

Chaire européenne

M. Pieter WESTBROEK, professeur

Introduction à la Géophysologie

Ce cours a concerné le rôle du biote dans le dynamisme et le développement de la Terre. La notion de la vie comme une force géologique très importante est généralement reconnue. Les systèmes vivants influencent par de multiples manières les cycles des roches, de l'eau et des gaz atmosphériques et c'est par l'accumulation de ces effets pendant les 3,7 milliards d'années de l'existence de la vie sur Terre que le milieu extérieur de la planète s'est écarté très loin de l'équilibre thermodynamique.

Le but principal de la géophysologie est d'introduire une approche systémique à la dialectique entre les forces physico-chimiques et biologiques en géologie. On peut imaginer que le comportement de notre planète est largement déterminé par un petit nombre de puissants attracteurs émergents de ces multiples interactions. Cette impression est inspirée en particulier par le fait que le développement de la vie n'a jamais été interrompu depuis son origine. Il en suit que les conditions sur Terre ont été relativement stables, en dépit d'un accroissement de la radiation solaire d'environ 25 %.

La géophysologie est profondément reliée à l'hypothèse Gaia qui attribue un rôle prépondérant aux forces biologiques pour la stabilisation du milieu terrestre. Pour l'usage scientifique, le terme Gaia est cependant défavorisé par des connotations (semi-)religieuses résultant, en particulier, de l'intervention du mouvement New Age. Par contre, le concept de la Géophysologie permet de prendre distance de pratiques non-scientifiques ; en plus, son contenu est plus compréhensif que celui de Gaia puisqu'il n'y a pas référence a priori à une détermination biologique de la stabilisation de la Terre.

Participation du vivant dans le dynamisme géologique

Récemment, la stimulation par des systèmes biologiques terrestres, et surtout par les plantes vasculaires, de l'altération des roches a reçu beaucoup d'attention,

en particulier parce que cette activité représente un puits important du CO₂ atmosphérique. Cette intervention biologique est d'importance encore plus générale : c'est à partir de l'altération des roches que les organismes libèrent un grand nombre de nutriments essentiels pour la biosphère entière, y compris le biote océanique. Les nutriments extraits des roches, d'abord recyclés sur place par l'intermédiaire de couches d'altération, sont transportés ensuite à des positions en aval, où ils fertilisent des sols appauvris, et finalement arrivent dans les océans. Après d'innombrables cycles d'utilisation, mobilisation et sédimentation, ils sont éliminés de la circulation biologique par incorporation dans les sédiments du fond des océans. Le cycle des roches est clos par la transformation endogénique et le soulèvement de ces sédiments, leur re-incorporation dans les continents et, à la surface, leur soumission à une nouvelle phase d'altération. On peut conclure que la vie dépend de la tectonique des plaques pour l'apport de nouveaux nutriments.

L'accumulation de l'oxygène dans l'atmosphère terrestre constitue un autre exemple de cette cohérence entre l'activité biologique et les forces physico-chimiques et surtout endogéniques, en géologie. L'oxygène et la matière organique sont produits par la photosynthèse à partir de l'acide carbonique et de l'eau. Cette réaction s'oppose à la respiration des organismes hétérotrophiques, qui donc inhibe l'accumulation de l'oxygène dans l'atmosphère. Pourtant, ce gaz constitue 21 % de l'atmosphère actuelle, et son accumulation, au cours de l'histoire géologique, est due à l'incorporation dans les bassins sédimentaires d'une infime fraction de la matière organique formée par la photosynthèse. Le temps de résidence de cette matière dans la croûte terrestre est très long, de l'ordre de 250 millions d'années et sa masse sédimentaire est immense — plus de 10 000 fois la biomasse actuelle. La masse d'oxygène atmosphérique est reliée à cette masse de matière organique dans la croûte terrestre et il suit de cette cohérence entre le cycle biologique et la formation de bassins sédimentaires que la Terre se comporte comme une « batterie » chimique, avec un pôle réduit dans l'intérieur et un pôle oxydé à l'extérieur.

Problème de modélisation et simplicité émergente

Le but de la géophysologie est de modéliser le comportement de la partie externe de la Terre et en particulier les interactions biotiques. Les exigences de la modélisation semblent difficilement compatibles avec la réalité du vivant. Les bons modèles sont simples et opèrent sur des échelles de temps et d'espace limitées, tandis que les systèmes biologiques sont extrêmement complexes et opèrent à la fois sur une grande variété d'échelles.

Il apparaît que la modélisation est pourtant possible, pour trois raisons : (1) on peut envisager la construction d'emboîtements de modules qui chacun représente les interactions géosphériques-biosphériques à un niveau donné d'organisation ; (2) au lieu d'étudier toute la diversité biologique la modélisation peut se limiter à un nombre très limité de systèmes de référence représentatifs. La diversité

biologique cache une uniformité étonnante d'organisation ; et (3) à certains niveaux d'organisation une grande simplicité émerge de la complexité du vivant. Le meilleur exemple d'un tel niveau est représenté par le métabolisme de l'organisme individuel : l'opération des grands réseaux enzymatiques et régulateurs de la biochimie aboutit à un comportement qui peut être résumé par un nombre très limité de variables et de paramètres et est parfaitement modélisable.

On ne peut que spéculer sur l'émergence d'une telle simplicité à d'autres niveaux d'organisation, ceux de l'écosystème et de la Terre entière. Le réalisme de la démarche géophysio-logique dépend surtout d'une simplicité au niveau mondial. Il est probable, d'ailleurs, que la simplicité à ce dernier niveau ne puisse émerger qu'à l'échelle des temps géologiques, ce qui pourrait rendre futile toute tentative, comme le programme Global Change, de comprendre le système mondial à l'échelle historique.

Le phénomène de la « cristallisation » de simplicité et d'ordre d'une complexité apparemment inextricable à certains niveaux d'organisation est d'ailleurs le sujet d'études purement théoriques comme celles de Stuart Kauffman (Santa Fé). Ces travaux suggèrent que la simplicité dépend de l'émergence d'attracteurs très puissants à des degrés donnés de complexité et que le potentiel créatif du vivant dépend de sa position à la bordure entre l'ordre et le chaos.

Emiliana huxleyi, système de référence

Il s'avère que le calcaire est un excellent point de repère pour une étude géophysio-logique : c'est un produit biologique qui joue un rôle essentiel dans le cycle mondial du carbone et par voie de conséquence dans le contrôle du climat et dont la dynamique de formation et de dissolution peut être parfaitement étudiée à tous les niveaux d'organisation. Cependant, comme la dynamique du cycle marin de calcaire dépend du comportement complexe des organismes qui y participent l'étude doit se focaliser sur une seule espèce représentative et ensuite généraliser la connaissance acquise pour comprendre le phénomène dans sa totalité.

L'algue unicellulaire *Emiliana huxleyi* est notre système de référence préféré. La cellule est couverte de très élégantes écailles de calcaire — les coccolithes. C'est un des organismes les plus répandus et on le trouve dans tous les océans. Ses floraisons gigantesques, visibles depuis les satellites, se développent en quelques semaines à partir d'un mélange de centaines d'espèces d'organismes planctoniques. *Emiliana* est l'un des principaux producteurs de calcaire au monde. La formation du calcaire dégage de l'acide carbonique dans l'atmosphère, ce qui contribue à l'effet de serre et au réchauffement de notre planète. *Emiliana* produit également des substances organiques qui absorbent du CO₂, ce qui diminue l'effet de serre et tend à contrebalancer l'effet de la formation du calcaire. Finalement, les floraisons d'*Emiliana* produisent du sulfure de diméthyl (DMS),

un gaz qui, en s'oxydant dans l'atmosphère, forme d'excellents noyaux de condensation pour l'eau. Il en résulte des nuages blancs qui réfléchissent les radiations solaires avec une grande efficacité et refroidissent la terre.

Emiliana est le système idéal pour une étude géophysique approfondie. Nous avons entamé des projets intégrant l'expérience et la modélisation aux niveaux génétique moléculaire, organismal, écologique et mondial. Voici, en pratique, la modélisation emboîtée aux points de cristallisation du simple à partir de la complexité sur un système représentatif, le tout conforme aux considérations théoriques discutées auparavant.

Uniformité du vivant aux divers niveaux d'organisation

La formulation de modèles généralisés de l'interaction biologique et géologique ayant la priorité dans le développement de la géophysique, une partie considérable du cours a été consacrée aux grands principes d'organisation sur les principaux niveaux : celui de la biologie moléculaire, de l'organisme, de l'écologie et de la biosphère. Des projets comme celui d'*Emiliana* s'inscrivent dans une telle analyse fondamentale.

Le niveau moléculaire. — Aux principes uniformes d'organisation bien établis, tels que l'architecture et la composition des acides nucléiques, protéines, polysaccharides et lipides, ainsi que le code génétique et le métabolisme intermédiaire s'ajoutent en ce moment des concepts unifiants nouveaux. Ces concepts sont reliés à l'organisation des gènes et des protéines selon un nombre limité de « domaines » fonctionnels, leur groupement par « familles », « superfamilles » et « usines » et leur organisation en cascades génétiques régulatrices. De tels principes seront des éléments essentiels pour la modélisation de la cellule au niveau moléculaire.

Le niveau organismal. — Le groupement hiérarchique des unités fonctionnelles moléculaires en complexes de plus en plus englobants aboutit à l'organisation cellulaire et organismale. C'est d'abord à ce niveau-là que la fonctionnalité des parties est déterminée et que la sélection naturelle intervient. Après un long épisode de focalisation sur le niveau moléculaire, la biologie vit maintenant une résurgence des disciplines organisationnelles tels que la morphologie et la physiologie. La mise en évidence, par modélisation, des attracteurs de forme et de fonction à partir du cheminement moléculaire a été discutée en prenant les travaux de Goodwin, Kerzberg et Kooijman comme exemples. Le dernier est responsable pour la modélisation, d'une simplicité et fidélité étonnantes, du métabolisme organismal, mentionné plus haut.

Le niveau écologique. — Les limites de l'écosystème étant plus floues que celles de l'individu ou de la molécule, on peut attendre un accroissement des difficultés de modélisation à ce niveau. L'étude du fonctionnement d'écosystèmes bactériens — les « tapis microbiens » — révèle néanmoins que l'organisation à

ce niveau obéit à des règles d'uniformité et de simplicité. Un centimètre cubique d'un tapis contient à peu près tout le métabolisme présent dans la nature. Des équipes bactériennes parfaitement coordonnées surgissent de la population dormante et font tout le travail nécessaire pour permettre le fonctionnement du système. Elles sont suivies par d'autres recrutements aussitôt que les conditions extérieures sont changées. Les différents processus métaboliques (la photosynthèse, la respiration par réduction de l'oxygène, de l'azote, du sulfate, la méthanogenèse) se succèdent selon des règles facilement modélisables. Tous les écosystèmes, y compris la forêt tropicale et le récif corallien, se comportent de façon très similaire à l'exception de certaines de leurs fonctions qui sont hypertrophiées. La formulation d'un modèle pour l'écosystème théorique universel paraît en principe possible.

Le niveau mondial. — A ce niveau, l'interaction géosphère-biosphère est très peu connue. Néanmoins il y a eu quelques essais de modélisation, une purement théorique et les autres plutôt géochimiques. L'exemple classique d'une modélisation théorique est celle de « Daisyworld » par J.E. Lovelock. Une planète grise est irradiée par un soleil qui augmente sa dose de radiation au cours du temps. Sur la surface de « Daisyworld » se trouvent des graines de marguerites dont la rapidité de croissance varie avec la température selon une courbe en forme de cloche : les marguerites ne poussent qu'entre 5 et 40 °C et l'optimum de croissance est à 20 °C. Les marguerites sont identiques, à l'exception du fait qu'elles varient en couleur du gris très foncé au beige. Il s'avère que la température à la surface de la planète est stabilisée par les marguerites sur un trajet délimité de l'augmentation de la radiation solaire. Voilà, selon Lovelock, l'effet Gaia.

Mais Daisyworld n'est pas la terre, et son logiciel, si élégant qu'il soit, n'illustre qu'un principe possible d'organisation planétaire. La rétroaction négative climatique qui suit l'altération des roches et, en particulier, de son amplification par la végétation, présente un exemple dans le monde réel de la mise en place d'un mécanisme gaien. Plus le climat se réchauffe, plus la végétation devient active, donc plus de CO₂ est extrait de l'atmosphère et plus la température a tendance à baisser. R. Berner estime que, en grande partie, la baisse du taux de CO₂ atmosphérique entre le Silurien et le Permien, de l'ordre de 4 000 à 250 ppm, est causée par la conquête des continents par les plantes vasculaires et l'énorme augmentation de l'intensité de l'altération qui en était le résultat. Cela expliquerait une des plus grande glaciations connues dans l'histoire de la terre, celle du Permo-Carbonifère.

Les nuages blancs issus des floraisons d'algues comme *Emiliania* est un autre exemple. Lovelock et Kump ont suggéré que leur effet rafraîchissant augmente à la transition d'une période glaciaire à interglaciaire, mais que toute continuation du réchauffement — causé par exemple par un accroissement du CO₂ — peut renverser cette rétroaction négative en une positive : la distribution géographique des nuages diminue à ces températures de plus en plus élevées, réduisant la fraction réfléchie de la radiation solaire. Même pour l'auteur de la théorie Gaia, l'efficacité des rétroactions négatives est limitée.

L'évolution explosive de la calcification organisée des métazoaires au début du Cambrien

La période Cambrienne qui commence il y a environ 544 millions d'années est marquée par une diversification majeure d'animaux portant des squelettes. Cette prolifération squelettique qui d'ailleurs ne coïncide pas avec la première apparition d'animaux dans les archives géologiques est un événement géophysologique de grande importance, parce qu'elle ouvrait des possibilités fonctionnelles et écologiques nouvelles et plaçait pour la première fois les organismes eucaryotiques à une position principale dans les cycles mondiaux du carbone et de la silice. Pour expliquer le développement indépendant et simultané de la calcification dans des taxa différents d'animaux, la possibilité pendant le Précambrien que les composantes différentes de l'appareil calcifiant aient leur origine dans des fonctions non-relées à la calcification, que celles-ci aient en outre été orchestrées pour la formation de squelettes pendant l'explosion Cambrienne, a été étudiée. Une telle fonction, l'anti-calcification, c'est-à-dire l'inhibition dans la mer sursaturée du Précambrien de précipitations spontanées et nocives sur les tissus mous par du mucus sécrété, a été discutée en détail. Il a été démontré que ce mucus était utilisé dans la calcification pour contrôler la cristallisation.

L'humanité — un niveau d'organisation in statu nascendi ?

Cette dernière partie du cours a présenté quelques réflexions sur la position de l'humanité dans la nature et dans le système mondial. La pensée du philosophe et astronome néerlandais Anton Pannekoek sur l'anthropogénèse s'avérait comme particulièrement intéressant.

L'homme se distingue des espèces animales par sa production délibérée d'outils, sa pensée abstraite et sa langue. L'ensemble de ces propriétés (dont chacune peut être présente, sous forme primitive, chez les animaux) a doué l'homme d'une capacité unique de transformer son environnement et de devenir une force géologique de premier ordre. Il donne également au développement humain son caractère historique.

En principe, l'outil s'ajoute aux organes spécifiques chez les animaux — un homme est un animal avec des organes échangeables et peut, par la suite, s'adapter à un spectre toujours plus grand d'environnements et en créer de nouveaux. L'emploi systématique d'outils a des conséquences profondes pour la pensée. Le circuit immédiat qui conduit du désir à la satisfaction chez l'animal est interrompu, celui de la pensée à l'outil (qui doit être cherché, fabriqué, etc.) s'y interpose. Plus que chez les animaux, la pensée humaine suit des détours et c'est de l'ensemble de ces détours que la pensée abstraite a émergé. La langue, enfin, est porteuse de la pensée. Elle individualise les concepts en leur donnant des étiquettes.

Voici, résumées en quelques mots, les idées de Pannekoek sur l'interdépendance des attributs essentiels de l'humanité et de l'émergence d'un nouveau type d'organisation : non biologique, d'une rapidité évolutive sans précédent, et capable, en principe, de transformer en outils le milieu extérieur de la terre. Ces idées font supposer que notre planète est en phase de transition rapide et que le régime géophysio-logique, encore en vigueur il y a quelques millions d'années, est en crise. La question se pose de savoir si le niveau mondial d'organisation, point de repère de la modélisation de la terre, est encore en vigueur et si, par la suite, une modélisation mondiale sera possible. Il apparaît, enfin, que la focalisation sur une nouvelle organisation stable de notre planète n'est pas encore réalisée.

P. W.

SÉMINAIRES

11 octobre : A. Adoutte (Université Paris-Sud) : Origine et diversification du vivant.

18 octobre : F. Gros (Collège de France) : L'organisation hiérarchique du génome.

25 octobre : L. Margulis (Université du Massachusetts) : Evolution by symbiosis

30 octobre : B. Goodwin (Open University, G.-B.) : Résurgence de l'école morphologique française.

8 novembre : A. Labeyrie (Collège de France) : Les écosystèmes comme des réseaux neuronaux.

22 novembre : A. Knoll (Harvard Univ.) : Cambrian event — the geological evidence.

29 novembre : J. Trichet (Université Orléans) : Calcification dans le milieu microbien.

J.-P. Cuif (Université Paris-Sud Orsay) : Microstructure squelettique chez les invertébrés.

AUTRES ACTIVITÉS

(1) Organisation, avec A. Adoutte et A. Knoll, d'un symposium à la fondation des Treilles (Provence) sur « Biomineralization : Its Role in the Cambrian Diversification of Life » (5 à 11 mai). Le symposium était précédé d'une excursion géologique dans la Montagne Noire, dirigé par Prof. R. Bourrouilh (Université de Bordeaux).

(2) Organisation de rencontres avec les équipes de A. de Ricqlès (Collège de France) et E. Lopez (MNHN).

(3) Rédaction de divers articles et de quelques chapitres pour un livre sur l'unité de vivant.

(4) Ré-édition du livre : « Life as a geological force » pour la version française (Éditions du Seuil).

(5) Conférences au CNRS (Gif-sur-Yvette), Université de Bordeaux, Université de Brest, Cerège (Aix-en-Provence), Université de Montpellier, etc.

(6) Collaborations avec E. Lopez (MNHN), Y. Le Gal (Station Biologie Marine de Concarneau), J.-P. Cuif (Université Paris-Sud Orsay) ... et établissement de contacts de travail avec M. Aubert (Cagnes-sur-Mer), J.-J. Jaeger (Université de Montpellier), J.-M. Lévy-Leblond (Seuil), D. Allemant (Centre Scientifique de Monaco)

(7) Pour étudier la possibilité de l'établissement éventuelle d'un Centre de Recherches en Géophysologie des discussions ont eu lieu avec de nombreuses personnalités. Jusqu'ici le résultat le plus important de ces démarches est la décision préliminaire de tenir un cours d'été d'environ 2 semaines en juin 1998 au Cerège (Aix-en-Provence) sur le cycle géochimique du carbone. Ce cours sera focalisé sur 3 thèmes : l'altération des roches, la sédimentation de carbonates et la sédimentation de matière organique. Il sera accessible à environ 20 thésards et post-doctorants et comprendra une semaine de cours formels et une semaine d'excursion. Parmi les enseignants figureront les professeurs Daniel Nahon (Cerège), Robert A. Berner (Yale), Don Canfield (Odense), Westbroek (Leiden), Kooijman (Amsterdam).... Ce cours sera le point de démarrage pour le Centre.