

Introduction

Christophe THOMAZO¹ et Karim BENZERARA²

¹ *Biogéosciences, Université Bourgogne Europe, Dijon, France*

² *IMPMC, CNRS, Sorbonne Université, MNHN, Paris, France*

Le découpage de la Terre en compartiments qui ont une dynamique propre mais qui interagissent entre eux est un principe central dans l'approche du biogéochimiste qui vise à comprendre comment la Terre fonctionne, comment elle a évolué au cours des temps géologiques et comment elle évoluera dans le futur. Ces compartiments sont dénommés « sphères » et peuvent être délimités différemment et à différentes échelles selon les questions que l'on se pose (figure I.1). Ainsi, on lit régulièrement les termes atmosphère, hydrosphère, lithosphère ou biosphère comme constituants du Système Terre¹. Mais à des échelles plus fines, on peut aussi penser à la troposphère et la stratosphère lorsque l'on s'intéresse plus précisément au fonctionnement de l'atmosphère, ou l'on peut penser à la lithosphère et l'asthénosphère lorsque l'on étudie la tectonique des plaques. À d'autres échelles encore, on peut distinguer une pédosphère lorsque l'on s'intéresse aux sols ; enfin, certaines personnes parlent d'anthrosphère pour désigner le compartiment influencé par les activités anthropiques. Dans ce livre, nous entendons la géosphère comme l'ensemble des compartiments solides, gazeux et liquides composant la Terre. Ainsi, la géosphère regroupe les lithosphères océaniques et continentales, les parties plus internes encore, c'est-à-dire le manteau et le noyau terrestre ainsi que les parties les plus superficielles constituant l'hydrosphère et l'atmosphère. Le terme biosphère, concept introduit pour la première fois dans les sciences

1. Terme désignant l'ensemble des sphères géologiques et biologiques formalisé lors d'un congrès organisé par la Nasa dans les années 1980 comme un champ disciplinaire scientifique à part entière visant à comprendre et quantifier mécaniquement les interactions entre sphères et leurs impacts.

naturelles en 1875 par Eduard Süß, professeur de paléontologie à l'université de Vienne, désigne l'ensemble des êtres vivants.

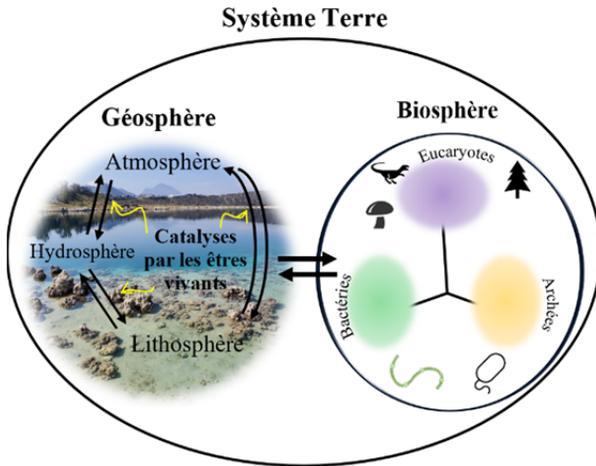


Figure I.1. Une représentation d'un cycle géochimique (par exemple du carbone mais cela pourrait être pour de nombreux autres éléments chimiques) impliquant différents réservoirs et notamment la géosphère et la biosphère, le tout composant le Système Terre.

COMMENTAIRE SUR LA FIGURE I.1.– La géosphère est elle-même composée de différents réservoirs comme l'atmosphère, l'hydrosphère ou la lithosphère. La biosphère est un réservoir en soi mais les êtres vivants catalysent aussi des transferts entre réservoirs.

L'existence d'interactions entre ces deux compartiments est soupçonnée dès le XVI^e siècle, quand l'origine du pétrole, utilisé depuis plus de trois mille ans, commence à être débattue. C'est Andreas Libavius, chimiste et médecin allemand, qui fut l'un des premiers, en 1597, à suggérer une origine organique du pétrole qui correspondrait à la résine d'anciens arbres. En 1757, Mikhaïl Lomonosov précise cette théorie et propose que le pétrole liquide et les bitumes sont issus de la transformation en profondeur de restes d'organismes végétaux, sous l'effet de l'augmentation de la température et de la pression. Les observations conjointes par des approches géologiques (le pétrole est au centre des bassins sédimentaires) et géochimiques (la composition isotopique du pétrole est la même que celle de la biosphère de surface et tous les pétroles contiennent des molécules très spécifiques appelées porphyrines qui dérivent de la chlorophylle) permettront quatre siècles plus tard de définitivement confirmer les hypothèses de Libavius et Lomonosov sur l'origine biologique de cette roche. Mais c'est certainement

Vladimir Verdnasky, scientifique illustre en son temps (1863-1945) en Russie mais redécouvert tardivement en Occident, qui théorisa ces interactions entre géosphère et biosphère en soulignant le rôle du vivant (et des êtres humains) comme une force géologique (Verdnasky 1986). Ces idées furent le ciment d'une discipline qui s'est depuis constamment développée : la biogéochimie.

Lorsque les deux éditeurs du présent ouvrage étudiaient à l'université, il existait des formations combinant les sciences de la vie et les sciences de la Terre, avec l'objectif notamment de former les enseignants du secondaire. Ce couplage semblait directement issu de l'alliance traditionnelle des sciences naturelles qui avaient produit tant de grandes connaissances, aussi bien en biologie qu'en géologie, à l'ère de leurs héros comme Jean-Baptiste Lamarck, Georges-Louis Leclerc de Buffon, Georges Cuvier ou Charles Darwin. Pourtant, à la suite d'une spécialisation accrue dans le monde de la recherche scientifique, la dichotomie entre la biologie et la géologie s'est creusée et seuls quelques rares enseignements touchant à l'écologie ou la paléontologie permettaient de rappeler parfois les liens évidents entre ces deux domaines scientifiques.

L'influence de la géosphère sur le vivant semble généralement la plus évidente. En écologie, la notion de niche écologique fondamentale est associée aux conditions abiotiques environnantes, elles-mêmes en partie imposées par la géosphère. Le biotope est une aire géographique définie par des propriétés physiques et chimiques relativement homogènes. Biotope et biocénose associées forment un écosystème. Il existe à la surface de la Terre une distribution grossièrement latitudinale des grands couverts végétaux depuis la toundra et la taïga aux hautes latitudes jusqu'aux forêts tropicales, en passant par les forêts tempérées et les savanes. Cette distribution est contrôlée par le climat qui lui-même contrôle les propriétés des sols, ce qui impose les conditions de vie locales. Peu de lieux semblent inhabitables à la surface de la Terre. En effet, on connaît depuis les années 1960 de véritables écosystèmes se développant dans les milieux hydrothermaux au fond des océans, en l'absence de lumière. La limite en température de la vie semble être d'environ 120 °C, atteinte dans des environnements aux pressions relativement élevées comme au fond des océans. On trouve aussi des traces de vie dans les déserts les plus froids en Antarctique ou les plus chauds et les plus arides comme dans l'Atacama. Seules quelques mares hypersalées, hyperacides et (hyper)chaudes en Éthiopie semblent rédhibitoires pour la vie.

En revanche, l'influence de la biosphère sur la géosphère peut sembler moins évidente au premier regard. En effet, la différence d'échelle (en taille et durée dans le temps) entre un organisme comme une bactérie et une montagne semble telle que l'on a du mal à imaginer comment le premier pourrait influencer le second. Et pourtant, dans les années 1960, James Lovelock et Lynn Margulis développent conjointement une idée révolutionnaire exposée dans l'hypothèse de Gaïa (Lovelock et Margulis

1974). Cette hypothèse suggère que les organismes vivants de la Terre régulent collectivement les conditions de la planète, notamment la composition chimique de l'atmosphère, pour créer un environnement stable et hospitalier pour la vie. Ils envisagent ainsi la Terre comme un système autorégulé, dans lequel la vie elle-même influence la géosphère, et en particulier le climat.

Bien qu'un tel niveau global d'intrication entre biosphère et géosphère reste débattu, nous verrons dans le premier chapitre que l'influence de la biosphère sur la géosphère peut être étudiée à une échelle plus locale, notamment à travers les processus de dissolution des minéraux. Ce processus assure le cyclage des éléments chimiques, dont ceux indispensables à la vie, les libérant dans les sols dont la fertilité est ainsi impactée. Malgré toutes nos connaissances, prédire la vitesse de dissolution des minéraux reste difficile et si l'influence du vivant sur ces vitesses semble établie dans certains cas, la quantifier à une échelle globale apparaît comme un enjeu actuel majeur. Une grande quantité de ces éléments chimiques libérés par les minéraux vont, après avoir ou non transité dans le réservoir biosphérique, rejoindre l'hydrosphère (rivières, lacs, fleuves et océans). Là, ils pourront être réemprisonnés dans des minéraux se formant *de novo* et participer à redistribuer la matière, parfois en créant des ressources d'intérêt pour l'homme, comme pour les gisements de fer ou de phosphore, par exemple.

Le deuxième chapitre aborde cet autre processus témoignant de l'action du vivant sur la géosphère : la formation de minéraux par le vivant, ou biominéralisation. Nous y verrons que, depuis très tôt dans l'histoire de la Terre, des organismes ont impacté la formation des minéraux. Ceci a d'un côté eu des répercussions sur le fonctionnement du vivant et l'histoire de la vie. Mais en retour, les biominéralisations semblent aussi avoir joué un rôle dans l'évolution du fonctionnement chimique de la surface de la Terre en abaissant notamment la concentration de certaines espèces chimiques dans les océans.

Les stromatolites sont un exemple emblématique de roches formées par le vivant. Ces « pierres vivantes » sont observées dans les archives géologiques depuis plus de 3,5 milliards d'années. Le troisième chapitre expliquera les mécanismes impliqués dans cette formation et les informations qui peuvent être déduites de l'étude des stromatolites anciens pour la connaissance de l'histoire de la vie. Les stromatolites sont principalement formés par des écosystèmes microbiens diversifiés qui transforment leur environnement chimique immédiat. L'identification de ces microbes et de leurs fonctions géochimiques à travers leurs métabolismes requiert l'utilisation des méthodes de la biologie moléculaire, dont les progrès méthodologiques au cours des dernières décennies ont révolutionné notre connaissance de la diversité du vivant. Le quatrième chapitre expliquera cette approche ainsi que la manière dont on peut obtenir des informations précieuses sur l'histoire de la vie à partir de l'étude de la diversité des êtres vivants actuels.

La manifestation la plus évidente du rôle de la vie dans la transformation de la Terre au cours de son histoire est l'oxygénation de l'atmosphère, un processus initié il y a près de 2,3 milliards d'années et qui a permis au cours des 600 derniers millions d'années le développement d'océans riches en sulfates ainsi que le développement des eucaryotes, dont les plantes et les animaux. Cette révolution chimique a fait suite à une innovation biologique : l'apparition de la photosynthèse oxygénique. Le cinquième chapitre détaillera comment l'on a mis en évidence cet événement dans l'enregistrement géologique, comment on l'a daté, et précisera les liens entre cette innovation biologique et l'évolution chimique de la géosphère. Au-delà de l'apport d'une nouvelle molécule en abondance dans l'atmosphère (la molécule de dioxygène), cet événement a profondément bouleversé le fonctionnement chimique de la surface de la Terre et notamment le cycle d'autres éléments chimiques tels que le carbone et l'azote, d'importance biologique et climatique.

Ainsi, le sixième chapitre expliquera le fonctionnement des cycles actuels du carbone et de l'azote et comment l'on peut essayer de reconstituer leur fonctionnement dans le passé. On y apprendra que le vivant tient de nouveau un rôle-clé dans ces cycles globaux. L'étude des cycles biogéochimiques requiert la manipulation d'une variété d'outils, dont la mesure des rapports d'abondance entre les différents isotopes des éléments chimiques. Ceci aboutit à la définition de réservoirs représentés schématiquement par des « boîtes », qui interagissent entre elles par l'intermédiaire de flux de molécules dont la spéciation peut changer lors de leurs transferts. La variation au cours du temps d'un paramètre physicochimique (ou biologique), comme la température, peut alors intensifier un flux par exemple. Par ricochet, cette intensification peut induire des modifications qui en retour vont augmenter plus encore ou bien au contraire diminuer ce même flux. On voit ainsi la mise en place de véritables boucles de rétroaction, positives ou négatives, qui rendent peu intuitive *a priori* la prédiction de l'évolution du Système Terre lors d'une perturbation ou d'un changement. Pour réaliser ces prédictions, il faut alors conduire une approche de modélisation permettant d'évaluer l'importance relative de différents processus dans l'évolution d'un compartiment géochimique.

Ce sera l'objet du septième chapitre que d'expliquer les différents types de modélisation utilisés actuellement pour comprendre les perturbations des interactions géosphère/biosphère survenues au sein du Système Terre, par exemple les conséquences climatiques de la colonisation des continents par les plantes il y a plus de 450 millions d'années et les causes géologiques des extinctions de masse qui ont affecté le vivant. Différentes boucles d'interaction ont pu stabiliser le Système Terre et permis le maintien de la vie sur de longues périodes de temps géologique, mais ce couple a aussi évolué pour devenir ce qu'il est aujourd'hui. Les perturbations anthropiques actuelles pourraient à leur tour déstabiliser ce système ; l'ampleur de ces changements et les rétroactions à venir, au-delà des menaces directes sur les civilisations humaines, restent cependant incertaines.

Enfin, le huitième chapitre approfondira l'exposé de nos connaissances sur les variations de la biodiversité au cours des temps géologiques, comprenant des épisodes d'extinction et de diversification du vivant qui témoignent de multiples interactions entre la biosphère et la géosphère.

Pour finir, cet ouvrage sera l'occasion de prendre conscience et de se sensibiliser à la diversité des concepts, savoirs et savoir-faire qu'il faut mobiliser pour étudier les interactions entre la géosphère et la biosphère. C'est l'essence même d'un domaine dit interdisciplinaire qui implique ici le recours à des notions de la physique, de la chimie, de la biologie et, bien entendu, de la géologie. De plus, nous aurons constaté qu'il n'y a pas d'un côté le vivant et de l'autre la planète Terre. Les fonctionnements de ces deux entités sont fortement intriqués et l'évolution de la première a influencé l'histoire de la seconde, et vice-versa. Les différents chapitres sont indépendants et ont été écrits par différents auteurs, offrant ainsi un aperçu de la pluridisciplinarité développée dans ce domaine d'étude.

Les interactions entre géosphère et biosphère se sont mises en place certainement très tôt dans l'histoire de la Terre. Les comprendre est une nécessité pour mieux évaluer ce qu'est une planète habitable et habitée, ce qui constitue une des clés pour la recherche de vie extraterrestre.

Bibliographie

- Lovelock, J.E. and Margulis, L. (1974). Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: The Gaia hypothesis. *Tellus*, 26(1–2), 2–10.
- Vernadsky, V.I. (1986). *The Biosphere*. Copernicus, New York.