

LES GRILLES D'INTERPRETATION DES UNITES CONTINENTALES¹

par

J. MICHOT²

RESUME.- L'auteur consacre son adresse présidentielle à une analyse des différents systèmes qui ont contribué par étapes au développement de nos connaissances sur la structure et l'évolution des domaines crustaux. Les premières investigations, au delà des approches conceptuelles régulièrement affinées, ont conduit à la mise au point des classifications les plus fines et les plus sophistiquées; dans la suite, les développements géophysiques et géochimiques ont abouti à une diversification des grilles interprétatives et par là, à une multiplication des modèles de référence. Au modèle orogénique simple, si pas simpliste, s'est substitué le modèle lithosphérique; les recherches quantitatives, celles sur le temps absolu ou sur les contraintes géochimiques, ont mené au modèle planétaire. Les domaines continentaux ont cessé d'être les seuls pris en compte, les domaines océaniques ont finalement eux aussi livré leurs lots de données.

La dynamique crustale et ses inter-relations avec le «climat» mantélique devient aujourd'hui la préoccupation d'une géologie en pleine évolution.

ABSTRACT.- The author uses his presidential address to analyse the different systems which have contributed, step by step, to the development of our knowledge of the structure and evolution of crustal domains. The first investigations, beyond the conceptual approaches which have been regularly improved, have led to the most sophisticated and fine classifications; afterwards, geophysical and geochemical progresses have opened the interpretative grids and then led to a multiplication of reference models. The simple, if not simplistic, orogenic model has been substituted by the lithospheric model; the quantitative researches, those on absolute time frames or on geochemical constraints have led to the planetary model. Continental domains are no more the only ones considered, as oceanic domains have finally also generated their share of data.

Crustal dynamics and their interrelations with mantle «climate» become today the main preoccupation of a fully evolving geology.

I.- INTRODUCTION

Les masses continentales et les étendues océaniques constituent de toute évidence les deux grandes unités immédiatement distinguables à la surface du globe. La problématique géologique s'est donc très tôt posée en terme de dualité **terre-mer**, l'eau apparaissant ainsi, dans un premier temps, comme l'élément essentiel de la «maturation» continentale, au point de justifier la notion d'«**Océan primordial**» au sein duquel tout aurait été initié. C'était là l'esquisse d'une première grille de modélisation issue de l'imaginaire greffé sur le vécu événementiel dans les régions du «Croissant

fertile» et de la vallée du Nil. Cette interprétation élémentaire s'est, bien entendu, rapidement trouvée en opposition avec nombre de faits et données qui ont conduit à sa révision fondamentale. En particulier, l'émergence de la pensée rationnelle a très largement favorisé l'élaboration progressive des grilles «catégorielles» nécessaires au développement d'une lithologie systématique indispensable à tout progrès dans la connaissance des matériaux terrestres.

1. Adresse présidentielle, présentée le 19 janvier 1988.

2. Laboratoires associés de Géologie, Université Libre de Bruxelles, av. Fr. Roosevelt 50, B-1050 Bruxelles, Belgique.

II.- LES GRILLES «CATEGORIELLES» DES MODELES LITHOLOGIQUES

Stenon (1638-1686), en argumentant sur le principe de superposition, met en place les premiers fondements de la géologie; il est à la base de la stratigraphie qui, au fil du temps, organise l'ensemble à première vue cohérent que constitue la série des **roches sédimentaires**.

Werner (1750-1817) en déduit un modèle **neptuniste** où l'eau tient le rôle régulateur du processus qui contrôle l'ensemble des constructions lithologiques. Bien vite cependant, la réalité d'une provenance souterraine de certains produits dont les caractéristiques relèvent plutôt d'une origine ignée, amène aux corrections nécessaires.

Mieux argumenté, soutenu par des observations plus détaillées, le modèle **vulcaniste** de Hutton (1726-1797) intègre le phénomène volcanique; il interprète les intercalations concordantes de roches magmatiques insérées dans le contexte sédimentaire, comme autant de coulées ou de sills formés par des laves d'origine interne, dès lors génétiquement distinctes.

Les vulcanistes introduisent donc une deuxième catégorie de roches : les **roches magmatiques**, dont la permanence en profondeur est déduite, à l'affleurement, des relations séquentes que présentent les roches grossièrement cristallines, vis-à-vis des structures litées plus ou moins régulières des sédiments.

L'examen attentif des phénomènes d'interaction entre ces deux types lithologiques incite ensuite Lyell (1797-1875) à conclure à l'existence d'un processus de recristallisation affectant certaines roches à l'état solide et à y distinguer une troisième catégorie : les **roches métamorphiques**.

Ainsi outillée à l'intermédiaire de systèmes de classification de plus en plus variés et sophistiqués dont les derniers ressortissent d'accords internationaux (Streckeisen, 1974, 1979; Zanettin, 1984; Salvador, 1987), la géologie entame sa première période, celle de l'étude des continents; elle s'appuie sur l'examen du 1/3 des roches qui composent la surface du globe solide. L'histoire des unités continentales se construit donc, dans une première phase, sur l'examen minutieux des grilles paléontologiques, minéralogiques, structurales et/ou texturales discutées, critiquées et réorganisées de nombreuses fois (Michel-Levy, 1889; Rosenbusch, 1898; Cross *et al.*, 1903; Niggli, 1931; Johannsen, 1932; Pettijohn, 1957; Turner & Weiss, 1963; Spry, 1969); elle s'efforce de mettre à jour les modifications intervenues dans les matériaux «originels» jusqu'au moment

où, soumis à des variations d'ambiance, ils se transforment en d'autres matériaux : meubles, recristallisés, fluides ou ignés, ... etc.

Le développement de la géophysique, de la géochimie et l'extension des observations à la totalité du domaine continental, en surface et en profondeur, contribueront ensuite à faire apparaître les caractéristiques de l'ensemble des continents dans leurs aspects les plus significatifs, aux différents niveaux de leur épaisseur. Celles-ci s'inscriront dans des interprétations relevant de l'utilisation de grilles «techniques», essentiellement analogiques, de plus en plus élaborées, où l'expérimentation et l'analyse théorique tenteront de pallier les lacunes inévitables liées au statut d'inaccessibilité des profondeurs crustales. La configuration interne des géosphères, et particulièrement celle de la géosphère supérieure du globe terrestre, la lithosphère, se trouvera ainsi progressivement exprimée.

Aujourd'hui tout particulièrement, elle fait l'objet de deux projets d'étude ambitieux qui visent à atteindre une meilleure définition des structures, des compositions, et par là, des séquences de développement de la croûte continentale, tout à la fois dans l'optique des jeux tectoniques qui en sont l'élément moteur et des matériaux, originels ou recyclés, qui en composent les diverses ceintures et segments emboîtés.

Ces deux projets envisagent de construire, au sein d'une collaboration pluridisciplinaire et internationale, une grille interprétative multidimensionnelle où pourraient être coordonnés les nombreux paramètres qui relèvent de la prospection traditionnelle des complexes lithologiques à l'affleurement, mais aussi de l'analyse comparée des résultats des prospections géophysiques et des extrapolations géochimiques sur les parties lithosphériques et sous-lithosphériques les plus profondes. Elaborés sous l'égide du Programme Lithosphère, ces projets se développent, à l'échelle européenne, sous les auspices de la Fondation Européenne de la Science, dans le cadre des travaux de la Géotraverse Européenne (EGT) et du Programme de sondages océaniques (ODP) (EGT, 1983, 1985, 1986, 1987; ODP, 1981, 1986, 1987a, 1987b). L'excellence et la rigueur, tant scientifiques que techniques du travail réalisé dans la préparation, la mise au point et l'exécution des contributions sollicitées de chacun des groupes participants, potentiels ou effectifs, sont une expérience d'efficacité scientifique remarquable à méditer par la communauté géologique belge.

L'aboutissement actuel des recherches géologiques au plan fondamental s'entend, est le fait d'un lent cheminement au fil duquel les systèmes

d'analyse et les grilles d'interprétation sont passés du stade qualitatif au stade quantitatif, en même temps qu'ils glissaient du niveau continental au niveau planétaire. C'est cette évolution, et les hypothèses ou modèles qu'elle a engendrés qui sont envisagés ici, dans certaines de ses lignes les plus significatives.

III.- LES GRILLES DU MODELE LITHOSPHERIQUE

LITHOSPHERE ET CROUTE TERRESTRE

La lithosphère correspond à l'unité géosphérique externe qui, dans son ensemble, présente des caractéristiques de rigidité telles qu'elles lui confèrent le comportement du solide. Elle se divise en une série de plaques plus ou moins indépendantes les unes des autres (Le Pichon, 1968; Condie, 1976; Windley, 1984), dont les mouvements relatifs sont liés, entre autres, aux déplacements en masse de produits magmatiques générés à sa partie inférieure, dans la couche à plasticité renforcée qu'est l'asthénosphère. Elle constitue ainsi l'unité majeure au sein de laquelle s'individualise la croûte terrestre, à savoir ce domaine spécifiquement sialique, ou à tout le moins différencié, qui se trouve au-dessus de la discontinuité de MOHO.

Produit d'un lent remaniement, contrôlé par un enchaînement de phénomènes qui se succèdent les uns aux autres au cours des périodes géologiques, la croûte terrestre relève d'une manière générale de l'ensemble des processus qui génèrent les diverses unités composantes de la planète, à commencer par celui qui à l'échelle du globe, et à son début, a abouti au développement de sa différenciation géochimique et à l'individualisation de «l'écume» silicatée (Allègre, 1983) qui en a constitué la première croûte sialique.

Le redéploiement sédimentaire, l'intrusion magmatique, océanique ou continentale, l'extrusion volcanique, la variation du niveau des mers et ses séquences transgressives et régressives, la succession des glaciations, les déformations tectoniques et l'édification des chaînes montagneuses, avec leurs cortèges de transformations métamorphiques et de mobilisations ignées, ont réalisé au fil d'une évolution lente et progressive, la redistribution de la matière à la surface du globe pour finalement sculpter au sein de la lithosphère, la **croûte terrestre** telle qu'elle est aujourd'hui conformée.

Cette croûte, du côté océanique, constitue 60 % environ de la surface terrestre; elle y présente une épaisseur réduite à quelques km (± 5 à 12 km); du côté continental, elle forme un

épaississement qui s'enfonce par endroits dans la plaque lithosphérique jusqu'à 50 à 80 km de profondeur; si on y inclut la partie de la transition qui la lie à la croûte océanique, elle représente 80 % du volume crustal. C'est cette unité qui a focalisé jusqu'il y a peu l'essentiel de l'intérêt des géologues et sur laquelle s'appuient les premiers essais d'élaboration d'une grille qualitative à la base d'un premier modèle continental.

LES GRILLES QUALITATIVES DU MODELE CONTINENTAL

Les observations relatives à la formation de la croûte terrestre portent, avant tout, sur les processus géologiques les mieux repérables au sein des masses continentales émergées, les seules qui, jusqu'il y a peu, compte tenu du niveau technique atteint, étaient susceptibles d'être directement échantillonnées. Elles aboutissent, au terme de nombreuses spéculations et controverses, à la mise au point d'un modèle d'intégration, à caractère exclusivement qualitatif, basé sur la périodicité apparemment répliquée, des processus répertoriés, organisés dès lors en un cycle: le cycle géologique ou **cycle orogénique**. Ce sera, dans la voie des conceptualisations, la première ébauche d'une organisation séquentielle de la phénoménologie géologique. Le temps n'y trouvera cependant pas sa véritable signification, la notion même du cycle fixant plutôt l'attention sur le déroulement relatif des événements, effaçant en conséquence le fait d'une évolution plus fondamentale de la nature des processus eux-mêmes.

LE CYCLE OROGENIQUE : UNE GRILLE QUALITATIVE

Le schéma qui rend compte du cycle orogénique, exprime dans sa généralité la systématique de succession des étapes que parcourent les roches d'un continent ancien progressivement émergé et retrace leur histoire dans le cadre de la formation d'une ceinture continentale nouvelle. Il comprend deux séquences (fig. 1): l'une externe, destructrice, l'autre interne, reconstitutive.

L'une et l'autre rassemble en un tout cohérent l'ensemble des connaissances acquises au cours d'une première approche du globe terrestre, en surface. Elles coordonnent une multitude de données et constitue le fondement des analyses théoriques dont vont émerger les grandes théories sédimentologiques d'une part, magmatologiques et métamorphiques de l'autre.

Les premières développent les modèles liés à l'ensemble du phénomène «géosynclinal» et s'expriment dans les grandes reconstitutions paléogéographiques et paléotectoniques, aux

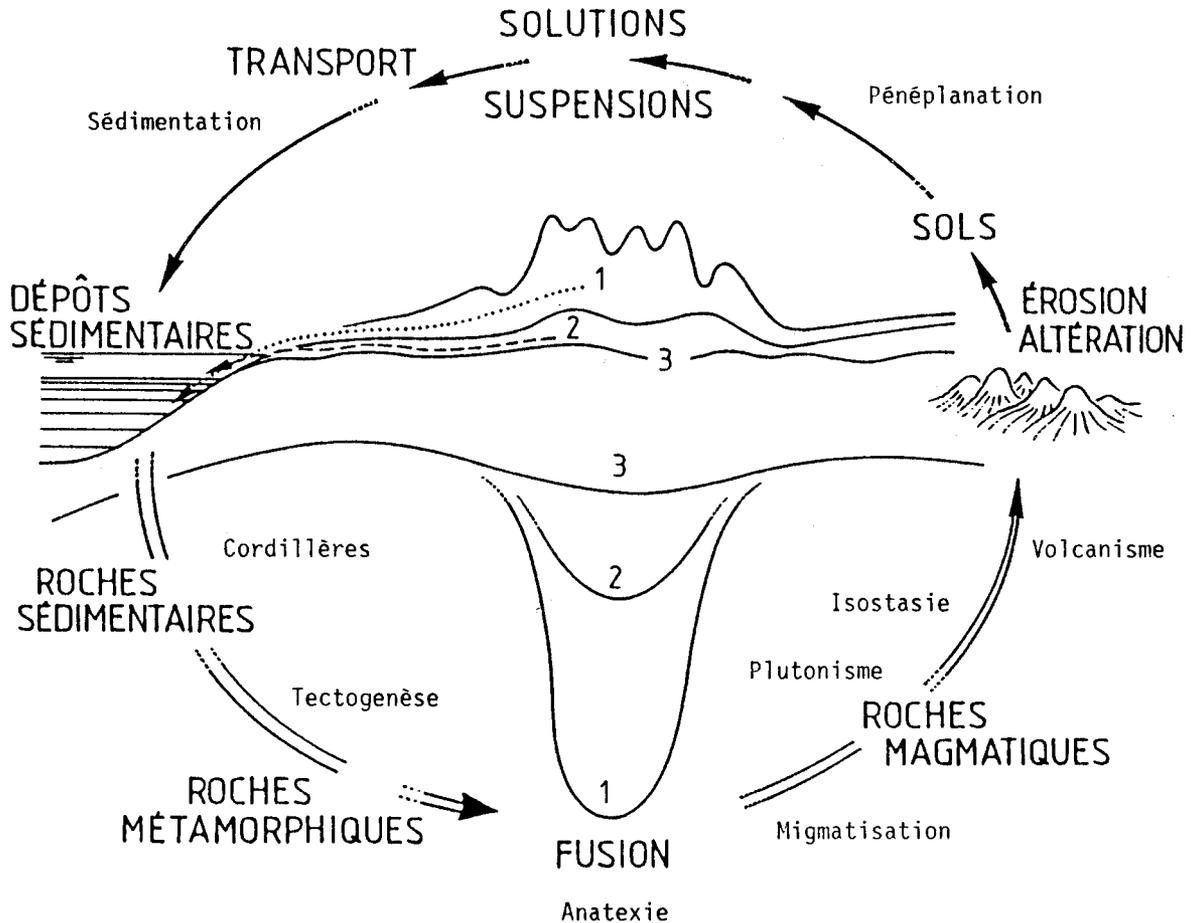


Fig. 1.- Modèle du cycle orogénique (continental) à la base de la formation d'une ceinture continentale complète. Les deux séquences de ce cycle, l'une externe, l'autre interne, schématisent l'évolution des roches exogènes et endogènes.

diverses époques de l'évolution des masses continentales; elles restent souvent confinées aux domaines dont l'évolution s'est réalisée dans les zones supérieures de l'écorce.

Les secondes poussent l'investigation vers les domaines profonds, et s'appuient sur les approches quantitatives théoriques et expérimentales que permet le développement des connaissances en thermodynamique. Les conséquences sur les roches des modifications de température et de pression enregistrées au cours de leur cheminement au sein de l'écorce sont ainsi répertoriées et systématiquement analysées dans le champ référentiel pression-température de mieux en mieux documenté, qu'illustrent les grilles pétrogénétiques semi-quantitatives.

LES GRILLES PETROGENETIQUES SEMI-QUANTITATIVES

Ces grilles rassemblent les données théoriques et expérimentales sur la stabilité des phases minérales les plus variées (Barrow, 1893; Eskola, 1920; Grubenmann & Niggli, 1924; Tilley, 1924; Bowen, 1928, 1940; Jung & Roques, 1936, 1952; Barth, 1952; Fyfe *et al.*, 1958; Garrels & Christ,

1965; Turner & Verhoogen, 1960; Verhoogen *et al.*, 1970; Winkler, 1970; Carmichael *et al.*, 1974) et permettent les essais d'interprétation sur les conditions physiques, physico-chimiques et chimiques qui déterminent la nature et/ou la structure des différents dépôts sédimentaires, sur celles qui orientent la genèse des séries magmatiques et métamorphiques, ou qui aboutissent par ailleurs à fixer les bathymétries d'évolution des divers complexes lithologiques de toute origine.

Systématiquement recalibrées au fur et à mesure que se diversifient les études expérimentales comparées aux observations de terrain, par exemple dans les provinces orogéniques d'Europe ou d'Amérique du Nord, ou dans les ceintures métamorphiques pairées de l'arc japonais (Miyashiro, 1961, 1973), au sein des bassins sédimentaires les plus importants (Kaplan & Rittenberg, 1966; Frey, 1969), ou encore dans les complexes tectono-magmatiques d'âges variés (Menehrt, 1968; Schreyer, 1977), elles rendent compte finalement des possibilités d'existence de lignées lithologiques spécifiques (Thompson, 1955, 1957; Den Tex, 1965; Zwart, 1967; Richardson, 1970; Miyashiro, 1973; Thompson,

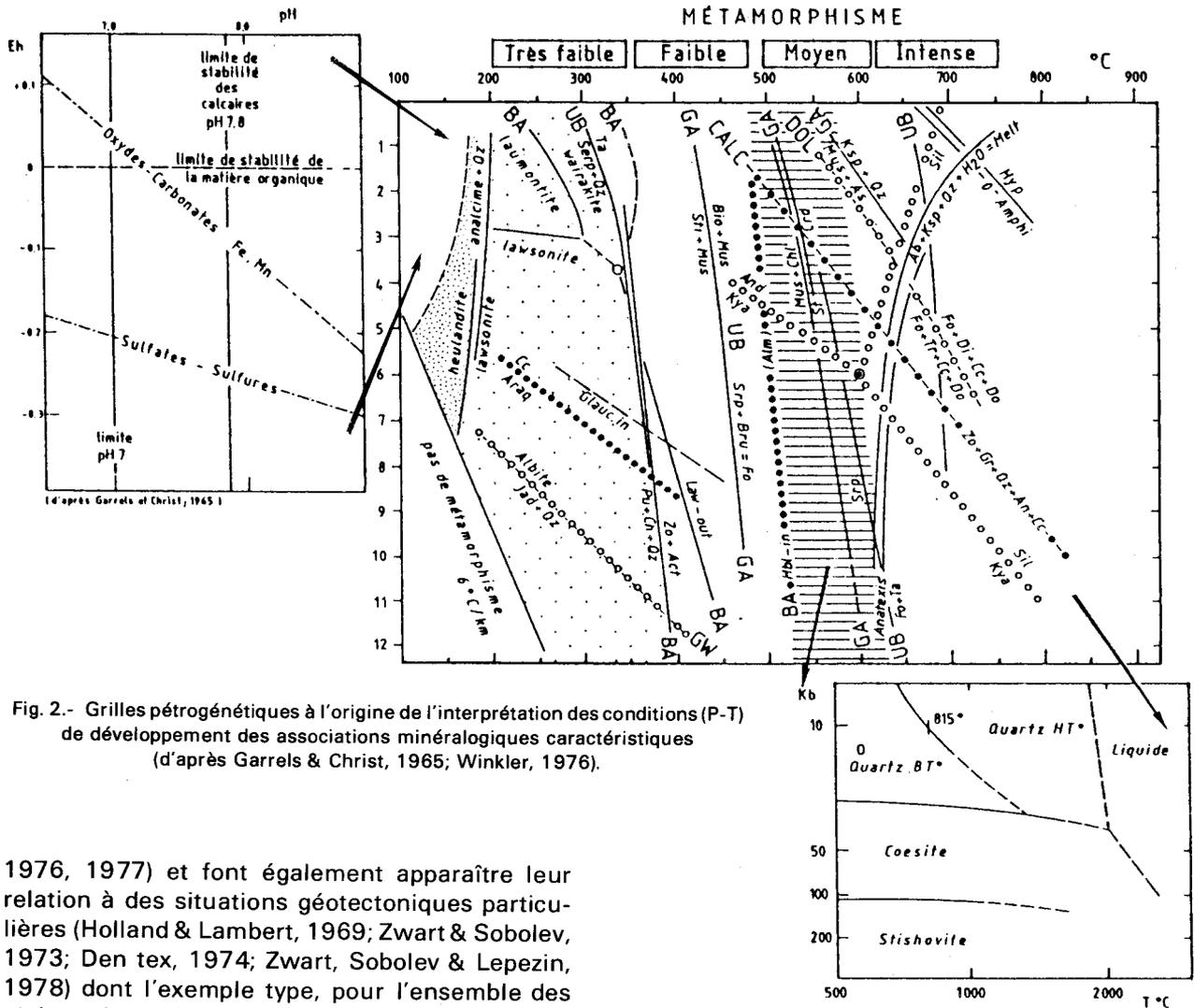


Fig. 2.- Grilles pétrogénétiques à l'origine de l'interprétation des conditions (P-T) de développement des associations minéralogiques caractéristiques (d'après Garrels & Christ, 1965; Winkler, 1976).

1976, 1977) et font également apparaître leur relation à des situations géotectoniques particulières (Holland & Lambert, 1969; Zwart & Sobolev, 1973; Den Tex, 1974; Zwart, Sobolev & Lepezin, 1978) dont l'exemple type, pour l'ensemble des phénoménologies concernées, est celui du domaine circum-pacifique. Le développement théorique et la présentation des grilles pétrogénétiques les plus documentées ont trouvé leur expression dans les essais de Thompson (1957), de Garrels (1965), de Den Tex (1965), de Zen (1966), etc., et ont été synthétisés dans les remarquables travaux de synthèse de Winckler (1976) (fig. 2).

La problématique de cette longue période de diversification des méthodologies, aujourd'hui classiques, au delà de celle qui concerne la pétrologie générale, est axée sur la recherche des arguments permettant de mettre en valeur l'importance des processus agissant aux grandes profondeurs dans l'écorce terrestre, sans cependant s'en référer toujours à la spécificité de la déformation subie; elle aboutit à la construction d'un certain nombre de modèles, à caractère statique, fondés uniquement sur le comportement, vérifié par voie expérimentale, de systèmes physico-chimiques simplifiés.

Dans la suite, l'**empreinte minérale** exprimée par l'association minéralogique indicative des

conditions physiques (température, pression totale, pression des fluides) subies par la roche au cours de son développement est corrélée à l'**empreinte du mouvement**, traduite dans la roche, par la répartition spatiale de ses différents constituants. Ainsi, la distinction et l'opposition entre les domaines supérieurs ou profonds, sièges de processus complémentaires, mais par ailleurs fort différents, sont progressivement précisés, spécialement sur base de leurs caractéristiques structurales respectives. Ce fut le mérite de P. Michot, d'introduire en cette matière, une réflexion nouvelle sur une géologie différente, celle des zones profondes de l'écorce terrestre (Michot, 1956, 1957; Zwart, 1960; Den Tex, 1963; Holland, 1969; Miyashiro *et al.*, 1984).

LE TECTOGRAMME

Les processus géologiques sont dorénavant situés séquentiellement dans un **tectogramme** (fig. 3) en fonction de la période relative et de la profondeur à laquelle ils exercent leur action.

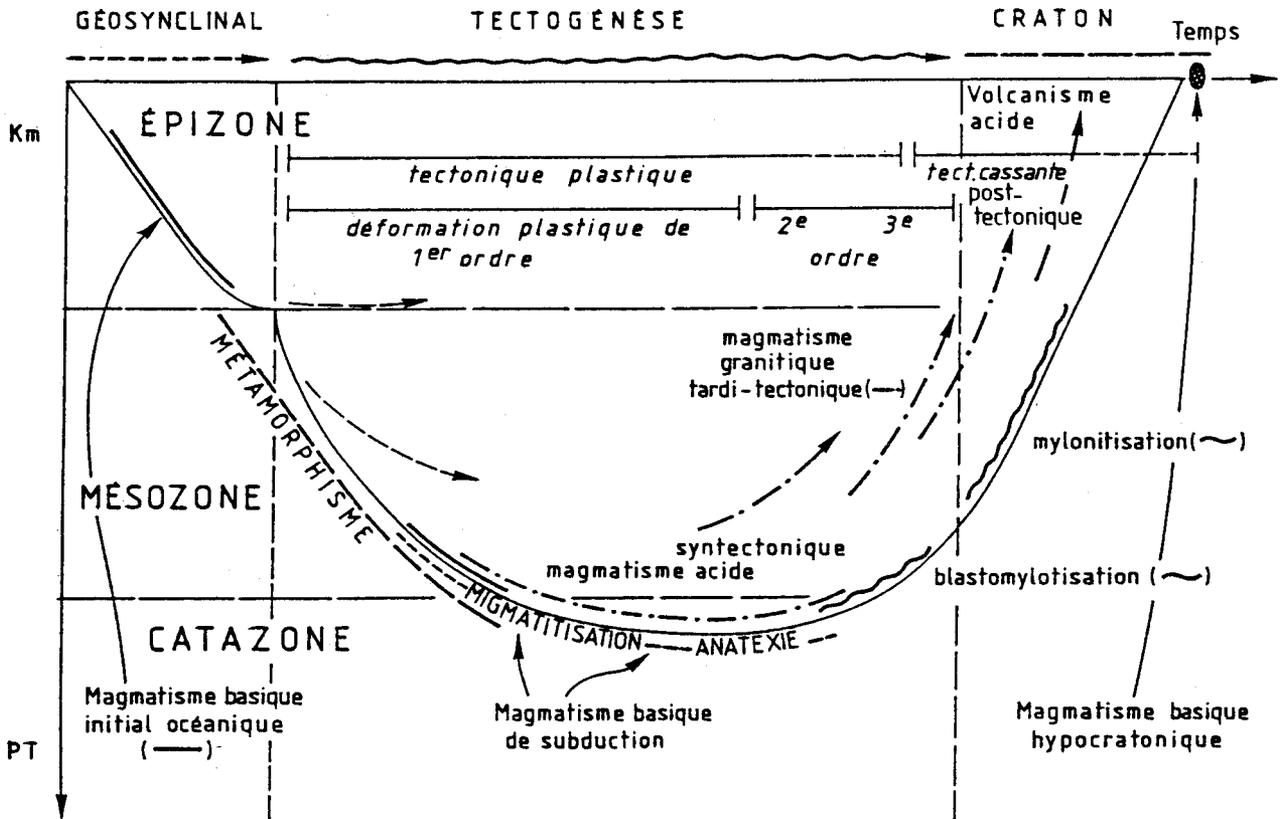


Fig. 3.- Succession des phases principales définissant le cycle orogénique, répertoriées dans un tectogramme en fonction du temps et de la profondeur

Cette profondeur est imprimée dans les roches sous la forme d'une association minérale type définissant les paramètres température et pression de l'un des trois étages : épizone, mésozone ou catazone (Grubenmann & Niggli, 1924) que l'on distingue traditionnellement, de haut en bas, dans la croûte continentale.

La courbe du tectogramme retrace donc l'évolution d'un niveau repère de la pile sédimentaire déposée dans le domaine océanique sous les températures et pressions atmosphériques. Elle schématise le cheminement régulier, le plus complet, qui intègre l'ensemble des processus du cycle, à savoir jusque et y compris ceux qui n'ont en principe d'existence que dans les zones les plus profondes du tectogène (catazone profonde). La pente générale de la courbe est hypothétique; sa rupture à l'endroit du passage de la phase sédimentaire à la phase tectogénique exprime le couplage **déformation-métamorphisme** et rend compte d'un accroissement du taux d'enfouissement à partir de cet événement.

La position dans le temps d'un processus donné est définie relativement à celle du ou des processus qui le précède(nt) et le suit(nt); elle s'exprime, dans la séquence des événements dont il constitue une étape, sur base soit de données paléontologiques, soit de relations de superposition. Sa durée réelle ne peut donc être précisée.

Les grilles pétrogénétiques d'une part, le tectogramme de l'autre, apportent les deux éléments clés qui permettent d'envisager les essais de reconstitution, pour les époques passées, des structures continentales les plus significatives. En outre, l'une et l'autre rendent possible de mieux cerner la problématique liée à l'étude des gisements métallogéniques dont sortiront les schémas unificateurs sur leur origine, leur mise en place et leur position au sein des séquences géotectoniques responsables de la formation des différentes unités crustales. Mais ni l'une, ni l'autre n'apportent de réponse ferme sur l'évolution spécifique du domaine continental dès les premiers stades de son évolution, pas plus qu'elles ne permettent de préciser d'où ce domaine tire sa matière : apports mantéliques, recyclage sédimentaire, contribution mixte, à composantes variables, successives ou simultanées. Le modèle cyclique reste limité à son statut d'image répliquative; l'effet « temps » reste imprécisé, au mieux limité à la connotation que lui confère la perspective uniformitariste.

Deux grands thèmes prennent dès lors une importance de plus en plus grande : la détermination de l'âge absolu de l'événement géologique et la mise en valeur du mécanisme responsable en dernière analyse du déclenchement de la phase tectogénique à la base même de la construction

continentale et des structures qu'elle induit, et ce depuis l'instant de l'apparition des premiers noyaux sialiques.

VI.- LES GRILLES QUANTITATIVES DU MODELE PLANETAIRE

En fait, deux grilles conceptuelles nouvelles, interdépendantes, s'élaborent conjointement: l'une concerne l'établissement de l'échelle absolue du temps; l'autre s'attache à définir les lois du développement spatial des aires continentales. L'une et l'autre marquent la tendance, de mieux en mieux affirmée, du passage à l'analyse quantitative des processus qui structurent «l'écume» sialique.

LA GRILLE DU TEMPS ABSOLU

Dans les complexes géologiques où la vie n'a pas eu la possibilité de se développer, dans les roches qui résultent de processus où la température élevée est incompatible avec la préservation de la matière organique, il a fallu substituer une autre mesure du temps à celle relative, déduite de l'examen des fossiles des roches sédimentaires. Dans la foulée des progrès de la géochimie théorique et instrumentale, la géochronologie s'est penchée sur la détermination des compositions isotopiques de certains éléments chimiques présents dans les unités lithologiques concernées. Les proportions, dans une série de roches cogénétiques, d'isotopes radioactifs et des isotopes radiogéniques qui en dérivent, dépendent de l'âge de constitution de ces roches; l'estimation de ces proportions permet, dès lors, de calculer l'âge absolu du complexe dont elles font partie. La grille des temps absolus devient ainsi la référence prioritaire de la recherche géologique étendue à l'ensemble des continents. Elle apporte un plus essentiel au développement de nos connaissances sur la construction progressive des ensembles continentaux, tant en ce qui concerne la succession et les enchaînements des éléments structuraux principaux, qu'en ce qui relève de leur situation géologique et de leur corrélation à l'échelle de la planète.

Dès la fin des années '60, la datation absolue de certains phénomènes géologiques, tels l'intrusion magmatique, la recristallisation métamorphique, puis la chronologie des dépôts ou la déformation tectonique, permet d'aborder le repérage systématique suivant l'axe du temps du tectogramme, des cycles géologiques principaux. En effet, dès cette époque, il devient possible par les méthodes Rb/Sr et U/Pb, voire aussi par la méthode Pb/Pb, de définir des valeurs de l'âge, à quelques millions d'années près, pour des

événements datés de quelques centaines de millions d'années à plus de 3 milliards d'années. Actuellement, les précisions sont encore améliorées, soit par ajustement méthodologique, soit grâce à de nouvelles procédures, basées, par exemple, sur l'analyse du couple Sm/Nd.

LE DEVELOPPEMENT DES AIRES CONTINENTALES

L'événement comptabilisé par la mesure géochronologique est, en général, encadré vers le haut par les valeurs de l'âge «tectonique» des complexes structurés, dont on peut penser qu'il correspond au paroxysme métamorphique lié à l'orogénèse principale; c'est, en effet, la période à partir de laquelle les éléments radiogéniques sont immobilisés dans les structures minérales résultant des nouveaux équilibres de la recristallisation régionale; vers le bas, les valeurs de l'âge «magmatique» des dernières intrusions ignées fixent la phase terminale du cycle et permet théoriquement la distinction avec le cycle ultérieur.

L'examen de la grille des âges absolus obtenus par l'étude de l'un ou l'autre des domaines continentaux, permet ainsi d'estimer tant les durées des orogénèses que leur répartition spatiale, et par là de les comparer entre elles.

En Europe ou en Amérique du Nord, les études géochronologiques, ont permis de distinguer à partir de la première apparition du nucleus sialique fondamental, les diverses phases tectogéniques qui emboîtées les unes à la suite des autres ont créé le domaine continental actuel, ceinturé par les chaînes récentes paléozoïques et méso-cénozoïques (fig. 4). Le modèle de la structuration des continents apparaît ainsi sous une première version en fonction du temps: celle du développement graduel, par accollement latéral de type concentrique de ceintures orogéniques de plus en plus jeunes vers la périphérie. La spirale centrifuge paraît donc être pour une part importante le modèle de base du déploiement des aires continentales.

La synthèse géochronologique qui concerne le continent africain (Fig. 5) fait assez nettement apparaître combien est grande, cependant, la difficulté de définir, à l'échelle de ce continent, et le début de chacun des cycles orogéniques, et la systématique de leur succession depuis les époques les plus anciennes. En ne s'attachant qu'aux épisodes les mieux exprimés, cinq périodes principales peuvent être distinguées; elles couvrent essentiellement l'ensemble du Précambrien: de 3700 à 3000 Ma, 3000 à 2500 Ma, 2500 à 1750 Ma, 1750 à 1425 Ma et 1425 à 425 Ma.

En Afrique, l'âge le plus ancien se situe aux environs de 3800 Ma; il apparaît au sein des divers cratons de Kaapvaal, du Zwaziland, du Nord Kasai, du Zimbabwe ou encore du Hoggar ou de Madagascar et souligne l'existence de boucliers continentaux fondamentaux (fig 6) enchassés dans la plaque lithosphérique, sans que l'on

puisse déceler une quelconque structure générale concentrique et centrifuge. C'est là un autre aspect structural qui pose la question de l'opportunité d'une analyse systématiquement uniformitariste de la formation des masses continentales.

LES PREMIERS STADES DE LA CONSTRUCTION CONTINENTALE

Les travaux de L. Cahen et de ses collaborateurs (1966, 1984), sur la géochronologie africaine, mis à part la quantité de données qu'ils rassemblent, apportent d'intéressantes précisions sur la question si souvent débattue de l'origine des unités continentales et de leur développement. Ils représentent, en une synthèse devenue classique, une nouvelle grille où s'esquissent de manière explicite, au sein du continent africain, les premières étapes de l'élaboration des boucliers sialiques fondamentaux et où sont répertoriés les éléments les plus importants définissant leur chronologie, leur structure et leurs caractéristiques originelles. Intégrés aux études entreprises par d'autres sur certaines des mêmes régions (Tankard *et al.*, 1982), ces travaux permettent dans leurs conclusions de s'interroger sur la validité, dès les premiers temps d'existence de ces protocontinents, du modèle de tectonique globale qui aujourd'hui gouverne l'évolution lithosphérique.

La plateforme précambrienne d'Afrique du Sud est constituée d'un certain nombre d'unités archéennes au sein desquelles coexistent des ensembles sialiques et d'autres plus basiques, «océaniques», dont l'origine remonte à environ 3800 Ma et dont la cratonisation s'est achevée vers 3000 Ma (Craton du Kaapvaal). Ces domaines

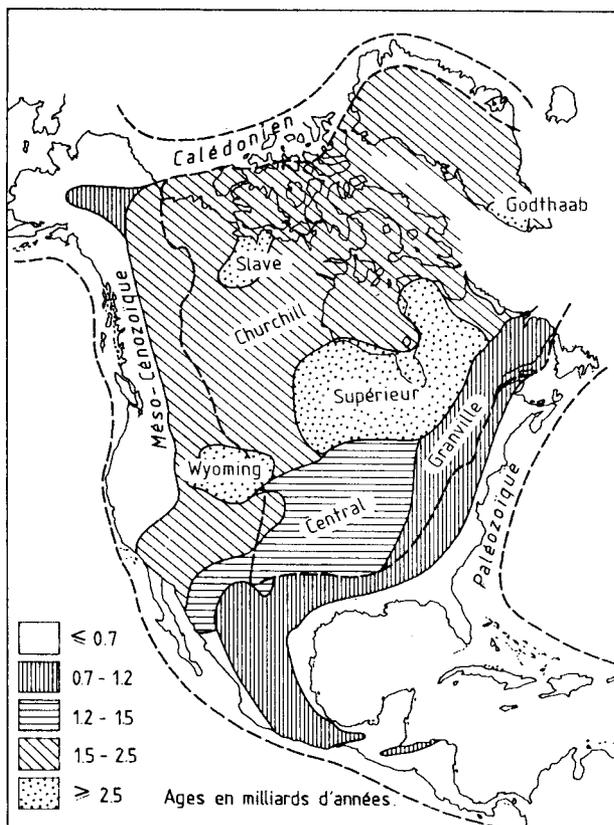


Fig. 4.- Répartition des principales ceintures crustales d'Amérique du Nord (d'après Condie, 1976)

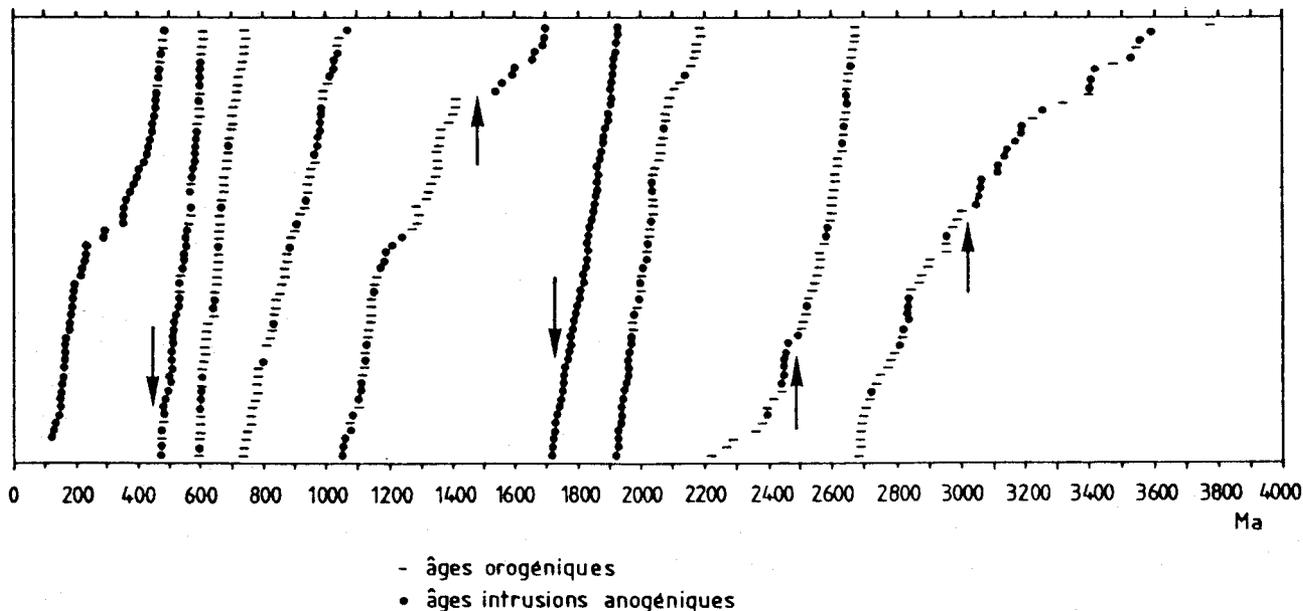


Fig. 5.- Séquence des âges (Rb/Sr et U/Pb) en Afrique (d'après Cahen *et al.*, 1984)

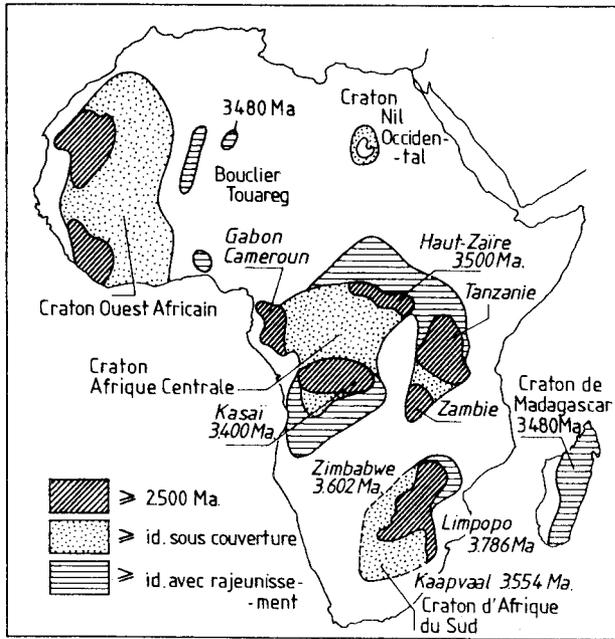


Fig. 6.- Distribution des domaines cratoniques d'Afrique (données chronologiques reprises de Cahen *et al.*, 1984)

dont certains sont constitués par l'association de masses importantes de roches vertes et de gneiss granitique («Granite-Greenstone belts»), et d'autres formés d'ensembles de gneiss à faciès granulitique, sont les témoins des premiers stades du développement continental. De dimensions initiales pouvant atteindre plusieurs centaines de km, ils se retrouvent, actuellement dispersés dans la plaque lithosphérique où ils sont vraisemblablement morcelés et remodelés pour partie par les événements orogéniques ultérieurs.

Ces noyaux révèlent dans leur structure la double origine des produits qui encourent à leur développement; les uns sont issus d'un processus de cristallisation différentielle associé à la mise en place des magmas jumelés aux premiers «arcs insulaires» et constituent les premiers dômes continentaux; les autres résultent de l'accumulation de matériaux volcaniques et sédimentaires épandus et finalement comprimés entre ces dômes. Ils exposent la double séquence des processus qui depuis le début de l'histoire du globe élaborent la masse des continents : d'une part, la contribution sédimentaire dont l'évolution s'exprime dans les phases du cycle orogénique et dont la marque est finalement celle du «recyclage»; d'autre part, la contribution magmatique dont on situe aujourd'hui la réalité au niveau d'un cycle sous-crustal marquant l'apport régulier des matériaux «juvéniles» et dont le développement s'exprime sous les conditions géotectoniques de l'expansion océanique.

LE MODELE PHANEROZOIQUE DE CROISSANCE LIMITEE

L'étude de la structure des masses continentales montre qu'à partir du Protérozoïque, un changement important s'est produit dans leur développement. Elles constituent pendant cette période des aires cratonisées très nettement stabilisées et partiellement immergées, sur lesquelles se déposent d'épaisses séries sédimentaires; certaines d'entre elles s'inscrivent au sein même du craton sous forme de ceintures orogéniques linéaires, et sialiques, qui préfigurent celles des époques suivantes. Si le complexe du Limpopo ne correspond plus en fait à une situation de ce type, d'autres exemples existent tels les Ubendides dans le craton du Zimbabwe, le Coronation geosyncline dans le bouclier canadien (Hoffman, 1973), les bassins internes en Australie centrale (Lindsay *et al.*, 1987), ou certains sillons sédimentaires intercalés dans le bouclier Baltique.

Ce n'est finalement qu'à la fin du Protérozoïque que l'on peut réellement déceler l'existence, autour de certains boucliers, de structures tectoniques caractéristiques comparables à celles des marges actives où se développe le processus typique de la subduction. En Afrique, il s'agit essentiellement des ceintures orogéniques pan-africaines dont les prolongements s'étendent vers l'Amérique du Sud, l'Antarctique et l'Australie. Elles indiquent sans aucun doute possible le début de l'aire de la tectonique des plaques telle qu'elle est conçue sur la base des observations et des recherches actuelles, dans la chaîne tertiaire, par exemple. Leur édification résulte de la fragmentation des grands boucliers et marque le départ d'un type tectonique nouveau dans la structuration de la croûte continentale. Black *et al.*, (1979) ont mis en évidence la réalité du processus d'écartement et de fermeture de plaques, à la bordure Est du craton au Mali, phénomènes qu'ils ont datés entre 800 et 600 Ma. L'étude pétrologique et géochimique des plutons «granitiques» que nous avons réalisée aux Iles Seychelles a abouti à la conclusion de l'existence d'un processus d'expansion des fonds océaniques dans cette région de l'Océan Indien, vers 800 Ma également (Deloosse, 1975; Michot & Deutsch, 1977; Demaiffe *et al.*, 1981). D'autres auteurs le situent, pour l'Amérique du Nord et l'Australie, entre 850 et 600 Ma (Stewart, 1972; Crook, 1980; Roy, 1983; Piper, 1983; Bond *et al.*, 1984). Les études récentes entreprises sur le batholite des Iforas (J.P. Liégeois, 1987), concourent utilement à compléter ces interprétations par une analyse centrée sur les structures et les compositions des produits magmatiques générés au sein d'un des

premiers batholites de l'histoire du globe terrestre qui daterait, vers 600 Ma, la première collision de type subduction entre les cratons de l'Ouest africain.

Les ceintures tectogéniques du Protérozoïque supérieur semblent, dès lors, marquer le départ d'une aire tectonique nouvelle; en fait, celle de la **tectonique globale s.s.** au cours de laquelle les deux types de croûte graduellement élaborée au sein de l'enveloppe lithosphérique, entament une évolution spécifiquement distincte; l'une continentale, dont l'histoire est déjà longue et complexe, continue à enregistrer la succession systématique des ajouts orogéniques qui contribuent soit à l'accroissement du domaine continental, soit au renforcement de sa cratonisation; l'autre, océanique, éternellement rajeunie, immobilise en surface les produits différenciés issus du manteau et qui, pour quelques centaines de millions d'années, peuvent ainsi être utilisés dans les constructions d'orogènes nouveaux.

Ainsi, la loi de l'uniformitarisme ou du principe des causes actuelles ne pourrait-elle s'appliquer à l'ensemble de la période d'existence du globe terrestre ?

Les hautes températures présentes à la surface du globe à ces époques reculées, liées essentiellement à la désintégration nucléaire des éléments radioactifs, ont vraisemblablement engendré des conditions de mobilité tectonique différentes de celles qui sont observées actuellement. En particulier, on peut penser qu'un gradient thermique plus prononcé a certainement empêché la création d'une plaque lithosphérique épaisse; cette dernière, à température plus élevée devait se caractériser par une densité plus faible; l'ensemble avait dès lors tendance à se maintenir à la surface du globe, excluant de ce fait son retour par subduction vers les zones internes.

Le refroidissement progressif des parties supérieures du globe a suivi la décroissance régulière de la production de chaleur d'origine radioactive pour atteindre progressivement l'état actuel. Dès lors, deux questions se posent: quel est le type de développement de la première croûte et quel est son modèle de croissance? Bien qu'elle comporte à chaque période géologique la double marque sédimentaire et magmatique de ses matériaux constitutifs, peut-elle procéder d'un processus différent de celui qui existe aujourd'hui ?

LA GRILLE SISMIQUE ET LA DYNAMIQUE CRUSTALE

Comme dans le cas des cratons archéens d'Afrique, le développement de la croûte continentale au sein des boucliers d'Amérique du Nord,

du Brésil, du Groenland, de l'Inde ou d'Australie, se réalise en deux étapes. La première voit l'apparition progressive, entre 3800 et 3500 Ma, de dômes de composition granitique marqués par une association minérale caractéristique dans certains cas d'un métamorphisme de faciès granulite; la seconde phase les remanie plus ou moins fortement à l'intermédiaire d'un processus de «granitisation» qui induit, vers 3000 Ma, leur cratonisation complète. Dans le même temps, une trame formée d'un ensemble volcano-sédimentaire s'intercale entre ces dômes où finalement, entre 3000 et 2600 Ma, elle est déformée, schistifiée et fortement tectonisée. Cette trame apparaît ainsi sous la forme d'une série de ceintures de «roches vertes» qui serpentent et séparent les boucliers de gneiss granulitiques, de façon tout à fait comparable à celle qui s'exprime dans la structure à grande échelle du craton du Zimbabwe. Ces ceintures, atteignant plusieurs centaines de km de long, se sont constituées à partir de dépôts accumulés dans des bassins plus ou moins étroits générés dans les zones déprimées qui entouraient les dômes sialiques. Composées de matériaux volcaniques auxquels se mêlent des éléments détritiques de composition andésitique à dacitique et des laves basiques à ultra-basiques, elles sont le siège de déformations intenses et de recristallisations métamorphiques acquises dans le cadre du faciès schiste vert ou amphibolite supérieur.

Les températures élevées qui à cette époque caractérisaient vraisemblablement les zones supérieures du globe jusqu'aux environs immédiats de la surface, le gradient thermique pouvant atteindre 100° à 120°/km, donnaient vraisemblablement lieu à de puissants mouvements de convection dont les effets ont favorisés les collisions entre les boucliers à racine granulitiques et leurs intercalaires de roches vertes; graduellement incorporés les uns aux autres, ces deux ensembles ont dès lors constitué des plateformes continentales de grande étendue sur lesquelles se sont finalement déposées les strates sédimentaires protérozoïques qui en cachent aujourd'hui de grandes parties.

Les premières consolidations crustales, apparaissent donc de façon très plausible, comme le résultat d'un phénomène tectonique dont l'intensité et la dynamique étaient nettement différentes et plus marquées que dans le cas du processus invoqué actuellement dans le modèle de la tectonique de plaques. Les continents sont, au cours de cette période, en voie d'aggradation.

La croûte archéenne est parfois décrite, par certains auteurs, dans les premiers stades de son développement, comme constituée d'une strate de

composition basaltique au sein de laquelle se seraient individualisés des coupoles granitiques, différenciées au sommet de cellules de convection générées au sein même du manteau. Entre ces coupoles, la croûte amincie aurait permis le passage et l'éruption de masses volcaniques et les accumulations détritiques à l'origine des ceintures de roches vertes. Ce modèle d'élaboration crustale, de type «statique» («tectonique de points chauds», Fyfe, 1978) ne rend pas compte des aspects dynamiques que révèlent les cratons archéens; c'est le cas en Afrique du Sud, par exemple, où le domaine du Limpopo apparaît aujourd'hui, non plus comme une ceinture orogénique plus jeune que les cratons qui l'enserrent, mais comme le résultat d'un chevauchement intra-cratonique, d'âge archéen tardif, mettant en contact le craton du Zimbabwe au nord et le craton de Kaapvaal au sud. Cette structure s'intègre plus logiquement dans le modèle de tectonique brownienne envisagé en premier lieu.

Le style tectonique qui caractérise les racines crustales fondamentales est donc ici l'élément clé qui doit permettre de départager les hypothèses extrêmes. La grille d'interprétation doit cette fois être tirée d'une analyse précise des profils sismiques et des sondages profonds actuellement en cours au travers des grandes structures continentales d'Amérique du Nord, d'Australie ou d'Europe (COCORP, BIRPS, DEKORP, ECORS, BELCORP, Conf. soc. Géol. Belg., 1988). Cette grille est aujourd'hui à peine esquissée, mais permet déjà de présenter une image comparée des structures profondes liées à diverses situations

crustales. Quatre canevas sismiques ont été répertoriés qui permettent de distinguer la structure des boucliers et des zones de plateforme de celles qui définissent les domaines d'écaillage crustal et les segments orogéniques (Allmendinger *et al.*, 1987) (fig. 7).

Les deux premiers se caractérisent, dès la surface, par une série de réflexions parallèles plus ou moins horizontales s'effaçant dans le tiers, voire la moitié supérieure de l'épaisseur crustale (profil de l'avant-pays dans les Appalaches du sud, par exemple); leur partie inférieure est parcourue de diffractions et réflexions d'inclinaison et d'orientation variables qui vont en s'atténuant dans la zone de transition vers le manteau qui n'est marquée par aucune discontinuité tranchée.

Le troisième apparaît constitué d'un train de réflexions parallèles, fortement inclinées, prolongées en profondeur sous les domaines orogéniques (ECORS, Bois *et al.*, 1986) et recoupées par les traces de la discontinuité de Moho; il souligne la périphérie des cratons précambriens (profil dans la région des Cordillères aux États-Unis; profils septentrional et méridional dans les Appalaches).

Le quatrième canevas, enfin, est régulièrement zébré d'une abondante série de réflexions horizontales ou faiblement pentées, localisées dans la croûte moyenne et profonde et limitées, dans sa partie basale, à la transition vers le manteau, par une zone continue de réflexions accentuées (Arrière-pays des orogènes récents, domaine des grabens dans les Appalaches, région des «basin and range» dans la zone centrale des Cordillères).

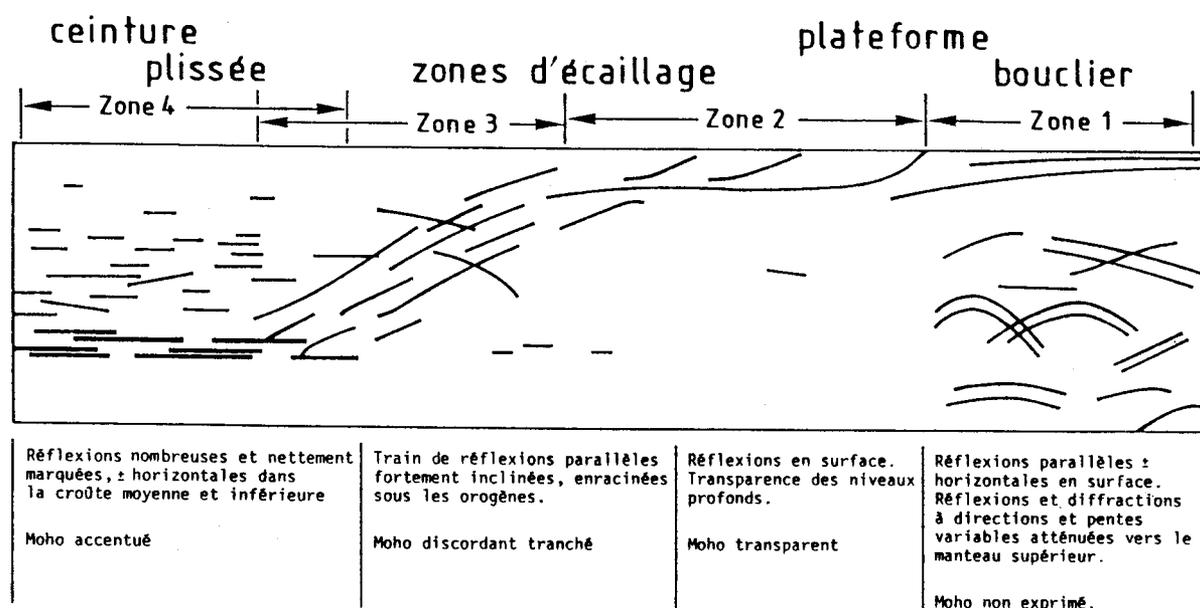


Fig. 7.- Grille d'interprétation des structures crustales profondes, définies sur base de leurs caractéristiques en sismique réflexion d'après Allmendinger *et al.*, 1987)

La grille sismique, telle qu'elle est tracée pour l'instant, indique donc que l'on puisse envisager l'existence d'une coupure qualitative entre le style du développement crustal du Précambrien et celui du Phanérozoïque. Il reste certes à l'améliorer, mais les indications qu'elle livre jusqu'à présent, confirme l'argumentation offerte par d'autres modes d'approche.

LES GRILLES GEOCHIMIQUES QUANTITATIVES ET L'ACCROISSEMENT CRUSTAL

La structure actuelle de la lithosphère, déduite des données fournies par la géologie classique, la prospection géophysique et l'analyse géochimique, marquent clairement la manière dont se constitue la croûte continentale dans sa composante «juvénile», formée essentiellement de produits mantéliques soumis à divers degrés de fusion. Ceux-ci résultent d'une suite échelonnée de processus à caractère cyclique que décrit parfaitement le **cycle sous-crustal**, cycle qui s'intègre et s'ajoute à la séquence que schématise le cycle orogénique (Michot, 1987).

LE CYCLE OCEANIQUE SOUS-CRUSTAL

Le **cycle sous-crustal** s'amorce dans le domaine mantélique sous-lithosphérique, dans une zone où l'évolution du rapport P/T permet le développement de processus complexes de fusion partielle (fig. 8). Les produits progressivement générés s'accumulent dans certaines parties du manteau supérieur et forcent leur voie au travers de la lithosphère. Il en résulte des extrusions de magmas d'origine essentiellement basique et diversément différenciés; ceux-ci s'étalent à la surface du globe de part et d'autre de fractures d'étendue souvent considérable. Au cours du temps, en se répétant à intervalles plus ou moins réguliers, ce processus aboutit à écarter l'un de l'autre, les deux zones lithosphériques ainsi séparées. En même temps, il donne naissance à une croûte consolidée nouvelle, basaltique, de plusieurs km d'épaisseur qui, régulièrement alimentée en produits magmatiques, s'étend de plus en plus largement de part et d'autre de la fracture médiane. Compte tenu de la densité des roches qui la composent, cette double plaque s'affaisse graduellement et constitue une dépression rapidement envahie par les eaux océaniques et par les dépôts provenant du démantèlement des masses continentales voisines.

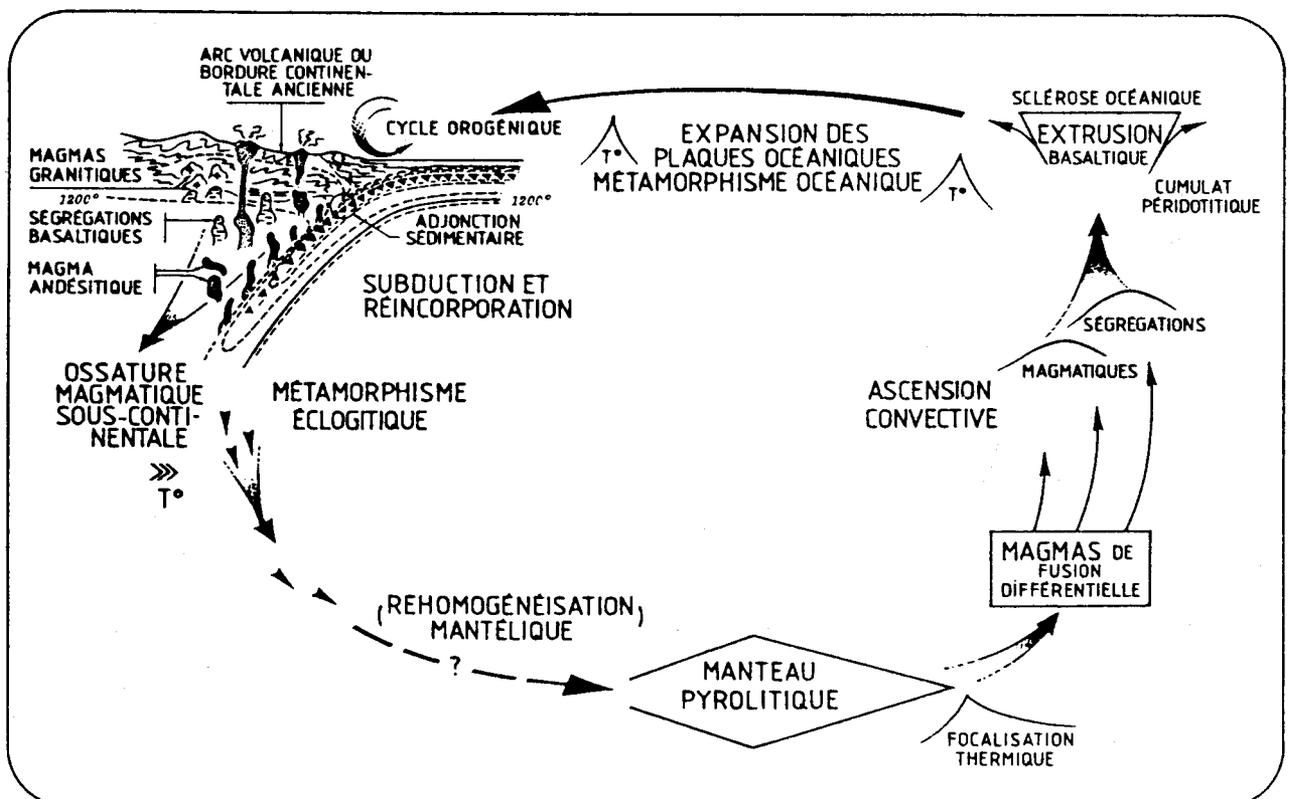


Fig. 8.- Modèle de la contribution mantélique à l'édification de la croûte terrestre définie dans le cadre d'un cycle sous-crustal entraînant l'expansion océanique

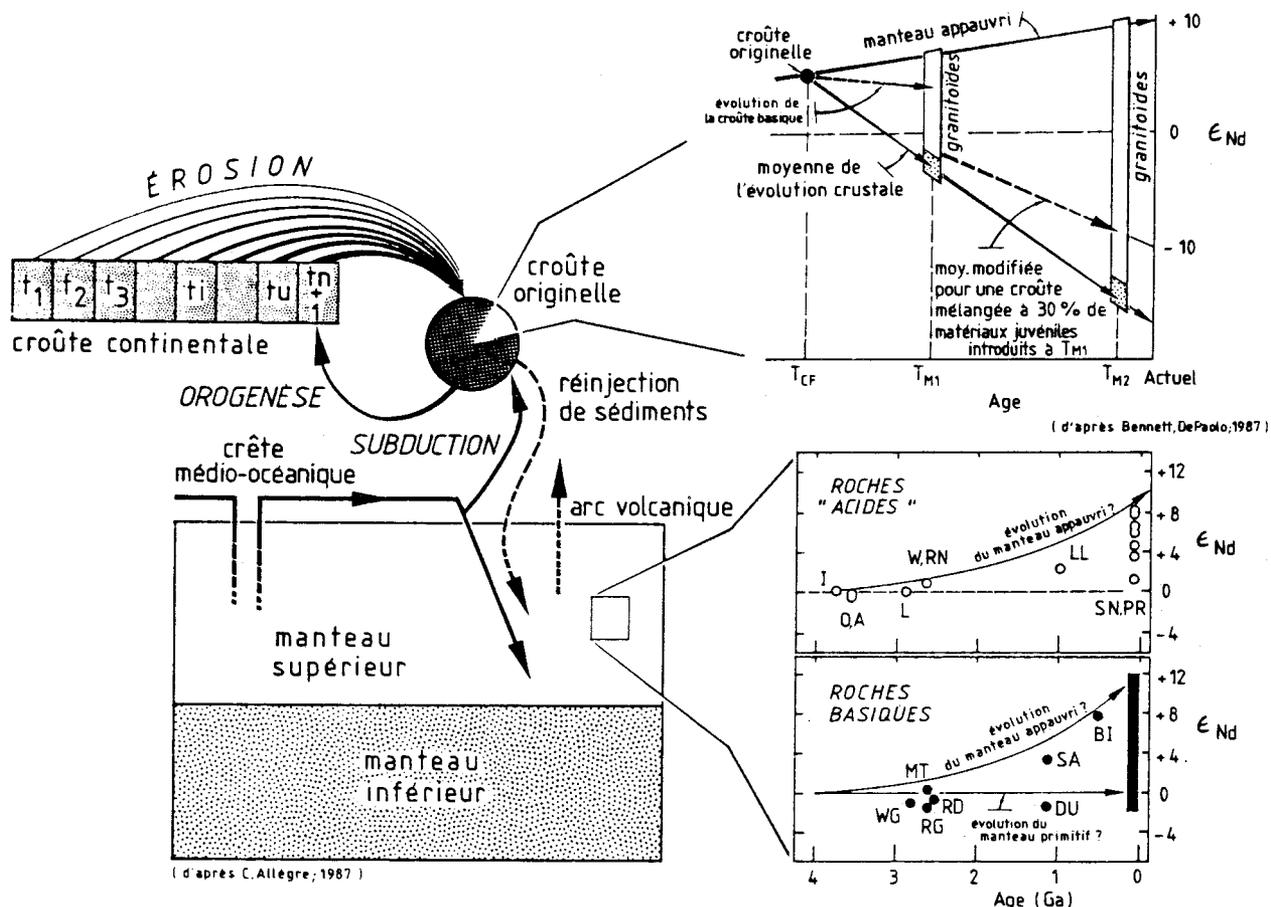


Fig. 9.- Modèle géochimique de l'évolution des ceintures continentales dans leur relation avec les produits issus du manteau supérieur et les recyclages des produits sialiques

Cette première phase du cycle sous-crustal se termine lorsque deux plaques, générées en des endroits différents du globe, sont amenées en opposition dans leur mouvement respectif.

La deuxième phase du cycle intervient dans la zone d'affrontement des plaques, là où celle dont la densité est la plus élevée, se voit forcée de réintégrer les parties profondes du manteau supérieur. Il en résulte, en premier lieu, une séparation plus ou moins complète entre la plus grande part de la masse sédimentaire accumulée à l'interface des deux plaques, d'une part (zone de subduction), et son substratum mantélique, d'autre part. La majeure partie du soubassement basaltique rejoint ainsi le manteau en emportant quelques écailles de sédiments. La réincorporation de ce matériau est contrôlée par la variation du rapport P/T en fonction de la profondeur atteinte. Métamorphisme et fusion en découlent et entraînent dans un premier stade la formation de roches de basses températures et fortes pressions, dont les éclogites représentent les types les plus profonds. Dans un second stade, pour des valeurs plus élevées de la température, certains produits basiques subissent une fusion différentielle qui entraîne la constitution de fractions

magmatiques dont la nature dépend de la profondeur et du taux de fusion atteints; ces dernières s'élèvent vers les zones supérieures du manteau sous-lithosphérique lui-même.

Les magmas individualisés s'accumulent ainsi à la racine de la plaque où ils contribuent au développement, vertical, de l'accroissement crustal; en poursuivant leur ascension vers la surface, ils peuvent y édifier, en outre, un arc insulaire volcanique qui ultérieurement s'accolera au continent voisin, agrandi d'autant, latéralement cette fois.

Les essais de mise au point des modèles relatifs à ce type d'évolution de la croûte terrestre tentent d'intégrer l'ensemble des composantes d'un système particulièrement complexe qui actuellement n'est conçu que dans ses implications qualitatives (fig. 9). C'est l'objectif des grilles géochimiques d'y inclure les contraintes quantitatives. Vue globalement, cette nouvelle approche de l'histoire lithosphérique amène ainsi à considérer l'existence d'une limite à la croissance des masses continentales, tout au moins à dater du Protérozoïque supérieur.

De nombreuses estimations ont été tentées en

ce qui concerne la croissance des domaines continentaux; de façon générale, deux types de développement ont été proposés. Le premier considère la nucléation et la croissance des continents dans le cadre d'un processus continu et régulier : les premiers noyaux continentaux auraient été de petites dimensions et se seraient nourris continuellement, proportionnellement à l'évolution thermique du globe (Windley, 1977; Moor bath, 1978; Brown, 1979). Les produits de l'érosion des masses émergées auraient, conformément au schéma du cycle géologique classique, contribué à l'accroissement latéral soit par accollement à l'aplomb des zones de subduction, soit par compression et pincement entre deux blocs continentaux en collision. Ce modèle trouve ses exemples dans la constitution des grands ensembles continentaux d'Europe ou d'Amérique où la structure en croissance concentrique a pu être mise en évidence.

Le deuxième type d'évolution des masses continentales considère ces dernières comme définitivement élaborées vers la fin de l'Archéen, voire dès le début du Protérozoïque; seuls des changements mineurs se seraient dès lors produits dans les époques plus récentes (Fyfe, 1978). En particulier, il est imaginable que les accrétiens crustales liées au processus de subduction soient compensées par des réincorporations de sédiments entraînés au cours du même processus à l'intérieur du manteau. Compte tenu du fait que le taux de réincorporation sédimentaire pourrait être actuellement plus élevé que celui de l'accrétion de nouveaux matériaux, ce dernier modèle envisage que les masses continentales anciennes (2000 Ma environ) aient pu atteindre un volume plus élevé, actuellement en voie de résorption.

La grille d'interprétation utilisée dans l'analyse de cette problématique nouvelle fait essentiellement intervenir les paramètres géochimiques concernant les Terres rares et les isotopes. Dans cette démarche, les données fournies par l'examen des rapports isotopiques du Sr ou du Pb, voire du Nd, n'ont pas toujours permis d'aboutir à des conclusions univoques. Souvent, parce que les valeurs obtenues, considérées pour elles-mêmes, nécessitent une série d'extrapolations et d'hypothèses qui n'ont pas de correspondances avec le fait géologique, tel qu'il est observé. Parfois aussi, parce que la procédure d'échantillonnage reste rudimentaire eu égard à l'ampleur de l'objectif visé.

Par contre, depuis quelques années, l'approche que propose la géodynamique chimique (Allègre, 1982) où s'interpénètrent les données géochimiques et géophysiques, paraît très cer-

tainement plus prometteuse. Extrapolée à la géochimie du manteau (Depaolo, 1981; Zartman & Doe, 1981; Fauré, 1986; Zindler & Hart, 1986; Allègre, 1987), elle permet de préciser les conditions limites qui doivent contraindre les recherches sur les types de matériaux dont sont susceptibles de provenir les unités crustales. Les grilles géochimiques ont ainsi pris le pas, dans les travaux récents, sur d'autres, restées classiques, qui ont fourni leur part d'information, mais qui représentent un canevas de contraintes néanmoins incontournables. Elles sont souvent basées sur la considération de deux types de rapport isotopique significatif : celui du $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ et celui du $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; ils permettent, en effet, de schématiser les caractéristiques générales des domaines mantéliques proposés comme sources possibles de la production crustale et de jalonner l'évolution probable de ses caractéristiques dans le système complexe d'une croissance crustale où coexistent recyclage continental et apport mantélique (fig. 10).

Il reste à préciser s'il existe bien actuellement un phénomène de réincorporation dans le manteau de masses continentales en quantités importantes, permettant de conclure à une réduction des volumes crustaux. L'une des dernières grilles aujourd'hui à l'étude serait donc celle du «cannibalisme mantélique»; elle est dans son essence principalement axée sur des considérations de géochimie théorique et ne pourra prendre de signification réelle contraignante que dans la mesure où on parviendra à la greffer sur des données géologiques liées à une interprétation rigoureusement contrôlée des profils sismiques profonds.

La systématique d'analyse sera donc dès à présent conditionnée par l'émergence d'une grille interprétative où des disciplines telles que la géochimie, la géophysique et la pétrologie plus classique seront obligatoirement interpénétrées. Cette exigence souligne, une fois de plus, la nécessité d'entraîner à une formation particulièrement adéquate, un certain nombre de groupe de chercheurs dont la qualité majeure devra être marquée du sceau de l'interdisciplinarité et de la volonté de collaboration.

L'accès à la géologie quantitative, découverte progressivement, au cours de cet exposé, impose ainsi une attitude nouvelle quant aux moyens à mettre en oeuvre pour rester dans le courant d'une science en pleine évolution.

On peut donc se rendre compte aujourd'hui combien devient essentiel, dans le développement de la géologie fondamentale, de promouvoir l'association d'écoles de pensée et de groupes d'expérimentation à des solides unités de pro-

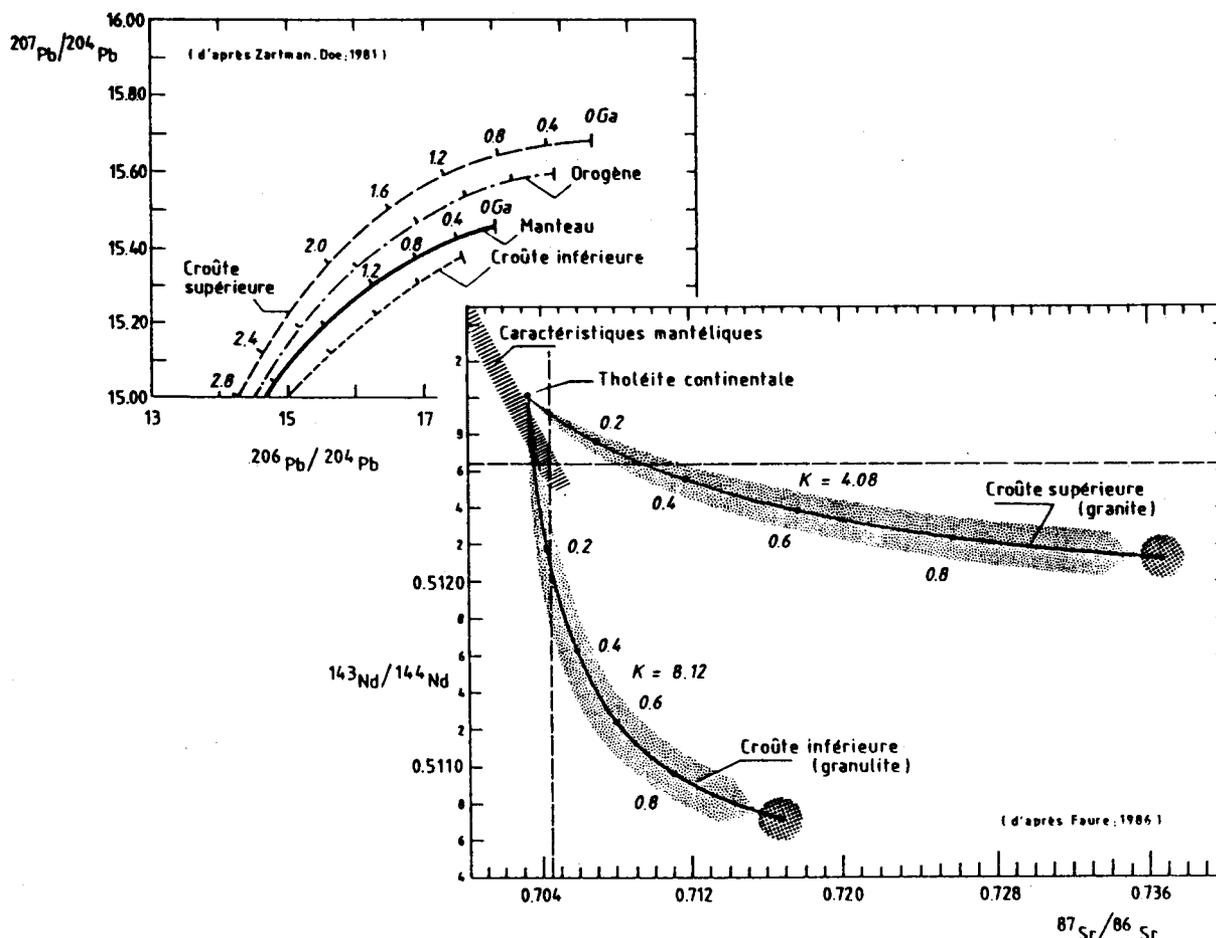


Fig. 10.- Grille géochimique (Pb, Sr et Nd) fixant les conditions limites des matériaux à l'origine des blocs crustaux

peption aguerries aux meilleures techniques modernes. Dans la perspective des ajustements de comportement que nécessite le regroupement des forces à l'échelle européenne, il nous revient, une fois encore, d'attirer l'attention sur l'intérêt de favoriser la pérennité d'une école belge, dont on doit reconnaître qu'elle a toujours joué un rôle moteur dans le développement des idées au sein de la communauté géologique internationale. Son rôle futur dépendra de sa volonté de recentrer ses objectifs et de concentrer ses moyens, tant dans son enseignement que dans ses trajectoires de recherche. Notre société géologique y a une part de responsabilité; elle souhaite la rencontrer et sa volonté de promouvoir l'édition d'un bulletin de haute qualité scientifique témoigne de la conscience qu'elle a des défis auxquels elle doit faire face.

BIBLIOGRAPHY

- ALLEGRE, Cl., 1982. Chemical geodynamics. *Tectonophysics*, 81: 109-132.
- ALLEGRE, Cl., 1983. L'écume de la Terre. Fayard, Le temps des sciences, Paris.
- ALLEGRE, Cl., 1987. Isotopes geodynamics. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 86: 175-203.
- ALLMENDINGER, R.W., NELSON, K.D., POTTER, C.J., BARANZANGI, M., BROWN, L.D. & OLIVER, J.E., 1987. Deep seismic reflection characteristics of the continental crust. *Geology*, 15: 304-310.
- BARROW, G., 1893. On an intrusion of biotite-muscovite gneiss in the southeast Highlands of Scotland and its accompanying metamorphism. *Geol. Soc. London Quart. Jour.*, 49: 330-358.
- BARTH, T.F.W., 1952. *Theoretical petrology*. Wiley, New York.
- BLACK, R., CABY, R., MOUSSINE-POUCHKINE, A., BAYER, R., BERTRAND, J.M., BOULLIER, A.M., FABRE, J. & LESQUER, A., 1979. Evidence for late Precambrian plate tectonics in West Africa. *Nature*, 278: 223-227.
- BOIS, C., CAZES, M., DAMOTTE, B., GALDEANO, A., HIRN, A., MASCLE, A., MATTE, P., RAOULT, J.F. & TORREILLES, G., 1986. Deep seismic profiling of the crust in northern France: the ECORS project. *In Reflection seismology: a global perspective*, Barazangi & Brown ed., *Amer. Geophys. Union, Geodynamics ser.*, 13: 21-30.
- BOND, G.C., NICKESON, P.A. & KONINZ, M.A., 1984. Breakup of a supercontinent between 625 and 555 Ma: new evidence and implications for continental histories. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 70: 325-345.
- BOWEN, N.L., 1928. *The evolution of the igneous rocks*. Princeton Univ. Press, Princeton.
- BOWEN, N.L., 1940. Progressive metamorphism of siliceous limestone and dolomite. *Jour. Geol.*, 48: 225-274.
- BROWN, G.C., 1979. The changing pattern of batholith emplacement during Earth history. *In Origin of granite batholiths: geochemical evidence*. Atherton and Tarney ed., 106-115.
- BRUNE, J.N., 1969. Surface Waves and crustal structure. *Am. Geophys. Union Mon.*, 13: 230-242.

- CAHEN, L. & SNELLING, N.J., 1966. Geochronology of Equatorial Africa. *North-Holland Publ.*, Amsterdam.
- CAHEN, L., SNELLING, N.J., DELHAL, J. & VAIL, J.R., 1984. The geochronology and evolution of Africa. Clarendon Press, Oxford.
- CARMICHAEL, I.S.E., TURNER, F.J. & VERHOOGEN, J., 1974. Igneous petrology. McGraw-Hill, New York.
- CONDIE, K.C., 1976. Plate tectonics and crustal evolution. Pergamon Press, New York.
- CROOK, K.A.W., 1980. Fore-arc evolution in the Tasman Geosyncline: the origine of the southeast Australian continental crust. *Geol. Soc. Austr. Journ.*, 27: 215-232.
- CROSS, W., IDDINGS, J.P., PIRSSON, L.V. & WASHINGTON, H.S., 1903. Quantitative classification of igneous rocks. Chicago.
- DELHAL, J., 1986. De la datation «absolue» à la géochimie isotopique. Exemples africains de l'évolution de la géochronologie, ARSOM.
- DELOOSE, J., 1975. Contribution à l'étude de l'origine du granite des Seychelles et de ses enclaves. Mém. Univ. libre Bruxelles, Faculté des Sciences : 1-91.
- DEMAIFFE, D., HERTOGEN, J. & MICHOT, J., 1981. The granitic rocks of the Seychelles islands and their enclaves: Part I: REE and Sr isotope geochemistry. *7th European Coll. Geochron, Cosmochron. and isotope Geol.*, Terra Cognita, 2: 67.
- DEN TEX, E., 1963. A commentary on the correlation of metamorphism and deformation in space and time. *Geol. en Mijnbouw*, 42: 170-176.
- DEN TEX, E., 1965. Metamorphic lineages of orogenic plutonism. *Geol. en Mijnbouw*, 44: 105-132.
- DEN TEX, E., 1974. The polycyclic lithosphere: an attempt to assess its orogenic memory. *Centenaire Soc. Géol. de Belg.*: Géol. domaines cristallins, Liège: 145-181.
- DEPAOLO, D.J., 1981. Nd isotopic studies: some new perspectives on Earth structure and evolution. *Eos*, 62: 137-145.
- EGT, 1983. First EGT workshop: the northern segment. *E.S.F.*, 1984, Galson & Müller ed., Copenhagen: 1-169.
- EGT, 1985. Second EGT workshop: the southern segment. *E.S.F.*, 1985, Galson & Müller ed., Venice: 1-267.
- EGT, 1986. Third EGT workshop: the central segment. *E.S.F.*, 1986, Freeman, Müller & Giese ed., Bad Honnef: 1-260.
- EGT, 1987. The european geotraverse project, a major european scientific venture. *E.S.F.*, Strasbourg: 1-8.
- ESKOLA, P., 1920. The mineral facies of rocks. *Norsk Geol. Tidsskr.*, 6: 143-194.
- FAURE, G., 1986. Principles of isotope geology. 2d ed., Ch. 13: Isotope geology of neodymium and strontium in igneous rocks. John Wiley, New York.
- FREY, M., 1969. The step from diagenesis to metamorphism in pelitic rocks during alpine orogenesis. *Sedimentology*, 15: 261-279, Elsevier, Amsterdam.
- FYFE, W.S., 1978. The evolution of the earth's crust: modern plate tectonics to ancient hot spot tectonics? *Chem. Geol.*, 23: 89-114.
- FYFE, W.S., TURNER, F.J. & VERHOOGEN, J., 1958. Metamorphic reactions and metamorphic facies. *Mem. Geol. Soc. Am.*, 73: 1-259.
- GARRELS, R.M. & CHRIST, C.L., 1965. Solutions, minerals and equilibria. Harper & Row, New York.
- GRUBENMANN, V. & NIGGLI, P., 1924. Die Gesteinsmetamorphose. Barnträger, Berlin.
- HOFFMAN, P., 1973. Evolution of an early proterozoic continental margin: the Coronation geosyncline and associated aulacogens of the northwestern Canadian Shield. *Phil. trans. Roy. Soc. Lond.*, 273: 547-581.
- HOLLAND, J.G. & LAMBERT, R.St.J., 1969. Structural regimes and metamorphic facies. *Tectonophysics*, 7: 197-217.
- JOHANNSEN, A. A descriptive petrology of the igneous rocks. I, 1932; II, 1932; III, 1937; IV, 1938, Chicago.
- JUNG, J. & ROQUES, M., 1952. Introduction à l'étude zéonographique des formations cristallophyliennes. *Bull. Serv. Carte Geol. France*, 50, Paris.
- KAPLAN, I.R. & RITTENBERG, S.C., 1966. Basin sedimentation and diagenesis. The sea, Hill ed., 3: 583-619, *Interscience*, New York.
- LE PICHON, X., 1968. Sea-floor spreading and continental drift. *J. Geophys. Res.*, 73: 3681-3697.
- LIEGEOIS, J.P., 1987. Le batholite composite de l'Adrar des Iforas (Mali). Thèse de Doctorat, Université libre de Bruxelles.
- LINDSAY, J.F., KORSH, R.J. & WILFORD, J.R., 1987. Timing the breakup of a proterozoic supercontinent: evidence from Australian intracratonic basins. *Geology*, 15: 1061-1064.
- McGREGOR, A.M., 1951. Some milestones in the Precambrian of southern Africa. *Proc. Geol. Soc. S. Afr.*, 54: 27-71.
- MEHNERT, K.R., 1968. Migmatites and the origin of granitic rocks. Elsevier, Amsterdam.
- MICHEL-LEVY, A., 1889. Structure et classification des roches éruptives. Paris.
- MICHOT, J. & DEUTSCH, S., 1977. Les Seychelles, un nucleus sialique. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 100: 147-156.
- MICHOT, J., 1987. Les sources de la modélisation géologique. *Bull. Séanc. Acad. r. Sci. Outre-Mer*, 32: 665-679.
- MICHOT, P., 1956. La géologie des zones profondes de l'écorce terrestre. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 80: B19-60.
- MICHOT, P., 1957. Phénomène géologiques dans la catazone profonde. *Geol. Rundschau*, 46: 147-173.
- MIYASHIRO, A., 1961. Evolution of metamorphic belts. *J. Petrology*, 2: 277-311.
- MIYASHIRO, A., 1973. Metamorphism and metamorphic belts. George Allen & Unwin, London.
- MIYASHIRO, A., AKI, K. & SENGOR, A.M., 1984. Orogeny. John Wiley & Sons, New York.
- MOORBATH, S., 1978. Age and isotope evidence for the evolution of the continental crust. *Phil. trans. Roy. Soc. Lond.*, 288A: 401-412.
- NIGGLI, P., 1931. Die quantitative mineralogische Klassifikation der eruptivgesteine. *Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, XI: 296-364.
- ODP, 1981. Rep. Conference on scientific ocean drilling. *Joint Oceanographic Institutions Inc.*, Washington DC: 1-110.
- ODP, 1986. Ocean drilling program; launching of the ESF consortium. *Special issue E.S.F.*, Communications, 15: 1-16.
- ODP, 1987. Ocean drillin program: to explore the structure and history of the earth beneath the global sea. Cullen ed., *Joint Oceanographic Institutions Inc.*, Washington DC: 3-24.
- ODP, 1987. Rep. Second Conference on scientific ocean drilling «COSOD II». Munsch ed., *Joint Oceanographic Institutions Inc.*, ESF, Strasbourg: 1-142.
- PETTIJOHN, F.J., 1957. Sedimentary rocks. 2d ed., Harper & Row, New York.
- PIPER, J.D.A., 1983. Proterozoic paleomagnetism and single continent plate tectonics. *Roy. Astron. Soc. Geophys. Journ.*, 74: 163-197.
- RICHARDSON, S.W., 1970. The relation between a petrogenetic grid, facies series, and the geothermal in metamorphism. *Fortschr. Miner.*, 47: 65-76.
- ROSENBUSCH, H., 1898. Elemente der Gesteinslehre, Stuttgart.
- ROY, J.L., 1983. Paleomagnetism of the north american Precambrian. A look at the data base. *Precambrian Research*, 19: 319-348.
- SALVADOR, A., 1987. Stratigraphic classification and nomenclature of igneous and metamorphic rock bodies. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 99: 440-442.
- SCHREYER, W., 1977. Whiteschists: their composition and pressure temperatures regimes based on experimental, field and petrographic evidence. *Tectonophysics*, 43: 127-144.
- SOC. GEOL. BELG., 1988. Coll. «Deep seismics and drillings conference», Bruxelles, 1987. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 111: 201-321.
- SPRY, A., 1969. Metamorphic textures. Pergamon, Oxford.
- STEWART, J.H., 1972. Initial deposits in the cordilleran geosyncline: evidence of a late Precambrian (< 840 m.y.) continental separation. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 83: 1345-1360.
- STRECKEISEN, A., 1974. Classification and nomenclature of plutonic rocks. *Geol. Rundschau*, 63: 773-786.

- STRECKEISEN, A., 1979. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites, and melilitic rocks: recommendations and suggestions of the IUGS Subcommittee of the systematics of igneous rocks. *Geology*, 7: 331-335.
- TANKARD, A.J., JACKSON, M.P.A., ERIKSON, K.A., HOBDAV, D.K., HUNTER, D.R. & MINTER, W.E.L., 1982. Crustal evolution of South Africa. 3.8 billions years of earth history. Springer-Verlag, New York.
- THOMPSON, J.B., 1955. The thermodynamic basis for the mineral facies concept. *Amer. J. Sci.*, 253: 65-103.
- THOMPSON, J.B., 1957. The graphical analysis of mineral assemblages in pelitic schists. *Amer. Min.*, 42: 842-858.
- THOMPSON, P.H., 1976. Isograd patterns and pressure-temperature distributions during regional metamorphism. *Contrib. Mineral. petrol.*, 57: 277-295.
- THOMPSON, P.H., 1977. Metamorphic P-T distribution and the geothermal gradients calculated from geophysical data. *Geology*, 5: 520-522.
- TILLEY, C.E., 1924. The facies classification of metamorphic rocks. *Geol. Mag.*, 61: 161-171.
- TURNER, F.J. & VERHOOGEN, J., 1960. Igneous and metamorphic petrology. 2d ed., McGraw-Hill, New York.
- TURNER, F.J. & WEISS, L.E., 1963. Structural analysis of metamorphic tectonites. McGraw-Hill, New York.
- VERHOOGEN, J., TURNER, F.J., WEISS, L.E., WAHRHAFTIG, C. & FYFE, W.S., 1970. The earth; an introduction to physical geology. Holt, Rinehart & Winston, New York.
- WINDLEY, B.F., 1977. Timing of crustal growth and emergence. *Nature*, 270: 426-428.
- WINDLEY, B.F., 1984. The evolving continents. 2d ed., John Wiley & Sons, New York.
- WINKLER, H.F.G., 1970. Abolition of metamorphic facies, introduction of the four divisions of metamorphic stage, and of a classification based on isograds in common rocks. *Neues Jahrb. Miner.*, 189-248.
- WINKLER, H.F.G., 1976. Petrogenesis of metamorphic rocks. 4th ed., Springer-Verlag, New York.
- ZANETTI, B., 1984. Proposed new chemical classification of volcanic rocks. *Episodes*, 7/4: 19-20.
- ZARTMAN, R.E. & DOE, B.R., 1981. Plumbotectonics: the model. *Tectonophysics*, 75: 135-162.
- ZEN, E-an, 1974. Construction of P.T. diagrams for multicomponent systems after the method of Schreinemakers. A geometric approach. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 1225.
- ZINDLER, A. & HART, S., 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 14: 493-571.
- ZWART, H.J., 1960. The chronological succession of folding and metamorphism in the Central Pyrenees. *Geol. Rundschau*, 50: 203-218.
- ZWART, H.J., The duality of orogenic belts. *Geol. Mijnbouw*, 46: 283-309.
- ZWART, H.J. & SOBOLEV, V.S., 1973. Metamorphism map of Europe. *Sub-Comm. for cartography of metamorphic belts of the World*, UNESCO, Paris.
- ZWART, H.J., SOBOLEV, V.S. & LEPEZIN, G.G., 1978. Metamorphism map of Asia. *Inst. Geol. Geophys., Siberian branch of the USSR Acad. Sciences*, Pergamon Press, Oxford.