



HAL
open science

Le Grand bouleversement

Marc Delepouve

► **To cite this version:**

Marc Delepouve. Le Grand bouleversement : Le système bio-Terre et l'éon Anthropozoïque. 2020. hal-02503252v1

HAL Id: hal-02503252

<https://hal.science/hal-02503252v1>

Preprint submitted on 9 Mar 2020 (v1), last revised 31 Mar 2020 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Le grand bouleversement

Systeme bio-Terre
Éon Anthropozoïque

Marc Delepoue

CNAM, Univ.Lille, EA 3716-HT2S

Texte rédigé dans le cadre de la préparation d'une thèse de doctorat
dirigée par Bertrand Bocquet et codirigée par Jean-Claude Ruano-Borbalan

Table des matières

1 ^{ère} partie.....	5
Le système bio-Terre.....	5
1 Influences et chocs externes.....	5
1.1 Les mouvements des continents.....	6
1.2 l'activité volcanique.....	8
1.3 L'érection des montagnes.....	8
1.4 L'activité solaire.....	8
1.5 Les météorites et les astéroïdes.....	8
1.6 Les variations de l'orbite de la Terre.....	9
2 Cycles climatiques du Quaternaire.....	9
3 Bouleversement du cycle du carbone.....	10
4 Un système complexe.....	11
Encadré : Une révolution totale.....	11
2 ^e partie.....	13
L'hypothèse de l'éon Anthropozoïque.....	13
1 Éons, ères, périodes.....	13
2. L'Archéen.....	13
3 De l'Archéen au Protérozoïque.....	14
4 Du Protérozoïque au Phanérozoïque.....	16
5 Du Phanérozoïque à l'Anthropozoïque ?.....	18
5.1 Les bifurcations entre éons depuis la naissance de la Terre.....	18
5.2 L'hypothèse de l'éon Anthropozoïque.....	19
5.3 L'ère de l'Anthropocène.....	20
5.4 Une nouvelle composante du vivant.....	20
5.5 Fulgurance.....	21
5.6 Irréversibilité.....	21
3 ^e partie.....	22
Libérer la complexité.....	22
Géo-ingénierie.....	22
Obscurantisme scientifique.....	23
XXe siècle, l'humanité entre en bifurcation.....	23
Accélération.....	24
La force du sens.....	25
Annexe 1. Les paramètres de Milankovitch.....	26
1 L'excentricité.....	26
2 L'obliquité.....	26
3 La précession.....	26
Annexe 2. L'acidification des océans.....	27
Annexe 3. Point sur la bifurcation en ce début de XXI ^e siècle.....	28
Dioxyde de carbone et climat.....	28
Les forêts dévastées.....	28
Biodiversité.....	29
Nitrates.....	29
Perturbateurs endocriniens.....	30
Microparticules de plastique.....	30
Champignons, l'effet boomerang.....	30

Océans, la rupture des équilibres.....	31
Perméabilité et vulnérabilité des humains.....	33
Choc frontal.....	34
Remerciements.....	36

1^{ère} partie

Le système bio-Terre

Le Monde du vivant, l'atmosphère (sa composition chimique, les nuages...), les océans (la composition chimique de l'eau, les courants, les fonds marins...), les sols continentaux (l'albédo, la nature des sols...), le climat, ces cinq domaines présentent des évolutions extrêmement liées, inséparables. Finalement, leurs histoires ne font qu'une. « Monde du vivant – atmosphère - océans - sols continentaux - climat » forment un même système. Un système au sein duquel d'innombrables interactions s'expriment et se traduisent par une évolution sans fin du système pris dans son ensemble. Un système que j'appellerai désormais système bio-Terre, où des stades d'évolution lente sont entrecoupés de moments de basculement, de bifurcation. Mais pourquoi introduire le terme système bio-Terre, alors que le terme système Terre lui pré-existe et bénéficie déjà d'un usage répandu ? Le préfixe bio renvoie au Monde du vivant, lequel présente une évolution irréversible qui ne s'interrompt jamais. Une évolution qui conditionne constamment et fortement l'état de la totalité du système bio-Terre et qui enclenche ou contribue à enclencher des bifurcations de ce système, notamment – nous le verrons - les plus importantes d'entre elles. Aussi, nous pourrions définir le système bio-Terre comme l'ensemble des éléments qui sont en interaction complexe avec le monde du vivant. Selon cette définition, l'intérieur de la Terre (plaques tectoniques incluses) n'est pas compris dans le système bio-Terre, bien qu'il puisse être considéré comme une partie du système Terre.

1 Influences et chocs externes

Le système bio-Terre n'est pas un univers fermé, mais est soumis à l'influence de phénomènes qui lui sont extérieurs : le mouvement des continents, l'activité volcanique, l'érection des montagnes, l'activité solaire, les météorites et astéroïdes qui percutent la Terre, les variations de l'orbite terrestre. Ces phénomènes sont la cause ou une des causes de certaines bifurcations du système bio-Terre.

Système bio-Terre		
Composantes internes	Influences externes	
	Terrestres	Non terrestres
Monde du vivant	Mouvements des continents	
Climat	Activité volcanique	
Atmosphère	Érection des montagnes	

Océans	Activité solaire
Sols continentaux	Météorites
	Orbite de la Terre

1.1 Les mouvements des continents

Au commencement, il y a environ 2,9 milliard d'années, nous avons la naissance des premières surfaces continentales conséquentes. Auparavant la Terre était quasiment entièrement couverte d'océans. Depuis, se déroule un va et vient – dû aux mouvements des plaques tectoniques. Ce va et vient va de la constitution d'un continent unique ou quasiment unique à son éclatement en plusieurs continents, puis à des dérives de ceux-ci, et enfin à leur rapprochement et à la formation d'un nouveau continent unique. Et ainsi de suite.

L'histoire des continents influence celle du climat. Toutefois, la nature et les mécanismes de cette influence ont évolué au cours des temps géologiques, car ils dépendent du vivant et du stade de son évolution. Nous allons ici nous situer après la période géologique du Dévonien (de 419 millions d'années à 358,9 millions d'années avant nos jours), durant laquelle les forêts, écosystème inédits, sont apparues et ont colonisés les continents. Sur un continent unique, encore appelé super continent, les surfaces arides prennent des dimensions démesurées. L'effet albédo y est important, ce qui favorise un refroidissement climatique global. Mais il y a aussi et surtout des effets opposés. Tout d'abord, la décomposition des forêts et de leur sol génère du dioxyde de carbone qui rejoint l'atmosphère, ce qui favorise un réchauffement climatique global. Ensuite, l'effondrement de la végétation a pour conséquence une réduction notable de la quantité de dioxyde de carbone capté par cette végétation, ce qui favorise à nouveau un réchauffement. Enfin, il y a une diminution du captage du dioxyde de carbone par érosion des silicates des sols – en raison d'une moindre présence de la végétation, d'une part, et, d'autre part, d'une moindre quantité de pluies - ce qui apporte une troisième contribution à l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère et donc au réchauffement.

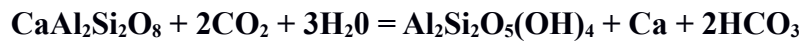
Encadré : Érosion chimique des silicates

Le captage du CO₂ par érosion des silicates se réalise grâce à de l'eau de pluie chargée en CO₂, laquelle est plus rare sur un continent unique, immense et globalement aride que sur des continents dispersés et de taille réduite. Il repose sur des réactions chimiques (voir l'exemple ci-dessous) entre des molécules de silicate, des molécules de dioxyde de carbone et des molécules d'eau, et donne naissance à d'autres molécules dont des molécules de carbonate¹ (lesquelles contiennent les atomes de carbone issues des molécules de CO₂). Ce processus a une influence importante sur le taux de CO₂ dans l'atmosphère et donc sur le climat, car les

¹ Les molécules de carbonates sont composées de CO₃ et d'un ou plusieurs autres atomes. Par exemple le bicarbonate a pour formule chimique HCO₃. Le bicarbonate de soude, NaHCO₃. Le carbonate de calcium, CaCO₃.

silicates sont présents dans des quantités considérables : ils composent l'essentiel de la croûte terrestre.

Exemple de l'aluminosilicate de calcium. Une catégorie de labradorites - pierres précieuses dont le nom est inspiré de la région où elles ont été identifiées, le Labrador, au Canada - sont composées d'aluminosilicate de calcium, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. L'érosion chimique de ce silicate repose sur la réaction suivante :



Le carbone du dioxyde de carbone (CO_2) est passé dans le carbonate (HCO_3)

Au final, depuis la période du Dévonien, l'existence d'un supercontinent agit en faveur d'un réchauffement climatique global. Le dernier supercontinent a pour nom la Pangée. Il a notamment occupé toute la période géologique du Permien, allant de 299 millions d'années à 252 millions d'années. Au début de cette période, le taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère était situé entre 300 et 400ppm (proche du taux actuel). Le climat était celui d'une glaciation (l'énergie solaire arrivant sur Terre était alors inférieure de 2 % à ce qu'elle est de nos jours). 47 millions d'années plus tard, à la fin du Permien, le taux de CO_2 était multiplié d'un facteur évalué entre 5 et 10. Le climat était très chaud et aride. Des espèces vivantes ne survécurent pas à ce réchauffement climatique global ; y compris dans les mers et océans, devenus plus chauds et plus acides. C'est alors qu'une intense activité volcanique se déclencha, en Sibérie, avec pour conséquence, une intensification de la disparition d'espèces vivantes, et finalement la plus grande extinction de tous les temps. De là s'ouvrit une nouvelle ère géologique, l'ère du Mésozoïque (autrefois appelée ère secondaire).

Autre événement notable de l'histoire de la Terre lié aux mouvements des continents : l'ouverture du passage du Drake, il y a un peu plus de 30 millions d'années. Le continent Antarctique, à l'époque couvert de forêts, s'est séparé du continent Sud Américain, ce qui a ouvert un passage entre les océans Pacifique et Atlantique. Ceci a permis la naissance d'un courant océanique circulaire qui, aujourd'hui encore, fait le tour de l'Antarctique. Ce courant, dit circumpolaire, créa une frontière entre d'un côté l'Antarctique et ses eaux limitrophes, et de l'autre les eaux chaudes situées plus au Nord. Concrètement, depuis lors les courants venant des mers chaudes sont bloqués par le courant circumpolaire, ils ne réchauffent donc plus l'Antarctique. Cela, combiné à une baisse du taux de CO_2 (amorcée il y a près de 150 millions d'années), eut pour effet la disparition de la forêt antarctique et la constitution de la calotte de glace de ce continent polaire.

Ces deux exemples, la Pangée et l'ouverture du Drake, illustrent les multiples influences des mouvements des continents, tant sur le climat que sur le Monde du vivant, l'atmosphère, les mers et océans et les sols continentaux, et donc sur l'ensemble du système bio-Terre. Cependant, la réciproque est fautive. Les mouvements des continents ne sont influencés par aucune des composantes de ce système. Ils ne sont pas considérés comme interne au système bio-Terre, mais extérieurs à celui-ci.

1.2 L'activité volcanique

L'activité volcanique joua un rôle central au début de l'histoire du climat terrestre, par des émissions massives de dioxyde de carbone ou encore des rejets d'oxysulfure de carbone (COS), un puissant gaz à effet de serre. Elle joua ensuite un rôle de premier plan dans des ruptures de l'histoire du vivant, marquées par des extinctions massives d'espèces, comme nous venons de le voir, à la fin de l'ère du Paléozoïque il y a 252 millions d'années, et, comme nous le verrons, à la fin de l'ère du Mésozoïque il y a 66 millions d'années.

1.3 L'érection des montagnes

L'érection des montagnes impacte directement le climat. De la formation de l'Himalaya est née la mousson en Inde. De plus, les silicates mis à nu et la pluviosité élevée font de ce massif un important puits de carbone.

1.4 L'activité solaire

Trois derniers phénomènes, cette fois-ci extérieurs à la planète Terre, influencent le système bio-Terre sans être influencés par celui-ci. Tout d'abord l'activité solaire. La quantité d'énergie solaire reçue par la planète Terre augmente de 7 % chaque milliard d'années. Elle a donc augmenté de 31 %² en 4 milliards d'années. Cela, si toute chose avait été égale par ailleurs, aurait dû rendre la Terre inhabitable. Cela ne se produisit pas car, notamment, en tendance longue le taux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, extrêmement élevé aux premiers âges de la Terre, poursuit une baisse continue.

L'activité solaire présente en outre des fluctuations de courte durée. Certaines sont brèves, selon un cycle de onze ans. D'autres, plus longues, peuvent s'inscrire sur plusieurs siècles. Cependant, ces fluctuations possèdent une ampleur et une durée insuffisante pour participer aux grands basculements de l'histoire du climat. Elles constituent par contre des facteurs notables de la météo. Elles jouent aussi un rôle dans des variations climatiques de courte durée, pouvant aller jusqu'à plusieurs siècles. Durant le dernier millénaire, l'impact de ces fluctuations sur l'énergie emmagasinée dans l'atmosphère a varié de $\pm 0,3 \text{ W/m}^2$. Depuis le milieu du XXe siècle, nous sommes en haut de cette fourchette, entre $+0,2$ et $+0,3 \text{ W/m}^2$. Il y a donc une contribution de l'activité solaire au réchauffement climatique global. Toutefois, ce chiffre doit être comparé à l'impact du dioxyde de carbone émis depuis deux siècles par les activités humaines, qui est aujourd'hui de l'ordre de 2 W/m^2 . Finalement, la part de réchauffement climatique due au CO_2 émis par les activités humaines est près de dix fois supérieure à celle due à l'intensification de l'activité solaire. Les émissions de dioxyde de carbone par les humains ne constituent donc pas la seule cause du réchauffement climatique global¹, mais elles en constituent clairement la toute première cause.

1.5 Les météorites et les astéroïdes

La rencontre de la Terre avec des comètes ou avec des corps célestes influence le système bio-Terre. Il y a 66 millions d'années, l'impact d'un météorite percutant la Terre associé à celui de l'activité volcanique joua un rôle dans l'extinction massive d'espèces vivantes qui marqua le

2 $(1,07)^4 = 1,31$

passage entre l'ère du Mésozoïque (autrefois appelée ère secondaire) et l'ère du Cénozoïque (autrefois ères tertiaire et quaternaire).

1.6 Les variations de l'orbite de la Terre

Enfin, sixième et dernier phénomène de notre tour d'horizon, la variation de trois paramètres orbitaux de la Terre autour du soleil. En 1941, le Serbe Milutin Milankovitch publia une théorie du climat où il expliquait les glaciations et les déglaciations des derniers 600 000 ans, en se basant sur les variations de trois paramètres orbitaux : l'excentricité, l'obliquité et la précession ; voir Annexe 1. Ces paramètres, aujourd'hui appelés paramètres de Milankovitch, varient selon des cycles dont la durée s'expriment en dizaines de milliers d'années. Depuis lors, les résultats de la recherche scientifique ont confirmé la théorie de M. Milankovitch et le lien de causalité entre les variations des paramètres du même nom et les cycles climatiques, avec toutefois une nuance sur laquelle nous allons revenir ; cela sur un intervalle de temps étendu à l'ensemble de la période géologique du Quaternaire, qui a débuté il y a 2,6 millions d'années et qui, nous le verrons, a pris fin récemment (géologiquement parlant).

2 Cycles climatiques du Quaternaire

Le climat du Quaternaire était globalement stable. Plus précisément, il variait selon un système de cycles relativement stable. Les variations cycliques des trois paramètres de Milankovitch se combinaient pour orchestrer des variations cycliques du climat terrestre où chaque cycle débutait par une glaciation (augmentation importante du volume de glace terrestre), puis s'achevait par une déglaciation (diminution importante du volume de glace terrestre). Toutefois, les cycles n'étaient pas parfaits. Tout d'abord ils se sont succédé sur un fond de refroidissement climatique lent (aux effets négligeables à l'échelle de l'humanité). Ensuite, la durée des cycles a varié : de l'ordre de 40 000 ans entre 2,6 millions d'années et 1 million d'années, puis de l'ordre de 100 000 ans durant le dernier million d'années. Enfin, au cours de chacun des cycles, le climat a connu des fluctuations distinctes d'un cycle à l'autre, qui elles même se déroulaient plus ou moins en cycles (de courte durée). Pour l'essentiel, ces fluctuations étaient, elles aussi, liées aux paramètres de Milankovitch, sinon à l'activité solaire.

Toutefois, la mécanique climatique en place tout au long du Quaternaire ne reposa pas uniquement sur les paramètres de Milankovitch. En effet, la variation de l'insolation terrestre (la quantité d'énergie solaire reçue au sommet de l'atmosphère et sa répartition selon les latitudes et les saisons), consécutive aux variations des paramètres de Milankovitch, était bien trop faible pour expliquer à elle les cycles glaciations/déglaciations. Un mécanisme d'amplification de l'influence des paramètres de Milankovitch, qui reposait notamment sur le carbone et le Monde du vivant entraînait en jeu.

Du carbone est stocké dans le sols des continents et dans les fonds marins. Lors d'un réchauffement climatique global engendré par les variations combinées des trois paramètres de Milankovitch, une partie de ce carbone est relâché dans l'atmosphère, cela sous la forme de gaz à effet de serre (CO_2 et CH_4), ce qui amplifie le réchauffement. A l'opposé, lors d'un refroidissement

climatique engendré par la variation des paramètres de Milankovitch, du dioxyde de carbone est soustrait de l'atmosphère et vient accroître les stocks de carbone des sols continentaux et des fonds marins, ce qui amplifie le refroidissement.

Depuis 2,6 millions d'années et jusqu'à il y a peu, l'influence sur le climat des paramètres de Milankovitch a été fortement amplifiée par le cycle du carbone. Par exemple, lors d'un réchauffement climatique global, du pergélisol se désintègre et donne lieu, d'une part à la fonte d'hydrates³ de méthane (dont le méthane a été produit par le vivant au moins des dizaines de milliers d'années auparavant) et d'autre part à la formation de marres thermokarst. De la partie inférieure de ces marres, des archées méthanogènes émettent du méthane, alors que d'autres micro-organismes, plus proches de la surface de l'eau, émettent du dioxyde de carbone. Ces mares font leur apparition à chaque déglaciation. Au-delà des marres thermokarst, le vivant - sur les continents et dans l'immensité des océans (nous y reviendrons) - est au centre de la mécanique qui détermine la composition chimique de l'atmosphère (taux de dioxyde de carbone, de méthane, d'oxygène...) et les changements climatiques.

3 Bouleversement du cycle du carbone

Le mouvement incessant d'aller retour du carbone, entre les sols continentaux et les fonds marins d'un côté, et l'atmosphère de l'autre, a donné l'expression *cycle de carbone*. Ce mouvement s'est déroulé selon des cycles à peu près réguliers, d'une durée de 100 mille ans au cours du dernier million d'années, et d'une durée de 40 mille ans entre 2,6 millions et un million d'années. Cette expression, cycle du carbone, est encore employée dans le contexte du changement climatique actuel. Cela peut être trompeur. En effet, la notion de cycle semble comporter l'idée que dans le futur nous retrouverons les états passés. Or nous n'en savons rien. Un passage par les états antérieurs semble même improbable. La période de relative stabilité climatique, d'une durée de 2,6 millions d'années, a pris fin il y a deux siècles. Le climat a depuis lors amorcé un profond changement. Un jour peut-être, le climat et le carbone trouveront à nouveau une relative stabilité présentant des évolutions cycliques plus ou moins importantes. Mais cela ne se produira pas dans un avenir proche. De plus, cette relative stabilité serait très probablement de nature très différente de celle du Quaternaire. Toujours est-il qu'actuellement le climat et le carbone évoluent hors de tout cycle, hors du système qui a eu cours pendant 2,6 million d'années. Cela est illustré par la quantité de carbone présente dans l'atmosphère, d'une ampleur jamais atteinte depuis au moins 3,5 millions d'années.

Le cycle du carbone est frontalement percuté par certaines activités humaines : usage d'énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), agriculture (élevage de ruminants dont notamment les bovins et les ovins, culture du riz sur des parcelles inondées, fumiers...), déforestations, cimenteries... Ainsi, le carbone n'est plus uniquement une source d'amplification des changements climatiques, comme c'était le cas depuis au moins 2,6 millions d'années : les Homo sapiens en ont

3. Un hydrate de méthane est une molécule de méthane emprisonnée dans une cage d'eau glacée. Lorsque l'une de ces cages fond, elle libère sa molécule de méthane.

fait la cause du réchauffement climatique global, dont l'amplification par le même carbone (et par le Monde du vivant) n'est, à ce jour, quasiment pas ou pas encore enclenchée.

4 Un système complexe

L'histoire de la Terre et plus largement les résultats de la recherche relative à la Terre montre que le Monde du vivant, l'atmosphère, les mers et océan, les sols continentaux et le climat sont les cinq composantes d'un **système complexe**, que nous appelons système bio-Terre. Toute modification de l'une de ces composantes entraîne une modification de chacune des quatre autres. Ainsi, tout changement du climat se traduit par des adaptations du Monde du vivant, des modifications des taux de présence du dioxyde de carbone, du méthane et de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, des modifications de la composition de l'eau de mer, et des modifications des processus d'érosion des sols. En retour, la modification de chacune de ces quatre dernières entraîne des modifications de la première. Finalement, dès lors qu'une des composantes du système bio-Terre connaît un changement, s'opère alors une évolution de l'ensemble du système, sous l'effet d'interactions en cascade.

Encadré : Une révolution totale

La révolution de la pensée du complexe s'est amorcée au milieu du XXe siècle. Elle permet d'étudier des objets que le plus souvent les disciplines scientifiques n'ont pas vocation à aborder, par exemple le système bio-Terre ou encore l'humanité prise dans son ensemble. Elle se nourrit des résultats des sciences segmentées en disciplines, mais va au-delà. Elle est porteuse d'un changement de nos modes de pensée et constitue un outil puissant qui permet de profondément modifier l'ensemble des représentations, y compris celles que chacun possède de lui-même, des autres et de ses groupes d'appartenance. Elle est indispensable à la conception et la mise en œuvre de réponses à de nombreux problèmes. Au-delà de la pensée et des représentations, la révolution du complexe se traduira dans l'agir, aux plans culturel, social et politique ; en ce sens, cette révolution en marche est une révolution totale. Cette révolution est indispensable – mais pas suffisante - pour adapter nos systèmes mentaux, nos comportements et notre agir collectif planétaire à la situation créée par le grand basculement du système bio-Terre.

Des approches et des développements de la pensée du complexe assez divers existent ; cela est en partie dû au fait que la pensée du complexe est souple et s'adapte à l'objet sur lequel elle se pose. Certains concepts lui sont associés. Par exemple ceux de **bifurcation**, de **boucle rétroactive** et d'**émergence**, que nous retrouverons ici à propos du système bio-Terre. Il y a aussi, et c'est le cœur de tout système complexe, les interactions qui fondent ces systèmes. Par ailleurs, des objets ou des systèmes extérieurs à un système complexe peuvent éventuellement agir sur celui-ci. Enfin, la plupart des systèmes complexes sont en évolution, le plus souvent lente, parfois cyclique, avec d'éventuels moments de rupture et de bifurcation.

Aujourd'hui, le système bio-Terre a amorcé une évolution profonde. Il est sorti de l'état d'évolution lente et approximativement cyclique du Quaternaire, pour emprunter une **bifurcation**, c'est à dire un passage allant d'un état à un autre état. Ce dernier devrait se présenter sous une nouvelle forme d'évolution lente ; mais pourrait aussi, à l'opposé, prendre la forme d'une dérive chaotique. La cause de cette bifurcation est notamment une modification de la composition chimique de l'atmosphère et un changement du Monde du vivant.

Cette bifurcation est nourrie de **boucles rétroactives**. Ainsi le réchauffement climatique global entraîne la fonte de pergélisol. Celle-ci s'accompagne de la formation de marres thermokarst où se développent des micro-organismes (archées, bactéries...) générateurs de méthane et de dioxyde de carbone. En retour, ces gaz à effet de serre se répandent dans l'atmosphère, d'où une intensification du réchauffement climatique. Et ainsi de suite. Par ailleurs, le réchauffement climatique est un facteur de développement de zones mortes dans les mers et océans où l'oxygène est absent ou peu présent et où prolifèrent les archées méthanogènes, d'où ici aussi un effet retour sur le climat. Nous avons ainsi des chaînes de causalité - changement du climat → changement du Monde du vivant → changement de l'atmosphère → intensification du changement du climat - qui constituent autant de boucles rétroactive positives.

A la source de la bifurcation en cours du système bio-Terre, se trouve un événement au sein du Monde du vivant : l'**émergence** de l'espèce humaine, dont le mode activité, inédit dans l'histoire du système bio-Terre, transforme ce système. Cette transformation ne cesse de s'accélérer, notamment depuis deux siècles, plus encore depuis le milieu du XXe siècle. La bifurcation actuelle du système bio-Terre est géologiquement fulgurante. Ce qui en émergera dans les quelques décennies à venir, qui plus est au-delà, est imprévisible.

2^e partie

L'hypothèse de l'éon Anthropozoïque

1 Éons, ères, périodes...

Les géologues découpent l'histoire de la Terre en quatre éons. L'Hadéen (issu du terme grec *Hadès*, dieux et maître des enfers), l'Archéen (commencement, origine), le Protérozoïque (premiers animaux) et le Phanérozoïque (animaux visibles). Les éons sont divisés en ères, lesquelles sont à leur tour divisées en périodes, puis celles-ci en époques, etc.

Les éons	Les événements qui les fondent
Hadéen	Naissance de la Terre 4,55 milliards d'années
Archéen	Grand bombardement tardif 4,1 milliards à 3,8 milliards d'années
Protérozoïque	Grand événement d'oxygénation 2,45 à 2,2 milliards d'années
Phanérozoïque	Explosion cambrienne 541 à 520 millions d'années

2. L'Archéen

La Terre s'est formée il y a environ 4,55 milliards d'années. Puis, de 4,1 milliards à 3,8 milliards d'années, un bouleversement au sein du système solaire propulsa vers le centre de celui-ci un très grand nombre de comètes issues de la ceinture de Kuiper (dont la distance au soleil est plusieurs dizaines de fois supérieure à celle de la Terre au soleil). La conséquence fut un gigantesque bombardement météorique de la surface de la Terre, le Grand bombardement tardif, lequel conclut le premier éon, l'Hadéen, et ouvrit l'Archéen, qui mènera jusqu'au grand événement d'oxygénation, situé de 2,45 à 2,2 milliards d'années. Tôt dans l'Archéen, vraisemblablement vers 3,5 milliards d'années (sinon avant), sont apparues les premières archées méthanogènes et les premières cyanobactéries. Les unes et les autres vivaient dans l'océan. Ce dernier couvrit quasiment l'ensemble de la planète durant les deux premiers tiers de l'Archéen, jusqu'à la formation de premiers continents, il y a 2,9 milliards d'années.

Durant les premiers temps de l'Archéen, une activité volcanique intense produisait du dioxyde de carbone en très grande quantité. Ce dernier constituait le gaz à effet de serre qui maintenait l'atmosphère et les océans à des températures nettement plus élevées que de nos jours. Il faut aussi noter la présence, en ces temps lointain, de l'oxysulfure de carbone (COS), gaz à effet de serre extrêmement puissant, lui aussi d'origine volcanique. La température de l'océan se situait au moins entre 30°C et 50°C. Puis le taux de dioxyde de carbone amorça une longue décrue, en raison d'une baisse de l'activité volcanique, à laquelle vint s'ajouter une captation du dioxyde de carbone par érosion chimique des silicates des sols continentaux. Cependant, jusqu'à la fin de l'Archéen la température terrestre resta élevée (ou quasiment toujours élevée), car le méthane produit par les archées méthanogènes avait pris le relais du dioxyde de carbone manquant.

Le premier rôle déterminant du Monde du vivant sur le climat a été joué par les archées méthanogènes. Pourtant, au même moment, dans les océans les cyanobactéries étaient déjà au travail. Mais celui-ci s'effectuait de façon silencieuse, sans effet sur le climat. En effet, l'oxygène qu'elles produisaient était pour l'essentiel capté par l'oxydation des fonds et des roches océaniques. Durant des centaines de millions d'années, elles ne fournirent de l'oxygène dans l'atmosphère que de façon locale, sans portée significative au plan global.

Dès la formation des premiers continents, il y a 2,9 milliards d'années, le système bio-Terre et ses cinq composantes étaient en place et ses dernières étaient en interaction. Le climat était déjà largement déterminé par les quatre autres composantes : au sein du **Monde du vivant**, les archées méthanogènes emplissaient une fonction importante dans un climat particulièrement chaud ; les fonds **océaniques** absorbaient l'oxygène produit par les cyanobactéries, ce qui permettait la survie des archées méthanogènes et leur influence sur le climat ; les **sols continentaux** influençaient la composition de l'**atmosphère** en captant un gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone. Réciproquement, le **climat** et ses pluies déterminaient l'intensité de l'érosion des **sols continentaux** et la captation de dioxyde de carbone de l'**atmosphère** par ceux-ci, ce qui influençait le taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et donc dans les **mers et océans** et de là l'acidité des océans (voir Annexe 2) et le **vivant**. (Ces illustrations n'ont évidemment aucun caractère d'exhaustivité).

Toutefois, le système bio-Terre était alors à un stade nettement différent de ses stades ultérieurs. Lors de chaque bifurcation de ce système, notamment dans les cas de métamorphose globale du Monde du vivant, l'état des interactions évolue fortement.

3 De l'Archéen au Protérozoïque

A la fin de l'Archéen, dès lors que le travail d'oxydation des roches et fonds océaniques fut achevé, se déclencha le Grand événement d'oxygénation, qui occasionna une métamorphose du Monde du vivant. L'oxygène généré par les cyanobactéries se répandit dans la couche supérieure de l'océan et dans l'atmosphère. Au niveau de la couche supérieure des océans, il intoxiqua mortellement la plupart des archées méthanogènes. Il s'en est suivi une forte baisse du taux de méthane dans l'atmosphère ; baisse qui fut par ailleurs accrue du fait que l'oxygène de l'air réduisit la durée de vie du méthane. En outre, l'oxysulfure de carbone, autre gaz à effet de serre, a été éliminé de l'atmosphère par l'oxygène. D'où un refroidissement global qui déboucha sur la première glaciation majeure, la glaciation huronienne.

Par ailleurs, le Grand événement d'oxygénation a ouvert la voie au développement et à la diversification de nouveaux organismes vivants, en premier lieu des eucaryotes dotés d'un système respiratoire qui capte de l'oxygène disponible dans l'air ou dans l'eau et rejette du dioxyde de carbone. Cette mutation du Monde du vivant constitue une étape majeure de l'évolution.

Le Grand événement d'oxygénation résultait du franchissement d'un seuil par l'activité d'organismes vivants : la production d'oxygène des cyanobactéries. Il eut donc pour conséquence une rupture au sein du **Monde du vivant**, l'intoxication des archées méthanogène et le déploiement des eucariotes, une chute de la présence de méthane et la disparition de l'oxysulfure de carbone dans l'**atmosphère** et un refroidissement considérable du **climat**. Ce dernier s'est accompagné d'une forte diminution des pluies, d'où un ralentissement de l'érosion des **sols continentaux**. Il s'est par ailleurs traduit par une hausse de l'albédo : des calottes glacières avaient pris place.

Un nouvel état du système bio-Terre avait pris forme. Chacune de ses composantes et les interactions entre celles-ci avaient subi des changements profonds. De nouvelles évolutions, le plus souvent relativement lentes, allaient se déployer. Le système bio-Terre était passé de l'éon Archéen à l'éon Protérozoïque.

Encadré : A la fin du Grand événement d'oxygénation, le taux d'oxygène dans l'atmosphère n'avait opéré qu'une première étape de sa progression. Il est estimé qu'il était situé entre 5 % et 18 % de sa valeur actuelle.

Encadré : Les Eucaryotes

Le Monde du vivant est classiquement divisé en six règnes. Quatre d'entre eux constituent les eucaryotes : les animaux, les végétaux, les champignons et les protistes. Deux règnes ne font pas partie des eucaryotes : les archées et les bactéries. Ils constituent les procaryotes. Les eucaryotes et les procaryotes sont parfois appelés les deux « empires du vivant ». La distinction entre les eucaryotes et les procaryotes peut reposer sur plusieurs critères, chacun suffisant ; par exemple les cellules des eucaryotes sont pourvues d'un noyau, contrairement à celles des procaryotes. La plus ancienne trace d'eucaryote, découverte par les humains, date d'il y a 2,7 milliards d'années. Il s'agissait alors d'organismes unicellulaires. Après quelques centaines de millions d'années d'existence, ils prirent leur premier essor grâce au Grand événement d'oxygénation. En effet, au sien des eucaryotes, ce dernier enclencha un mouvement de multiplication et de diversification d'espèces.

Procaryotes	Eucaryotes
Bactéries	Animaux
Archées	Végétaux (plantes et algues)
	Champignons
	Protistes

4 Du Protérozoïque au Phanérozoïque

Le Protérozoïque s'est conclu il y a 541 millions d'années par l'explosion cambrienne, que Jean Vannier, directeur de recherche au CNRS, définit en ces termesⁱⁱ : « *L'Explosion Cambrienne désigne l'apparition soudaine à l'échelle des temps géologiques d'anatomies entièrement nouvelles qui préfigurent déjà les grands groupes d'animaux actuels. Cet événement évolutif sans précédent, attesté par de nombreuses données paléontologiques et moléculaires, marque un tournant décisif dans l'évolution de la vie sur notre planète.* » S'ouvrit alors le Phanérozoïque. Cette approche des géologues et leur vocabulaire mettent l'accent sur l'évolution du monde animal : zoïque vient d'un terme grec qui signifie « de l'animal ». L'éon Protérozoïque signifie étymologiquement l'éon des premiers animaux (lesquels apparurent à la toute fin de cet éon qui dura près de deux milliards d'années). L'éon Phanérozoïque signifie étymologiquement celui des animaux visibles (par contraste avec les animaux du Protérozoïque qui étaient, sauf exceptions, de très petite taille).

Du point de vue de la pensée du complexe et du système bio-Terre, le passage entre ces deux éons ne se réalisa pas en un million d'année ni même sur le seul temps de l'explosion cambrienne, mais sur une durée de près de 200 millions d'années. Au départ il y a bien l'explosion cambrienne, de 541 millions à 520 millions d'années avant nos jours. A l'arrivée il y a la colonisation des continents par des plantes de grandes tailles ou plus exactement par des écosystèmes où plantes, animaux, champignons, bactéries et archées sont interdépendants. Cette colonisation, qui s'effectua durant la période du Dévonien (419 millions à 359 millions d'années avant nos jours) modifia profondément les échanges de carbone entre atmosphère, vivant, sols et mer, et plus généralement les interactions entre les cinq composantes du système bio-Terre. Dès lors, et durant près de 360 millions d'années, le monde du vivant a conservé une forme générale relativement stable, organisée selon des lois d'équilibres naturelles, au sein et entre des écosystèmes qui intègrent des virus, des organismes unicellulaires, des champignons, des végétaux et des animaux. Certes, des évolutions du vivant se poursuivirent et il y eut plusieurs extinctions massives, mais cela ne se traduisit guère par des bifurcations de premier ordre du monde du vivant et du système bio-Terre, c'est-à-dire par des changements d'éon, mais au plus par des bifurcations entre des ères géologiques.

Éon du Phanérozoïque		
Nouvelle classification	Ancienne classification	Débuts
Ère du Paléozoïque (anciens animaux)	Ère primaire	541 millions d'années
Ère du Mésozoïque (animaux intermédiaires)	Ère secondaire	252,2 millions d'années
Ère du Cénozoïque (nouveaux animaux)	Ères tertiaire et quaternaire	66 millions d'années

L'ère du Cénozoïque est réunion des ères tertiaire et quaternaire de l'ancienne classification. Selon l'ancienne classification, l'ère tertiaire s'arrêtait il y a 2,6 millions d'années, date où s'ouvrait l'ère quaternaire. Dans la nouvelle classification, le Quaternaire s'ouvre toujours il y a 2,6 millions d'années, mais c'est maintenant une période, la dernière et troisième période du Cénozoïque.

Encadré. Le Dévonien

Situé entre 419 millions et 358,9 millions d'années avant nos jours, la période du Dévonien a connu un événement majeur, la colonisation des continents par les plantes vasculaires - c'est-à-dire les plantes qui possèdent racines, vaisseaux et sèves, notamment des fougères et des arbres dont les premiers spécimens apparurent au début du Dévonien ; mais aussi par des animaux dont la diversité était issue de l'explosion cambrienne ; et finalement par des écosystèmes d'un genre nouveau et d'une complexité inédite. Cette colonisation - précédée de celles par diverses espèces vivantes telles que des bactéries, des lichens, etc. - se fit progressivement. En ce qui concerne les plantes, il y eut tout d'abord des plantes de petite taille, puis des fougères géantes et enfin des arbres. Les effets furent majeurs sur la composition de l'atmosphère, sur l'érosion des sols et sur le climat, et par conséquent sur les océans (les cours d'eau emportent à la mer une part importante de la matière issues de l'érosion des sols ; tout changement climatique se traduit par un changement de la température des océans et des modifications de courants marins ; la baisse du taux de CO₂ de l'atmosphère se traduit par une réduction de l'acidité des mers...). Sur le climat, deux effets opposés s'exprimèrent. Le premier, une chute du taux de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. En effet, en se développant le tapis végétal consomme du CO₂ pour se nourrir de son carbone et, de plus, favorise une érosion chimique des roches qui elle aussi consomme du CO₂. Durant le Dévonien, en approximativement 60 millions d'années, le taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a été divisé par trois. Il est tombé de 3000ppm à 1000ppm⁴. Une forte baisse des températures aurait donc dû se produire à la surface de la Terre. Ce serait sans compter sur le second effet sur le climat de la colonisation des continents : le développement de la végétation a progressivement changé l'albédo. Au début du Dévonien, les continents avaient la couleur claire d'un sol désertique, qui réfléchit 30 % du rayonnement lumineuxⁱⁱⁱ. A la fin, ils avaient la couleur foncée d'une couverture forestière, qui ne réfléchit que 10 % du rayonnement lumineux^{iv}. Il a ainsi été mis un terme à un important albédo. Finalement, hormis durant quelques événements climatiques relativement bref, la période du Dévonien a connu un climat plutôt stable. La diminution du taux de dioxyde de carbone (refroidissement) a été compensée par une plus grande absorption de l'énergie solaire par la surface des continents (réchauffement). Puis la fin du Dévonien a été provoquée par le ralentissement du changement de couleur des sols, alors que le tapis végétal continuait à nettement s'étoffer. Si bien que la réflexion de la lumière ne diminuait plus que lentement,

4. ppm : parties par million, en nombre de molécules. Un taux de dioxyde de carbone de 3000ppm signifie que parmi un million de molécules d'air sec (les molécules de vapeur d'eau ne sont pas prises en compte) se trouvent 3000 molécules de dioxyde de carbone.

pendant que les forêts pompaient toujours abondamment le dioxyde de carbone de l'atmosphère. Le facteur de réchauffement s'effaçait nettement devant le facteur de refroidissement. Il s'en est suivi un refroidissement climatique global.

Chacune de ces multiples interactions étaient inédites, elles ouvrirent un nouveau stade du système bio-Terre, un nouvel éon.

5 Du Phanérozoïque à l'Anthropozoïque ?

5.1 Les bifurcations entre éons depuis la naissance de la Terre

Éon, ère, période, époque... ont été conçus par les géologues, sur la base de la stratigraphie. Nous sommes là dans le champ d'une discipline scientifique. La pensée du complexe se nourrit de la production de disciplines scientifiques, mais ne se réduit pas à l'une d'entre elles, ni à la simple juxtaposition de celles-ci. Appliquée au système bio-Terre, elle engendre une approche de l'histoire de la Terre où les passages d'un éon à un autre, d'une ère à une autre, d'une période à une autre ou d'une époque à une autre, correspondent à des bifurcations de ce système, et ne sont pas fondées sur les seules données issues de la géologie et de la stratigraphie. Ces bifurcations sont plus ou moins importantes et chacune ouvre un état inédit du système bio-Terre. Les plus conséquentes consacrent les passages entre éons et correspondent à un changement profond et durable du Monde du vivant, « *marque un tournant décisif dans l'évolution de la vie sur notre planète* »⁵.

Le Grand bombardement tardif marqua le passage du premier éon, l'Hadéen, au deuxième éon, l'Archéen. Un monde vivant était-il apparu sur Terre durant l'Hadéen ? Cette question reste à ce jour sans réponse partagée par l'ensemble de la communauté scientifique. Cependant, dans l'hypothèse de la présence du vivant à la fin de l'Hadéen, le Grand bombardement tardif l'aurait très certainement anéanti. Puis, durant l'Archéen des populations d'organismes unicellulaires ont émergé, se sont développées et ont constitué un monde du vivant inédit. Un monde du vivant dont l'évolution ne connaîtra pas d'interruption et se poursuit de nos jours.

Le Grand événement d'oxygénation marqua le passage entre le deuxième éon, l'Archéen, et le troisième, le Protérozoïque. Il entraîna l'intoxication d'une large part du vivant et, surtout, il ouvrit la possibilité du développement d'organismes dotés d'un système respiratoire et consommateurs d'oxygène.

Enfin, l'explosion cambrienne ouvrit le passage entre l'éon Protérozoïque et l'éon Phanérozoïque. Elle donna lieu au développement de grands groupes d'animaux qui préfiguraient ceux que nous connaissons aujourd'hui, et précédèrent la colonisation des continents par des écosystèmes comprenant une nouvelle émergence, les plantes vasculaires. Colonisation qui vint achever l'entrée dans le Phanérozoïque. Chaque éon constitue un chapitre de l'histoire du Monde du vivant où de nouveaux organismes émergent, s'implantent, impactent l'ensemble du Monde du vivant, jouent durablement un rôle central au sein de celui-ci et modifient de façon profonde le système bio-Terre.

5. Propos de Jean Vannier, directeur de recherche au CNRS, au sujet de l'Explosion cambrienne. Confer bibliographie

5.2 L'hypothèse de l'éon Anthropozoïque

Au sein de l'Union internationale des sciences géologiques (UISG), depuis 2012 la Commission internationale de stratigraphie étudie la proposition de reconnaître l'entrée dans une nouvelle époque géologique, l'Anthropocène. Cela fait débat. Une controverse est ouverte au sein de la discipline de la géologie. Du point de vue de la complexité, par contre, selon nous la question n'appelle pas débat : le système bio-Terre entre dans une nouvelle époque. Il entre même dans une nouvelle période et une nouvelle ère, nous y reviendrons. La seule interrogation nous semble être : le système bio-terre est-il au commencement d'un nouvel éon ? Autrement dit, l'apparition de l'espèce humaine marque-t-elle « *un tournant décisif dans l'évolution de la vie sur notre planète* » qui se traduit par une modification profonde et durable du Monde du vivant et une bifurcation majeure du système bio-Terre ? Répondre à cette interrogation serait prématuré. En effet, à ce jour les connaissances scientifiques laissent ouverts différents scénarios, dont notamment trois que abordons brièvement :

- L'humanité pourrait finalement n'avoir qu'une existence éphémère, et disparaître au cours de la bifurcation du système bio-Terre qu'elle a elle-même enclenchée. Cette bifurcation pourrait alors déboucher sur une nouvelle ère (sans changement d'éon) où des écosystèmes, ne présentant pas de rupture significative avec les écosystèmes qui se succèdent depuis les débuts de l'éon Phanérozoïque, couvriraient à nouveau quasiment l'ensemble de la planète.

- Une bifurcation du système bio-Terre durant laquelle l'espèce humaine se serait éteinte pourrait tout aussi bien atteindre une ampleur de premier ordre et déboucher sur un Monde du vivant profondément et durablement nouveau. Un nouvel éon, post-humain, serait alors ouvert.

- Un tout autre scénario est celui d'un nouvel éon où l'humanité perdurerait avec une population nombreuse, marquerait un tournant décisif dans l'évolution de la vie et jouerait un rôle central tout au long du nouvel éon qu'elle aurait ouvert. Dès aujourd'hui, le Monde du vivant n'est plus organisés en écosystème couvrant librement les surfaces terrestres. Tout d'abord, des animaux et des végétaux sont de plus en plus massivement sortis des écosystèmes pour être soumis à l'humanité. Ensuite, les écosystèmes ont accès à des surfaces de plus en plus restreintes, l'Homme s'étant appropriés environ la moitié des surfaces continentales. Enfin, les écosystèmes sont soumis à des contraintes inédites : extinction sinon réduction des populations des prédateurs du haut de la chaîne alimentaire ; pollutions diverses...

Dans le cas où cette hypothèse d'un nouvel éon se confirmerait, conformément au vocabulaire actuel de la classification des temps géologiques, centrée sur les animaux, il conviendrait de parler de l'éon Anthropozoïque⁶ (celui des animaux humains), à la suite des éons Phanérozoïque (celui des animaux visibles) et Protérozoïque (celui des premiers animaux). L'Anthropocène (terme issu des mots grecs « anthropos », être humain, et « kainos », récent) en constituerait alors la première ère.

6 Le terme Anthropozoïque n'est pas un néologisme. Introduit en 1873 par le géologue italien Antonio Stoppani, il est aujourd'hui très peu utilisé et nomme la période du quaternaire.

5.3 L'ère de l'Anthropocène

Durant les derniers douze milles ans, chacune des cinq composantes du système bio-Terre a été modifiée du fait des activités humaines ; certaines - le vivant et les sols continentaux - profondément. Ces modifications se poursuivent et s'accroissent de façon exponentielle. Le tout interagit de plus en plus intensément. Le système bio-Terre entre dans l'ère de l'Anthropocène.

Le vivant subit une extinction massive, de plus en plus rapide, et les territoires de l'ensemble des espèces sont bouleversés. **Les sols continentaux** ont été largement remodelés (déforestation, agriculture, urbanisation...), le phénomène s'accroît. L'évolution de **la composition de l'atmosphère** présente une rupture. Tout au long des 66 millions d'années du Cénozoïque (ère qui précède l'Anthropocène), le taux de CO₂ poursuivait une tendance longue et lente à la baisse (avec des fluctuations de faible amplitude) ; il subit aujourd'hui un mouvement à la hausse, fulgurant sur l'échelle des temps géologiques. **Les océans** sont soumis à de fortes perturbations : acidification, zones mortes, pollutions diverses... Enfin, **le climat** amorce un réchauffement global particulièrement rapide.

L'Holocène

L'humanité a progressivement bouleversé le système bio-Terre dès l'émergence de la pratique de l'agriculture (élevage et culture) suivie de l'apparition des villes. Une transformation du Monde du vivant a été amorcée (déforestation, plantations agricoles, extinction d'espèces, domestication d'animaux, perturbation d'écosystèmes). Des cours d'eau ont été modifiés. Des carrières de pierre ont été exploitées. Le climat global, déjà, était impacté. Si bien que l'Holocène, qui a débuté il y a 11 700 ans, s'avère être la première époque de l'éon Anthropozoïque, celle de l'émergence d'une transformation profonde et durable du système bio-Terre. Nous pouvons mettre en débat le moment de sa fin : la révolution industrielle ?

5.4 Une nouvelle composante du vivant

L'hypothèse de l'éon Anthropozoïque est celle d'une humanité, nouvelle et singulière composante du vivant, qui modifie profondément et de façon irréversible le Monde du vivant et l'ensemble du système bio-Terre. Il faut ici préciser ce en quoi cet acteur est singulier et nouveau.

Tout d'abord, l'espèce humaine est la seule espèce vivante qui présente certains caractères d'une société planétaire unique (cela depuis quelques siècles et tout en conservant une certaine diversité en son sein). Aucune espèce n'a développé une vie sociale qui présente un mode et un niveau d'échanges, d'interactions et d'interdépendances entre l'ensemble des individus qui la compose, semblables à ceux des humains. Une caractéristique essentielle de ce système social global est sa dynamique d'évolution et d'accumulation/assimilation/destruction (matérielle et immatérielle). Aussi, chaque membre de cette espèce, de cette société, chaque être humain est potentiellement capable de se représenter l'ensemble des humains, d'avoir conscience des périls qu'ils ont à affronter en commun et de se mobiliser pour et avec l'humanité. Enfin, l'espèce humaine possède une créativité, une capacité d'adaptation et une puissance d'action sur le système bio-Terre inédites.

5.5 Fulgurance

Les bifurcations d'une ère à une autre ou d'un éon à un autre sont des processus. Jusqu'à l'émergence de l'humanité, celles d'une ère à une autre se déroulaient au minimum sur des dizaines de milliers d'années, souvent bien davantage. Celles d'un éon à un autre, sur environ 200 millions d'années. Qu'en sera-t-il cette fois-ci ? Le passage vers l'éon Anthropozoïque débuta avec la naissance de l'agriculture, il y a 12 mille ans. Puis la révolution industrielle a ouvert une série d'accélération. Enfin, depuis le milieu du XXe siècle les changements sont fulgurants. La précipitation de l'histoire du système bio-Terre se traduit par une réduction extrême des temps géologiques.

5.6 Irréversibilité

Jusqu'à ce jour, l'humanité a utilisé sa puissance et sa créativité de façon largement aveugle et désorganisée. Dans le même temps, ses quatre caractéristiques citées précédemment (société planétaire, créativité, capacité d'adaptation, puissance) permettent un espoir, celui d'une mobilisation collective planétaire capable de relever les défis de la bifurcation du système bio-Terre et plus largement l'ensemble des défis globaux.

Cependant, il ne pourra s'agir de retrouver ni de reconstruire l'état du système bio-Terre de l'ère Quaternaire. La transformation du système bio-Terre opérée depuis 12 000 ans est largement irréversible. La question posée à l'humanité ne peut donc être celle d'un retour vers le passé. A l'opposé, se présente à elle la nécessité de se projeter vers un avenir inédit et se mobiliser afin que l'issue de la bifurcation en cours du système bio-Terre offre les conditions de la survie de l'espèce humaine et celles du bien-vivre et de l'épanouissement de l'ensemble de ses populations. Corrélativement, l'humanité est face à la nécessité de se transformer et de repenser sa place au sein du système bio-Terre.

3^e partie

Libérer la complexité

Les Homo sapiens sont apparus et se sont déployés dans le contexte du Quaternaire. Que sera leur devenir alors que la bifurcation en cours du système bio-Terre rompt ce contexte ? Ils auraient tort de surestimer leurs facultés et sous-estimer leur fragilité. La bifurcation du système bio-Terre pourrait s'emballer et finalement occasionner la disparition de la plus grande part de l'humanité et le repli des survivants dans les zones les moins inhabitables. Un autre scénario pourrait être le refuge de l'humanité sous des bulles hermétiques géantes, en raison d'un environnement devenu mortellement toxique (par exemple en raison d'un excès d'oxygène dans l'atmosphère ou au contraire d'un manque d'oxygène) ou d'un Monde du vivant devenu hostile. D'autres scénarios de survie de l'humanité à un emballement de la bifurcation en cours peuvent être envisager. Au-delà, la disparition de tout humain de la surface terrestre n'est pas à exclure. Plus de 99 % des espèces vivantes apparues sur Terre depuis 3,8 milliards d'années ont disparu. Le sort des Dinosaures, anéantis il y a 66 millions d'années, n'a rien d'exceptionnel. Le monde d'aujourd'hui prépare-t-il la fin de l'espèce humaine ? Le système bio-Terre est des plus complexes. Son histoire montre que dès lors qu'il est déstabilisé par une évolution majeure issue du Monde du vivant, ce qui prévaut, c'est l'inédit et l'imprévisible.

Au sein du système bio-Terre, l'humanité elle même est d'une extrême complexité, sujette à l'inédit et l'imprévisible. Une métamorphose ou bifurcation dont elle est aujourd'hui l'objet s'accélère, ouvre le champ des possibles. L'hypothèse selon laquelle l'humanité parviendrait finalement à agir efficacement sur le système bio-Terre avec l'humilité, la lucidité et la détermination nécessaires n'est pas à exclure.

Géo-ingénierie

Le dos au mur, l'humanité doit agir sur le devenir du système bio-Terre. Mais avec humilité et lucidité. Dans l'immédiat, il lui faut réduire les perturbations du système bio-Terre occasionnées par les activités humaines. A l'opposé de cette nécessité, et dans une totale absence d'humilité et de lucidité, des promoteurs de projets de géo-ingénierie visent une modification de la composition chimique de l'atmosphère ou des océans à coups de diffusions massives de produits chimiques. Or, personne n'est en capacité de connaître la réaction du Monde du vivant et plus largement la réaction du système bio-Terre que cela engendrerait. Cette fuite en avant favoriserait les basculements les plus imprévisibles. Les conséquences sur l'espèce humaine seraient tout aussi imprévisibles.

La promotion de tels projets s'inscrit dans un moment où l'humanité se soumet aveuglement à une succession de plus en plus rapide d'innovations technologiques.

Obscurantisme scientifique

Tout aussi redoutable, une atrophie de la pensée, en raison d'un repli sur une certaine connaissance scientifique voire pseudo scientifique, laisse dans l'ombre la complexité et les dimensions imprévisibles des émergences et bifurcations, que ce soient celles du système bio-Terre ou celles de l'humanité. Il s'en suit un aveuglement et une perte de lucidité qui nous amène à parler d'obscurantisme scientifique.

Ainsi, les écosystèmes complexes des océans, négligés par les promoteurs de la géo-ingénierie, le sont tout autant par les scénarios pour le XXI^e siècle publiés dans le V^e rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2013-2014). Or il est vraisemblable que les bouleversements de ces écosystèmes impacteront le climat, possiblement fortement, hormis peut-être si était rapidement mis fin aux émissions de gaz à effet de serre et plus généralement aux perturbations anthropiques des océans.

Quant à la complexité humaine, bien que présente et déterminante dans chaque individu, tout comme au niveau des groupes sociaux et jusqu'à l'échelle de l'humanité, elle est étrangement absente de nombreuses études à prétention scientifique.

Plus largement, l'obscurantisme scientifique a déposé son voile sur les esprits. Aujourd'hui, il accroît son emprise sur l'humanité par une quantification et une mathématisation de plus en plus envahissante du non quantifiable. Les savoirs, les rapports sociaux et les activités humaines en sont affectés. Ainsi, une quantification – sous la forme d'objectifs chiffrés et d'évaluations chiffrées – participe à une déshumanisation du travail (perte de valeurs et de sens), que ce soit celui des fonctionnaires, des agents des services publics ou d'un grand nombre de salariés d'entreprises privées. Cette quantification est de plus utilisée pour une implication intégrale dans le travail, une soumission de la personne physique, mentale et morale du travailleur, dans le cadre d'une large autonomie accordée pour atteindre des objectifs chiffrés^v.

Lever le voile obscurantiste et laisser libre cours à la complexité humaine est une clé pour parvenir à relever les défis que pose la complexité de la bifurcation empruntée par le système bio-Terre. Par contre, toute démarche qui viserait à diffuser auprès des populations humaines une connaissance de la complexité de cette bifurcation, de son imprévisibilité, son irréversibilité et des menaces qu'elle présente pour l'humanité, sans dans le même temps diffuser une représentation de l'humanité qui prend en compte la complexité de cette dernière, son imprévisibilité et sa puissante capacité de changement et de bifurcation, serait une démarche périlleuse, susceptible de précipiter l'humanité dans l'angoisse et finalement dans la paralysie inhérente à la croyance en la théorie de l'effondrement.

XXe siècle, l'humanité entre en bifurcation

Depuis son apparition, il y a au moins 315 mille ans^{vi}, l'homo-sapiens évolue, culturellement, socialement et physiquement. Durant le XXe siècle, cette évolution a été singulièrement importante et rapide. Grâce à la médecine et à une évolution des modes et conditions de vie, la mortalité infantile a fortement baissé, plus généralement la durée de vie s'est allongée et les douleurs

physiques ont été atténuées et ont perdu leur caractère de quasi-omniprésence. Toutefois, il faut noter, sur chacun de ces points, de fortes inégalités entre les pays riches et dominants et le reste de l'humanité. A l'opposé de ces progrès, auxquels s'ajoute notamment la progression de l'alphabétisation, il y a l'horreur et le traumatisme de la seconde guerre mondiale avec ses camps d'extermination et le largage d'une bombe atomique sur Hiroshima puis sur Nagasaki. Il y a de plus la violence et l'échec du soviétisme. Il faut aussi noter, évitant toute évaluation, positive ou négative :

- le passage d'une humanité essentiellement rurale et agricole à une humanité majoritairement urbaine ;
- une première révolution de la communication et de l'information (radio, télévision, téléphone) et le déploiement massif des transports (automobile, avion...) ;
- la photographie, qui, dans la mesure de l'accès effectif à celle-ci, modifie le rapport que chaque humain entretient avec sa propre histoire, avec lui-même et avec ses proches ;
- le cinéma et la musique enregistrée ;
- l'éclairage électrique, qui modifie le nature profonde de la nuit ;
- la machine à laver ;
- la pilule et, dans de nombreux pays, la légalisation et la médicalisation de l'Interruption volontaire de grossesse (IVG).

En outre, l'individualisme, la société de consommation et dans une certaine mesure celle des loisirs, se sont répandus dans les pays les plus riches et au sein d'une classe minoritaire dans les autres pays. Il faut aussi considérer les transformations des structures sociales, économiques et géopolitiques. La liste des changements n'est ici pas exhaustive.

Finalement, durant le XXe siècle les sociétés et les cultures, les rapports de genre et la sexualité, les rapports au corps, à la mort, au religieux, à l'espace et au temps, au passé et au futur, à la vie, à la nuit et au jour, à l'humanité prise dans son ensemble et dans sa diversité... ont été l'objet d'une profonde transformation.

Accélération

En ce début du XXIe siècle, cette métamorphose s'accélère. La seconde moitié du XXe siècle a vu l'émergence des outils numériques. Depuis lors, ceux-ci évoluent constamment, sont de plus en plus puissants et ouvrent la voie à des modes inédits de communication et de socialisation, d'influence, de domination et de totalitarisme ou au contraire d'émancipation et de démocratie... En ce début de XXIe siècle l'impact est devenu considérable. Demain il sera colossal. Sur les individus, leurs rapports au temps, aux autres, à la connaissance, sur la vie intérieure et les conditions de la pensée... Sur l'organisation du travail et plus largement sur l'ensemble des aspects de la vie en société. D'autant que ces outils numériques interagissent avec d'autres révolution technologiques, telles que celle des nanotechnologies, cela dans le contexte de prise de conscience – certes aujourd'hui encore confuse – de la bifurcation du système bio-Terre et de la menace post-humaniste, le tout avec en toile de fond le déclin de la domination de l'Occident. Le système hyper complexe que constitue l'humanité est entré en bifurcation. Le devenir de celle-ci est largement imprévisible. Personne n'est en capacité de savoir quelles en seront les futures émergences et ce que

deviendra l'humanité. Tout ira très vite. Dans cinquante ans, l'humanité aura emprunté des voies inimaginées aujourd'hui.

La force du sens

La bifurcation du système bio-Terre provoquée par l'humanité pourrait être dramatique pour celle-ci, voire lui être fatale. Une mobilisation générale, planétaire et durable est indispensable. Son caractère d'urgence s'accroît. Nous entrons dans une période historique où un engagement individuel et collectif porteur de sens se présente à l'ensemble des humains : relever les défis planétaires et, pour ce faire, opérer une transformation de l'humanité, de ses relations avec le système bio-Terre, des relations en son sein, de ses activités, de ses modes de vie et de pensée... En particulier, il s'agit d'ériger un nouveau groupe d'appartenance pour les être humains, un groupe global, planétaire, à côté des groupes d'appartenance préexistants : familles, réseaux divers, nations... Un groupe uni, organisé et conscient de lui-même, de sa puissance et de sa fragilité, mobilisé pour la pérennité d'un système bio-Terre hospitalier, pour le bien vivre et l'épanouissement durables de toutes ses populations.

Cette profonde transformation de l'humanité inclura nécessairement une transformation des femmes et des hommes qui la composent. Chaque être humain est complexe. Chaque être humain est susceptible de bifurcations majeures, dès lors que le contexte dans lequel il se situe et que les contraintes qui s'exercent sur lui se modifient. L'aventure de toute vie humaine est imprévisible, tout comme celle de l'humanité. Face aux périls inédits des temps présents, chaque être humain est appelé à s'engager, à écrire sa propre histoire et à contribuer à celle, collective, de l'humanité.

Fin

Annexe 1. Les paramètres de Milankovitch

1 L'excentricité

La Terre effectue le tour du soleil en un an selon une orbite en forme d'ellipse. Mais une ellipse qui varie tout en restant constamment presque circulaire. Il arrive même qu'elle soit circulaire. Le premier des paramètres orbitaux de la Terre, appelé excentricité, mesure la proximité de l'orbite de la terre avec un cercle. L'excentricité d'une ellipse est un nombre situé entre 0 et 1. Si elle est égale à zéro, alors l'ellipse est un cercle. L'excentricité de l'orbite de la Terre varie au cours des temps entre 0 et 0,06. Sa valeur actuelle est de 0,016. Il est heureux que cette excentricité soit constamment très faible. Avec une excentricité élevée, la quantité d'énergie solaire reçue par la Terre varierait fortement au cours d'une même année, au détriment de la vie.

2 L'obliquité

Le second paramètre orbital de la Terre est l'obliquité. C'est un angle. L'orbite de la Terre est située dans un plan, appelé le plan orbital. La Terre possède un axe, c'est la droite autour de laquelle elle tourne chaque jour. Cet axe rejoint les deux pôles. L'obliquité est l'angle entre l'axe de la Terre et une perpendiculaire au plan orbital de la Terre. Si l'axe de la Terre était perpendiculaire au plan orbital de la Terre, alors l'obliquité serait de 0° . L'obliquité de la Terre varie, mais peu. Elle reste constamment située entre 22° et $24,5^\circ$. L'obliquité est la cause des saisons alternée entre hémisphère Nord et hémisphère Sud. Si l'obliquité était nulle, les cycles météorologiques annuels ne dépendraient que de l'excentricité et ne différencieraient pas le Nord et le Sud.

3 La précession

L'orbite de la Terre autour du soleil est une ellipse dont l'un des deux foyers est le soleil, si bien que selon la période de l'année la Terre est plus ou moins proche du soleil. En ce XXI^e siècle, la Terre est au plus proche du soleil (périhélie) au début du mois de janvier. Elle passe par son point le plus éloigné (aphélie) début juillet.

La place du périhélie sur le calendrier varie le long d'un cycle d'une durée située entre 19 000 et 23 000 ans. Dans dix mille ans, le périhélie devrait se situer vers le début du mois de juillet, et non plus début janvier. Les variations de cette position sur le calendrier influencent le climat terrestre. Ainsi, et c'est le cas depuis plus de mille ans, les hivers et les étés de l'hémisphère nord sont atténués par cette influence, puisque durant l'hiver du Nord, la Terre est plus proche du soleil et durant l'été du Nord elle est plus éloignée. Tandis que dans l'hémisphère sud, c'est le contraire, les saisons sont accentuées.

La position du périhélie sur le calendrier dépend du troisième paramètre de Milankovitch, appelé la précession ou précession des équinoxes. L'axe de la Terre tourne autour d'un cône, dont l'axe est perpendiculaire au plan orbital de la Terre, sur une durée qui varie entre 19 000 et 23 000 ans. La précession indique la position de l'axe de la Terre sur ce cône.

Annexe 2. L'acidification des océans

Entre les océans et l'atmosphère s'effectuent des échanges de dioxyde de carbone (CO_2). De nos jours, une partie des rejets anthropiques de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est ainsi absorbée par les océans. Par ailleurs, la présence de CO_2 dans l'eau de mer s'accompagne de la présence d'acide carbonique H_2CO_3 . Plus précisément, la plupart des molécules de CO_2 restent stable dans l'eau, tandis qu'une faible part d'entre elles fusionnent avec une molécule d'eau (H_2O) et donne une molécule d'acide carbonique (H_2CO_3). D'où, de nos jours et en raison d'une augmentation du taux de dioxyde de carbone, une acidification des mers et océans qui agresse certaines espèces vivantes, dont les coraux, modifie la croissance de certaines espèces de poissons, etc., et impacte les écosystèmes marins.

Annexe 3. Point sur la bifurcation en ce début de XXI^e siècle

Une part de la bifurcation actuelle du système bio-Terre est connue. Cependant, aussi et surtout, il y a la part inconnue. Ainsi, depuis son apparition sur Terre, le vivant est en évolution permanente, irréversible et imprévisible. Aujourd'hui, son futur est largement inaccessible à la connaissance humaine. De plus, des domaines du vivant actuel restent peu cernés par les sciences, en particulier le vivant marin.

Dioxyde de carbone et climat

Au cours du dernier million d'année, le taux de dioxyde de carbone variait entre 180 et 300 parties par million (ppm). Il est aujourd'hui, en 2020, supérieur à 400ppm. Durant les cent dernières années, il a fait un bond de plus de 100ppm. La situation est encore plus marquée pour le méthane. Au cours du dernier million d'années, le taux de méthane dans l'atmosphère variait entre 0,4 et 0,7ppm. Il est aujourd'hui aux environs de 1,9ppm. Quant à la température à proximité de la surface terrestre, elle a progressé d'environ 1°C en un siècle. Pour l'essentiel, l'augmentation de ces trois paramètres s'est produite durant les quatre dernières décennies. Ainsi, depuis 1974 le taux de CO₂ a effectué un bond d'au moins 70ppm. Sa progression ne cesse de s'accélérer. Depuis le début du XXI^e siècle, elle dépasse en moyenne les 2ppm par an, et depuis 2011 les 2,5ppm. Soit un rythme fulgurant de 250ppm par siècle. Quant à la température terrestre, le record de sa moyenne annuelle (établie depuis l'année 1860) a été battu durant trois années consécutives, 2014, 2015 et 2016 ; puis les années 2017, 2018 et 2019 ont toutes connu une température moyenne supérieure à celle de 2014.

Cependant, la question du climat - indissociable de celle du système bio-Terre - est extrêmement complexe et ne peut être cernée par ces trois indicateurs : taux de dioxyde de carbone, taux de méthane, température moyenne à proximité de la surface terrestre. Nous y reviendrons.

Les forêts dévastées

Les forêts constituent le territoire de nombreuses espèces de chacun des six genres du vivant : animaux, plantes, champignons, bactéries, archées, protistes. Depuis 2500 ans, une large part d'entre elles a été détruite pour l'agriculture, l'exploitation du bois (chauffage, énergie, papier, bâtiment...), l'urbanisation, l'industrialisation et les réseaux de transports. Quant à celles qui n'ont pas été détruites, le plus souvent leur écosystème a été perturbé et appauvri par la chasse, par les pollutions de l'air ou de l'eau, par des espèces invasives ou des épidémies. Au XX^e siècle en Europe, le champignon microscopique *Ophiostoma ulmi (sensu lato)* a occasionné la quasi disparition des ormes. En ce début de XXI^e siècle, toujours en Europe, depuis 2008 le *Chalara fraxinea*, champignon microscopique d'Asie introduit par négligence humaine, se propage et décime la population des frênes. De nos jours, une perturbation supplémentaire - le réchauffement climatique - aggrave encore et toujours plus la situation des forêts. Dans l'hémisphère Nord, La multiplication et l'ampleur des incendies dont elles sont la proie en constituent la face la plus visible.

Biodiversité

L'effondrement en cours de la biodiversité est couramment qualifiée de « sixième grande extinction massive ». La focale est mise sur la disparition de nombreuses espèces vivantes et sur la perte que cela représente pour l'humanité en termes de « services écosystémiques ». Dans tous les domaines, le Monde du vivant met à la disposition des humains des richesses inestimables : médecine et pharmacopée, agriculture, assainissement de l'air et de l'eau, travaux de recherche basé sur le mimétisme d'organismes vivants.... Aujourd'hui, l'extinction massive et extrêmement rapide d'espèces vivantes a pour conséquence une réduction tout aussi massive et rapide de ces richesses. Cependant, le bouleversement du Monde du vivant provoquée par l'humanité n'est pas seulement une question d'extinction d'espèces vivantes et de perte de richesse. En effet, l'histoire de la Terre montre que les grands basculements du Monde du vivant présentent deux faces : ce qui disparaît, mais aussi ce qui apparaît. Le nouveau, l'inédit en constitue un aspect essentiel. Ce nouveau, cet inédit est, au demeurant, largement imprévisible. L'apparition ou le développement d'organismes vivants et d'écosystèmes néfastes au bien être de l'humanité, voire menaçant la survie de l'espèce humaine, pourrait demain devenir le principal enjeu du bouleversement actuel du Monde du vivant. D'où la nécessité de changer le point de vue et de porter l'attention principale sur ce qui émergera durant ce bouleversement, et non sur ce qui disparaîtra : ce qui renvoie à la part inconnue de la bifurcation actuelle du système bio-Terre.

Nitrates

Une multitudes de déchets - issus de l'agriculture, de l'industrie, des transports et des villes - dont la toxicité est reconnue ou suspectée, sont présents dans les moindres recoins de la planète et diffusés au sein même du vivant. Parmi ceux-ci, citons les nitrates, les pesticides, les hormones, les perturbateurs endocriniens, les microparticules de plastique, les nano-particules.

Les nitrates sont particulièrement présents dans les cours d'eau et dans de nombreuses zones maritimes plus ou moins proches des côtes. Ils sont en outre désormais présents dans les grands réservoirs d'eaux douces souterraines de la planète^{vii}. Le plus souvent, la pollution de ces réservoirs dépasse le seuil fixé par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), 50 milligramme de nitrate par litre. Au-delà, selon l'OMS, l'eau n'est plus considérée comme potable. Certes, une réduction de la présence de nitrates sous ce seuil est de plus en plus souvent réalisée avant la mise en circulation de l'eau dans les canalisations qui alimentent les habitations humaines. Par contre, l'ensemble du vivant ne bénéficie pas de cette précaution. Si bien que la pollution par ce produit toxique se diffuse au sein du vivant. Elle est responsable de la mort d'animaux et de leur disparition de nombreux cours d'eau. Elle occasionne aussi des déformations physiques d'animaux ou/et des freins à leur développement. Elle est enfin responsable de phénomènes d'eutrophisation, c'est à dire d'un excès de nutriment dans des zones fluviales ou maritimes, avec pour conséquence une invasion d'algues, d'où la naissance de zones mortes et le développement d'archée méthanogènes qui contribuent aux réchauffement climatique.

L'humanité possède les moyens de remédier à cette situation. Ainsi, l'agriculture biologique n'utilise et ne rejette pas de nitrate, or sa généralisation est possible. De plus, cette généralisation est possible tout en améliorant notablement et durablement l'alimentation de l'humanité et en

réduisant d'autres pollutions. Dès l'année 2007, cela était montré dans une étude de la FAO (Organisation des Nations-unies sur l'agriculture et l'alimentation)^{viii}.

Perturbateurs endocriniens

Les perturbateurs endocriniens, responsables de dysfonctionnements du système hormonal, sont disséminés par les humains (intrants agricoles, produits pharmaceutiques...) et présents partout dans le système bio-Terre : les eaux (eaux douces et eaux de mer), l'atmosphère, les sols et le vivant. Pour des organismes complexes tels que les poissons ou les mammifères (dont les humains), cette dissémination peut être particulièrement conséquente. Au sein de populations animales diverses, elle est responsable de la féminisation de mâles, de retards de développement (y compris intellectuel chez les humains) et d'une augmentation de la stérilité.

Ici aussi, la généralisation d'une agriculture de type biologique, qui n'utilise pas de pesticide chimique, constituerait une part conséquente de la solution.

Microparticules de plastique

Transportées jusqu'à la mer par les cours d'eau ou issues de la désagrégation en mer d'objets, notamment de sacs, les microparticules de plastique seraient présentes dans 88 % des eaux de surface des océans^{ix}. Elles entrent dans la chaîne alimentaire et sont présentes dans les écosystèmes et les fonds océaniques. En ce qui concerne leur impact sur le vivant en général et sur la santé humaine en particulier, peu d'études ont été menées. Il s'agit d'un sujet de recherche quasiment vierge. L'usage des plastiques est apparu durant les années 1950. Depuis il n'a cessé de s'amplifier et de s'étendre à toujours plus d'objets de consommation. Ces dernières décennies, il a pris une dimension titanesque. A l'échelle mondiale, il poursuit une croissance exponentielle qui accompagne la diffusion de la société de consommation. L'usure des pneus (en caoutchouc de synthèse) sur les routes et le lavage des vêtements (synthétique ou contenant des composés synthétiques) sont deux sources substantielles de microparticules de plastiques présentes dans les océans^x. Au final, les conséquences sur de nombreuses espèces et sur les écosystèmes pourraient être importantes, notamment dans les mers et les océans. Cependant, les espèces terrestres ne sont pas hors de danger. Les humains en particulier. Ces derniers absorbent des quantités de plus en plus grandes de ces microparticules de plastiques. En effet, elles sont toujours plus abondantes dans certaines composantes de l'alimentation humaine, en particulier les poissons, les fruits de mer et le sel de mer. Elles sont aussi présentes dans la plupart des « eaux du robinet », qualifiées de potable, plus particulièrement aux États-Unis^{xi}. Certes, la quantité de microparticules de plastique présente dans ces eaux, est actuellement encore faible, mais l'eau ainsi polluée est bue en très grande quantité.

Champignons, l'effet boomerang

Des champignons et de nombreuses plantes sont en association symbiotique, sans laquelle ni l'un ni l'autre ne peuvent survivre. Par ailleurs, les champignons sont au cœur de la dégradation des résidus végétaux. Ils jouent un rôle majeur dans les écosystèmes. Dans le même temps, des

champignons sont responsables de maladies qui peuvent être particulièrement redoutables, nous l'avons vu à propos des ormes et des frênes sur le continent européen. Il est montré que ces maladies peuvent déboucher sur la disparition d'espèces végétales ou animales avec une probabilité bien plus importante que ce n'est le cas pour les maladies dues à des virus ou des bactéries. De plus, concevoir des remèdes sans endommager les cellules de leurs victimes, plantes ou animaux, peut parfois être particulièrement difficile, en raison de l'appartenance des champignons à l'univers des eucaryotes, et donc de la proximité de leurs cellules avec celles de leurs victimes.

Or l'humanité modifie les conditions de vie du règne des champignons, ce qui entraîne une évolution de ce dernier avec pour conséquence une augmentation de son impact en termes de maladies infectieuses et d'érosion de la biodiversité. Cette situation est résumée dans un article^{xii} de la revue Nature du 12 avril 2012 : « *Au cours des deux dernières décennies, on a observé une augmentation du nombre de maladies infectieuses virulentes. Tant chez les animaux que chez les plantes, un nombre sans précédent de maladies fongiques (dues à un champignon) ont récemment causé certaines des mortalités et extinctions les plus graves jamais observées chez les espèces sauvages, et mettent en péril la sécurité alimentaire. L'activité humaine intensifie la dispersion des maladies fongiques en modifiant les milieux naturels et en créant ainsi de nouvelles possibilités d'évolution. Nous soutenons que les infections fongiques naissantes entraîneront une érosion croissante de la biodiversité, avec des implications plus larges pour la santé humaine et des écosystèmes, à moins que des mesures ne soient prises pour renforcer la biosécurité dans le monde entier.* ». Par ailleurs, dans cet article est noté une accentuation des émissions de dioxyde de carbone des plantes victimes de maladies fongiques. Il est complété par une publication^{xiii} de la revue Science datée du 18 mai 2018. Cette dernière alerte sur les menaces pour la santé humaine et la sécurité alimentaire présentées par l'émergence à l'échelle mondiale de résistances aux substances antifongiques. La première cause est un usage massif de fongicides par les agriculteurs. Il en résulte un redoutable effet boomerang, une résistance à ces fongicides de champignons pathogènes pour des cultures, mais aussi une résistance de champignons pathogènes pour les humains. Ce qui rappelle certaines bactéries pathogènes pour les humains, devenues résistantes aux antibiotiques.

Le règne des champignons, soumis à un environnement en évolution rapide, est lui même en évolution rapide. Vu la dangerosité des champignons pathogènes pour les plantes et les animaux, dont les humains, l'humanité a ici un défi à relever. Le règne des champignons reste peu connu : la recherche qui lui est destinée a longtemps été marginale ; elle reste encore aujourd'hui trop peu soutenue.

Océans, la rupture des équilibres

Les océans se réchauffent, s'acidifient, se chargent en nitrates, en microparticules de plastiques et en déchets de toutes sortes. Le système global des courants océaniques connaît ses premières perturbations. La pêche intensive de surface ou proche de la surface a perturbé et perturbe toujours plus les écosystèmes marins. Depuis les années 1990, s'est ajoutée la pêche en eaux profondes qui pénètre jusqu'à plus de mille mètres sous la surface. Or, les océans hébergent un nombre astronomique d'organismes vivants. Ils constituent le principal régulateur de la composition chimique de l'atmosphère et du climat. En leur sein, les équilibres et les cycles, tout à la fois

chimiques, biologiques et thermiques, en place depuis le début du Quaternaire, sont aujourd'hui perturbés, et leur devenir reste largement imprévisible.

Les océans et notamment la vie dans les océans présentent de nombreuses questions restées sans réponse scientifique ; par exemple les écosystèmes des zones profondes des océans restent très peu connus. Dans la situation inédite créée par les humains, le devenir de l'ensemble du vivant marin est grandement imprévisible.

Les bactéries SAR11 et les virus marins

Les bactéries SAR11 ont été identifiées à la toute fin des années 1980. Elles ont donné lieu à une première publication scientifique en 1990^{xiv}. Quant aux *virus marins*, leur existence était connue antérieurement, depuis le début des années 1950, mais leur étude n'a vraiment pu se développer que durant les années 1990, grâce à de nouvelles techniques^{xv}. Ces bactéries représentent plus du quart des organismes monocellulaires des eaux de mer. Elles produisent l'essentiel des composés organiques et l'essentiel du CO₂ consommés par de nombreuses algues qui, par photosynthèse, vont à leur tour produire environ la moitié de l'oxygène relâché par les océans dans l'atmosphère. En 2014, certaines souches qui produisent du méthane ont été découvertes^{xvi}. A ainsi été résolu l'énigme de l'origine de la présence abondante de ce gaz à effet de serre dans les eaux de surface océanique situées loin des côtes et donc en milieu océanique oxygéné ; jusqu'alors, les seuls organismes vivants méthanogènes connus étaient des archées pour qui l'oxygène est toxique.

Grâce à un certain nombre de caractéristiques originales, dont une extrême petite taille, les bactéries SAR11 sont particulièrement résistantes et dominantes. Toutefois, le développement de leur population rencontre une limite, car elles seraient victimes de l'attitude agressive de *virus marins*, parmi lesquels le virus HTVC010P^{xvii xviii}. Cependant, l'étude des bactéries SAR11 est à ce jour très incomplète et de nombreuses questions restent sans réponse.

Que deviendrait le climat et le Monde du vivant si les interactions entre les bactéries SAR11 et *virus marins* venait à être modifiée ? Par exemple si, après mutation, des virus provoquaient la disparition d'une part notable des bactéries SAR11 ? Plus largement, que deviendrait le climat et le Monde du vivant si la population des bactéries SAR11 productrice de CH₄ ou de CO₂ et indirectement d'O₂ venait à fortement évoluer en raison de perturbations dues à l'activité humaine ?

Les mutations de bactéries et de virus se diffusent à une vitesse sans commune mesure avec celle d'organismes tels que les mammifères, dès lors que ces mutations sont particulièrement adaptées aux évolutions du milieu. Sur le même sujet, Janine Guespin-Michel souligne « la rapidité » et « l'inventivité » avec lesquels les bactéries sont capables d'acquérir des caractéristiques phénotypiques⁷ nouvelles. »^{xix}.

7 Le phénotype est l'ensemble des traits observables d'un organisme vivant, expressions combinées de facteurs génétiques et environnementaux.

Au sein d'un univers complexe tel que le Monde du vivant, en particulier en cas de situation inédite, l'imprévisibilité des émergences oblige à beaucoup d'humilité et à accepter notre incapacité à prévoir le scénario du futur qui sera effectivement suivi. Toutefois, cette incapacité à prévoir ne doit pas entraîner une absence de prise en compte des risques tels que celui d'une brusque évolution des bactéries SAR11 et de leurs populations. Suite à un tel événement, la bifurcation en cours du système bio-Terre connaîtrait une évolution dont, au stade actuel des connaissances scientifiques, nous ne pourrions prévoir ni le contenu ni l'ampleur. Il est donc indispensable de convoquer le principe de précaution et d'éviter - ou de mettre un terme à - toute intervention ou activité humaine qui nourrit ce risque.

L'imprévisibilité des évolutions des océans dans les décennies et les siècles à venir ne repose pas uniquement sur le vivant qu'ils hébergent. D'autres questions restent à ce jour largement sans réponse. Le méthane produit au cours du temps par des archées méthanogènes et stocké dans des hydrates des fonds océaniques seront-ils en partie relâchés. Si oui, quand et en quelle quantité ? Faute de réponse à ces questions, ici aussi il conviendrait de convoquer le principe de précaution. D'autant que, en 2010, une étude de l'International Arctic Research Center (IARC) de l'université de Fairbanks en Alaska, montrait que les fuites du méthane emmagasiné sous la forme d'hydrates sous les 2 millions de km² de l'Arctique étaient alors déjà enclenchées et « pourraient avoir à l'avenir un effet dramatique sur le réchauffement climatique » (Shakhova & al., 2010^{xx}).

Selon une communication^{xxi} du 2 février 2006 du département de géologie et de génie géologique de l'université de Laval au Québec « *On estime aujourd'hui que les hydrates de méthane des fonds océaniques contiennent deux fois plus en équivalent carbone que la totalité des gisements de gaz naturel, de pétrole et de charbon connus mondialement.* » Selon Gilles Ramstein^{xxii} ⁸, juin 2015, « *les estimations récentes ont proposé entre 0,5 et 2,5 x 10¹² tonnes pour le contenu (en méthane) des sédiments (marins)* » « *La masse de méthane actuellement dans l'atmosphère atteint désormais près de 5 milliards de tonnes* ». Donc entre 100 et 500 fois moins que la masse de méthane piégée dans les fonds océaniques. Toutefois, cette masse est située dans le sous-sol marin jusqu'à une profondeur d'une centaine de mètres sous l'eau et semble ne pouvoir être relâchée que progressivement sur plusieurs siècles, voire plusieurs millénaires. En outre, lors de la remontée vers la surface des océans, une grande part du méthane serait vraisemblablement transformée en dioxyde de carbone. Une faible portion du stock de méthane est ainsi susceptible de se rejoindre l'atmosphère au cours du XXI^e siècle. Son évaluation nécessite des études supplémentaires. " *Des Ces énormes quantités de méthane pourraient être « relarguées » dans l'atmosphère en cas de réchauffement important des zones boréales ou des océans. Ce type de phénomène n'est actuellement pas pris en compte dans les modèles du climat car les processus de déstabilisation et l'ampleur des dégazages de méthane sont encore trop mal connus.* " (Masson-Delmotte, 2011^{xxiii}, p. 99-100).

8 p.134.

Perméabilité et vulnérabilité des humains

Nitrates, microparticules et nanoparticules, hormones, perturbateurs endocriniens..., ces substances polluent toujours plus les sols, l'atmosphère et les océans, et colonisent aujourd'hui le Monde du vivant : le corps des humains ne fait pas exception. Cancers, baisse de la fertilité, réduction du QI, nervosité et troubles comportementaux de l'enfance... en sont des conséquences. Celles-ci sont révélées par des études épidémiologique^{xxiv} et par la connaissance des organes humains : citons ici la thyroïde, au rôle déterminant dans le développement du cerveau^{xxv}. Ces pollutions sont récentes, cinq ou six décennies pour les plus anciennes, et ne cessent de s'amplifier. Elles n'ont pas encore exprimé tous leurs effets. Parmi ceux-ci, certains pourraient se transmettre génétiquement, de génération en génération. D'autres s'accroissent d'année en année.

Selon de nombreuses études, les perturbateurs endocriniens sont responsables ou tout au moins coresponsables d'une dégradation du sperme humain^{xxvi} ; notamment dans les pays occidentaux où l'usage des pesticides agricoles est particulièrement important depuis des décennies et où, en quarante ans le nombre de spermatozoïdes par millilitre de sperme a été divisé par deux. De plus, le taux de spermatozoïdes dont la morphologie est normale et la mobilité intacte, a lui aussi nettement baissé. Selon les résultats d'une recherche publiée en 2012^{xxvii}, en seulement seize ans, en France les hommes de 35 ans ont subi « *une diminution significative et continue de la concentration du sperme atteignant 32,2 %* ». La concentration moyenne est passé de 73,6 millions de spermatozoïdes par millilitre (ml) de sperme en 1989 à 49,9 millions/ml en 2005. Durant cette période, chaque année la baisse était à peu près identique à celle de l'année précédente. Selon cette même étude, simultanément le pourcentage de spermatozoïdes ayant une morphologie normale a diminué d'un tiers, passant de 60,9 % à 39,2 %. Si bien que le score de 2005 équivalait à 33 millions de spermatozoïdes par millilitre, au lieu de 73,6 millions. Or, selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2010) le seuil de fertilité est de 15 millions/ml. Finalement, si la dégradation du sperme se poursuivait, la France pourrait rapidement rencontrer un problème massif d'infertilité des hommes. Cette situation n'est pas spécifique à la France, avec toutefois des différences selon les pays. Cependant, l'infertilité des hommes ne signifierait pas nécessairement la fin de l'humanité. Des recherches scientifiques en cours pourraient déboucher sur des remèdes à un tel scénario. Il y a par exemple les recherches sur la technique de la fécondation in vitro des ovules, grâce aux cellules mères des spermatozoïdes (situées dans les glandes génitales des hommes), et donc en se passant de spermatozoïde naturel. Cependant, cette technique – dont la fiabilité à venir n'est pas assurée – pourrait être onéreuse et réservée aux populations les plus riches.

Choc frontal

A la diversité et la complexité du monde des bactéries, des archées, des protistes et des virus, se sont ajoutées celles des organismes pluricellulaires. Au final, les différentes complexités sont en relation et interagissent dans un ensemble hyper complexe. Ainsi, chaque mammifère héberge des milliards de bactéries, d'archées et de virus - dont il est entièrement dépendant – qui jouent un rôle majeur dans la digestion, dans le système immunitaire ou encore dans l'apparition, le développement ou la prévention de cancers, d'inflammations, d'abcès... De cette complexité globale

du vivant, vieille de centaines de millions d'années, a émergé l'humanité, système social inédit hyper complexe. Nous assistons aujourd'hui au choc frontal entre la complexité du système bio-Terre telle qu'elle était avant l'apparition de l'Homo sapiens, d'un côté, et, de l'autre, la complexité de l'humanité. Ce choc a débuté il y a plusieurs dizaines de milliers d'années. Il a pris de l'ampleur avec la naissance de l'agriculture, il y a douze mille ans, puis avec les déforestations massives. Un nouveau seuil a été franchi avec la révolution industrielle, il y a deux siècles. Enfin, il y a 50 ou 60 ans, se sont propagés à grande échelle l'agriculture industrielle et ses intrants (pesticides, nitrates, etc.), l'automobile, l'usage de plastiques... Depuis lors, la puissance du choc s'amplifie de façon exponentielle.

Alerte sur le vivant

Le Monde du vivant est soumis à des conditions inédites. Il est pris dans un tourbillon de plus en plus puissant. L'histoire du vivant montre que nous avons là les conditions favorables à l'apparition de phénomènes émergents, inédits et imprévisibles. La sensibilité et la créativité du vivant pourraient donner lieu à des émergences qui bouleverseraient rapidement l'ensemble du Monde du vivant. En effet, les évolutions peuvent être particulièrement rapides chez des organismes unicellulaires telles que les bactéries. Tout d'abord, les mutations y sont fréquentes. Ensuite, toute innovation ou évolution génétique au sein d'une population peut se propager à grande vitesse par échange de gènes entre individus, y compris d'espèces différentes et éloignées^{xxviii}. Enfin, la vitesse de reproduction des organismes unicellulaires peut être très élevée. L'ensemble des organismes vivants dépendent étroitement des organismes unicellulaires. Ainsi le corps humain est habité par des milliards de bactéries, d'archées et de virus qui conditionnent l'ensemble de son fonctionnement, sa santé et sa survie.

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à Bertrand Bocquet, mon directeur de thèse, et Jean-Claude Ruano Borbalan, mon codirecteur, pour leur confiance et leur soutien, pour leur ouverture d'esprit indissociable de la vivacité de leur esprit critique.

Mes remerciements vont ensuite à Valérie Lilette, docteur en anthropologie, pour m'avoir convaincu de mettre par écrit et d'approfondir ma réflexion sur les évolutions du vivant et leur impact sur le système-Terre.

Mes échanges avec Anne-Frédérique Paul Antoine, enseignante-chercheuse en biologie, et Janine Guespin-Michel, professeure honoraire de microbiologie, m'interdisent de prétendre être un autodidacte dans le domaine de la biologie. En outre, les collaborations avec Janine Guespin-Michel, depuis près de dix ans, et la lecture d'ouvrages dont elle est l'auteure ont motivé la place centrale donnée à la pensée du complexe.

Un mot final pour Gilles Ramstein, auteur de *Voyage à travers les climats de la Terre* (juin 2015). De cet ouvrage j'ai puisé une partie de mes données. Sa lecture a contribué à la maturation de ma pensée sans laquelle ce texte n'aurait pas vu le jour.

i Influence des variations d'insolation sur le climat global : modèles climatiques

Auteur : Gilles Delaygue. Université de Chicago, Département de Géosciences
Publié sur le site de l'école normale supérieure de Lyon. Mai 2001.

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/variations-insolation.xml>

ii L'explosion Cambrienne

Auteur : Jean Vannier. CNRS. Université Claude-Bernard, Lyon I.
Publié par le site du CNRS.

<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosevol/decouv/articles/chap2/vannier.html>

iii Climat, modéliser pour comprendre et anticiper

Comité de rédaction : Pascale Braconnot (IPSL), Christophe Cassou (CERFACS),
Serge Planton (CNRM, Centre de recherche de Météo-France, Didier Swingedouw
(IPSL), Laurent Terray (CERFACS), Aurore Voldoire (CNRM).

Réaliser dans le cadre du projet MISSTERRE qui rassemble les les laboratoires
français de modélisation climatique (CNRM, Centre de recherche de Météo-
France, Cerfacs et IPSL).

Publié sur le site de Météo-France : <http://www.meteofrance.fr/publications/nos-collections/climat/climat-modeliser-pour-comprendre-et-anticiper>

iv Climat, modéliser pour comprendre et anticiper

Comité de rédaction : Pascale Braconnot (IPSL), Christophe Cassou (CERFACS),
Serge Planton (CNRM, Centre de recherche de Météo-France, Didier Swingedouw
(IPSL), Laurent Terray (CERFACS), Aurore Voldoire (CNRM).

Réaliser dans le cadre du projet MISSTERRE qui rassemble les les laboratoires
français de modélisation climatique (CNRM, Centre de recherche de Météo-
France, Cerfacs et IPSL).

Publié sur le site de Météo-France : <http://www.meteofrance.fr/publications/nos-collections/climat/climat-modeliser-pour-comprendre-et-anticiper>

v La gouvernance par les nombres. Cours au Collège de France (2012 - 2014)

Auteur : Alain Supiot

Editions Fayard. Poids et mesures du monde. Juin 2015.

vi The age of the hominin fossils from Jebel Irhoud, Morocco, and the origins of the Middle Stone Age

Auteur : Daniel Richter, Rainer Grün, Renaud Joannes-Boyau, Teresa E. Steele, Fethi
Amani, Mathieu Rué, Paul Fernandes, Jean-Paul Raynal, Denis Geraads,
Abdelouahed Ben-Ncer, Jean-Jacques Hublin et Shannon P. McPherron.

Publié par la revue scientifique Nature, numéro 546. 8 juin 2017.

vii La pollution par les nitrates

Site du CNRS. Octobre 2017

http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/degradation/07_pollution.htm

viii Conférence internationale sur l'agriculture biologique et la sécurité alimentaire

Conférence organisée par la FAO par l'intermédiaire du Groupe de travail
interdépartemental sur l'agriculture biologique, en association avec l'Associazione
italiana agricoltura biologica, le CIHEAM, le FIBL, l'IFOAM, RAFI-USA, The
Third World Network (TWN), le Worldwatch Institute et le WWF.

Rome, 03 - 05 mai 2007

Consultable sur le site Internet de la FAO :
http://www.fao.org/organicag/ofs/index_fr.htm

ix Plastic debris in the open ocean

Auteur : Andrés Cózar, Fidel Echevarría, J. Ignacio González-Gordillo, Xabier Irigoien, Bárbara Úbeda, Santiago Hernández-León, Álvaro T. Palma, Sandra Navarro, Juan García-de-Lomas, Andrea Ruiz, María L. Fernández-de-Puelles and Carlos M. Duarte.

Publié par le journal de l'académie des sciences des Etats-Unis d'Amérique (PNAS). Vol.111. N°28. 30 juin 2014.

x Primary microplastics in the ocean. A Global Evaluation of Sources

Auteurs : Julien Boucher, Damien Friot.

Rapport de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN). 22 février 2017.

xi Invisibles. The plastic inside us

Auteurs : Chris Tyree et Dan Morrison

Publié sur le site orb one world one story. 2017.

xii Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health

Auteurs : Matthew C Fisher, Daniel A Henk, Cherie Briggs, John S Brownstein, Lawrence C Madoff, Sarah L McCraw, Sarah Gurr

Publié par la revue Nature. Avril 2012

xiii Worldwide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security

Auteurs : Matthew C. Fisher, Nichola J. Hawkins, Dominique Sanglard, Sarah J. Gurr

Publié par la revue Science. 18 mai 2018. Vol. 360, pp. 739-742.

xiv Genetic diversity in Sargasso Sea bacterioplankton

Auteurs : Stephen J. Giovannoni, Theresa B. Britschgi, Craig L. Moyer et Katharine G. Field

Publié par la revue Nature, le 3 mai 1990

xv Les virus: un élément important de la boucle microbienne dans l'Océan

Compte-rendu de la réunion du JSC / WCRP - Le Cap, Afrique du Sud, 16-20 mars 1998.

Publié par La Lettre du Changement global. Emanation du CNFCG (Comité national français du changement global), en relation avec l'Académie Numéro. 9 avril 1999. Site du CNRS.

xvi SAR11, oceans' most abundant organism, has ability to create methane

Auteur : Mark Floyd. Source : une publication de Angel White et Steve Giovannoni.

Publié par Oregon State University (OSU). News and Research Communications. 7 juillet 2014.

xvii Abundant SAR11 viruses in the ocean

Auteurs : Yanlin Zhao, Ben Temperton, J. Cameron Thrash, Michael S. Schwalbach, Kevin L. Vergin, Zachary C. Landry, Mark Ellisman, Tom Deerinck, Matthew B. Sullivan et Stephen J. Giovannoni
Publié par la revue *Nature*, 494, pages 357–360. 21 février 2013.

xviii **SAR11 viruses and defensive host strains**

Auteurs : Selina Våge, Julia E. Storesund et T. Frede Thingstad
Publié par la revue *Nature* 499. 25 juillet 2013.

xix **Les bactéries, leur monde et nous**

Auteure : Janine Guespin-Michel, Université de Rouen.
Édition Dunod, Paris, 2011.

xx **Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf**

Shakova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ô.
Science. 5 mai 2010.

xxi **Les hydrates de méthane : une réserve énergétique énorme, mais une bombe écologique en puissance »**

2 février 2006. Consultable sur le site Internet :

<http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/hydrates.methane.htm>.

xxii **Voyage à travers les climats de la Terre**

Auteur : Gilles Ramstein. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). France.
Éditions Odile Jacob. Juin 2015.

xxiii **Climat : le vrai et la faux**

Auteure : Valérie Masson Delmotte. Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement. CEA-Saclay.
Editions le Pommier. Paris. 2011.

xxiv **Prenatal Exposure to Nonpersistent Endocrine Disruptors and Behavior in Boys at 3 and 5 Years**

Auteurs : Claire Philippat, Dorothy Nakiwala, Antonia M. Calafat, Jérémie Botton, Maria De Agostini, Barbara Heude, Rémy Slama, and the EDEN Mother–Child Study Group.
Publié par *Environmental Health Perspectives*. Septembre 2017.

xxv **Thyroid Hormone Signaling Acts as a Neurogenic Switch by Repressing Sox2 in the Adult Neural Stem Cell Niche**

Auteurs: Alejandra López-Juárez, Sylvie Remaud, Zahra Hassani, Pascale Jolivet, Jacqueline Pierre Simons, Thomas Sontag, Kazuaki Yoshikawa, Jack Price, Ghislaine Morvan-Dubois, Barbara A. Demeneix.
Publié par la revue scientifique *Cell Stem Cell*. Volume 10, Issue 5, p531–543, 4 May 2012.

xxvi **Semen quality trends in French regions are consistent with a global change in environmental exposure**

Auteur : Jacques De Mouzon, Matthieu Rolland, Sarah Gorla, Véréne Wagner, Perrine De Crouy-Chanel, Annabel Rigou, et Dominique Royère
Publié par la revue scientifique REPRODUCTION, The Journal of the Society for Reproduction and Fertility. 24 février 2014

xxvii Decline in semen concentration and morphology in a sample of 26 609 men close to general population between 1989 and 2005 in France

M. Rolland, J. Le Moal, V. Wagner, D. Royère, J. De Mouzon
Human Reproduction, Volume 28, Issue 2, 1 February 2013, Pages 462–470.

xxviii Espèces de bactéries !

Auteure : Patricia Léveillé

Publié sur le site de l'Institut national de recherche agronomique (INRA), INRA SCIENCE ET IMPACT. Publié le 18 mars 2010. Mis à jour le 13 mai 2013.