



Les supercalculateurs existants en sont très loin : ils ne dépassent pas 10^9 opérations par joule.

les autres villes intermédiaires, Rennes dans notre exemple. Après une journée complète de travail au laboratoire, je terminai cette procédure itérative ; c'était la partie la plus fastidieuse de

L'étape 2c de l'algorithme se termine avec la fin de la séparation par affinité : dans le tube se trouvent alors les molécules d'ADN qui codent le chemin hamiltonien. Ainsi, si le tube contenait un seul type de molécule, je pouvais en conclure qu'un chemin hamiltonien existait dans le graphe sinon, un tel chemin n'existait pas. Comment le savoir? En utilisant une nou-

L'émergence d'un nouveau domaine

Les ordinateurs moléculaires consomment extrêmement peu d'énergie : un joule suffit, en principe, pour effectuer 2×10^{19} opérations de liaison. C'est remarquable, car le deuxième principe de la thermodynamique fixe la limite à 34×10^{19} opérations irréversibles par joule à la température ambiante.

Les supercalculateurs existants en sont très loin : ils ne dépassent pas 10^9 opérations par joule.

Leonard ADLEMAN travaille au département d'informatique de l'Université de Californie du Sud.

James D. WATSON, *Biologie moléculaire du gène*, InterÉditions, 1978.

Leonard M. ADLEMAN, *Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems*, in *Science*, vol. 266, pp. 1021-1024, 11 novembre 1994.

David K. GIFFORD, *On the Path to Com-*

Leonard M. ADLEMAN, *Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems*, in *Science*, vol. 266, pp. 1021-1024, 11 novembre 1994.

David K. GIFFORD, *On the Path to Com-*

David K. GIFFORD, *On the Path to Com-*

Cependant, ce serait une erreur de considérer seulement l'intérêt pratique des ordinateurs moléculaires. Mon expérience est la première d'un nouveau domaine des sciences. Partout, cette nouvelle «science moléculaire» fait des émules. Par exemple, Gerald Joyce, qui travaille à l'Institut Scripps, en Californie, et Laura Landweber, de l'Université Princeton, élèvent des milliards de molécules d'ARN, génération après génération, jusqu'à ce que les «meilleures» aient les propriétés de catalyse désirées (voir *L'évolution moléculaire dirigée*, par Gerald Joyce, *Pour la Science*, février 1993). À l'Institut de technologie du Massachusetts, Julius Rebek crée des molécules qui peuvent se reproduire, ce qui nous donne des indications sur la façon dont la vie est apparue sur Terre (voir *Qu'est-ce que la vie?*, par Julius Rebek, *Pour la Science*, septembre 1994). À l'Institut de technologie de Californie, Erik Winfree synthétise des complexes moléculaires «intelligents», qui peuvent être «programmés» pour s'auto-assembler en des structures prédéterminées de complexité arbitraire (voir l'encadré de la page 61). Le potentiel de la biochimie est considérable.

D'autres informations sur les ordinateurs à ADN peuvent être trouvées sur notre site : <http://www.pourlascience.com/>

Le Gondwana

ROLAND TROMPETTE

Le supercontinent du Gondwana, père de la plupart des continents actuels, a vécu 400 millions d'années. Les géologues retracent l'histoire de son assemblage, de sa fragmentation et reconstituent les climats qui y régnaient.

Le Gondwana est une entité géologique réelle qui évoque, dans notre imaginaire, le mythe du continent disparu. Le Gondwana n'a pas été englouti par les flots, au contraire de la disparition légendaire de l'Atlantide, mais s'est déchiqueté pour donner la plupart des continents actuels. Les récents travaux des géologues qui peuvent remonter sûrement dans le passé permettent de reconstituer l'histoire du Gondwana, de sa création à sa disparition.

Le Gondwana réunissait, il y a 500 millions d'années, cinq continents : Afrique, Amérique du Sud, Antarctique, Australie et Inde, plus la péninsule Arabique, les grandes îles de Ceylan, Madagascar, de la Nouvelle-Zélande et de Tasmanie. La preuve de l'existence du Gondwana réside dans la présence d'une succession de roches particulières qui ont été trouvées sur toutes les terres qui constituaient le Gondwana et qui se sont déposées durant l'intervalle Carbonifère-Jurassique supérieur (entre 360 et 150 millions d'années).

Les géologues de la fin du XIX^e siècle ont été fascinés par cette association de roches. Celles-ci occupaient des milliers de kilomètres carrés sur chacun des cinq continents (en Europe, elles étaient cependant peu connues). Épaisses de plusieurs milliers de mètres et restées à peu près horizontales, elles formaient de spectaculaires falaises. La séquence débutait par de beaux faciès glaciaires et se poursuivait par des couches de charbon renfermant une abondante flore constituée notamment de belles fougères et, quelquefois, d'une jolie faune de petits reptiles, puis par des grès et des argilites rouges associés à des faciès évaporitiques (gypse et anhydrite, qui sont des sulfates de calcium, et halite, qui est un

chlorure de sodium). À la partie sommitale affleuraient d'épaisses et massives coulées de basaltes qui, en Afrique du Sud, couronnaient les fameux plateaux du Karoo.

Le concept du Gondwana

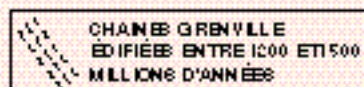
Ce terme a été utilisé pour la première fois autour de 1875, en Inde, pour désigner des roches essentiellement sédimentaires, sub-horizontales, affleurant dans la portion centrale de la péninsule et discordantes sur un socle très ancien. Ces roches, la plupart continentales, étaient datées par des faunes et des flores de l'intervalle Carbonifère-Jurassique supérieur. Aussi le terme de Gondwana dérive-t-il du nom d'une peuplade aborigène, les Gonds qui, du XII^e au XVIII^e siècle, dominèrent cette partie de l'Inde avant être refoulés dans les montagnes par l'arrivée des Maharrates : le terme de Gondwana est, à l'origine, une dénomination géographique indienne.

Les géologues travaillant dans l'hémisphère Sud constatèrent que cette séquence caractéristique n'était pas particulière à l'Inde. Elle se retrouvait en

Afrique du Sud, en Australie et en Amérique du Sud : plus tard, elle sera identifiée en Antarctique. Pour rendre compte de ces similitudes, le géologue autrichien Eduard Suess suggéra, dans un ouvrage publié autour de 1900 (titre français : *La face de la Terre*) que, durant l'intervalle Carbonifère-Jurassique, les cinq continents énumérés précédemment avaient été réunis en un méga-continent austral ou Gondwanaland. Aujourd'hui séparés par des océans, ces cinq continents représentaient, selon Suess, les vestiges de ce méga-continent dont la majeure partie se serait enfoncée dans les océans.

L'idée de Suess est reprise par le météorologiste allemand Alfred Wegener, inventeur de l'hypothèse de la mobilité des continents. Mais celui-ci ne peut admettre l'engloutissement même partiel de ce méga-continent. La croûte continentale, dont la composition moyenne est celle d'un granite, est légère, sa densité est voisine de 2,7 ; la croûte océanique de composition basaltique est plus lourde, sa densité est de l'ordre de 2,9. Aussi les continents légers ne peuvent-ils s'enfoncer dans la croûte océanique ; ils sont insubmersibles et

1. LE SUPERCONTINENT DE RODINIA (en haut) est l'ancêtre du Gondwana. Il s'assemble autour de 1 200-1 000 millions d'années, époque où les collisions entre les divers blocs engendrent les chaînes, dites Grenville, dont la continuité est utilisée pour reconstituer l'architecture du Rodinia. Le premier épisode de fracturation individualise le Rodinia occidental de petite taille. L'épisode principal, autour de 800 millions d'années, sépare le vaste Rodinia oriental du Rodinia central. Les Rodinia occidental et central, après dérive et rotation dans le sens horaire, entrent en collision et formeront l'essentiel du Gondwana. Une partie du Rodinia oriental, après une longue dérive et une rotation anti-horaire, constituera le flanc Ouest du Gondwana. **LE MÉGA-CONTINENT DU GONDWANA (en bas)** s'est assemblé autour de 600 millions d'années. Il est reconstitué en dessinant l'Afrique dans sa position actuelle. En réalité, l'Afrique est, à cette époque, renversée, avec l'Afrique du Nord à proximité du pôle Sud. Deux méga-chaînes de montagnes panafricaines représentent les cicatrices des deux collisions principales assurant l'aggrégation du Gondwana. La méga-chaîne orientale, joignant l'Arabie saoudite au Mozambique, est la trace de la collision, autour de 700-600 millions d'années, entre les Gondwana central et oriental. La méga-chaîne occidentale, reliant l'Afrique de l'Ouest à la côte atlantique de l'Afrique du Sud, marque la collision autour de 600 millions d'années des Gondwana central et occidental. Immédiatement après l'assemblage du Gondwana, le Laurentia se détache de l'Amérique du Sud. La fragmentation du Gondwana se produit, à partir de 170 millions d'années, suite à l'ouverture des océans atlantique, indien et péri-antarctique.



**BLOCS QUI CONTRIBUERONT
À LA FORMATION
DUMÉGA-CONTINENT
DE LAURASIA**

RODINIA CENTRAL :
FUTUR GONDWANA ORIENTAL

FRAGMENTAT DII
ETRE 900 ET 800 MILL DII 6 DII 11 ÉB

APPROVED

APPROVED USE
+ ORDER & TERMS

SUBJECT DUE

AMÉRIQUE DU NORD

FRAGMENTATION TARDIVE
AUTOUR DE 550 MILL D'AN D'ÂGE
APRÈS L'ÂGE D'ENCLAVEMENT DU GONDOLAR

AMERQ UE DU 6 UC

AFRIQUE
DE L'OUEST

RODINA OCCIDENTAL :
FUTUR GONDWANA CENTRAL

RODINIA ORIENTAL :
FUTUR GONDWANA OCCIDENTAL

ROTATION HORARE DE RODILHOCC DENTAL

ROTATION ANTIHORAIRE
DE RODÉA ORIENTALCICATRIZACIÓN DE LA COLONIA ENTRE GONDIMAR
CENTRO Y OCCIDENTECENTRE DE RECOLLECTION ENTRE L'AFRIQUE
CENTRALE ET ORIENTALE

CHARR 66 PRAFRICARR 66 JELIN 66
(500 MP) DUGOINDMARR OCCIDENTAL

CHARR 66 PRAFRICARR 66 COINTEMARR 66
DEL'76-6 ENBLAGD UGOINDMARR (500 MP)

CHARR 66 DUPREARR 66

AFRIQUE

GONDWANA
CENTRAL

0 LEADING ZEROS

APPLIED BUSINESS
COMPUTER DUNLOP B&T B&

NORDEST
DRAGON

ARRIVEE AMPUTEE
DE 6 A PORTION QUEB
AUGMENTEE DU
NOF-6T 8R6 L

GONDAWANA
OCCIDENTAL

INDONESIA
ORIENTAL

ANTARCTIQUE

INDEX

PR06 DE6 G000

AUSTRALIE

SÉPARATION TARDIVE DE LAURENTIA

OUVERT UREOC BR ATLANTIQUE 6 UD ET CENTRAL

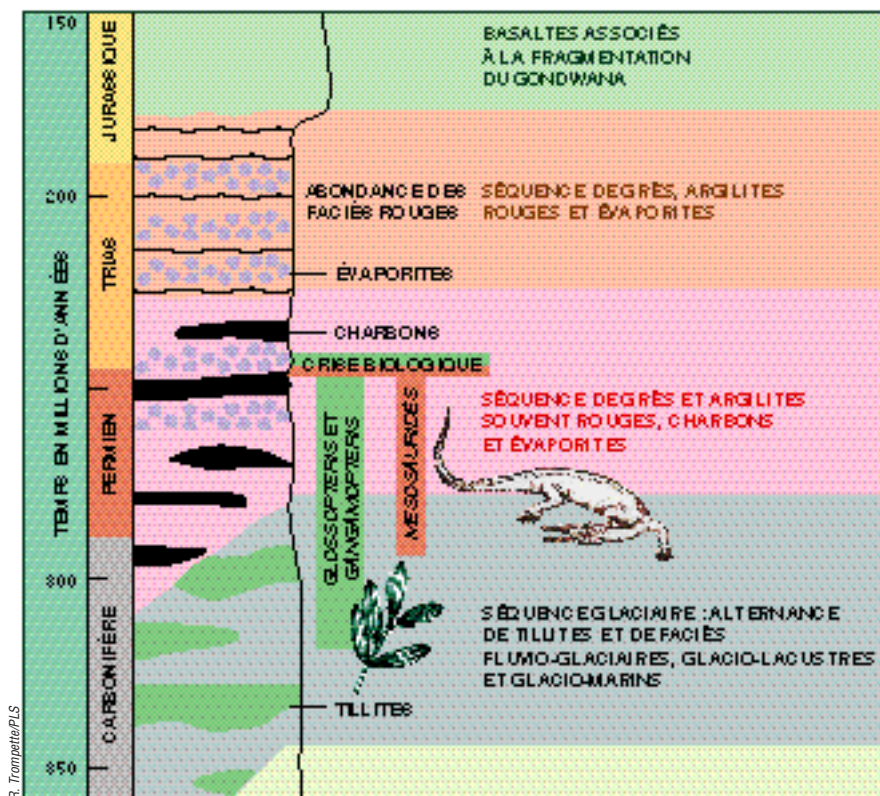
OUVERTURE OCEAN PERLA PERFECT QUE

R. Trompette/PLS



R. Trompette

2. FALAISE DU CAP DE BONNE-ESPÉRANCE. À la partie inférieure, des roches métamorphiques redressées et des granites appartiennent à la chaîne de Malmesbury une des chaînes panafricaines plissée autour de 600 millions d'années lors de la collision entre les deux blocs de Rodinia Ouest et Rodinia Est. À la partie supérieure, les couvertures du groupe de la Montagne de la Table scellent l'assemblage du Gondwana. Ces grès se sont déposés autour de 500 millions d'années. Le contact entre ces deux unités est plan et horizontal : ainsi, la chaîne de Malmesbury était complètement rabotée au moment du dépôt des grès. La route suit la limite entre les deux unités lithologiques. Les séquences permo-carbonifères (tillite de Dwyka, charbons) ne sont pas visibles.



R. Trompette/PLS

3. LA SÉQUENCE TYPE DU GONDWANA EST LA SIGNATURE DE CE CONTINENT ANCIEN. Couvrant la période Carbonifère-Jurassique (350-150 millions d'années), elle est essentiellement continentale. La formation inférieure glaciaire débute au Carbonifère inférieur et se prolonge jusqu'au Permien, en Australie. La majorité des charbons se déposent à hautes latitudes sous des climats humides et froids ; ils sont contemporains de grès et d'argilites souvent rouges et d'évaporites formées à plus basses latitudes, en climat chaud et aride. La flore à *Glossopteris* et *Gangamopteris* caractérise le Carbonifère supérieur et le Permien, alors que les reptiles Mésosauridés se rencontrent dans le Permien du Brésil et d'Afrique du Sud. Les basaltes, couronnant la séquence, marquent le début de la fragmentation du Gondwana.

forment des entités géologiques permanentes, archives de l'histoire de notre planète. Wegener propose l'existence, entre 300 et 200 millions d'années, d'une seule masse continentale, la Pangée issue de la jonction du Gondwana, le méga-continent austral, et du Laurasia, le méga-continent septentrional. Les continents actuels seraient issus de sa fragmentation. Contrairement aux vues fixistes de Suess, ils occuperaient leurs positions actuelles après une longue dérive. On sait que, devant l'incapacité de Wegener à imaginer des forces susceptibles de déplacer de telles masses continentales, sa théorie fut rejetée par la plupart des géologues et par la totalité des géophysiciens. Ce que l'on sait moins, c'est que des géologues de l'hémisphère Sud, et notamment le Sud-Africain Alexander Du Toit, très fin connaisseur de la géologie de l'Afrique du Sud et de l'Amérique du Sud, continueront à croire en la réalité d'un supercontinent du Gondwana.

L'hypothèse du Gondwana rendait compte des similarités des séquences Carbonifère-Jurassique observées sur les divers continents. Et notamment celles des flores de fougères et des faunes de Mésosauridés, petits reptiles qui sont localisés, soit au-dessus des carbonés comme dans le bassin du Parana au Brésil, soit en dessous comme dans le bassin sud-africain du Karro.

Les adversaires de cette hypothèse devaient montrer beaucoup d'imagination pour expliquer ces ressemblances : transport de graines par le vent ou des organismes volants ; animaux migrant le long d'éphémères et interminables (plusieurs milliers de kilomètres) isthmes transocéaniques ou bien traversant les mers en sautant d'île en île ! À moins que ne soient invoquées des évolutions identiques s'accomplissant au même moment en des points très éloignés.

Le Gondwana reconstitué

Comment replace-t-on les continents actuels au sein du Gondwana ? Tout d'abord en s'aidant du tracé des côtes ou plutôt de la base de la pente continentale qui, *grosso modo*, correspond à la transition entre la croûte continentale et la croûte océanique. Souvenons-nous que c'est d'ailleurs l'emboîtement quasi parfait des côtes sud-américaine et africaine qui a mis Wegener sur la piste de l'hypothèse de la dérive des continents. Ensuite, en alignant les principales

chaînes panafricaines fragmentées lors de la dislocation du Gondwana, par exemple lorsque l'Atlantique Sud s'est ouvert. Ainsi la chaîne brésilienne du Sergipe est-elle prolongée par la chaîne africaine des Oubanguides quand on emboîte les côtes africaine et sud-américaine ; ces deux chaînes représentent les deux morceaux d'une méga-chaîne, qui s'est formée lors des collisions responsables de l'édification du Gondwana à partir de la fragmentation du supercontinent Rodinia plus ancien (voir la figure 1).

Enfin les études paléomagnétiques renseignent sur les positions géographiques successives occupées par un continent. L'inclinaison du champ magnétique terrestre varie avec la latitude : horizontale à l'équateur, elle est verticale aux pôles. Il est possible de mesurer ces paléo-inclinaisons imprimées dans les roches sédimentaires et magmatiques et d'en déduire à quelle latitude ces roches se sont mises en place.

L'agrégation du Gondwana

Une fraction de la communauté géologique a longtemps cru que le Gondwana s'était formé au Précambrien, autour de 2 000 Ma. C'est encore la position défendue dans l'édition 1996 du *The New Penguin Dictionary of Geology*. Pourtant, dès 1981, le paléomagnéticien américain Michael McWilliams avait suggéré que le Gondwana s'était constitué plus tardivement, autour de 600 millions d'années, lors de l'orogénèse panafricaine. Il résultait, selon lui, de la collision de deux blocs, l'un oriental et l'autre occidental.

La cicatrice de cette collision était marquée par une méga-chaîne de montagnes qui traverse l'Arabie saoudite, l'Éthiopie, le Kenya, la Tanzanie, le Mozambique et écorne l'Est de l'Antarctique. Toutefois, une seconde méga-chaîne de montagnes panafricaine, parallèle à la précédente et traversant l'Afrique de l'Ouest, le Brésil et se prolongeant jusqu'en Afrique du Sud, indique que la construction du Gondwana a été plus complexe que ne le suggérerait McWilliams. Le Gondwana résulterait d'une double collision entre trois blocs principaux : le Gondwana oriental, tel qu'il a été défini par McWilliams, le Gondwana central, composé de l'Afrique amputée de sa

portion Ouest, mais augmentée du Nord Est du Brésil, et le Gondwana occidental qui englobe le reste de l'Amérique du Sud et l'Afrique de l'Ouest. Au sein des blocs, la plupart des chaînes panafricaines intérieures résultent de collisions secondaires.

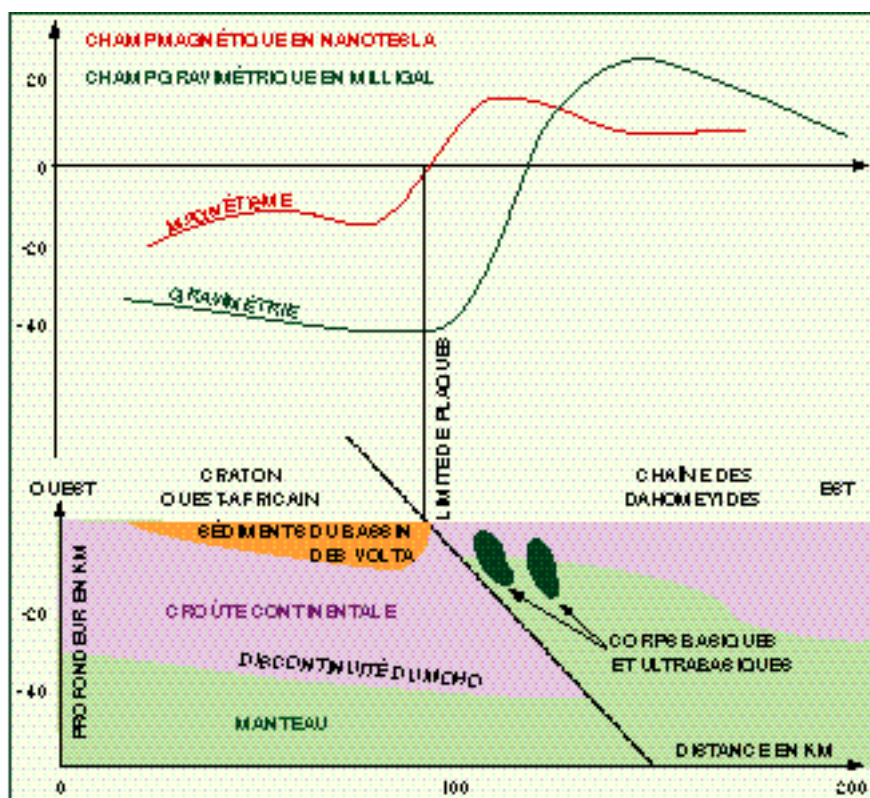
Les chaînes panafricaines, étroites et souvent allongées sur des centaines, voire sur un millier de kilomètres, sont d'excellents marqueurs du collage des blocs constitutifs du Gondwana. De la même façon, elles permettent d'apprécier l'ampleur des déplacements qui accompagnent sa fragmentation. La reconstitution du tracé des chaînes panafricaines est donc fondamentale.

Bien sûr, ce ne sont pas les reliefs, érodés depuis bien longtemps, qui permettent d'identifier ces chaînes, mais, par exemple, les vestiges de paléocéans panafricains engloutis (on dit subductés) dans le manteau, lors du rapprochement des blocs. La géophysique permet également de localiser ces zones de collision. Les deux blocs qui s'affrontent ont toutes les chances

d'avoir une structure profonde différente qui apparaîtra dans les cartes ou/et dans les profils sismiques, gravimétriques ou magnétiques. C'est ainsi que Yvonne Crenn géophysicienne à l'ORSTOM (Office français de Coopération et de Recherche Scientifique Outre-mer), a montré dès 1957, avant l'avènement de la tectonique des plaques, que la chaîne des Dahomeyides du Togo et du Bénin représentait une zone d'affrontement entre deux blocs – on dirait aujourd'hui deux plaques lithosphériques – dont les structures internes, révélées par les études gravimétrique et magnétique, étaient différentes.

De Rodinia au Gondwana

Les ophiolites, ou restes de croûte océanique panafricaine, les plus anciennes sont radiométriquement datées d'environ 900 millions d'années, indiquant que des océans panafricains existaient à ce moment-là. Les blocs continentaux qui constituent le Gondwana provien-



4. SIGNATURES GRAVIMÉTRIQUE ET MAGNÉTIQUE de la suture entre les plaques lithosphériques du craton ouest-africain et de la chaîne panafricaine des Dahomeyides. Dans l'interprétation du profil gravimétrique, les densités choisies, respectivement pour le manteau, la croûte continentale et les sédiments, sont de 3,1, 2,7 et 2,7. L'anomalie positive de la plaque orientale traduit un excès de masse imputable à la remontée du manteau dense, l'anomalie négative de la plaque occidentale signale un déficit de masse induit par le bassin sédimentaire des Voltas et la croûte continentale épaisse (et peu dense). L'anomalie magnétique positive est associée aux intrusions de roches basiques et ultrabasiques, riches en magnétite, mises en place au dos de la suture.

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.

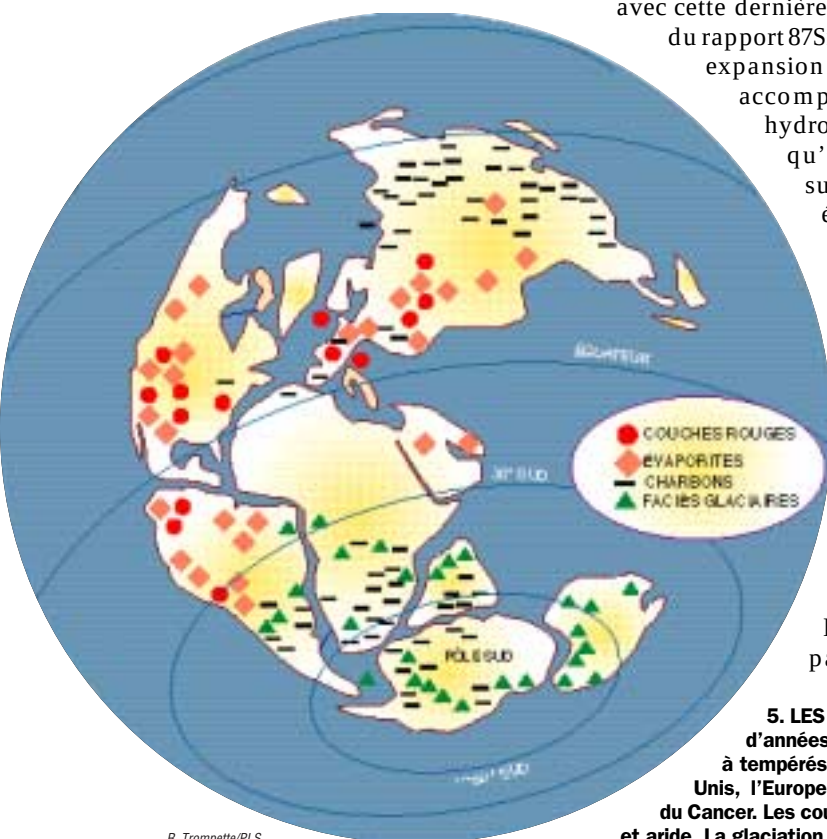
L'histoire de la fragmentation du Rodinia à partir de 1 000 millions d'années et de l'agrégation du Gondwana autour de 600 millions d'années est lisible sur la courbe d'évolution du rapport $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ des carbonates marins (Sr désigne le Strontium). Quelle est la signification géologique 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



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.

R. Trompette/PLS

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 intertropicale. 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, Cyclothem, 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.
