

Vincent Czeszynski

Climat

*20 questions
pour comprendre
et agir*



ellipses

Quel est le fonctionnement des principaux cycles régulant le climat et la vie sur terre ?

Pour répondre à cette question, nous évoquerons...

1. Les conditions de l'émergence de la vie sur Terre
2. L'existence de grands cycles de régulation des « constantes vitales » de la planète : température, teneur en CO₂, teneur en O₂, humidité...
3. Le rayonnement solaire (abondant) et le bilan radiatif de la Terre (important, car cela définit les scénarios du GIEC)
4. Quelques sources de perturbation de ces cycles

« La création du monde n'a pas eu lieu au début,
elle a lieu tous les jours. »

Marcel Proust

Au commencement était la Terre

La présence de la vie sur Terre est le fruit d'un concours de circonstances miraculeux. Elle résulte d'un subtil équilibre entre des facteurs qui, s'ils avaient varié à la marge, auraient empêché l'apparition de la moindre trace de végétal ou de bactérie. Selon une étude de 2014, la probabilité qu'une planète similaire à la Terre possède des conditions adaptées à la vie est d'environ une sur six cents. Nous sommes donc plutôt chanceux ! Il est toutefois important, si nous ne voulons pas gâcher cette chance, d'identifier les mécanismes de cette improbable genèse pour mieux comprendre le fonctionnement de notre planète et apprécier le risque climatique.

Notre chère Terre s'est donc formée il y a 4,5 milliards d'années par agrégation progressive d'éléments lourds provenant de débris d'étoiles. Un noyau se forme rapidement au centre de la planète (en 15 à 20 millions d'années quand même) constitué pour l'essentiel des éléments les plus lourds comme le fer ou le nickel, tandis que les autres remontent en surface. Le fer contenu dans le noyau crée alors un champ magnétique dont nous verrons l'importance. Les roches en fusion émettent de grandes quantités d'azote, de CO₂, de méthane et d'eau ; pas encore d'oxygène. Rien d'extraordinaire ne se passe durant 400 millions d'années, jusqu'à la collision entre Théa, une protoplanète, et la Terre. À la suite du choc, des débris sont projetés dans l'espace, qui entrent en orbite. Ils tournent et se regroupent pour former la Lune, qui s'éloignera petit à petit. Au-delà du plaisir que nous avons de contempler cet astre lors des chaudes nuits d'été, ce choc va surtout être à l'origine d'une intensification de l'activité volcanique sur notre planète. Les températures à la surface vont alors s'envoler pour atteindre les 10 000 °C (je vous rassure, le GIEC n'a pas de scénario aussi pessimiste). La Terre capture également à cette occasion le noyau de Théa – ce qui augmentera notre champ magnétique. La direction de son axe est déviée par la force de l'impact. Alors que les températures baissent petit à petit et que les comètes continuent de s'écraser à un rythme soutenu (1 par mois environ!), les océans finissent par apparaître. Il aura fallu atteindre les bonnes conditions de température et de pression pour permettre à l'énorme quantité d'eau contenue dans l'atmosphère (80 % de sa composition) de passer à l'état liquide. Cela rappelle de vieux cours de physique ! La température des premières gouttes de pluie atteint environ 300 °C ! Il va ainsi pleuvoir pendant des millions d'années, entraînant une baisse de la pression atmosphérique, une diminution de l'effet de serre et un refroidissement de la Terre.

On est encore loin de la planète que nous connaissons, mais un certain nombre d'obstacles à l'apparition de la vie a été franchi. D'abord, la Terre est située à bonne distance d'une étoile, le soleil, qui lui permet de recevoir la quantité d'énergie nécessaire et suffisante. Difficile d'imaginer la vie sur Mercure ou sur Neptune pour ne considérer que les extrêmes ! Sa taille est aussi assez grande, grâce à Théa, pour garder l'atmosphère, mais elle reste assez petite pour éliminer le dihydrogène ou l'hélium, contrairement à Jupiter ou Saturne. La présence d'un satellite, la Lune, lui permet également de stabiliser son orbite et son inclinaison, ce qui est évidemment fondamental pour disposer d'un climat favorable dans la durée. Le refroidissement de la surface de la Terre primitive a conduit à l'apparition de l'eau liquide, indispensable à la chimie du vivant. Enfin, notre planète est pourvue de boucliers fondamentaux : un champ magnétique

suffisamment puissant pour la protéger des vents solaires (que l'on peut admirer grâce aux aurores boréales!), et un bouclier gravitationnel avec Jupiter, qui attire à elle les plus gros astéroïdes. Pas si mal, mais il manque encore un ingrédient indispensable à la vie : le dioxygène (O_2).

Continuons donc notre cheminement à travers les temps anciens et revenons cette fois 3,5 milliards d'années en arrière. La vie est encore impossible sur terre faute d'ozone pour nous protéger des rayons ultraviolets (UV) et bien sûr faute d'oxygène – par ailleurs nécessaire à la fabrication de l'ozone (O_3). Mais elle va apparaître dans les océans, alors que la température a suffisamment baissé pour permettre les réactions chimiques de petits organismes anaérobies, d'une certaine manière nos ancêtres communs. Ces premières bactéries utilisent exclusivement la fermentation comme source d'énergie. Si l'on sait dater assez précisément leur apparition à partir de l'analyse de certains sédiments, leur origine reste assez mystérieuse. Les scientifiques pensent que les ingrédients de la vie, qu'ils nomment de façon imagée la « soupe prébiotique », seraient venues de l'espace à travers les pluies de météorites au tout début de l'Archéen pendant ce qu'on appelle le « grand bombardement tardif ». Une autre théorie – les deux n'étant pas exclusives – est que certaines réactions chimiques dans les profondeurs océaniques auraient permis l'émergence de ces bactéries très simples, composées à l'origine d'une cellule sans noyau et capables de se reproduire par division cellulaire. Parfois les copies comportaient des erreurs, ce qui a permis l'évolution – pour notre plus grand bonheur!

Ces premières formes de vie ont donc évolué et muté pendant un milliard d'années sans que l'on sache vraiment expliquer leur cheminement. On assiste *in fine* à l'apparition de bactéries capables de transformer l'énergie solaire en énergie chimique via la photosynthèse. Elles utilisent l'eau comme source d'hydrogène et rejettent du dioxygène – un poison à diffusion lente pour les autres organismes anaérobies qui vont donc perdre du terrain. Nous y sommes! On commence alors à trouver des traces d'oxygène dans des formations calcaires, notamment sous l'effet de l'oxydation du fer dissout dans les océans. Sa teneur va progressivement augmenter jusqu'à saturer les « puits d'oxygène ». Il commence alors à se diffuser dans l'atmosphère il y a 2,4 milliards d'années, ce qui va progressivement permettre aux végétaux de se propager sur terre, accentuant ainsi la production d'oxygène par la photosynthèse. On parle de la « grande oxydation ». *A contrario*, la concentration en CO_2 continue à diminuer, absorbée par les terres et océans, jusqu'à atteindre 0,04 % de l'atmosphère (contre 15 % dans l'atmosphère primitive). La teneur en oxygène atmosphérique progresse quant à elle jusqu'à dépasser les 30 %

concomitamment à l'expansion massive des forêts composées de fougères géantes, avant de se stabiliser à 21 %. Les conditions sont réunies il y a 600 millions d'années pour un véritable « big bang de la biodiversité ». Les cellules s'associent en formes de plus en plus complexes d'abord sous la forme d'éponges ou de méduses. La diversification est en marche et ne s'arrêtera plus. Les reptiles terrestres apparaissent il y a 350 millions d'années. 100 millions d'années plus tard, les dinosaures deviendront les maîtres des terres au milieu d'insectes, de serpents et de lézards. Leur règne prend fin il y a 65 millions d'années probablement à la suite d'une collision de la Terre avec une météorite dans l'actuelle région du Yucatan. Jupiter n'a pas joué son rôle de protecteur ! Cela va permettre aux petits mammifères de gagner du terrain, jusqu'à l'arrivée des hominidés il y a 7 millions d'années. Bienvenue Tumi ! Homo sapiens, notre espèce, n'apparaîtra que bien plus tard, il y a 200 000 ans. Cette brève et très incomplète histoire de l'Hadéen au Phanérozoïque met en évidence le caractère improbable et encore mystérieux de notre existence, fruit d'un concours de circonstances qui tient du miracle et qui a sans doute contribué à l'émergence des religions, faute de réponses probantes à tant de questions ontologiques. Le mécano de la vie est d'une richesse infinie, mais certains rouages sont plus déterminants. Un enchevêtrement de rétroactions inattendues entre l'atmosphère, la biosphère¹, l'hydrosphère² et la lithosphère³ a permis de progressivement stabiliser nos conditions d'existence. Pour combien de temps ? Ces quatre « sphères » ont-elles atteint un point d'équilibre stable, au sens physique du terme ? La déstabilisation de l'une d'entre elles met-elle l'ensemble en danger ?

Des rouages complexes et interdépendants

Essayons de décortiquer ces mécanismes en commençant par quelques définitions. « *Mal nommer les choses, c'est ajouter au malheur du monde* », disait Albert Camus.

La biosphère désigne l'ensemble des organismes vivants de la planète, qu'il s'agisse d'animaux ou de végétaux. Pour vivre et se développer, elle est dépendante de trois autres « sphères de vie » que sont la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère. L'ensemble forme l'écosphère. Pour permettre la vie, ces environnements doivent respecter certaines caractéristiques qui doivent rester suffisamment stables dans le temps. Il

1. Rassemblant animaux et végétaux.

2. Ensemble des réserves en eaux de la planète, quelle que soit la forme (liquide ou solide).

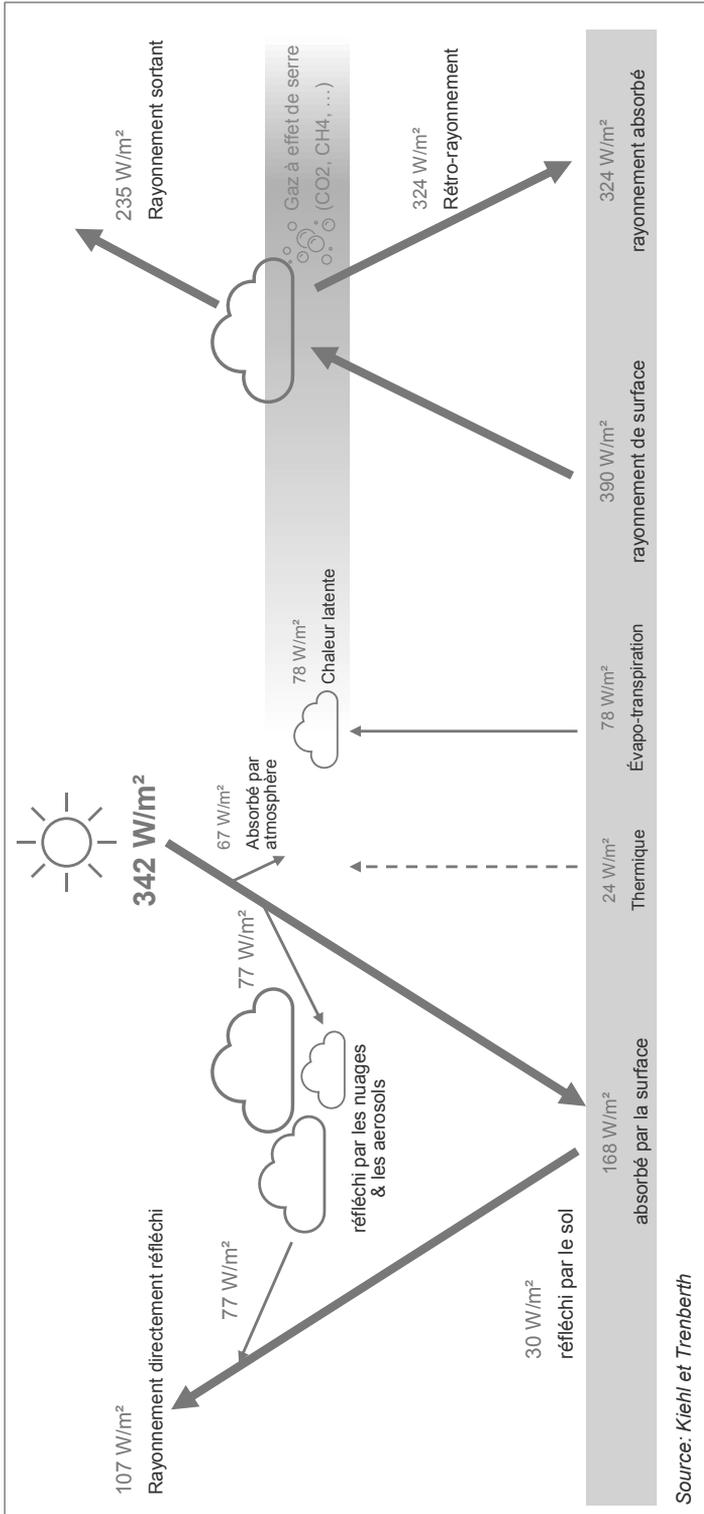
3. Surface des continents et des océans.

s'agit d'une certaine manière des « constantes vitales » de notre planète, qu'un « géo-médecin » se doit de surveiller avec attention pour, le cas échéant, identifier des pathologies et établir un diagnostic. Nous en avons rencontré certaines dans nos pérégrinations paléolithiques : la température de l'air, la teneur en dioxyde de carbone, le taux de dioxygène, la présence d'eau douce. Il en existe une myriade d'autres, relatives à des molécules également vitales comme le soufre ou le phosphate. Mais laissons cela aux spécialistes !

Ces constantes vitales sont influencées par de nombreux mécanismes exogènes ou endogènes, à commencer par l'effet de serre. Celui-ci est négativement connoté depuis quelques années car il est perçu comme la racine de nos problèmes. Ce n'est pas si simple. Sans effet de serre, la température moyenne de la terre serait de -18 °C environ. Un peu frisquet... Comment fonctionne-t-il dans les grandes lignes ? La terre est soumise à un rayonnement solaire d'une puissance d'environ 342 watts par mètre carré (Cf. figure 1). Une centaine est directement réfléchi vers l'espace, plus ou moins en fonction de l'albédo – c'est-à-dire du pouvoir réfléchissant des surfaces¹. 67 watts seront absorbés par l'atmosphère, ce qui signifie que les rayons du soleil vont rencontrer sur leur chemin des molécules de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4), d'eau (H_2O), d'ozone (O_3) ou de protoxyde d'azote (NO_2) qui vont se mettre à « vibrer » sous son impulsion et ainsi émettre un rayonnement infrarouge. Enfin les 168 watts restant vont être absorbés par le sol, qui va le restituer à travers des phénomènes de convection et d'évaporation, mais surtout en émettant lui aussi des rayons infrarouges – moins costauds que ceux du soleil. Ils vont donc finir dans les filets tendus par les molécules de gaz, qui les absorbent sans autre forme de procès, pour vibrer à leur tour. On est au cœur de l'effet de serre.

1. La valeur moyenne de l'albédo est d'environ 30 % mais il peut atteindre 90 % pour les nuages ou la neige.

Figure 1. Bilan radiatif de la Terre



On comprend dès lors que plus la concentration de gaz à effet de serre s'accroît, plus la probabilité que la chaleur émise par le sol reste piégée dans l'atmosphère est forte, augmentant ainsi la température moyenne et déclenchant l'effet domino tant redouté sur certaines des autres « constantes vitales ». La différence entre l'énergie reçue par la Terre en provenance du soleil et l'énergie renvoyée vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge est appelée « forçage radiatif », actuellement à un niveau d'environ 2,8 watts par mètre carré. Le terme est important car ce surcroît d'énergie explique le réchauffement climatique et sert à décrire les scénarios du GIEC que nous évoquerons plus tard dans ce livre.

Revenons aux cycles qui régulent nos « constantes vitales » et penchons-nous sur l'oxygène. Celui-ci est comme chacun sait produit par les végétaux via la photosynthèse, selon un cycle équilibré qui a tendance à s'accélérer en cas de hausse des températures. Il agit donc même comme un régulateur dans l'atmosphère. La situation est plus inquiétante pour l'oxygène présent dans les mers et océans, qui a diminué de 2 % sur les cinquante dernières années. Les températures chaudes incitent en effet la faune aquatique à consommer plus d'oxygène, ce qui diminue d'autant les réserves. La proportion peut paraître faible mais le phénomène n'est pas uniformément réparti sur le globe. Certaines zones au sud de la Californie ont ainsi subi une baisse de 30 % du taux d'oxygène en 25 ans. On estime désormais que les zones océaniques où l'oxygène est rare s'étendent sur une surface aussi grande que le continent européen. Pour certaines espèces, une trop faible oxygénation peut avoir de graves conséquences sur la reproduction, l'espérance de vie et le comportement animal. La théorie de l'évolution a montré que cela pouvait même altérer leur expression génétique. Il semble donc que nous ayons un problème...

Autre problème: la localisation et l'état de la ressource en eau. On la trouve schématiquement sous quatre formes différentes: de l'eau salée dans les mers et océans (97 %), de la glace – notamment au niveau des pôles (c.2 %), de l'eau douce dans les lacs, les rivières et dans les sols (c.0,8 %) et de la vapeur d'eau dans l'atmosphère (en très faible quantité – à peine un septième de la mer Caspienne!).

Les réserves d'eau douce facilement accessibles ne sont donc pas gigantesques même si elles se renouvellent grâce au cycle de l'eau – en dehors de celles qui sont stockées dans des nappes fossiles comme dans le Sahara. L'eau passe ainsi de la mer à l'atmosphère, puis de la terre à la mer, en suivant un rituel bien rodé: (1) évaporation et évapotranspiration (une partie des eaux de mer se transforme en vapeur d'eau sous l'action du soleil ainsi que l'eau des plantes et des animaux par évapotranspiration), (2) condensation (des nuages se forment dans

le ciel), (3) précipitations (les nuages s'agrègent puis se transforment en eaux pluviales, neige ou grêle), (4) infiltration (une partie des eaux pluviales s'infiltrent dans les nappes souterraines), (5) ruissellement (une autre partie des eaux rejoint les eaux de surfaces), (6) stagnation (l'eau est stockée dans les réservoirs naturels sur des périodes plus ou moins longues – par exemple : 8 jours dans l'atmosphère, 17 ans dans les lacs, 2500 ans dans les océans...), (7) retour à la mer. Vu ainsi, cela donne l'impression d'un cycle naturellement équilibré. Vous vous en doutez, j'ai encore quelques mauvaises nouvelles à vous annoncer.

Premièrement, la répartition de l'eau douce disponible n'est pas équitablement répartie entre les régions du globe. À double titre, selon que l'on s'intéresse aux stocks ou aux flux. Concernant les stocks, la quantité d'eau disponible par habitant permet de définir les zones en situation de pénurie (moins de 1 000 m³ par an et par habitant) ou de stress hydrique (moins de 1 700 m³). Ainsi, les pays du Maghreb ou de la péninsule arabique sont en situation de pénurie, quand l'Inde, le Pakistan, l'Afrique du Sud, l'Éthiopie ou encore la Pologne sont en situation de stress hydrique. Concernant les flux, il faut considérer un autre indicateur, qui mesure le rapport entre le volume d'eau prélevé et le volume annuel moyen des apports naturels. Dit autrement, la piscine se vide-t-elle plus vite qu'elle ne se remplit. En Arabie Saoudite, 100 % des apports naturels sont consommés. La France est dans la moyenne des pays développés avec environ 20 %. Le réchauffement climatique peut interférer dans le cycle de renouvellement de l'eau douce, en provoquant une évaporation accélérée des stocks, et en modifiant le climat de certaines régions – certaines devenant plus sèches quand d'autres sont plus humides. Cela conduit certains pays à ponctionner exagérément dans les réserves non-renouvelables (ou alors sur un temps long) : l'exploitation du pétrole libyen conduit à des prélèvements importants dans la nappe fossile du Sahara quand certaines exploitations agricoles américaines ou dans d'autres régions du monde utilisent aussi le même palliatif délétère.

Ces ponctions dans des sources difficilement renouvelables contribuent à accroître la quantité d'eau présente dans les autres « sphères » : on réinjecte dans le cycle, de l'eau qui en était sortie. C'est l'une des causes de la hausse des océans avec la fonte des glaces et l'accélération de l'évaporation des sols. Pour terminer cet inventaire non exhaustif et peu réjouissant des réactions en chaîne que peut provoquer la hausse des températures, l'accélération de l'évaporation peut déclencher un cercle vicieux difficile à enrayer. La vapeur d'eau étant un gaz à effet de serre, elle peut accentuer le réchauffement, qui en retour peut accélérer l'évaporation. Et ainsi de suite. C'est un parmi tant d'autres des risques d'emballement