ce cadre apportent, dans les grandes lignes, une confirmation supplémentaire aux conclusions auxquelles nous sommes arrivés jusqu'ici. L'association systématique du rubidium avec le potassium dans diverses catégories de roches, caractéristique qui s'explique sur la base de considérations cristallochimiques, a été appliquée à la recherche d'une solution au problème de la genèse des roches anorthositiques. Il se fait, en effet, que le rapport K/Rb est un des paramètres qui reflète de manière assez sensible le domaine d'origine des roches dans lesquelles il est mesuré. C'est ainsi que l'on a pu montrer (K. S. HEIER and S. R. TAYLOR, 1959; K. S. KEIER and J. A. S. ADAMS, 1964) que dans les roches d'origine crustale, ce rapport atteignait des valeurs voisines de 250, tandis que dans les matériaux en provenance du manteau supérieur ou de la base de l'écorce terrestre, il s'élevait très nettement au-dessus de ce chiffre (340-1830) (P. W. GAST, 1965).

En moyenne, les déterminations du rapport K/Rb dans les roches de la série anorthosite-charnockite des Adirondacks (R. C. REYNOLDS et al, 1968) ont donné des valeurs d'environ 1470 ± 107 , confirmant la possibilité de leur origine sous-crustale. Par ailleurs, l'étude de ce rapport dans l'ensemble norito-charnockitique entourant le cœur anorthositique de la Snowy Mountain a donné une série de valeurs décroissantes en fonction de l'acidité des roches étudiées (1318 ± 136 ; 647 ± 54 : op cit.), évolution conforme aux caractéristiques d'une série découlant d'un processus de différenciation magmatique (V. M. GOLDSCHMIDT, 1954). Signalons, toutefois, que cette évolution pourrait également être interprétée comme résultat d'une contamination, par les séries métamorphiques encaissantes, du magma dont seraient issues les masses anorthositiques (op cit.).

Dans un autre ordre d'idées, des études préliminaires sur la teneur en terres rares d'un échantillon d'anorthosite et de mangérite (J. A. PHILPOTTS, 1966) ont indiqué que l'anorthosite devait être considérée comme représentant un cumulat formé à partir d'un liquide dont le style de distribution des terres rares (*), à l'exclusion d'une forte teneur en europium, était d'un type semblable à celui des basaltes continentaux et océaniques. Quant au style de distribution des terres rares dans la mangérite, il semblait plutôt être apparenté à celui qui caractérise les roches sédimentaires.

L'anomalie importante de la teneur en europium dans l'anorthosite et l'absence de cette anomalie dans la mangérite confirmerait, d'après J. A. PHILPOTTS, ou bien la non existence, déjà indiquée dans les styles de distribution des terres rares, d'une relation génétique entre les deux roches, ou bien l'assimilation par le magma résiduel

(*) Distribution normalisée par rapport à la teneur en terres rares des chondrites.

dont serait issue la mangérite, d'une quantité considérable de roches renfermant une teneur normale en europium.

Sur le plan minéralogique, les travaux réalisés par DUCHESNE (inédit 1971) sur l'évolution de la composition de l'olivine et des pyroxènes dans le massif de Bjerkrem-Sogndal (Norvège méridionale) montrent que cette évolution présente de grandes analogies avec celles reconnues dans d'autres grands massifs anorthositiques, tels Michikamau et St-Regis. Ceci plaide en faveur de l'hypothèse d'une composition unique pour le magma initial.

En outre, l'évolution étudiée s'est révélée identique également, dans ses grandes lignes, aux tendances qui apparaissent au sein des intrusions du Skaergaard et du Bushveld. Si dans le détail, elle présente avec ces dernières des différences bien marquées que l'on peut interpréter en fonction de variations du chimisme et/ou de pression totale, elle permet néanmoins de poser la question de la dépendance chimique entre les magmas dont proviennent les anorthosites profondes et d'autres plus superficielles.

LE PROBLÈME DES ANORTHOSITES

Confrontés aux résultats acquis par les voies de la pétrologie expérimentale, de la géochimie isotopique et de la géochimie des éléments en traces, les hypothèses proposées par les géologues du cristallophyllien quant à l'origine et la genèse des grandes masses anorthositiques, ont pu être testées; certaines d'entre elles ont été repoussées. Des équipes de chercheurs, surtout anglo-saxons, grâce à une concertation interdisciplinaire, ont, dans ce domaine, réussi à clarifier les données d'un problème qui, jusqu'à il y a quelques années, paraissait encore fort confus.

De l'ensemble des hypothèses énoncées au début de cette étude, deux restent plausibles : (1) celle liée à un processus de différenciation magmatique opérant au sein d'un magma d'origine sous-crustal dont il reste cependant à définir la composition (avec ou sans contamination crustale) et l'évolution; (2) celle liée à un processus d'anatexie développé sur des roches de la croûte terrestre vraisemblablement d'origine magmatique, à rapport Rb/Sr faible, processus aboutissant à la concentration d'une fraction solide résiduelle constituant le cumulat anorthositique.

Une étape importante a ainsi été franchie dans l'étude d'un des grands phénomènes dont le développement intéresse les domaines profonds de l'écorce terrestre.

La synthèse des travaux qui y ont été consacrés au cours de cette dernière décade a fait l'objet d'un symposium à Plattsburgh, New-York, en 1966. Les différentes conceptions s'y sont confrontées, y ont été décantées et des lignes de recherches nouvelles y ont été esquissées.

Comme je le soulignais au début de mon exposé, l'extention des recherches dans le cadre de la prospection des fonds océaniques, de la reconnaissance de l'interface croûte continentale — croûte océanique et des divers paramètres géophysiques caractérisant les roches qui les constituent, de même que les découvertes récentes sur la nature et la composition du sol lunaire, ont relancé, s'il était nécessaire, l'intérêt pour les ensembles lithologiques dont les anorthosites constituent l'élément principal.

En effet, en ce qui concerne le satellite terrestre, l'étude des anomalies de gravité déduites de la trajectoire des véhicules en orbite autour de la Lune et des données pétrographiques obtenues sur les échantillons étudiés jusqu'à présent, a permis de proposer un premier modèle retraçant l'évolution de la croûte lunaire.



Fig. 19. — Distribution géographique des grands massifs anorthositiques préalablement à la dérive des continents (Configurations continentales reprises de P. M. HURLEY-1968).

La constitution d'une couche d'anorthosite « actuellement préservée dans la zone des montagnes » y est envisagée comme le résultat d'un phénomène de fusion partielle du matériau lunaire sur une épaisseur de quelques dizaines de Km, suivie d'un processus de différenciation magmatique. Cette conception, présentée par J. A. WOOD à la première réunion scientifique organisée par la N.A.S.A. (Houston, janvier 1970), a récemment fait l'objet d'un exposé plus général (J. A. WOOD, 1970). Si elle devait se confirmer par la suite, il est certain qu'elle influencerait nos idées sur la nature de la proto-croûte qui au début de son histoire entourait le globe terrestre.

Dans ce cadre d'ailleurs, mais dans une autre optique, des études réalisées sur la distribution des massifs anorthositiques, tenant compte de la disposition présumée des divers blocs continentaux préalablement à leur dérive (Fig.19), ont relancé la question de l'apparition de ces massifs à l'échelle planétaire.

N. HERZ (1969) y voit des arguments pour considérer les anorthosites comme le produit d'un phénomène cataclysmique unique dans l'histoire du globe terrestre. Daté de 1300 m.a., valeur approximative déterminée dans toutes les régions où affleure ce type de roches, ce phénomène pourrait d'après lui correspondre à la création du système Terre-Lune.

On peut concevoir, en effet, que cet événement soit responsable de l'accroissement rapide du gradient géothermique nécessaire à l'apparition du magma dont proviendraient les anorthosites.

D'autres explications à la distribution des anorthosites dans l'espace et dans le temps, moins hypothétiques peut-être, peuvent être discutées. En particulier, si la pression d' H_2O doit être considérée comme essentielle, on peut envisager que la formation de ces roches et leur mise en place résultent d'une évolution de la pression d' H_2O dans la zone sous-crustale, liée par exemple à une phase de dégazement du manteau. Il se pourrait aussi qu'elles dépendent d'une évolution temporaire, à l'époque précambrienne, du flux thermique, en réponse à une concentration des éléments radioactifs dans le manteau supérieur (G. J. F. Mac DONALD, 1959; A. E. G. ENGEL, 1966), voire sur le plan de la géologie fondamentale, d'une interaction sial-sima pure et simple en relation avec l'évolution de zones de convergence d'anciennes plaques lithosphériques, permettant par là de postuler la réalité d'une tectonique globale aux époques précambriennes.

Quoi qu'il en soit, j'espère vous avoir montré comment un problème, qui à première vue pouvait paraître n'intéresser qu'un domaine restreint de la géologie, émerge au contraire au cadre des Sciences de la Terre en général; qu'à l'heure actuelle, seule son étude dans une optique pluridisciplinaire, dont je n'ai relevé ici que certains aspects, mais qui devrait également comprendre le volet géophysique, permet d'espérer apporter une réponse aux questions qu'il soulève à l'échelle planétaire.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAM, F. D., 1893. — Uber das Norian oder Ober-Laurentian von Canada. *Neues Jahrb. Mineral. Geol. Pal. Beil.*, **8**, 419-498.
- ANDERSON, A. T., 1966. — Mineralogy of the Labrieville anorthosite, Québec. *Amer. Miner.*, **51**, 1671-1711.
- ANDERSON, A. T., 1968. — Massif-type anorthosite : A widespread Precambrian igneous rock. *OARR* 1969 (*), 47-55.
- ANDERSON, A. T. and M. MORIN, 1968. — Two types of massif anorthosites and their implications regarding the thermal history of the crust. *OARR* 1969, 57-69.
- ARMSTRONG, R. L., 1968. — A model for the evolution of strontium and lead isotopes in a dynamic earth. *Rev. Geophys.*, **6**, 175-199.
- BALK, R., 1931. — Structural geology of the Adirondack anorthosite, a structural study of the problem of magmatic differentiation. *Min. Pet. Mitt.*, **41**, 308-434.
- BARTH, T. F. W., 1936. — The large pre-Cambrian intrusive bodies in the southern part of Norway. *Intern. Geol. Congr. Wash.*, 1933, 297-309.
- BARTH, T. F. W., 1952. — Theoretical Petrology, p. 229.
- BERRANGE, J. P., 1966. — Some critical differences between orogenic-plutonic and gravity-stratified anorthosites. *Geol. Rundschau*, **55**, 617-642.
- BOONE, G. M., ROMEY, W. D. and THOMPSON, D. S., 1968. — Oscillatory zoning in calcic andesine-sodic labradorite relict phenocrysts in anorthosite of Oregon Dome and Giant Mountain, Adirondack Highlands. *OARR*, 1969, 317-327.
- BOULANGER, J., 1957. — Les anorthosites de Madagascar. C.C.T.A. Comités de Géologie Centre-est et sud, Tananarive. *Géol. Madagascar Ann.*, 1959, **26**, 71 p.
- BOWEN, N. L., 1917. — The problem of the anorthosites. *J. Géol.*, **25**, 209-243.
- BUDDINGTON, A. F., 1939. — Adirondack igneous rocks and their metamorphism. *Geol. Soc. Am.*, Mem. **7**, 354 p.
- BUDDINGTON, A. F., 1961. — The origin of anorthosite re-evaluated. *Recs. Geol. Surv. India*, **86**, 421-432.
- CLARK, S. P., SCHAIRER, J. F. and DE NEUFVILLE, J., 1962. — Phase relations in the system $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6 - \text{SiO}_2$ at low and high pressure. *Carnegie Inst. Wash. Yb.*, **61**, 59-68.
- DALY, R. A., 1914. — Igneous rocks and their origin. McGraw-Hill, New-York, 563 p.
- DALY, R. A., 1928. — The Bushveld igneous complex of the Transvaal. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **39**, 703-768.
- DAVIS, B. T. C., 1968. — Anorthositic and quartz syenitic series of the St. Regis quadrangle, New-York. *OARR*, 1969, 281-287.
- DE VUYST, A., 1969. — La nouvelle conception de la dérive des continents. *Ciel et Terre*, **85/3** et **86/1**, 118 p.
- DE WAARD, D., 1968. — The anorthosite problem : The problem of the anorthosite-charnockite suite of rocks. *OARR*, 1969, 71-91.
- DE WAARD, D. and ROMEY, W. D., 1963. — Boundary relationships of the Snowy Mountain anorthosite in the Adirondack Mountains. *Proc. Koninkl. Nederl. Akad. Wetensch.*, **66**, 251-264.
- DE WAARD, D. and ROMEY, W. D., 1968. — Petrogenetic relationships in the anorthosite-charnockite series of Snowy Mountain Dome, south-central Adirondack. *OARR*, 1969, 307-315.

(*) *OARR*, 1969. — Origin of Anorthosite and Related Rocks. Edited by YNGVAR W. ISACHSEN; New-York State Museum and Science Service, Mémoire 18, Albany, New-York, 1969.

- EMSLIE, R. F., 1968. — Crystallization and differentiation of the Mickikamau Intrusion. *OARR*, 1969, 163-173.
- ENGEL, A. E. J., 1966. — Some limitations on the composition of the upper mantle during the last 3.5×10^9 years (abs.). *Trans. Am. Geophys. Union*, **47**, 176.
- FAIRBAIRN, H. W., HURLEY, P. M. and PINSON, W. H., 1964a. — Preliminary age study and initial $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ of Nova Scotia granitic rocks by the Rb-Sr whole rock method. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **75**, 253-257.
- FAIRBAIRN, H. W., HURLEY, P. M. and PINSON, W. H., 1964b. — Initial $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ and possible sources of granitic rocks in southern British Columbia. *J. Geophys. Res.*, **69**, 4889.
- FAURE, G. and HURLEY, P. M., 1963. — The isotopic composition of strontium in oceanic and continental basalts : Application to the origin of igneous rocks. *J. Petrol.*, **4**, 31-50.
- GARLICH, G. D. and EPSTEIN, S., 1967. — Oxygen isotope ratios of coexisting minerals in regionally metamorphosed rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 181-214.
- GAST, P. W., 1961. — Strontium and rubidium in stone meteorites : Problem related to planetary matter. *Nat. Res. Coun. Pub.*, **845**, 85-89.
- GAST, P. W., 1965. — Terrestrial ratio of potassium to rubidium and the composition of the earth's mantle. *Science*, **147**, 858-860.
- GOLDSCHMIDT, V. M., 1922. — Stammestypen der Eruptivgesteine. *Vid.-Selsk. Kristiana Skrifter, I, Math.-Naturv. Kl.*, **10**, 12 p.
- GOLDSCHMIDT, V. M., 1954. — Geochemistry. Clarendon Press, Oxford.
- GREEN, T. H., 1968. — Experimental fractional crystallization of quartz diorite and its application to the problem of anorthosite origin. *OARR*, 1969, 23-29.
- HARGRAVES, R. B., 1962. — Petrology of the Allard Lake anorthosite suite, Québec. *Géol. Soc. Am.*, Buddington vol., 163-189.
- HEATH, S. A. and FAIRBAIRN, H. W., 1968. — $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ ratios in anorthosites and some associated rocks. *OARR*, 1969, 99-110.
- HEDGE, C. E., 1966. — Variations in radiogenic strontium found in volcanic rocks. *J. Geophys. Res.*, **71**, 6119-6126.
- HEDGE, C. E. and WALTHALL, F. G., 1963. — Radiogenic strontium-87 as an index of geologic processes. *Science*, **140**, 1214.
- HEIER, K. S. and TAYLOR, S. R., 1959. — Distribution of Li, Na, K, Rb, Cs, Pb and Tl in southern Norwegian Precambrian alkali feldspars. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **15**, 284-302.
- HEIER, K. S. and ADAMS, J. A. S., 1964. — The geochemistry of the alkali metals : *Physics and Chemistry of the Earth*, **5**, 253-381. Ed. L. H. Ahrens and others — Macmillan and Co, New-York, 398 p.
- HERZ, N., 1969. — Anorthosite Belts, Continental Drift, and the Anorthosite Event. *Science*, **164**, 944-947.
- HIETANEN, A., 1968. — Metamorphic environment of anorthosite in the Boehls Butte area, Idaho. *OARR*, 1969, 371-386.
- HIGGS, D. V., 1954. — Anorthosite and related rocks of the western San Gabriel Mountains, Southern California. *Univ. Calif. Pub. Geol. Sci.*, **30**, 171-222.
- HÖDAL, J., 1944. — Rocks of the anorthosite kindred in Vossestrand, Norway. *Norsk Geol. Tidsskr.*, **24**, 129-274.
- HURLEY, P. M., 1967. — $\text{Rb}^{87}\text{-Sr}^{87}$ relationships in the differentiation of the mantle. Ultramafic and related rocks. Ed. P. J. Wyllie, Wiley, 372 p.
- HURLEY, P. M., 1968. — The confirmation of Continental Drift. *Sci. Am.*, **218**, 53-64.
- HURLEY, P. M., BATEMAN, P. C., FAIRBAIRN, H. W. and PINSON, W. H., 1965. — Investigation of initial $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ ratios in the Sierra Nevada plutonic province. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **76**, 165-173.

- JONES, W. R., PEOPLES, J. W. and HOWLAND, A. L., 1960. — Igneous and tectonic structures of the Stillwater complex Montana. *Geol. Surv. Bull.*, **1071** H, 281-335.
- KOLDERUP, C. F., 1896. — Die Labradorfelse des westlichen Norwegens. I. Das Labradorfelsesgebiet bei Egersund und Soggedal. *Bergens Museum Aarboeg*, **5**, 222 p.
- LE PICHON, X., 1968. — Sea-Floor spreading and continental drift. *J. Geophys. Res.*, **73**, 3661-3697.
- LE PICHON, X., 1969. — Models and structure of the Oceanic Crust. *Tectonophysics*, **7**, 385-401.
- LE PICHON, X., 1971. — La tectonique des plaques. Conférence Soc. Géol. Belg., Mars 71.
- LOEWISON-LESSING, F., 1901. — Kritische Beitrage zur Systematik der Eruptivgesteine, IV. *Tscherm. Min. Pet. Mitt.*, **20**, 110-128.
- LOEWISON-LESSING, F., 1923. — The problem of the anorthosites and other monomineral igneous rocks. *J. Geol.*, **31**, 89-105.
- LOMBAARD, B. V., 1935. — On the differentiation and relationships of the rocks of the Bushveld complex. *Geol. Soc. South Africa Trans.*, **37**, 5-52.
- LUTH, W. C. and SIMMONS, G., 1968. — Melting relations in natural anorthosite. *OARR*, 1969, 31-37.
- MacDONALD, G. J. F., 1959. — Calculations on the thermal history of the earth. *J. Geophys. Res.*, **64**, 1967-2000.
- MARTIGNOLE, J. and SCHRIJVER, K., 1970. — Tectonic setting and evolution of the Morin Anorthosite, Grenville Province, Quebec. *Bull. Geol. Soc. Finland*, **42**, 165-209.
- MICHOT, J., 1955. — Le phénomène magmatique au sein du massif anorthositique de Haaland, Egersund, Norvège. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **78**, B. 247-266.
- MICHOT, J., 1957. — Un nouveau type d'association anorthosite-norite dans la catazone norvégienne (Egersund). *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **80**, B. 449-461.
- MICHOT, J., 1960. — La palingénèse basique. *Acad. Royale Belgique, Bull. Cl. Sci.*, **5e/46**, 257-268.
- MICHOT, J., 1961. — Le massif complexe anorthosito-leuconoritique de Haaland-Helleren et la palingénèse basique. *Acad. Royale Belgique, Mém. Cl. Sci.*, **2e/15**, 1-116.
- MICHOT, J. et MICHOT, P., 1953. — Enclaves dans les anorthosites de la région d'Egersund, Norvège. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **76**, B. 239-247.
- MICHOT, J. et PASTEELS, P., 1968. — Étude géochronologique du domaine métamorphique du sud-ouest de la Norvège (note préliminaire). *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **91**, 93-100.
- MICHOT, J. et PASTEELS, P., 1969. — La variation du rapport ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ dans les roches génétiquement associées au magma plagioclasique. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **92**, 255-262.
- MICHOT, P., 1939a. — Les anorthosites de la région d'Egersund (Norvège). *Acad. Royale Belgique, Bull. Cl. Sci.*, **5e/25**, 491-503.
- MICHOT, P., 1939b. — La série rubanée norito-granitique du massif anorthositique d'Egersund, Norvège. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **62**, B. 532-546.
- MICHOT, P., 1955a. — L'anatexie leuconoritique. *Acad. Royale Belgique, Bull. Cl. Sci.*, **5e/41**, 374-385.
- MICHOT, P., 1955b. — Anorthosites et anorthosites. *Acad. Royale Belgique, Bull. Cl. Sci.*, **5e/41**, 275-294.
- MICHOT, P., 1956. — Les gisements de minerais noirs de la région d'Egersund. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **69**, B. 183-202.
- MICHOT, P., 1957. — Constitution et genèse d'un dôme de gneiss coiffé en milieu catazonal profond. *Acad. Royale Belgique, Bull. Cl. Sci.*, **5e/43**, 23-44.
- MICHOT, P., 1960a. — La géologie de la catazone : le problème des anorthosites, la palin-

- genèse basique et la tectonique catazonale dans le Rogaland méridional, Norvège méridionale. *Intern. Geol. Congr.*, Norden 1960, 21st Sess., guide A9, 1-54.
- MICHOT, P., 1960b. — Le problème des intrusions marginales. *Geol. Rundschau*, **50**, 94-105.
- MICHOT, P., 1965a. — Le magma plagioclasiq. *Geol. Rundschau*, **55**, 956-976.
- MICHOT, P., 1965b. — Les orogènes fondamentaux. *Freiberg Forschungshefte*, C **190**, 49-62.
- MILLER, W. J., 1918. — Adirondack anorthosite. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **29**, 399-462.
- MORGAN, W. J., 1968. — Rises, Trenches, Great Faults and Crustal Blocks. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1959-1982.
- OLMSTED, J. F., 1968. — Petrology of the Mineral Lake Intrusion, northwestern Wisconsin. *OARR*, 1969, 149-161.
- PETERMANN, Z. E., HEDGE, C. E., COLEMAN, R. G. and SNAVELY, P. D., 1967. — Sr⁸⁷/Sr⁸⁶ ratios in some eugeosynclinal sedimentary rocks and their bearing on the origin of granitic magma in orogenic belts. *Earth Planet. Sci. Letters*, **2**, 433-439.
- PHILPOTTS, A. R., 1966. — Origin of the Anorthosite-Mangerite Rocks in Southern Quebec. *J. Petrol.*, **7**, 1-64.
- PHILPOTTS, A. R., 1968. — Parental magma of the anorthosite-mangerite suite. *OARR*, 1969, 207-212.
- PHILPOTTS, J. A., 1966. — Rare-Earth Abundances in an Anorthosite and a Mangerite (Abs.). George H. Hudson Symposium, Plattsburgh, October 1966.
- RAMBERG, H., 1952. — The origin of metamorphic and metasomatic rocks. The Univ. of Chicago Press, 317 p.
- REYNOLDS, R. C., PHILIP, R. W. and ISACHSEN, Y. W., 1968. — K/Rb ratios in anorthositic and associated charnockitic rocks of the Adirondacks, and their petrogenetic implications. *OARR*, 1969, 267-280.
- TATSUMOTO, M., HEDGE, C. E. and ENGEL, A. E. J., 1965. — Potassium, rubidium, strontium, thorium, uranium and the ratio strontium-87 strontium-86 in oceanic tholeiitic basalt. *Science*, **150**, 886.
- TAYLOR, H. P., 1968a. — The oxygen isotope geochemistry of igneous rocks. *Contr. Mineral. Petrol.*, **19**, 1-71.
- TAYLOR, H. P., 1968b. — Oxygen isotope studies of anorthosites, with particular reference to the origin of bodies in the Adirondack Mountains, New-York. *OARR*, 1969, 111-134.
- TAYLOR, H. P. and EPSTEIN, S., 1962a. — Relationship between O¹⁸/O¹⁶ ratios in coexisting minerals of igneous and metamorphic rocks, part I : Principles and experimental results. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **73**, 461-480.
- TAYLOR, H. P. and EPSTEIN, S., 1962b. — Relationship between O¹⁸/O¹⁶ ratios in coexisting minerals of igneous and metamorphic rocks, part II : Application to petrologic problems. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **73**, 675-694.
- TILLEY, C. E., YODER, H. S. and SCHAIRER, J. F., 1966. — Melting relations of volcanic rock series. *Carnegie Inst. Wash. Yb.*, **65**, 260-269.
- SILVER, L. T., 1968. — A geochronologic investigation of the Adirondack complex, Adirondack Mountains, New-York. *OARR*, 1969, 233-251.
- VOGT, J. H. L., 1908. — Uber anchi-mineralische und anchi-eutektische Eruptivgesteine. *Vid.-Selsk. Kristiana Skrifter. I. Math.-Naturv. Kl.*, **10**, 104 p.
- VOGT, J. H. L., 1924. — The physical chemistry of the magmatic differentiation of igneous rocks. *Vid.-Selsk. Kristiana Skrifter. I. Math.-Naturv. Kl.*, **15**, 132 p.
- YODER, H. S., 1965. — Diopside — Anorthite — Water at five and ten kilobars and its bearing on explosive volcanism. *Carnegie Inst. Wash. Yb.*, **64**, 82-89.

- YODER, H. S., 1968. — Experimental studies bearing on the origin of anorthosite. *OARR*, 1969, 13-22.
- YODER, H. S., STEWART, D. B. and SMITH, J. R., 1957. — Ternary feldspars. *Carnegie Inst. Wash. Yb.*, **56**, 206-214.
- YODER, H. S., and TILLEY, C. E., 1962. — Origin of basalt magmas. An experimental study of natural and synthetic rocks systems. *J. Petrol.*, **3**, 342-532.
- WAGER, L. R., 1953. — Layered intrusion. *Dansk. Geol. Foren. Medd.*, **12**, 335-349.
- WAGER, L. R. and DEER, W. A., 1939. — The petrology of the Skaergaard intrusion, Kangerdlugssuaq, east Greenland. *Medd. Grönland*, **105**.
- WAGER, L. R. and BROWN, G. M., 1957. — Funnel-shaped layered intrusions. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **68**, 1072.
- WAGER, L. R., BROWN, G. M. and WADSWORTH, W. J., 1960. — Types of igneous cumulates. *J. Petrol.*, **1**, 73-85.
- WETHERILL, G. W., 1971. — Of Time and the Moon. *Science*, **173**, 383-392.
- WINKLER, H. G. F. and von PLATEN, H., 1960. — Experimentelle Gesteins-metamorphose. III. Anatektische Ultrametamorphose kalkhaltiger Tone. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **18**, 294-316.
- WOOD, J. A., 1970. — The lunar soil. *Sci. Am.*, **223**, 14-23.

