

ment de la fragmentation, probablement entre 1 000 et 800 millions d'années, d'un supercontinent plus ancien dénommé Rodinia. Rodinia dérive de l'infinitif russe *rodit* qui signifie croître, engendrer. Le Rodinia est le père de nos continents actuels. Sur les marges des blocs issus de sa fragmentation vont apparaître, à la fin du Protérozoïque, les plus anciennes faunes du globe, en particulier la fameuse faune d'Ediacara. Les travaux récents, notamment ceux du Canadien Paul Hoffman, ont permis de proposer des scénarios conduisant de Rodinia à Gondwana.

Le Rodinia, qui s'est assemblé autour de 1 200-1 000 millions d'années, se fragmente en trois masses principales. Celles-ci, après une dérive de plusieurs centaines de millions d'années, se réunissent pour former, au Sud, le Gondwana et, au Nord, le Laurasia (Amérique du Nord, Europe du Nord-Est et Asie). Le méga-continent Laurasia prend forme tardivement, au Paléozoïque supérieur, par agrégation à Laurentia et Baltica des fragments asiatiques et de la Sibérie. Ce que nous venons de décrire illustre le cycle des supercontinents, dont la durée est de l'ordre de 450 millions d'années : 40 millions d'années pour la fragmentation, 160 millions d'années pour l'expansion

océanique, autant pour la fermeture océanique, qui voit la disparition ou subduction de la croûte océanique, et environ 80 millions d'années représentant la durée des collisions augmentée de celle de la survie du supercontinent.

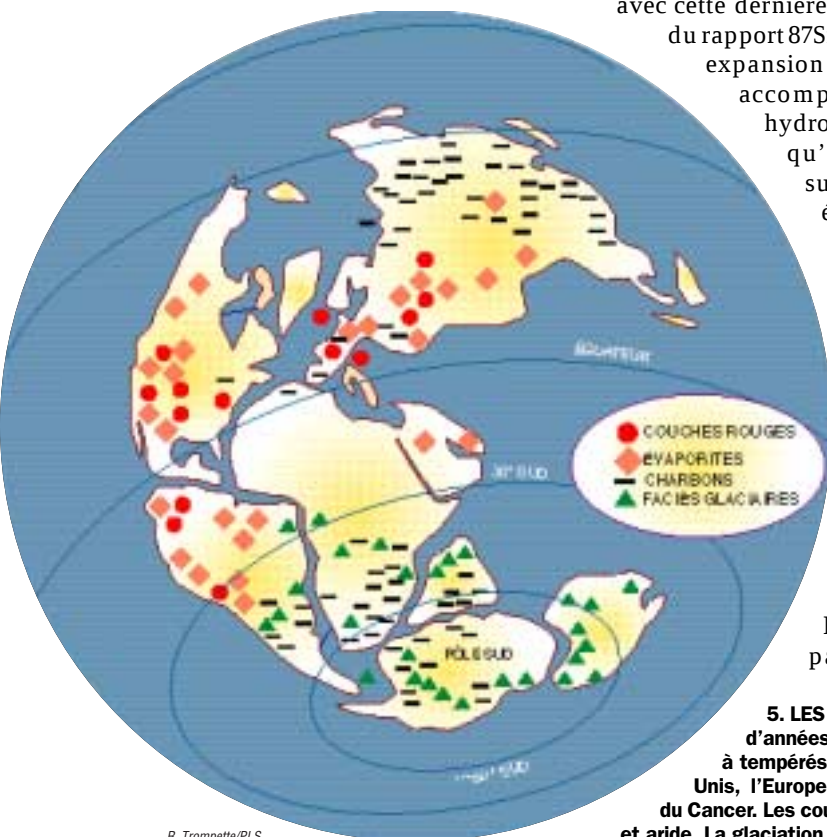
L'histoire de la fragmentation du Rodinia à partir de 1 000 millions d'années et de l'agrégation du Gondwana autour de 600 millions d'années est lisible sur la courbe d'évolution du rapport $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ des carbonates marins (Sr désigne le Strontium). Quelle est la signification géologique de ce rapport ? Sur les marges actives, la fusion partielle des péridotites du manteau des plaques lithosphériques plongeantes engendre des magmas qui, par cristallisation fractionnée, donnent naissance à la croûte continentale, dont la composition est voisine de celle des granites. Fusion partielle et cristallisation fractionnée concentrent dans la croûte continentale les alcalins et donc 87Rb (Rb désigne le Rubidium) ; 87Sr , issu de la désintégration de 87Rb , y est aussi concentré, et le rapport $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ y est élevé, voisin de 0,720. En revanche, il est faible et aujourd'hui voisin de 0,704 dans les basaltes de la croûte océanique pauvre en 87Rb .

Dans l'eau de mer ou dans les carbonates marins, en équilibre isotopique avec cette dernière, une faible valeur du rapport $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ indique une expansion océanique rapide accompagnée d'un fort hydrothermalisme, alors qu'une forte valeur suggère une intense érosion des continents. Ce rapport, mesuré dans les carbonates déposés durant le cycle panafricain (entre 900 et 800 millions d'années) atteint 0,706, sa valeur la plus basse de l'histoire de la Terre, ce qui souligne l'intensité de l'expansion océanique

panafricaine. Sa brutale remontée, autour de 600 millions d'années, jusqu'à 0,709, l'une des valeurs les plus élevées de l'histoire du Globe, marque l'érosion des volumineux reliefs des chaînes panafricaines engendrées lors de l'agrégation du Gondwana. Nous examinerons maintenant ce que nous enseignent les divers types de roches déposées sur le Gondwana.

Glaciation du Permo-Carbonifère

Vers 1870, une quarantaine d'années après la mise en évidence, dans le Jura, de la glaciation plio-quaternaire européenne par le Suisse Louis Agassiz, la glaciation permo-carbonifère de Dwyka (nom d'une rivière) était découverte en Afrique du Sud. L'identification des dépôts glaciaires, récents ou anciens, est délicate. Des figures d'abrasion telles que des surfaces planes et lisses comme des miroirs, des stries et cannelures, des indices d'arrachement de matière, des formes en dos de baleine – on dit moutonnées par comparaison avec les perouques enduites de graisse de mouton qui étaient utilisées à la cour des rois de France – sont attribuées à une érosion par la glace. Quant aux faciès continentaux grossiers déposés par les glaces – on parle de moraines ou de tills pour les glaciers actuels et de tillites dans les formations anciennes –, ils sont également difficiles à caractériser. Une tillite est composée de blocs de taille variable qui flottent dans une matrice fine, constituée de grains très fins de minéraux et de roches. Ces tillites ressemblent à des conglomérats particuliers, où les blocs ne seraient pas contigus. Pour déposer les blocs, il faut que des forces importantes soient mises en œuvre, mais alors, sous l'effet de ces forces, les particules fines sont balayées ! À l'inverse, un milieu peu énergétique, compatible avec le dépôt de la matrice, est incapable de transporter les blocs ! En domaine continental, les tillites résultent du transport de matériaux grossiers à la base, au sein du glacier ou sur son toit. Toutefois, des courants boueux de forte densité, comme ceux qui descendent les pentes continentales conduisant aux grands fonds



R. Trompette/PLS

5. LES CLIMATS DANS LE GONDWANA. Au Permien, il y a environ 300 millions d'années, la majorité des charbons du Gondwana témoignent de climats froids à tempérés et humides. Toutefois, les charbons, dans ce qui sera l'Est des États-Unis, l'Europe du Sud et l'Afrique du Nord, se déposent entre l'équateur et le tropique du Cancer. Les couches rouges et les évaporites colonisent la zone intertropicale chaude et aride. La glaciation est cantonnée dans l'hémisphère Sud.

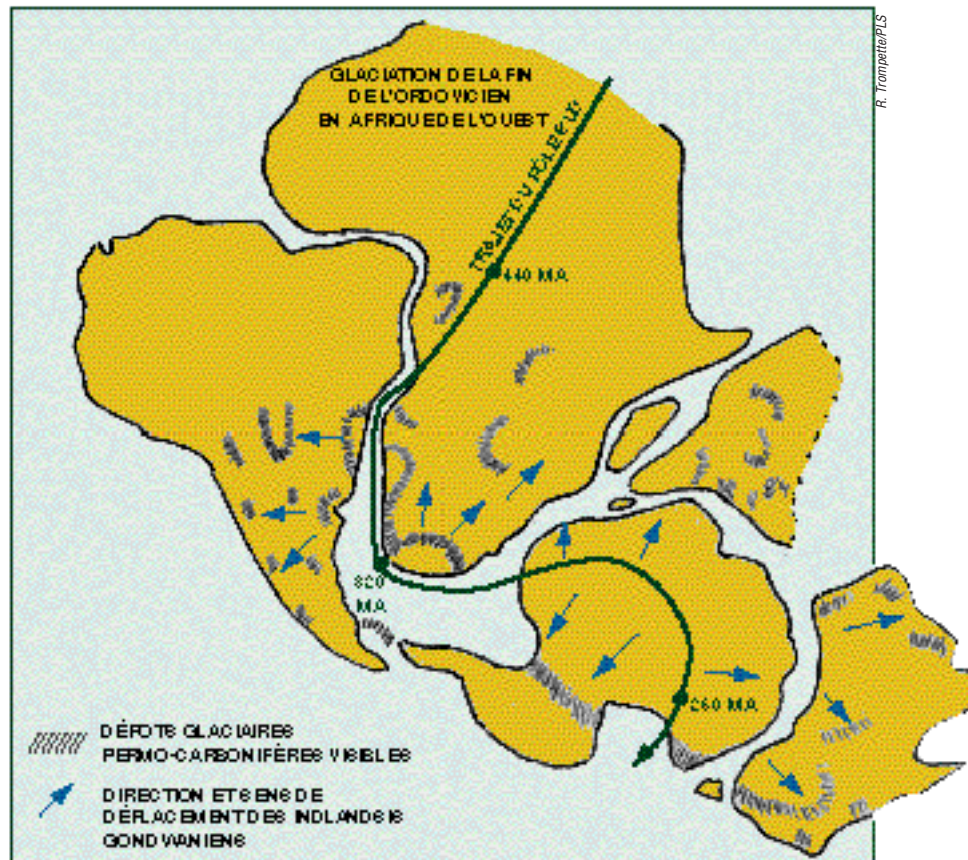
océaniques, ou la liquéfaction de masses rocheuses engendrent des faciès similaires aux tillites. D'où les difficultés et les polémiques soulevées par l'identification de celles-ci. Sur les continents, cannelures, stries, figures d'arrachement et moutonnements permettent de reconstituer direction et sens de cheminement des glaces.

Les faciès glaciaires permo-carbonifères sont représentés sur les cinq continents gondwaniens. Ils sont vieux de 330 à 250 millions d'années, la plupart d'entre eux étant d'âge carbonifère supérieur à permien inférieur (320-255 millions d'années). À l'exception de ceux de l'Antarctique, ils sont actuellement localisés à de basses latitudes, le plus souvent en zone inter-tropicale. Cela posait problème aux géologues qui, au début du siècle, défendaient l'idée de la fixité des continents. Si, en suivant le géologue Nord-américain John Crowell, nous les reportons sur une reconstitution du Gondwana de l'époque, nous constatons que la plupart de ces sédiments glaciaires se sont déposés à de hautes latitudes (40-90°). Au cours du temps, ils ont accompagné le déplacement du pôle Sud qui longe les côtes de Namibie, puis celles d'Afrique du Sud, infléchit sa trajectoire vers l'Est pour entrer en Antarctique non loin de la mer de Weddell et en ressortir, au Permien supérieur (255-245 millions d'années), à proximité de la mer de Ross.

Aussi les errements du pôle Sud, expliquent-ils la distribution des dépôts glaciaires : carbonifères (360-290 millions d'années), voire dévoniens (410-360 millions d'années), en Amérique du Sud et sur le flanc Ouest du Sud de l'Afrique, plutôt permien en Australie et en Antarctique. Cela explique également l'étalement dans le temps – 80 millions d'années – de la glaciation permo-carbonifère, alors que celle-ci n'a, en aucun lieu, duré aussi longtemps.

Charbon du Gondwana

Le charbon est essentiellement d'âge permien (290-245 millions d'années), débordant sur le Carbonifère et le Trias (245-210 millions d'années). Il se dépose dès le Carbonifère en Amérique du Sud, là où la glaciation s'achève précocement. Ce charbon n'est pas propre au Gondwana, il existe sur toute la Pangée et dans l'hémisphère Nord, il est généralement plus ancien et d'âge carbonifère



6. GLACIATION DU PERMO-CARBONIFÈRE. Entre 500 et 250 millions d'années, le pôle Sud, dont le trajet est retracé (en vert) à l'aide de données paléomagnétiques, traverse le Gondwana du Nord au Sud. Autour de 440 millions d'années (Ordovicien supérieur), il se situe au milieu du Sahara induisant une glaciation en Afrique de l'Ouest. Entre 360 et 250 millions d'années (Carbonifère et Permien), il longe les côtes occidentales de l'Afrique du Sud et traverse l'Antarctique. La glaciation engendrée est la plus importante que la Terre ait connue. Elle se propage en suivant fidèlement le déplacement du pôle. Par commodité graphique, les géologues représentent les déplacements du pôle. En réalité, celui-ci est quasi fixe, et ce sont les continents qui sont mobiles et viennent traverser la zone polaire. Les dépôts glaciaires sont plus étendus que ceux figurés ; ils sont en partie masqués par les couvertures plus récentes.

supérieur : ce sont les terrains du Houiller du Nord de la France. Le taux d'accumulation du carbone organique est, durant la période carbonifère supérieur-permien (320-245 millions d'années), le plus important de l'histoire de la Terre, près de 10^{19} moles de carbone par million d'années, soit le double de la moyenne. Les sous-bois des forêts sont colonisés par des fougères – dont *Glossopteris* et *Gangamopteris* – qui, bien qu'apparues au Silurien (440-410 millions d'années), prolifèrent au Permo-Carbonifère.

Durant l'intervalle Carbonifère supérieur-Trias inférieur, les végétaux se développent dans des zones marécageuses, mal drainées, périodiquement envahies par la mer, qui frangent la Pangée, mais aussi dans des bassins endoréiques intérieurs. Au Permien, les charbons s'accumulent majoritairement aux hautes latitudes sous des climats

froids à tempérés et humides ; cela est net dans le Gondwana. Dans l'hémisphère Nord (Europe et partie orientale des États-Unis), les charbons se déposent à basses latitudes, entre l'équateur et le tropique du Cancer, sous des climats chauds et plus ou moins humides, fréquemment dans des bassins fermés installés au pied des reliefs jeunes des montagnes hercyniennes. Pour constituer de grosses accumulations de charbon, il faut non seulement produire beaucoup de carbone organique, mais aussi qu'il soit enfoui rapidement, avant d'être oxydé.

Les charbons du Gondwana sont scellés, soit par les dépôts de transgressions marines engendrées par des fluctuations du volume des inlandis (masses glaciaires continentales), soit par des apports fluviaux périodiques provenant de la destruction de reliefs avoisinants.

Climat chaud et aride du Permo-Trias

Durant cette période qui s'étend de 290 à 210 millions d'années, le Gondwana est intégré au supercontinent de la Pangée, qui regroupe l'ensemble des continents et qui est entouré par un océan unique dénommé Panthalassa. La croûte continentale conduisant mal la chaleur géothermique, celle-ci s'accumule à sa base. La Pangée est soulevée, les zones côtières y sont étroites, les mers intérieures sont rares. Cette massivité engendre un climat aride, sauf dans les zones côtières baignées par l'océan périphérique. À côté des charbons, qui persistent jusqu'au Permien inférieur, les roches caractéristiques du Permo-Trias sont des grès éoliens qui conservent parfois des structures d'anciennes dunes, des grès ou argilites rouges et des évaporites.

Les superficies occupées par les évaporites du Permo-Trias sont les plus importantes de toute l'histoire de la terre. Les évaporites se déposent lorsque le taux d'évaporation est supérieur à la hauteur des précipitations, conditions que l'on rencontre dans les déserts chauds, mais aussi dans certains déserts froids, ces derniers étant toutefois rares. Ce sont des roches exceptionnelles. Elles ne nécessitent aucun apport détritique extérieur, ne font appel à aucune intervention biologique ; en général, elles précipitent directement à partir de l'eau de mer. Il faut évaporer 80 pour cent de l'eau de mer pour précipiter du gypse (sulfate de calcium), 90 pour cent pour l'halite (chlorure de sodium), qui est de loin le sel marin le plus abondant, et quasi 100 pour cent pour les sels de magnésium et de potassium. Dans certains bassins sédimentaires, les évaporites du Permo-Trias, avec de minces intercalations d'argilites noires, atteignent 1 500 mètres d'épaisseur. Pour précipiter une telle épaisseur d'évaporites, il faudrait imaginer des bassins profonds de 1 500 kilomètres entièrement remplis d'une eau contenant 35 grammes de sel au litre. Cela est bien sûr impossible. Il faut faire intervenir une recharge en eau salée assurée par des entrées marines périodiques.

Les grès et les argilites rouges sont des faciès continentaux colorés par de très petites quantités (0,1 pour cent) d'oxyde de fer ferrique (Fe^{+++}). Ce fer provient de l'altération de minéraux comme des amphiboles et des pyroxènes ferrifères ou de la biotite. Les

couches rouges se forment en abondance sous des climats tropicaux à saisons contrastées et dans les zones semi-désertique à désertique où les oxydes de fer sont libérés. Dans le Permo-Trias, l'association couches rouges-grès éoliens-évaporites est caractéristique d'un climat chaud et semi-aride. L'abondance des évaporites atteste de précipitations, réduites mais non nulles.

À la limite Permien et Trias se situe l'une des crises biologiques les plus dramatiques de l'histoire du Globe : 75 à 80 pour cent des espèces vont disparaître. En mer, trilobites, tétracoraliaires, fusulines, entre autres, disparaissent à jamais, alors que les brachiopodes, les bryozoaires et les crinoïdes sont décimés.

Extrême stabilité du Gondwana

La séquence type du Gondwana que nous venons d'examiner est, pour le géologue européen, surprenante. Elle dure longtemps, environ 200 millions d'années (360-150 millions d'années), est essentiellement continentale et peut être identifiée sur cinq continents, où elle couvre de vastes surfaces. Elle traduit une durable stabilité du Gondwana. On est loin de la stratigraphie européenne complexe et rythmée par les incessants va et vient de la mer et par les échos des déformations successives qui conduisent à la surrection de la chaîne hercynienne.

Le méga-continent du Gondwana est né autour de 600 millions d'années, alors que la séquence sédimentaire gondwanienne qui le caractérise s'est déposée entre 360 et 150 millions d'années. Que se passe-t-il durant la période 600-360 millions d'années ? De vastes bassins cratoniques stables se forment. Les caractères de la sédimentation y dépendent d'une compétition entre la lente montée du méga-continent et les variations du niveau marin. Les hauts niveaux marins déposent des séquences marines peu profondes. Lors des bas niveaux s'accumulent des séquences continentales. La vitesse de sédimentation reste faible (un peu plus de dix mètres par million d'années pour le Paléozoïque inférieur du bassin africain de Taoudeni), traduisant un relief arasé, une subsidence réduite. La longévité du Gondwana contredit quelque peu la notion de cycle des supercontinents, qui prédit qu'une

masse continentale étendue ne peut survivre plus de 100 millions d'années, l'accumulation de chaleur à sa base aboutissant à l'ouverture de rifts précurseurs des océans. Le Gondwana traverse, quasi intouché, 400 millions d'années. Il constitue un méga-continent surélevé où les sédiments continentaux abondent. En position polaire durant le Carbonifère supérieur et le Permien inférieur, il va être le cadre idéal pour le développement de la plus grande glaciation continentale que le Globe ait connue.

Localisation des coupures ?

La localisation des zones précises des coupures, lors de la fragmentation du Gondwana à partir de 170 millions d'années, reste énigmatique. Les zones d'ouverture océanique recoupent indifféremment les chaînes panafricaines et les cratons précambriens, sauf dans le cas de l'Atlantique Sud, dont l'ouverture est guidée par l'orientation d'un chapelet de chaînes panafricaines. Dans la dispersion du Gondwana, l'héritage tectonique semble peu important : l'orientation des dorsales des océans actuels paraît souvent indépendante des structures montagneuses panafricaines.

Roland TROMPETTE est chercheur CNRS au CEREGE (Centre Européen de Recherches et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement), Université d'Aix-Marseille III, Europôle méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence Cedex 04.

A. BLIECK, J. FERRIÈRE et M. WATERLOT, *Une mise au point sur la géologie des continents issus du Gondwana*, in *Ann. Soc. Géol. du Nord*, 3, 2^e série., pp. 41-63, 1994.

J.C. CROWELL, *Gondwana Glaciation, Cyclothems, Continental Positioning and Climate Change*, in *American Jour. Sci.*, 278, pp. 1345-1372, 1978.

R. TROMPETTE, *Geology of Western Gondwana (2 000-500 Ma)*, Balkema, 350 pages, 1996.

R. UNRUG, *Geodynamic Map of Gondwana Supercontinent Assembly*, Publ. Council for Geoscience, Pretoria, South Africa and Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, 1996.

M. de WIT, M. JEFFERY, H. BERGH et L. NICOLAYSEN, *Geological Map of Sectors of Gondwana Reconstructed to their Position ~150 Ma*, Publ. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, USA, 1988.
