

L'hypothèse Gaïa

Ghislain NICAISE

Séminaire du 18 octobre 2013





L'hypothèse

Le nom de Gaïa, la déesse-terre de l'antiquité grecque, a été attribué à une hypothèse scientifique selon laquelle l'ensemble des êtres vivants sur Terre et leur environnement formerait comme un vaste organisme réalisant l'autorégulation de ses composants pour favoriser la vie. Cette hypothèse a été formulée par James E. Lovelock en 1970, mais prend ses racines dans l'oeuvre d'autres scientifiques avant lui comme Vladimir Vernadsky, et a été enrichie simultanément par d'autres auteurs comme Lynn Margulis, Lee R. Kump, Andrew J. Watson ou David Schwartzman. Cette introduction appelle une première question : qu'est-ce qu'un organisme vivant ? Parmi de multiples définitions possibles, nous dirons que la vie est une propriété d'un système limité, ouvert aux flux d'énergie et de matière, capable de s'adapter et de maintenir ses conditions internes lors de fluctuations externes, et aussi capable de se reproduire. Que l'on retienne cette définition ou une autre, Gaïa a toutes les propriétés d'un organisme vivant (métabolisme, évolution, homéostasie) sauf la reproduction.

Contrairement à une opinion répandue, on ne peut pas dire que la biodiversité s'épanouit sur Terre *parce que* les conditions favorables y sont stables. Selon l'hypothèse Gaïa, il faut retourner la proposition : ces conditions favorables sont maintenues en permanence par l'action des êtres vivants. Si la vie disparaissait, notre planète perdrait ses océans, son atmosphère, et deviendrait une fournaise comme la planète Vénus ou au contraire un désert glacé comme la planète Mars.

L'histoire de la Terre

La Terre a environ 4 600 millions d'années (Ma).

1) Pendant le premier milliard, l'Hadéen, la planète était effectivement un *enfer* volcanique ; un soleil moins puissant qu'aujourd'hui éclairait une atmosphère à 200-300° C, probablement orange composée en grande partie de gaz carbonique (CO₂).

2) Pendant le milliard d'années suivant, l'Archéen, avec l'apparition des premiers procaryotes¹ on assiste à la naissance de Gaïa : la vie se propage et commence à modifier son environnement.

¹ Les procaryotes sont des êtres vivants unicellulaires qui ne présentent pas de noyau individualisé (à la différence des eucaryotes dont nous faisons partie), ils comprennent deux grands groupes : les bactéries et les archées. La vie a longtemps (+ de 3 000 Ma) été seulement représentée par les procaryotes, qui forment encore la plus grande partie de la biomasse.



Les premiers procaryotes producteurs d'oxygène (par la photosynthèse) datent selon certaines sources de 2 700 Ma (ou même plus tôt, 3500 pour les plus vieux stromatolithes) mais jusqu'à environ - 2 000 Ma l'atmosphère ne s'est pas sensiblement enrichie en oxygène du fait de tampons, probablement essentiellement du fer ferreux et du soufre.

3) Lorsque ces tampons ont été saturés, en même temps que diminuait l'activité volcanique, il y a eu une *catastrophe de l'oxygène*, ce gaz ayant envahi l'atmosphère. Des procaryotes se sont adaptés à ce gaz toxique et ont formé des associations symbiotiques : les eucaryotes. Cette période qui a duré jusqu'à -700 Ma est appelée Protérozoïque.

4) L'association de cellules eucaryotes pour former des organismes (plantes, animaux, champignons) caractérise le Phanérozoïque, la quatrième grande période de l'histoire de la Terre.

Echelle des temps géologiques				
Eon	Ere	Periode	Epoque	Date (millions d'années)
Phanérozoïque	Cénozoïque	Quaternaire	Holocène	0,01
			Pleistocène	1,8
		Tertiaire	Pliocène	5,3
			Miocène	23
			Oligocène	34
			Eocène	56
			Paléocène	65
	Mésozoïque	Crétacé	145	
		Jurassique	199	
		Triassique	251	
	Paléozoïque	Permien	299	
		Carbonifère	359	
		Dévonien	416	
		Silurien	443	
		Ordovicien	488	
		Cambrien	542	
	Précambrien	Protérozoïque		
Archéen				4600

Fig. 1. Échelle des temps géologiques (reproduite d'après le site du Muséum des Sciences Naturelles de Bruxelles).



L'atmosphère

L'atmosphère qui nous entoure est chimiquement très instable, sa composition n'est constante que par la permanence de flux. Ce sont essentiellement les organismes vivants qui maintiennent ces flux. L'oxygène (O₂), absent à l'Archéen constitue maintenant 21 % des gaz atmosphériques, grâce à un flux annuel de 100 000 Mt. Le CO₂ est passé de 10 à 30 % à l'Archéen à 0,03 % de nos jours, le flux est de 140 000 Mt. Le méthane (CH₄) avoisinait probablement 1% à l'Archéen mais est maintenu à 0,00017 % de nos jours avec un flux de 500 à 1000 Mt. L'azote (N₂) est maintenu à 78 % avec un flux de 500 Mt.

Sur Mars et Vénus le gaz carbonique domine, l'oxygène et l'azote sont presque absents, les atmosphères sont très proches de l'état d'équilibre chimique.

Tableau 0.1. Composition des atmosphères planétaires

Gaz	PLANÈTE			
	Vénus	Terre sans vie	Mars	Terre actuelle
Gaz carbonique	96,5 %	98 %	95 %	0,03 %
Azote	3,5 %	1,9 %	2,7 %	79 %
Oxygène	traces	0,0	0,13 %	21 %
Argon	70 ppm *	0,1 %	1,6 %	1 %
Méthane	0,0	0,0	0,0	1,7 ppm *
Températures en surface (°C)	459	240-340	- 53	13
Pression totale (bars)	90	60	0,0064	1,0

* ppm : parties par million.

Tableau 1.

(J. Lovelock. *Les âges de Gaïa*)

A l'Archéen, les *photosynthétiseurs* fabriquent de la matière organique à partir du gaz carbonique et de l'eau (CO₂ + H₂O -> molécules organiques + O₂), les molécules organiques nourrissent les *décomposeurs* méthanogènes (molécules organiques -> CO₂ + CH₄) le déchet oxygène est absorbé par les tampons. La baisse du gaz carbonique s'accompagne donc d'une hausse du méthane, ce qui permet de maintenir une température positive grâce à l'effet de serre.



A la fin de l'Archéen, *catastrophe de l'oxygène*, les méthanogènes ont été décimés par ce gaz toxique et en grande partie remplacés par les *consommateurs* qui savent tirer parti de l'oxygène (molécules organiques + O₂ -> CO₂ + H₂O). Nous en sommes les descendants.

L'oxygène

Le dioxygène O₂ est une molécule très réactive, qui se maintient à une concentration constante dans l'atmosphère grâce à un apport continu. Cet apport résulte principalement de la photosynthèse mais le gain d'O₂ résulte également de l'enfouissement de molécules carbonées fabriquées par le vivant. Au Carbonifère (voir Fig. 1) le taux d'O₂ a probablement avoisiné les 30 %, la faune comportait des libellules de 80 cm d'envergure et des batraciens de 2 m de long. Les incendies nombreux ont eu pour conséquence l'immobilisation de carbone sous forme de charbon de bois et cette séquestration massive de carbone s'est terminée par une glaciation à la limite Carbonifère-Permien (-300 Ma).

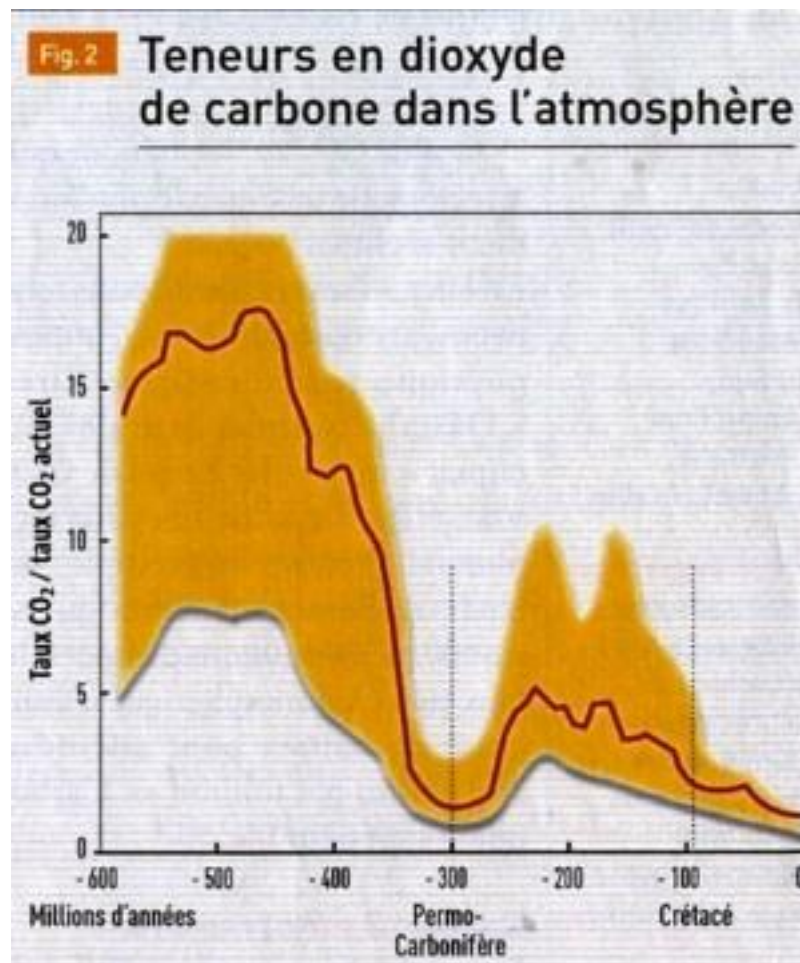


Fig. 2. (Les dossiers de La Recherche n° 25)



Depuis on sait que la concentration d'O₂ a peu varié autour de la concentration de 21 %. Au dessus de 25 % les forêts brûlent au moindre orage. En dessous de 15 à 17 % rien ne brûle. Les restes fossiles d'incendies montrent que la teneur en O₂ a dépassé 15 % depuis au moins 300 Ma et les restes de troncs intacts montrent qu'elle n'a pas dépassé 25 % depuis.

La production de méthane (par les décomposeurs) semble contribuer significativement à la régulation négative de l'O₂.

Le gaz carbonique

Il est maintenu à une concentration très basse par la photosynthèse et ce malgré un flux important. Cette concentration est de 250 ppm (0,025 %) au XIXe siècle, 400 ppm en 2013. Le taux de 180 ppm atteint au cours des dernières glaciations est proche de la limite au dessous de laquelle la végétation ne peut plus pousser.

Il y a environ 10 Ma sont apparues les plantes en C₄, dont le métabolisme est plus efficace dans l'utilisation de faibles concentrations de CO₂. Ces plantes comme le maïs, la canne à sucre ou le figuier de barbarie (*Opuntia*) représentent une adaptation au milieu tropical sec, dans des conditions où les stomates (ouvertures respiratoires des feuilles) sont souvent fermés pour limiter l'évaporation.

Les volcans rejettent environ 250 Mt de carbone par an. Ce chiffre est variable (et en débat, entre 100 et 500 Mt) mais très inférieur aux rejets de l'humanité, d'environ 32 000 Mt dont moins d'un tiers sont absorbés par le milieu.

L'azote

L'azote terrestre se trouve presque uniquement dans l'atmosphère, sous forme de diazote N₂, il y est maintenu constant avec un flux relativement modeste de 300 Mt/an. Il y est fort utile pour diluer l'oxygène et en atténuer le pouvoir corrosif, ainsi que pour contribuer à la pression atmosphérique, donc à l'effet de serre. Si la vie disparaissait sur Terre et que les océans aient subsisté, la quasi-totalité de l'azote passerait en quelques millions d'années de l'atmosphère dans les océans : les éclairs permettent son oxydation en oxydes d'azote NO, NO₂, et l'azote finira en solution sous forme de nitrates NO₃⁻. Les végétaux se servent de ces nitrates pour construire leurs acides aminés (et pour partie les nôtres !). En fin de parcours l'azote sera restitué à l'atmosphère par les bactéries dénitrifiantes, surtout si elles sont dans des conditions anoxiques.



La température

L'apport de chaleur dépend essentiellement du rayonnement solaire, la contribution du noyau terrestre étant très faible à la surface. Ce rayonnement solaire a augmenté de 25 à 30% depuis l'Archéen. La température est maintenue à un niveau compatible avec la vie par l'effet de serre. Sans les gaz à effet de serre (naturels) la moyenne terrestre serait d'environ -19° C. La température moyenne actuelle est de 14°, ce que Lovelock considère comme un accès de fièvre : elle était d'environ -11° lors de la dernière période glaciaire.

A l'Archéen, l'hypothèse Gaïa propose que le CO₂, puis le CH₄ ont permis par l'effet de serre une température favorable à la vie. Cependant l'équilibre entre l'avidité des photosynthétiseurs pour le CO₂ et la production de CH₄ par les décomposeurs n'était pas parfait. Il y a eu au Protérozoïque plusieurs épisodes de glaciation presque totale (snowball earth, la terre boule de neige : 2300-2000, 750-740, 660-635 Ma soit des périodes de 10 à 300 Ma) dont l'écosystème planétaire est sorti grâce aux éruptions volcaniques et du fait de l'absence de pluie qui laissait le CO₂ s'accumuler dans l'atmosphère.

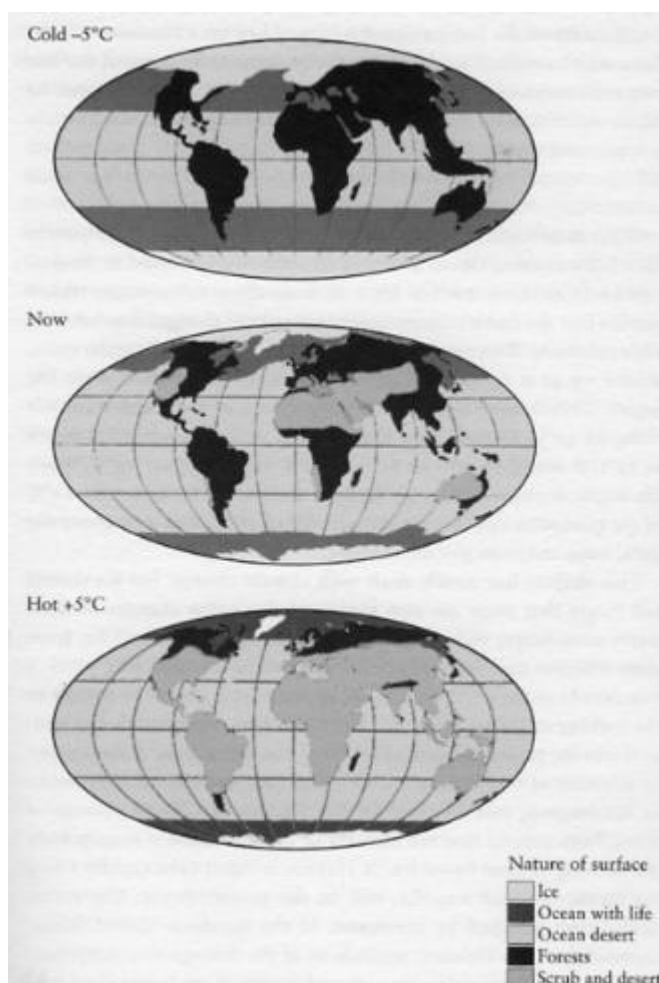


Fig. 3. La répartition de la vie maintenant, sur une planète plus froide (dernière glaciation, noter l'extension des terres émergées et l'absence de déserts) et sur une planète plus chaude (fin du XXI^e siècle ?), (J. Lovelock, *The revenge of Gaia*).



Il n'y a plus eu de telles glaciations radicales depuis le début du Phanérozoïque, ce qui peut permettre de supposer que la colonisation des terres émergées, les écosystèmes de plus en plus complexes et diversifiés ont permis une meilleure régulation de la température. Les glaciations modérées qui ont eu lieu au Phanérozoïque ont été plutôt bénéfiques à la vie, avec une augmentation de la surface des terres et une disparition des déserts chauds et secs, ce qui a fait écrire à Lovelock *Gaïa likes it cold* (Fig. 3), en allusion au film de Billy Wilder *Some like it hot*.

Le monde des pâquerettes, Floréale

Pour répondre aux objections qui avançaient que pour se réguler, Gaïa aurait besoin d'une impossible concertation consciente entre les différentes catégories d'êtres vivants, Lovelock a modélisé la régulation thermique. Le modèle initial de la planète Floréale (Daisyworld) comporte 2 espèces de pâquerettes, une noire, une blanche. Leur germination se fait au dessus de 5°, leur croissance est optimale vers 22°, s'arrête vers 40°. Le soleil de Floréale se rapproche au cours du temps, augmentant la chaleur reçue par la planète. La température est régulée par l'albédo, d'abord vers le haut par les fleurs sombres puis vers le bas par les fleurs claires. Elle reste ainsi constante jusqu'à ce que les fleurs claires réfugiées autour des pôles ne suffisent plus et l'on assiste à une transition brutale (Fig. 4). La principale conclusion apportée par ce modèle est qu'il n'y a besoin d'aucune conscience, d'aucun projet, pour que ces organismes maintiennent les conditions thermiques optimales de leur existence.

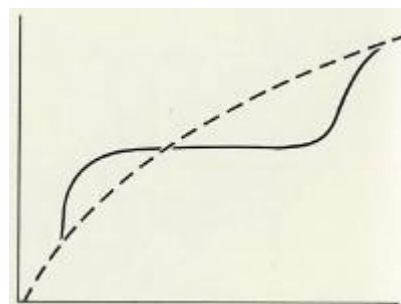


Fig. 4. La courbe en pointillés représente l'élévation de température sur Floréale en l'absence de vie. La courbe en trait plein montre que la température peut être maintenue constante par la vie sous forme de deux espèces de pâquerettes (des blanches et des noires). (J. Lovelock, *Gaïa. Comment soigner une Terre malade*)



Le modèle résiste à l'objection que des pâquerettes mutantes grises auraient un avantage sélectif lié au fait qu'elles ne fabriqueraient plus de pigment, il résiste à l'introduction de lapins dévoreurs de pâquerettes et enfin il résiste à l'ajout de renards prédateurs de lapins. La seule modification apparaît sous forme de petits accidents sur la partie stable (horizontale) de la courbe de température.

De Floréale à Gaïa

Sur Terre, la régulation de la température est assurée par les variations des concentrations des gaz à effet de serre (GES) mais aussi par l'albédo comme sur Floréale. L'océan est sombre (bleu foncé) et les nuages sont blancs. Un corps sombre exposé aux rayons du soleil chauffe plus qu'un corps blanc. Quand la température s'élève, l'eau des mers s'évapore davantage, donc il y a plus de nuages blancs qui réfléchissent le rayonnement solaire, donc la température redescend : on a une rétroaction négative.

Les forêts tropicales évaporent en masse, ce qui donne des nuages donc une diminution de température. Les conifères des régions froides restent sombres et leur forme permet à la neige de glisser, deux caractéristiques qui facilitent une augmentation de température. Par contre l'albédo de la glace est impliqué dans une boucle de rétroaction positive, ce qui a pu contribuer au déclenchement des épisodes de glaciation extrême (snowball earth).

L'eau

L'eau a permis la naissance de la vie sur Terre mais la Terre sans la vie serait probablement maintenant sans océans, comme Mars ou Vénus. La rétention de l'eau se fait de plusieurs façons :

- d'abord par la régulation de la température (une grande partie de l'eau reste liquide ou solide)
- un peu d'hydrogène est fixé par les microorganismes près de sa source au fond des océans (la réaction du basalte chaud avec l'eau produit de l'hydrogène)
- ensuite l'oxygène atmosphérique (radicaux OH-) empêche la fuite de l'hydrogène



- enfin l'oxygène atmosphérique, par l'intermédiaire de la couche externe d'ozone (O₃) absorbe le rayonnement ultra-violet qui sans cet obstacle casserait les molécules d'eau.

Les nuages et la pluie

L'évaporation de l'eau ne suffit pas à faire les nuages et la pluie. Il faut des molécules (autres qu'H₂O) ou des particules pour former les noyaux de condensation de la vapeur d'eau. L'acide sulfurique est très efficace dans ce rôle.

Les algues marines relâchent du sulfure de diméthyle (DMS) dans l'atmosphère

Le DMS s'oxyde en sulfate qui permet la formation de noyaux de condensation. Le DMS serait la principale source de noyaux de condensation pour la formation des nuages océaniques².

Au dessus de la forêt amazonienne, il semble établi que des aérosols de bactéries, spores, pollens, joueraient ce rôle. Les forêts pluviales tropicales entretiennent la pluie qui les arrose, si on en coupe les arbres, on crée des déserts arides.

Le sol et les arbres

Le sol n'existe pas sur les planètes sans vie (on parle de régolite). Le sol vivant a son atmosphère propre avec 30 fois plus de CO₂, beaucoup de CH₄ (comme à l'Archéen), il abrite la majeure partie de la biomasse terrestre et une grande part de la biodiversité.

Les microorganismes augmentent considérablement l'érosion des roches : l'érosion du basalte est 1000 fois plus rapide en présence du vivant (Schwartzman & Volk 1989).

La formation de sols a été considérablement améliorée par l'apparition des feuillus au Tertiaire. La préservation des sols est en danger.

Selon Claude et Lydia Bourguignon : « *au dessus de 550 mm/an de pluie les forêts de feuillus envoient l'excédent d'eau à la nappe par leurs racines. En supprimant la forêt ..., l'homme a créé deux milliards d'hectares de désert en 4000 ans d'agriculture* » (40 fois la surface de la France).

² En même temps que le vecteur du retour du soufre sur les continents



Les rivières et les arbres ont co-évolué. Les rivières stables se sont développées au cours du Dévonien (395-345 Ma) ce qui coïncide avec l'apparition (375 Ma) et l'expansion des arbres. Les arbres stabilisent les méandres et les berges.

La salinité des océans

C'est par l'érosion pluviale des continents que les océans se sont enrichis en sels. Si la salinité dépassait 5 %, la vie marine serait impossible. S'il n'y avait pas régulation, ce seuil serait atteint en ± 800 Ma. Du sel est piégé dans les lagunes en bordure des continents ou des lacs fermés ; on le retrouve fossilisé (mines de sel). Par exemple les réserves dans la seule Pologne sont estimées à 80000 Mt.

La présence de bactéries favorise la rétention de sel en recouvrant les cristaux d'une couche imperméable. Les stromatolithes³ favorisent la formation de marais salants naturels dans lesquels l'eau de mer peut se concentrer.



Fig. 5. Des stromatolithes actuels sur le rivage de Shark Bay, Australie (cours de Micropaléontologie sur Internet, Université Libre de Bruxelles)

³ Les stromatolithes sont des massifs principalement calcaires édifiés par des procaryotes photosynthétiseurs dont les premiers fossiles remontent à 3 500 Ma.



La tectonique des plaques

Les continents actuels sont posés sur des plaques qui dérivent depuis la dispersion d'un continent unique la Pangée qui existait il y a 200 Ma. En se déplaçant certaines plaques s'affrontent ce qui entraîne l'édification de chaînes de montagnes (ex. Pyrénées-Alpes-Himalaya). Les géophysiciens prédisent que les continents se regrouperont dans 400 Ma comme ils se sont regroupés pour former la Pangée. Les montagnes anciennes (hercyniennes) auraient ainsi été édifiées lors du précédent cycle de dérive des plaques. La tectonique des plaques aurait commencé il y a au moins 1900 Ma, peut-être seulement après la naissance de Gaïa.

La séparation comme la convergence des plaques ont plusieurs effets bénéfiques pour l'homéostasie de Gaïa :

- l'accroissement des zones littorales lors de la fragmentation : ces zones (comme toutes les interfaces entre écosystèmes) sont particulièrement riches en biodiversité, de plus le climat terrestre côtier est moins contrasté que le climat continental,
- l'orogénèse (formation de montagnes) lors de l'agrégation : les montagnes sont un élément puissant dans la régulation de l'eau douce par constitution des réserves qui alimentent les fleuves, elles jouent aussi un rôle dans la régulation des vents et du climat.

Il est possible que la vie joue un rôle important dans la tectonique des plaques :

- sans la séquestration massive du CO₂ par la photosynthèse⁴ et par la formation de calcaire⁵, il n'y aurait pas eu le refroidissement de la surface qui serait nécessaire à la tectonique des plaques, la planète Vénus en donne un contre-exemple.
- les sédiments et particulièrement la pluie continue de microfossiles déposant du calcaire au fond des océans modifieraient les marges continentales et pourraient favoriser la dérive des plaques. Il suffit de penser aux falaises d'Étretat pour apprécier la masse que peut représenter cette accumulation de squelettes.

⁴ Du fait des cyanobactéries, puis des algues puis des plantes, ces étapes ajoutant à chaque fois de la diversité donc pense-t-on de la stabilité

⁵ Du fait des stromatolithes (procaryotes), puis des coccolithophores (eucaryotes unicellulaires), puis des récifs coralliens (symbiose algues-animaux), même remarque.



L'évolution de Gaïa

Quelle que soit la méthode d'évaluation de la biodiversité d'après les fossiles (nombre de genres ou nombre de familles) on voit que mis à part les périodes d'extinction massive, la biodiversité progresse au cours du temps. Après chaque période d'extinction massive la biodiversité se hisse à un niveau supérieur (Fig.6).

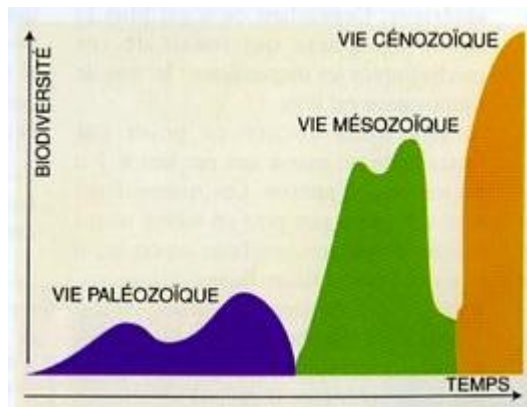


Fig. 6. La biodiversité est quantifiée ici par le nombre de genres fossiles. (Dossier "La valse des espèces" Pour la Science juillet 2000).

La vie a failli être supprimée lors d'accidents (principalement chute de météorites et épisodes volcaniques). Ces accidents correspondent aux périodes d'extinction massive, repérables sur les sédiments. Nous vivons en ce moment la 6e extinction de masse, pour la première fois due à une espèce vivante

Si la vie s'arrêtait, en quelques millions d'années, peut-être moins, l'azote atmosphérique serait remplacé par du CO₂, les océans auraient disparu et la terre deviendrait comparable à Vénus, un enfer torride.

Les critiques

L'hypothèse Gaïa a été l'objet de controverses, plus vives qu'il n'est courant pour une hypothèse scientifique ordinaire, mais à la mesure de sa nouveauté et de son importance.

Le darwinisme enseigne que le milieu modifie les êtres vivants et non l'inverse. Des biologistes comme Richard Dawkins (« Le gène égoïste ») pensent impossible que des organismes coopèrent pour réguler l'environnement : l'évolution est *l'opposition permanente à un milieu extérieur - proies et prédateurs -, seule susceptible de faire évoluer au fil du temps par le mécanisme bien connu de la sélection naturelle.* Cette opposition



n'existe pas pour la Terre, qui n'a ni milieu, ni proies, ni prédateurs. Le modèle Floréale a d'ailleurs été publié comme une réponse à Dawkins (à noter que ce courant de pensée minimise les mécanismes de symbiose dans l'évolution).

Stephen J. Gould a souligné que la biomasse initiale (bactéries, virus) ne rend pas la planète plus «hospitalière» pour elle-même, mais crée, en émettant des gaz issus de sa physiologie et en proliférant, les conditions qui à leur tour permettent l'apparition de formes de vie moins simples.

Schwartzman et coll. rappellent dans la même optique que l'homéostasie du vivant existant n'a pas été aussi directrice que Lovelock le proposait (exemple des Archées thermophiles anaérobies qui étaient parmi les premiers habitants de la Terre et qui ont été réduites à quelques refuges par la régulation du climat et la catastrophe oxygène); ils proposent que la vie n'est qu'un des acteurs du système Gaïa.

Le nom de Gaïa a suscité le soupçon de mysticisme : de fait l'hypothèse Gaïa a largement été reprise par la fiction ainsi que par le courant idéologique New Age. Plusieurs auteurs donnent à Gaïa une conscience, ce qui sort du domaine scientifique.

Mais même si l'on veut s'en tenir à une hypothèse scientifique, le terme *hypothèse Gaïa* est plus séduisant que celui d'*hypothèse biogéochimique*.

L'hypothèse Gaïa est prédictive

L'important pour une théorie scientifique n'est pas qu'elle soit juste, si l'on suit Karl Popper on ne peut prouver que sa fausseté, mais qu'elle soit utile. L'hypothèse Gaïa a été critiquée parce qu'elle ne serait pas réfutable, ni prédictive. Il faut se souvenir que c'est le cas pour l'essentiel de la Géologie. Cependant on peut noter que cette hypothèse a quelques succès à son actif :

- prédiction en 1968 qu'il n'y avait pas de vie sur Mars : confirmée par la mission Viking en 1977
- nécessité d'un transport d'éléments essentiels des océans vers les terres émergées, publication de 1971 : mise en évidence du rôle du sulfure de diméthyle en 1973,
- la vie jouerait un rôle dans l'érosion donc dans la genèse des roches sédimentaires (1981), l'érosion est considérablement augmentée en laboratoire en présence de microorganismes (1989).



En conclusion, si cet essai trop bref a pu attirer l'attention du public français sur l'oeuvre d'un des auteurs majeurs du XXe siècle⁶, trop méconnu dans notre pays, il aura atteint son but.

Sources consultées

Bourguignon, C. & Bourguignon L. 2009. Le sol, la terre et les champs. Pour retrouver une agriculture saine. Editions Sang de la Terre, Paris.

Lovelock, J.E. 1979. Gaia. A new look at life on earth. Oxford University Press

Lovelock, J.E. 1990. Les âges de Gaïa. Robert Laffont.

Lovelock, J.E. 1992. Gaïa. Comment soigner une Terre malade. Robert Laffont

Lovelock, J.E. 2006. The revenge of Gaia : Why the earth is fighting back - and how we can still save humanity. Allen Lane.

Lovelock, J. 2008. A geophysicist's thoughts on geoengineering. Phil. Trans. Roy. Soc. ser A, **366**, 3883-3890.

Lovelock, J.E. & Margulis L. 1974. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the gaia hypothesis. Tellus 26, 2-10.

Schwartzman, D. 2010. Gaia in Turmoil: Climate Change, Biodepletion, and Earth Ethics in an Age of Crisis, edited by Eileen Crist and H. Bruce Rinker, foreword by Bill McKibben, The MIT Press.

Schwartzman, D.W. & Volk, T., 1989. Biotic enhancement of weathering and the habitability of Earth. Nature 340: 457-460

⁶ James Lovelock, auteur de quelque 200 publications scientifiques a déposé plusieurs brevets dont un appareil à capturer les électrons qui lui a valu de partager en 1995 le prix Nobel de Chimie (avec Paul Crutzen) pour sa contribution à l'étude de la couche d'ozone stratosphérique.