

ÉNERGIE(S), CARBONE, CLIMAT, BIOLOGIE et... *SAPIENS SAPIENS*

Deux textes composent ce document : un premier, issu d'une discussion et de quelques séances de travail qui tentaient d'explicitier en peu de temps (une gageur !) deux faits relatifs à notre atmosphère¹ :

1) sa teneur en gaz carbonique (en très grande partie responsable du réchauffement actuel) est passée de **0,03 %** [ou 300 ppmv (pour *300 parties par millions en volume*)] avant le début de l'ère industrielle à plus de **0,04 %** en 2020: **soit 0,01 % de plus : ce (petit) 0,01 %**, représentant donc une augmentation (qui a été non linéaire durant ces dernier 150 ans) de **30 %**, a été suffisant pour réchauffer la surface de notre planète au point d'enclencher des processus naturels potentiellement irréversibles ;

2) cette teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère primitive de la terre était énormément plus élevé (plus de 1000 fois plus, et peut-être encore davantage) mais des processus biochimiques se sont amorcés il y a déjà 4 milliards d'années pour faire baisser cette teneur. On discutera donc de ce « paradoxe ».

Un deuxième texte reprend par écrit tout en les développant des éléments dont la trame était au départ les commentaires oraux d'un diaporama présenté à l'Université Populaire du Val de Drôme, et développe quelques nouveaux points ayant trait à la soit-disant transition « écologique » et aux énergies « bas-carbone ».

¹ En notant, déjà ici en préambule, que l'« *Atmosphère terrestre* », avec un grand A, à l'image d'une entité (déesse grecque) qui serait née un jour et aurait perduré, immuable, n'existe pas. Sur les 4,5 milliards d'années d'âge de notre planète, il y a eu une infinité d'états (variations de sa composition chimique, dont CO₂, oxygène, azote, vapeur d'eau, donc de sa capacité à générer un « effet de serre » plus ou moins fort).

Texte 1 : LA SAGA DE L'ATMOSPHÈRE ET DE LA VIE TERRESTRE

Bernard Moulin et Laurent Thévoz, février 2022

RÉSUMÉ

Le point de départ du questionnement a été le suivant : nous sommes passés en un siècle d'une atmosphère renfermant 0,03 % de CO₂ à une atmosphère en renfermant 0,04 % ; nous en avons donc rajouté 0,01 % (ce qui est très peu en valeur absolue), mais 30 % de plus (ce qui est monstrueux en valeur relative) ; la question subsidiaire qui a été le point de départ de ce texte est la suivante : *comment la composition de l'atmosphère - qui a permis l'apparition et le développement de la vie - a évolué depuis la formation de la terre ?* Sachant que l'atmosphère de la terre primitive était des milliers de fois plus riche en CO₂ qu'actuellement.

Pour répondre à cette question, nous décrivons brièvement les trois principales dynamiques qui ont permis, chacune à leur manière, de constituer peu à peu une atmosphère favorable à la vie (la vie telle que nous la connaissons aujourd'hui) sur la terre.

La première dynamique, en place depuis plus de 3 milliards d'années, a permis une diminution progressive du taux de CO₂ grâce à la création de deux puits de carbone : la formation des carbonates qui généreront les roches calcaires et la création de biomasse, qui générera les hydrocarbures enfouis dans la croûte terrestre. C'est la vie marine (bactéries primitives puis végétaux, puis animaux), par le biais de la photosynthèse, qui sont à la base de cette évolution. Ensemble, ces deux processus ont fait diminuer le taux de CO₂ de l'atmosphère, en capturant le carbone qui s'y trouvait pour l'enfouir dans la croûte terrestre.

Les deux autres dynamiques dépendent de la première puisque d'une part la photosynthèse rejette de l'O₂ dans l'atmosphère, oxygène indispensable au développement des organismes terrestres, alors qu'il n'était quasiment pas présent il y a 4 milliards d'années. D'autre part, l'accumulation d'O₂ dans l'atmosphère a conduit à la création d'une couche d'Ozone (O₃) qui offre une protection indispensable contre les rayons ultra-violet, qu'elle filtre, protégeant ainsi les organismes terrestres de la destruction de leur ADN.

L'amélioration d'une atmosphère favorable à la vie aérobie a favorisé le développement des organismes végétaux à la surface de la terre, qui à son tour, a renforcé la dynamique initiale conduisant à la création des deux puits de carbone.

Finalement, le texte montre comment la vie tardive (actuelle) se développe dans un nouveau contexte, adverse, dû à l'intervention de l'homme qui inverse le processus naturel d'enfouissement, en cours depuis des milliers de millions d'années, du CO₂ de l'atmosphère : il extrait les hydrocarbures, sources d'énergie pour les brûler et libère ainsi à nouveau le CO₂ dans l'atmosphère, ce qui induit, par ricochet, le réchauffement climatique actuel par effet de serre.

L'homme est tout simplement en train de détruire ce que des processus naturels ont mis trois milliards d'années à constituer : le cadre atmosphérique et climatique dans lequel il s'est épanoui.

On parle beaucoup ces temps de « bilan carbone », d'« équivalent carbone », de « taxe carbone », d'énergie décarbonée, mais connaissons-nous bien l'individu « C » dont il est question ici dans tous ses états ? Ses différentes formes, aspects, son cycle de vie sur la terre actuelle, et sur notre globe en tant que « système » vieux de 4,5 milliards d'années de formes de vie actuelles et passées ? Savons-nous quel rôle joue le vivant : les micro-organismes tels que les bactéries et le plancton mais aussi les plantes, dans leur

cycle entre le carbone du CO₂ de l'air, le carbone des calcaires, celui des hydrocarbures et celui de notre organisme ? Pas si sûr ! Ce document tente de répondre à certaines de ces questions.

Ce premier document a été élaboré à partir des explications, des notes et des références de Bernard Moulin, en octobre 2021, puis mis en forme conjointement avec Laurent Thévoz.

Le projet est d'exposer comment les organismes végétaux ont permis le développement d'une atmosphère favorable à la vie sur terre. Nous allons donc montrer comment la photosynthèse et la croissance de la vie végétale sont à l'origine de la création d'une atmosphère favorable à la vie².

Après avoir fait le point sur « notre » atmosphère, nous ferons donc une très succincte présentation de ce qu'est la photosynthèse (point 2) pour ensuite exposer comment cette dernière est à l'origine des trois cycles naturels qui contribuent à une atmosphère favorable à la vie (point 3) et en particulier à la vie animale (point 4). Nous concluons en montrant comment cet équilibre fragile est actuellement et fondamentalement remis en question par les activités humaines (point 5).

1. POINT DE DÉPART : « NOTRE » ATMOSPHÈRE : de quoi parle-t-on ?

Puisque la composition actuelle de l'atmosphère – et en premier lieu sa concentration **en** gaz à effet de serre (dont le CO₂), supérieure à ce qu'elle était il y a un siècle - est la cause du réchauffement actuel que connaît la terre³, nous allons nous demander comment la composition de cette atmosphère a évolué depuis la formation de la terre ?

1.1. L'atmosphère consiste en cette mince enveloppe de gaz qui entoure la terre et qui se raréfie graduellement à mesure que nous nous élevons en altitude. L'effet de serre « naturel » de notre atmosphère est bien sûr bénéfique : **la température moyenne de la surface du globe est de 16°C ; sans l'effet de serre « naturel », elle serait actuellement de -18°C.**

1.2. L'atmosphère de la terre n'a pas toujours été « notre » atmosphère, celle que nous connaissons aujourd'hui. Au moment de la formation de la terre, il y a plus de 4,5 milliards d'années, donc bien avant que la vie n'apparaisse (il y a environ 3,8 milliards d'années), l'atmosphère provenait du dégazage du magma, par le biais des volcans.

L'atmosphère était alors essentiellement composée de **plus de 60% de vapeur d'eau et de 30% de gaz carbonique (CO₂) et de quelques autres gaz en faibles proportions**⁴. Une atmosphère particulièrement impropre à l'existence et au développement de la vie telle que nous la connaissons.

1.3. Vers 1850 (dernière référence considérée comme « naturelle », car antérieure à l'utilisation massive des combustibles fossiles), la composition de l'atmosphère avait radicalement changé et, entre temps, la vie terrestre et maritime explosé. L'atmosphère avait alors la composition suivante :

21% d'oxygène-O₂ + 78% d'azote-N + 1% d'autres gaz, certains en très faibles pourcentages, dont 0,03% de CO₂ [ou 300 parties par million (noté ppm)] soit une concentration de CO₂ environ 1000 fois moindre qu'au moment des premiers âges de la terre !

2 Voir le schéma I « Les trois cycles qui influencent l'atmosphère et la vie sur Terre », annexe 1.

3 Nous n'allons pas développer ici de la relation entre les gaz à effet de serre et le réchauffement climatique.

4 Estimation basée sur des reconstitutions théoriques ; ce sont donc des ordres de grandeur.

1.4. Cette évolution de la concentration de CO₂, de 30% (passage de 0,03 % à 0,04% dans l'atmosphère) vers 1850 nous oblige à nous demander « *Comment expliquer cette diminution drastique de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère de la terre jusque vers 1850 ?* »

2. LA PHOTOSYNTHÈSE – son rôle dans le développement de la vie

2.1. La photosynthèse, c'est quoi ?

- La photosynthèse conduit à la production d'une molécule de sucre C₆H₁₂O₆, 6 molécules d'eau H₂O et 6 molécules d'oxygène O₂, à partir de **6 molécules de CO₂ et 12 molécules d'eau H₂O**⁵.
- Pour que la photosynthèse puisse avoir lieu, la plante extrait de son environnement les «éléments» physiques suivants (voir schéma I, annexe 1) :
 - L'eau provenant du sol par l'intermédiaire de la sève montante,
 - Le gaz carbonique CO₂ de l'atmosphère et
 - L'énergie dont elle a besoin du soleil.
- La photosynthèse conduit donc à ce qu'un organisme végétal, quel qu'il soit, produise du sucre⁶ et rejette dans l'atmosphère de l'oxygène et la moitié de l'eau dont la plante a besoin pour ce processus..

2.2. La photosynthèse et la vie végétale, quelle relation ?

- La plante utilise le sucre produit par la photosynthèse dans ses feuilles pour ses propres besoins. Le sucre (glucose, qui circule dans la sève sous forme de saccharose car soluble dans l'eau) permet en effet le développement de la vie végétale – tant dans les océans et les mers que sur les continents – car c'est la molécule de base qui rend possible la croissance et la multiplication des organismes végétaux : transformation des sucres en molécules plus complexes : amidon, cellulose, lignite, lipides, protéines (si adjonction d'azote), etc., grâce aux différents enzymes, ainsi que pour les échanges avec les organismes qui vivent en symbiose avec eux (les champignons pour les végétaux terrestres).

⁵ Cette formule est le bilan d'un double processus qui a lieu, dans les feuilles, grâce à l'énergie du soleil

- Le premier processus conduit à ce que 2 molécules d'eau, 2H₂O, se dissocient en 4 protons (H⁺), et 4 électrons (e⁻) et une molécule d'oxygène (O₂).
- Le second processus conduit, quant à lui, à ce qu'une molécule de CO₂, 4 H⁺ et 4 e⁻ soient transformés en une molécule CH₂O + H₂O, ce qui, multiplié 6 fois, équivaut à une molécule de sucre (glucose), soit 6 (CH₂O + H₂O) = C₆H₁₂O₆ + 6H₂O.

⁶ La production du sucre nécessite, de plus :

- Des catalyseurs (à base de phosphore, azote, magnésium, potassium) contenus dans les chloroplastes des cellules des feuilles qui sont mis à disposition de la plante par le mycélium des champignons qui lui livrent les sels minéraux dont elle a besoin, en échange de sucres. Ils sont transportés par la sève montante.
- Des « micro-batteries » - aussi contenus dans les chloroplastes des cellules des feuilles - qui stockent l'énergie électrique nécessaire aux réactions chimiques qui président à la production du sucre (voir 3.1.).

- De cette manière se met en place une interaction cumulative entre la photosynthèse et le développement de la vie végétale : la croissance du nombre des végétaux conduit à une augmentation de la photosynthèse qui fournit, « en retour », le sucre nécessaire à la croissance des organismes végétaux. Ce cercle vertueux sera le « moteur » des 3 cycles qui contribuent à une atmosphère favorable à la vie terrestre (voir schéma I).

3. LES TROIS CYCLES NATURELS QUI CONDUISENT À UNE ATMOSPHÈRE FAVORABLE À LA VIE TERRESTRE.

Les trois cycles que nous allons présenter contribuent tous trois, chacun de manière spécifique, à la création d'une atmosphère favorable à la vie (telle que nous la connaissons aujourd'hui). En effet, le premier cycle « vert » (voir le schéma 1) y contribue de manière indirecte et déterminante. En effet, il conduit d'une part à la captation (presque) « définitive » du CO₂ et donc à une réduction du taux de CO₂ dans l'atmosphère et d'autre part au rejet d'oxygène O₂ dans cette même atmosphère. Ces deux « produits » induisent à leur tour, et comme conséquence de ce premier cycle, un second cycle « rouge » qui conduit à une diminution de la température de l'atmosphère et un troisième « bleu » qui lui assure une augmentation de sa concentration en O₂ et en O₃, l'ozone.

3.1. Le Cycle I : La réduction du taux de CO₂ dans l'atmosphère

Nous allons maintenant décrire les deux processus biochimiques naturels qui sont intervenus au fil des temps géologiques et qui expliquent cette réduction du taux de CO₂ de 30 % il y a 3,8 milliards d'année (au moment de l'apparition de la vie) à 0,03 % vers 1850. Ils ont en commun le stockage du carbone extrait de l'atmosphère dans la croûte terrestre.

Le premier fait référence à la constitution des roches calcaires et le second à l'accumulation d'hydrocarbures.

3.1.1. La contribution des roches calcaires à la réduction du CO₂ dans l'atmosphère

- La vie apparaît d'abord dans l'eau, il y a environ 3,8 milliards d'années, sous la forme de bactéries et d'algues unicellulaires qui vivent d'abord isolées, puis en colonie. Elles « inventent » la photosynthèse (voir le point 2.) qui leur permet de produire le sucre nécessaire à leur croissance individuelle et à leur multiplication pour coloniser le monde marin. Elles utilisent du carbone et rejettent de l'oxygène dans l'eau.
- Ces premières formes de vie marine développent un squelette, interne ou externe, constitué de calcite. Elles combinent pour cela le CO₂ dissous dans l'eau et apporté par les fleuves, sous forme de bicarbonates avec du calcium (Ca) également en solution dans l'eau de mer, apporté par les fleuves depuis les continents⁷. De façon très simplifiée : de la chaux (CaO) et du gaz carbonique (CO₂) entrent dans la composition du calcaire (CaCO₃), mais la réaction chimique est plus complexe et se fait en plusieurs étapes : d'abord sur les continents, puis dans les océans.

⁷ Le cycle a ainsi commencé sur les continents par des processus chimiques : 1) l'altération de roches de surface qui a libéré du calcium de leur constitution et les eaux de pluie et de ruissellement qui ont piégé du gaz carbonique de l'air et l'ont transporté sous forme de bicarbonates.

- Ces organismes capturent donc, peu à peu, du bicarbonate contenu dans l'eau et issu du gaz carbonique pour constituer leurs squelettes, conduisant à ce que la concentration de ce gaz diminue, peu à peu et au fur et à mesure de la prolifération des organismes marins.
- À leur mort, leurs squelettes de calcite CaCO_3 s'accumulent au fond des mers et des océans pour constituer la « matière première » des roches dites calcaires. Ces dernières sont constituées d'empilement - pendant les périodes géologiques (qui se comptent en centaines de millions d'années) - des restes minéraux de squelettes des premiers micro-organismes vivants⁸.

Les roches calcaires représentent ainsi le premier puits de carbone dans lequel ce dernier a été stocké depuis plus de 3 milliards d'années. Elles sont une première partie de la réponse à notre question initiale : La diminution de plus de 1'000 fois de la concentration de CO_2 a été rendue possible d'abord grâce au carbone qui a été stocké définitivement depuis plus de 3 milliards d'années dans les roches calcaires, constituées de calcite CaCO_3 capturée dans le squelette des organismes marins morts.

3.1.2. La contribution de la biomasse à la réduction de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère.

- Le second processus qui intervient nous conduit à rappeler que la première conséquence de la photosynthèse est la croissance de la biomasse grâce au sucre qu'elle produit, qui en retour a pour effet une augmentation des activités de la photosynthèse.
- Toute cette biomasse, à sa mort, s'est accumulée au fond des océans et des mers avec son carbone issu au départ de CO_2 . Sa décomposition a conduit à la production d'hydrocarbures - charbon, pétrole et gaz – qui sont alors restés quasi définitivement stockés dans des structures géologiques (dans les roches sédimentaires).
- **Les hydrocarbures représentent donc le second puits de carbone qui le stocke depuis plus de 2 milliards d'années, constitués qu'ils sont par de la biomasse décomposée constituée en grande partie de carbone.**

3.1.3. En synthèse, et pour revenir à la question de comment expliquer la diminution de 1000 fois de la concentration du CO_2 , nous constatons qu'elle a été le fruit de deux processus naturels complémentaires :

- **Le premier, qui a conduit à ce que le carbone soit stocké depuis plus de 3 milliards d'années dans les roches calcaires,** qui ont capturé définitivement le carbone en l'incorporant dans la calcite (CaCO_3) par le biais des organismes marins morts.
- **Le second, qui a conduit, lui, à ce que le carbone soit stocké depuis plus de 2 milliards d'années dans les hydrocarbures,** qui ont capturé définitivement le carbone contenu dans la biomasse décomposée dans les fonds marins.

⁸ Par exemple, on peut estimer que le dépôt d'un m^3 de craie a nécessité la mort et l'engloutissement d'environ 500 000 milliards de cellules de micro-organismes à coquille en calcite !

Ensemble, ces deux puits à carbone (les roches calcaires et les hydrocarbures)⁹ ont progressivement, mais pas linéairement, abaissé le taux de CO₂ dans l'atmosphère de 30% à 0,03% !! Soit de 1'000 fois. Cette évolution a nécessité 3,8 milliards d'années.

La croissance de la vie végétale sur la terre, et celle de la photosynthèse qui l'accompagne, est à l'origine des deux autres cycles naturels que nous allons présenter maintenant.

3.2. Le cycle II : La diminution de la température de l'atmosphère

La variation de la concentration du taux de CO₂ dans l'atmosphère a des incidences directes sur la température à la surface de la terre par augmentation de l'effet de serre : une partie des rayons lumineux émis par le soleil qui se transforment en infrarouges sont réémis vers l'espace ; s'ils sont bloqués plus qu'habituellement lors de ce parcours par la « barrière » que constitue l'excès de CO₂, ces infrarouges seront redirigés vers la terre et seront alors responsables du réchauffement.

La capture du CO₂ - conséquence du développement de la vie végétale et de la photosynthèse - a donc conduit, au travers des temps géologique, à la diminution progressive de la température à la surface de la terre.

Cette diminution de la température a été favorable au développement de la vie à la surface de la terre et donc aussi à celle de la végétation telle que nous la connaissons actuellement. Qui a favorisé à son tour la capture du CO₂ et la diminution de son taux dans l'atmosphère. Et donc la diminution de sa température. Ce qui boucle le cycle. C'est une rétroaction positive¹⁰ dans la mesure où un phénomène (que nous pouvons juger bon ou mauvais, là n'est pas la question), s'amplifie de lui-même.

Cette modification du processus d'effet de serre dépend d'une très faible modification de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère. C'est ainsi que l'accroissement récent de 0,01 %, depuis 1850 à nos jours, de la concentration de CO₂ (passage de 0,03 % à 0,04 %) est à elle seule responsable du réchauffement terrestre que nous connaissons.

3.3. Le Cycle III : L'augmentation du taux d'oxygène O₂ qui permet la respiration animale et de celui de l'ozone O₃ qui protège les organismes terrestres des rayonnements ultraviolets (U.V.)

3.3.1. L'augmentation du taux d'oxygène O₂

- L'O₂ produit par la photosynthèse a été rejeté – pendant le premier milliard et demi d'années - dans l'eau des océans et des mers, colonisé par les organismes marins. Pendant toute cette période l'O₂ a été fixé par le fer, par oxydation (période baptisée par les géologues « la grande oxydation »).

⁹ Ces deux puits accumulent de façon inégale le stock de carbone initialement contenu dans l'atmosphère terrestre primitive : une plus grande quantité de carbone est stockée sous forme de calcaire que d'hydrocarbure. On évalue à 60 à 80 millions de gigatonnes le carbone total stocké dans la croûte terrestre (calcaire + hydrocarbures) contre 40 000 gigatonnes stocké dans les océans, 3000 gigatonnes stocké dans la biosphère (sol + forêts) et 750 gigatonnes stocké dans l'atmosphère (1 gigatonne = 1 milliard de tonnes) ; voir annexe 3.

¹⁰ Il y a en ce moment, à cause du réchauffement climatique, de nombreuses **rétroactions positives** que nous jugeons **néfastes** (la fonte de la banquise, le dégel du permafrost, etc.).

- Ce n'est qu'ensuite (une fois que la quasi-totalité du fer a été oxydé), il y a environ 2 milliards d'années, que l'oxygène O₂ a été rejeté, s'est échappé dans l'atmosphère, la rendant ainsi « respirable », donnant ainsi l'opportunité à de nouveaux organismes, dont les animaux, aquatiques et terrestres, de se développer sur un mode nouveau et de pouvoir dès lors croître et se reproduire avec un métabolisme basé sur la respiration, en consommant les dérivés du sucre produit par les végétaux.
- Là encore à l'échelle des temps géologiques, ce rejet constant d'O₂, d'abord par les organismes végétaux marins puis par ceux terrestres, a conduit (très) peu à peu à une accumulation d'O₂ dans l'atmosphère terrestre au point où il est passé de 0% à 21% actuellement. C'est donc là une contribution directe et essentielle de la vie végétale et de la photosynthèse en particulier à la vie animale sur terre : lui fournir l'oxygène dont elle a besoin pour respirer (voir 4).

3.3.2. L'augmentation du taux d'Ozone O₃.

Cette accumulation d'oxygène dans l'atmosphère terrestre a été accompagnée par la production d'ozone O₃ qui a constitué dans la haute atmosphère une barrière aux rayons solaires létaux. Létaux car ils altèrent l'ADN des organismes vivants, terrestres du fait de leur longueur d'onde proche de celle de la molécule d'ADN. C'est cette protection qui a alors permis d'abord à la vie végétale, puis animale, d'apparaître et de se développer sur les terres émergées. Et c'est une nouvelle contribution de la vie végétale à celle animale.

4. LA RESPIRATION, tant végétale qu'animale

4.1. De quoi s'agit-il ? La respiration consiste en la transformation de :

1 molécule de sucre C₆H₁₂O₆ + 6 molécules d'O₂ en 6 molécules de CO₂ + 6 molécules d'H₂O

C'est au niveau cellulaire que se fait cette transformation (pour les végétaux comme pour les animaux avec leurs mitochondries) qui conduit à la décomposition du sucre en consommant de l'oxygène (O₂) et en libérant du gaz carbonique (CO₂) et de la vapeur d'eau (H₂O).

De fait, la respiration pour les animaux - et dans une moindre mesure pour les végétaux (la nuit par exemple) - ne fait donc qu'expirer du CO₂ et de la vapeur d'eau à partir d'une réaction se réalisant au sein même des cellules. Ce sont ces cellules qui, au sens propre, libèrent le CO₂ et l'eau.

4.2. Cette transformation libère de l'énergie que les organismes vivants utilisent pour :

- Remplacer les cellules mortes
- Grandir
- Se déplacer (seulement pour les animaux !)

4.3. Elle a aussi pour conséquence de rejeter du CO₂ dans l'atmosphère et donc de contribuer à une augmentation de sa proportion dans l'atmosphère. Dans le cycle de la biosphère, et sans

l'impact de l'homme, il y a un équilibre permanent entre production et consommation de gaz carbonique et production et consommation d'oxygène.

5. OÙ (ou QUAND) TOUT EST REMIS EN QUESTION

Le fragile équilibre qui a conduit à la constitution de notre atmosphère est actuellement remis radicalement en question sous l'effet de trois phénomènes, résultant tous des activités humaines : d'abord l'extraction et la combustion des hydrocarbures, puis la déforestation et enfin la production de ciment (voir le schéma II, annexe 2).

5.1. La combustion des hydrocarbures. Elle conduit – comme avec la respiration végétale ou animale – à des rejets de CO₂ et de vapeur d'eau dans l'atmosphère, mais dans une proportion et à un rythme jamais vus dans l'histoire géologique de la terre (annexes 2 et 3). Pour plus de détail voir en particulier les sites suivants :

<https://www.ecoco2.com/blog/une-concentration-de-co2-au-plus-haut-depuis-3-millions-dannees/>
(<https://jancovici.com/changement-climatique/les-ges-et-nous/comment-evoluent-actuellement-les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/>).

https://www.cnrs.fr/sites/default/files/press_info/2019-09/DP_confpresse_CMIP6_OK2.pdf

5.2. La fabrication du ciment et de la chaux, qui consiste au processus inverse (CaCO₃ + énergie thermique >>> CaO + CO₂) de celui qu'ont élaboré les organismes vivant pour fixer du carbone en fabriquant leur squelette en calcaire. Cette fabrication libère des quantités importantes de CO₂ (et de plus consomme beaucoup énergie).

5.3. La (mauvaise) gestion des forêts et des sols : les déboisements intensifs, de même que les labours intensifs, entraînent une perte du carbone de la biosphère qui va alors rejoindre celui de l'atmosphère sous forme de CO₂.

Du cumul de ces processus anthropiques, il en résulte alors une augmentation continue et fulgurante de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère qui est passé entre 1850 et 2021 de 0,03% à 0,04%. Cette augmentation de + 0,01% du taux de CO₂ (donc tout de même un accroissement de 30 %) est suffisante pour conduire au dérèglement climatique que nous connaissons actuellement.

Précisons que ce dérèglement n'est pas uniquement la conséquence de la libération d'excès de CO₂ dans l'atmosphère. D'autres **gaz à effet de serre additionnel**, c'est-à-dire liés à l'activité humaine, sont aussi partie prenante de ce dérèglement, comme nous pouvons le voir dans les données chiffrées ci-après, qui prennent en compte l'ensemble des émissions anthropiques responsables du réchauffement :

- CO₂ : 77 % dont :
 - Combustibles fossiles : 57 %
 - Déforestation et dégradation de la biomasse des sols : 17 %
 - Des ciments : 3 %
- Méthane : 14 % ;
- Protoxyde d'azote : 8 % ;

- Gaz fluorés : 1 %.

On pourra donc noter que si les **combustibles fossiles sont responsables de 57 % des gaz à effet de serre** (donc de la majorité), l'agriculture joue une part qui est loin d'être négligeable si l'on fait le décompte : une grande partie des 14 % dus au méthane + une grande partie des 8 % dus aux protoxyde d'azote + l'essentiel des 17 % dus à la déforestation et à la perte du carbone des sols (donc **plus de 35% des gaz à effet de serre**), auquel s'ajoute l'énergie nécessaire à la fabrication des engrais, des fertilisants et au fonctionnement des engins agricoles mécanisés.

En plus d'effort à faire concernant les émissions de CO₂ liés à l'utilisation de combustibles fossiles, il faudrait sûrement envisager une agriculture plus respectueuse de la quantité de gaz à effet de serre émis, **voire même une agriculture qui stocke du carbone dans le sol** ! Comme par exemple ce qui est préconisé par l'**initiative 4 pour 1000** (voir : <https://4p1000.org/fr>). La raison en est qu'il va falloir trouver un moyen, à l'échelle humaine et donc très vite, de restocker du carbone ! Le cycle géologique du carbone, qui permet d'en stocker, est un cycle beaucoup trop long¹¹ pour être efficace à l'échelle humaine ; il ne reste donc que le cycle court à notre disposition : stocker du carbone dans les sols (agricoles et non agricoles) et dans les forêts (agroforesterie).

¹¹ Jérôme Gaillardet (Institut de Physique du Globe) nous explique qu' «il faudra attendre un million d'années probablement pour que l'excès de CO₂ que l'homme a injecté dans l'atmosphère soit complètement résorbé de l'atmosphère par les réactions géologiques». (<https://video.umontpellier.fr/video/0039-osu-oreme-conference-de-mr-gaillardet-jerome-le-language-des-fleuves/>)

Annexes

Annexes 1 et 2 : Les trois cycles qui influencent l'atmosphère et la vie sur terre, avec le schéma I (sans l'impact de l'homme) et le schéma II (avec l'impact de l'homme moderne), où la combustion d'énergie fossile, la déforestation et la fabrication de ciment remettent tout en question.

Explications pour la lecture des deux schémas

- Les flèches indiquent des relations de cause à effet directes entre deux variables A et B.

- Les signes « + » indiquent l'existence d'une relation directement proportionnelle entre deux variables impliquées. C'est-à-dire que si A augmente, ou diminue, alors B augmente, ou diminue.

Exemple : Plus le nombre d'organismes végétaux augmente, plus la photosynthèse augmente.

- Les signes « - » indiquent l'existence d'une relation inversement proportionnelle entre deux variables. C'est-à-dire que si A augmente, ou diminue, alors B diminue, ou augmente.

Exemple : Plus le CO₂ est capturé dans les roches calcaires, moins il y a de CO₂ dans l'atmosphère terrestre.

- L'enchaînement des relations causales conduit à la mise en évidence de cycles qui peuvent avoir deux qualités :
 - Un cycle cumulatif lorsqu'au final la combinaison des relations est positive ou
 - Un cycle compensatoire lorsque cette combinaison est négative.
- Les cycles cumulatifs sont responsables des dynamiques de croissance et ceux compensatoires des dynamiques de limitation de croissance, nécessaires au maintien à l'équilibre d'un système, pour l'empêcher de croître indéfiniment.

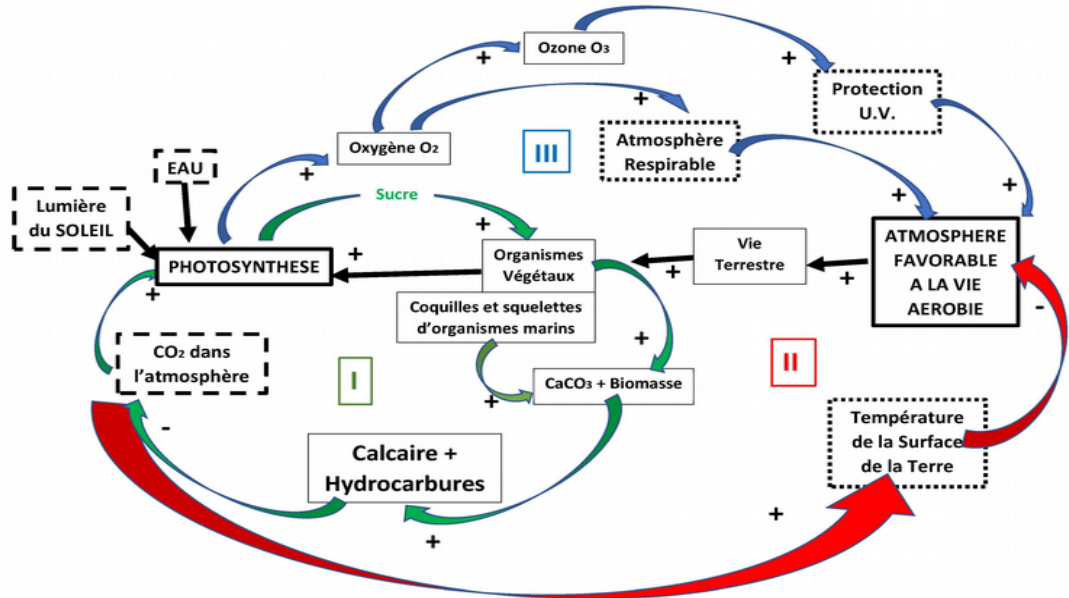
Exemples : tirés du Schéma I

- Le cycle III est cumulatif puisque la photosynthèse conduit à amélioration d'une atmosphère favorable à la vie qui, en retour, conduit à une augmentation de... la photosynthèse.
- Alors que les cycles I et II sont compensatoires. Avec le cycle I, la photosynthèse conduit à une réduction du CO₂ dans l'atmosphère ce qui augmente la photosynthèse pour qu'elle contribue à réduire le CO₂ dans l'atmosphère, etc...

Et le cycle II l'est aussi puisque la même réduction du CO₂ conduit à une amélioration de l'atmosphère favorable à la vie, ce qui contribue à son tour à la croissance des organisme végétaux et donc... à une réduction du CO₂.

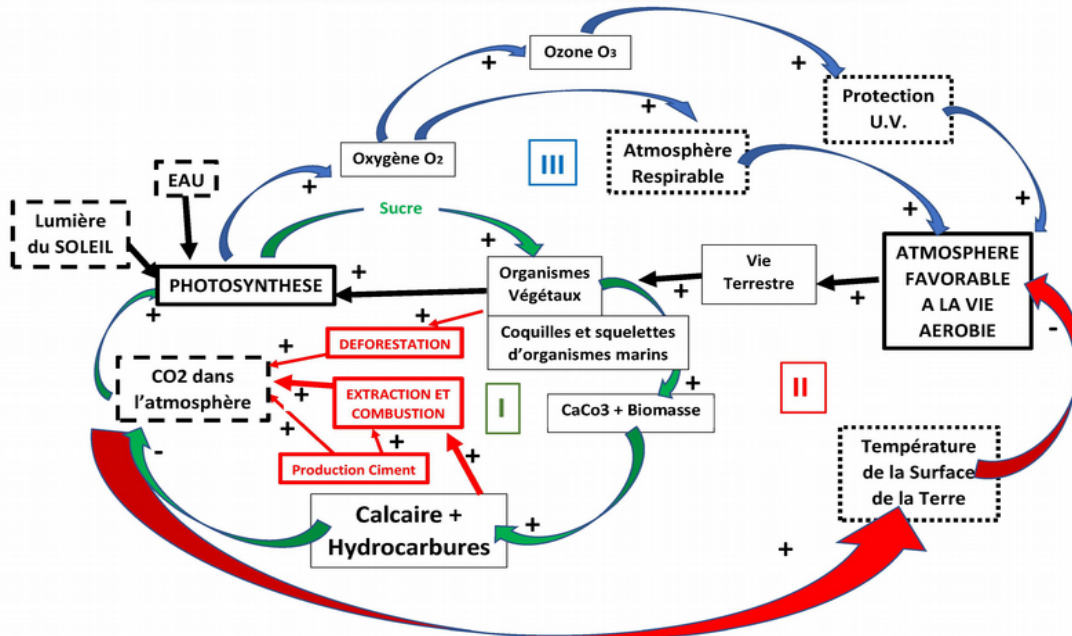
- Le schéma II met parfaitement en évidence le renversement opéré dans les dynamiques en place, par l'irruption des activités humaines. Ainsi le cycle II, de compensatoire devient cumulatif avec une augmentation continue de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, sans limite, alimentant par là le réchauffement climatique.

I. LES 3 CYCLES QUI INFLUENT L'ATMOSPHERE ET LA VIE SUR TERRE



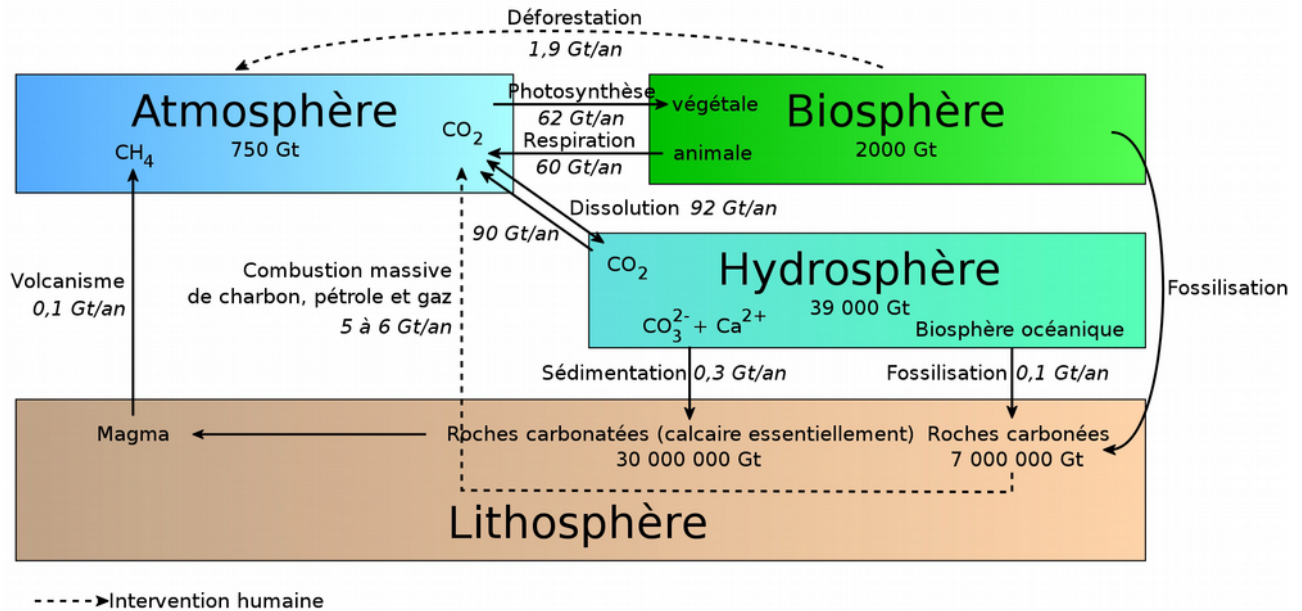
Annexe 1 : Les trois cycles qui influencent l'atmosphère et la vie sur terre

**II. LES 3 CYCLES QUI INFLUENT L'ATMOSPHERE ET LA VIE SUR TERRE :
LA COMBUSTION, LA DEFORESTATION ET LE CIMENT REMETTENT TOUT EN QUESTION**



Annexe 2 : Les trois cycles qui influencent l'atmosphère et la vie sur terre

Cycle du carbone



Annexe 3 : Schéma du cycle du carbone (https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_du_carbone)

L'immense réservoir de carbone est la lithosphère qui stocke 80 000 000 Gigatonnes (Gt) de carbone minéral, sous forme de roches carbonatées et 14 000 Gt de carbone dans la matière organique - *pétrole, charbon, gaz* - fossile (réévaluation par rapport aux données du schéma) ; ces très grands réservoirs ont un cycle extrêmement lent à l'échelle humaine. L'hydrosphère est un réservoir intermédiaire qui stocke 39 000 Gt de carbone sous forme de CO_2 . L'atmosphère et la biosphère sont des petits réservoirs : le premier stocke 750 Gt principalement sous forme de CO_2 , le second deux à trois fois plus selon les auteurs. Les deux derniers cités, bien qu'ils soient de « petits » réservoirs, ont un cycle « rapide » à l'échelle humaine et, sans l'impact de l'homme, sont à l'équilibre ; ils sont contrôlés par l'échange (décrit précédemment) des réactions photosynthèse \leftrightarrow respiration. [1 Gigatonne = 1 milliard de tonnes].

Texte II

CARBONE, SUCRE, ÉNERGIE, CROISSANCE, NUMÉRIQUE ET MÉTAUX RARES

***- QUELQUES POINTS ABORDÉS SOUS UN AUTRE ANGLE -
QUELQUES SUJETS DE RÉFLEXION QUI DÉCOULENT DU TEXTE PRÉCÉDENT***

par Bernard Moulin

- 1) Avant-propos
- 2) Énergie(s)
- 3) Histoire d'atmosphère primitive, de vie et de fer
- 4) Photosynthèse et respiration : le cycle court du carbone
- 5) Qu'est-ce qui différencie le dérèglement du climat dû à l'homme des variations naturelles du climat
- 6) Climat et météo : quelles différences ?
- 7) Un très grand « puits de carbone » : le cycle complet de la formation des calcaires
- 8) Hydrocarbures et moteurs thermiques
- 9) Qu'est-ce que véritablement « l'effet de serre »
- 10) D'où proviennent les gaz à effet de serre émis par l'homme ? Où vont-ils se retrouver ? Et où va se dissiper l'énergie libérée par le réchauffement dû à leur augmentation ?
- 11) Pourquoi faut-il dire : « *dérèglement climatique* » et non pas : « *crise climatique* »
- 12) Albédo, rétroactions et point(s) de bascule
- 13) Méthane, bétail, agriculture industrielle, engrais azotés
- 14) Le changement (climatique), c'est maintenant !
- 15) Le sol, ce grand oublié
- 16) Métabolisme
- 17) Énergie, exponentielle, numérique et « dématérialisation »
- 18) Le « piège » des énergies décarbonées et de la soit-disant « transition verte »
- 19) La question sous-jacente des terres rares
- 20) Des questions sociétales
- 21) En guise de bilan final

1) Avant-propos

Le texte qui suit reprend certains points qui ont été traités dans le texte précédent « *LA SAGA DE L'ATMOSPHERE ET DE LA VIE TERRESTRE* », tout en les présentant sous une autre facette ou en développant certains aspects. Il se poursuit en abordant la question suivante : sachant que le réchauffement climatique est dû pour les 2/3 à l'usage des combustibles fossiles pour nos besoins énergétiques, est-ce que l'utilisation de sources d'énergie décarbonées résoudra le problème, ou non ?

La question du réchauffement climatique (ou dérèglement climatique, bien plus grave qu'une simple « crise climatique » passagère, nous le verrons plus loin) devrait être encore bien plus qu'elle ne l'est au cœur des préoccupations de ces premières décennies du XXI^e siècle. Ce réchauffement climatique est la résultante de l'accumulation « anormale » et exponentielle de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre : 1) **anormale** dans le sens de « *produite par les humains par des processus qui sortent des processus habituels que le système terre met en œuvre* » ; 2) **exponentielle**, car elle suit une courbe qui se redresse de plus en plus. Mais nous verrons aussi que ce réchauffement climatique, dû à la libération de gaz à effet de serre, n'est qu'une des facettes de l'emprise de notre espèce sur son environnement par sa frénésie de consommation d'énergie, de matières premières et de ressources non renouvelables (ou du moins qui ne se renouvellent pas à la même échelle de temps que celle à laquelle elles sont ponctionnées¹²), surtout si l'on extrapole cette consommation exponentielle dans le futur, même proche : les 30 prochaines années¹³.

Le système terre est un système complexe qui prend en compte différentes « couches » (ou enveloppes, à l'image d'un oignon) successives et superposées que sont la **lithosphère**¹⁴ (les roches), l'**hydrosphère** (les océans, mers, lacs, fleuves et nappes aquifères), la **cryosphère** (les glaces, des pôles et des hautes altitudes), la **biosphère** (= le monde vivant : virus, bactéries, algues, champignons, végétaux, animaux) dans lequel les humains (la seule espèce parmi les 45000 espèces de vertébrés à s'être adaptée à tous les milieux écologiques de la planète) ont pris une place que l'on pourrait qualifier de « déséquilibrée » (ou, du moins, déséquilibrante)¹⁵, et enfin l'**atmosphère** (la couche gazeuse, elle-même séparée en plusieurs « strates ») ; ce système fonctionne comme un tout indissociable¹⁶ et chacune de ses « strates » a un lien d'interdépendance, proche ou lointain, avec toutes les autres. **L'élément carbone (C) est un élément clé** présent dans toutes les strates de ce système très complexe, comme par ailleurs l'eau (H₂O) et l'oxygène (O₂), par les échanges qu'il y entretient. D'autres éléments jouent un rôle d'importance variable selon les « couches » considérées (le silicium, le calcium, le potassium, l'azote, le phosphore, le soufre, le fer, le chlore, etc.).

12 Les gisements métallifères ne se renouvellent qu'à l'échelle de la centaine de millions d'années sur notre planète.

13 « 78,3 % et 89,4 % des ressources mondiales de cuivre identifiées seront extraites respectivement dans les scénarios 4° C et 2° C entre 2010 et 2050 ». <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/cuivre-transition-energetique-metal-essentiel-structurel-et-geopolitique> : autrement dit : soit on grille mais il nous reste 20 % du cuivre pour les voitures électriques d'après 2050 ; soit on a seulement « un peu » trop chaud, mais il ne nous reste plus que 10 % du cuivre pour après 2050...

14 En réalité, il conviendrait même de prendre en considération les enveloppes plus profondes qui sont : 1) le **noyau**, constitué essentiellement de fer (comprenant la graine, solide et de son enveloppe, liquide) car celui-ci est responsable du champ magnétique terrestre, lequel joue le rôle de bouclier contre le « vent solaire », constitué de particules létales qui supprimeraient instantanément toute vie sur terre si elles arrivaient jusqu'à la terre ; 2) le **manteau**, coresponsable, entre autre, de la tectonique des plaques, sans quoi la terre ne serait qu'une surface morte et sans renouvellement, et dont les seuls reliefs seraient dus aux impacts de météorites, comme c'est le cas pour la lune.

15 Jérôme Gaillardet, "La zone critique, interface scientifique" https://www.youtube.com/watch?v=vxG_IK0u9LQ

16 http://impmpc.sorbonne-universite.fr/fr/espace-grand-public/l_impmpc_en_images/films_en_ligne/e-seminaire-la-zone-critique-interface-scientifique-jerome-gaillardet.html

Il se trouve que les principaux gaz à effet de serre, à l'exception de la vapeur d'eau, sont le **gaz carbonique** (CO₂) et le **méthane** (CH₄), deux gaz qui contiennent justement l'élément carbone dans leur molécule et il se trouve également que les sources d'énergie les plus faciles à extraire et à utiliser par les humains sont aussi à base de l'élément carbone : les hydrates de carbone (= le bois) et les hydrocarbures (= charbons, pétrole et gaz naturel) et que ceux-ci libèrent du gaz carbonique en « échange » de l'énergie qu'elles nous procurent et dont nous tirons profit et confort. Tout est donc prêt pour un problème conflictuel de grande ampleur !

Le gaz carbonique et le méthane ont l'heur et le malheur d'être des gaz, inodores, invisibles et impalpables, et il est difficile, pour les humains que nous sommes, de leur imaginer une masse, un poids, à la différence des matériaux solides et liquides que nous côtoyons. Le bois est un hydrate de carbone, c'est-à-dire constitué de carbone, d'oxygène et d'hydrogène, ou bien, pour le dire autrement, de carbone et d'eau. Sa combustion, qui va dégager de l'énergie sous forme de chaleur, va libérer de la vapeur d'eau et du gaz carbonique. La combustion d'un kilogramme de bois sec (500 grammes de carbone) va dégager 1,8 kg de CO₂¹⁷. De même pour l'essence, qui est un hydrocarbure : la combustion d'un litre d'essence, qui renferme environ 0,63 kg de carbone, va produire environ 2,3 kg de CO₂. La combustion de matières carbonées, source d'énergie, dégage inévitablement, à notre insu si nous ne sommes pas attentif à cela, du gaz carbonique et de la vapeur d'eau. Et nous voyons que le poids de gaz carbonique qui en résulte, émis dans l'atmosphère par son utilisation (pour en tirer de l'énergie : mécanique pour les moteurs, thermique pour le chauffage), est plus élevé que le poids de la matière combustible (solide ou liquide) de départ ; ceci du fait de la capture d'oxygène dans sa molécule.

Dans le système terre, sans l'empreinte excessive de l'homme, le carbone entre dans deux grands cycles principaux qui **s'équilibrent chacun à leur façon**, cela sur des échelles de temps très différentes l'un de l'autre : le cycle du carbone organique (un cycle extrêmement court à l'échelle des temps géologiques : année, centaine d'années, donc un cycle à échelle humaine) et le cycle du carbone minéral (un cycle très long à l'échelle des temps géologiques : plusieurs centaines de millions d'années). Le cycle court, celui du carbone organique, est basé sur les **échanges entre le monde végétal et le monde animal, via l'atmosphère et l'eau** (sans entrer dans les subtilités des bactéries et autres organismes¹⁸) ; le cycle long, celui du carbone minéral, est basé sur le **dégazage** (émission de gaz carbonique) **du manteau terrestre** par le volcanisme, l'**altération des roches** en surface des continents, puis la **production de carbonate de calcium** par les organismes vivants, essentiellement en milieu marin, et l'accumulation de celui-ci dans les boues marines, puis dans les **roches calcaires** dont elles sont issues. Nous détaillerons ces deux cycles plus loin.

L'extraction d'hydrocarbures fossiles comme combustible, de même que la déforestation, la mauvaise gestion des sols par l'agriculture industrielle et, plus accessoirement, la production de ciment, déséquilibrent ces deux cycles et vont à l'encontre du fonctionnement qui a été celui du système terre depuis au moins 3,5 milliards d'années.

2) Énergie(s)

Tout organisme vivant, du virus aux vertébrés, en passant par les bactéries, les champignons et les plantes, a besoin d'énergie pour son **métabolisme** [durant sa croissance, sa reproduction, etc. (voir

17 Pour déculpabiliser ceux qui se chauffent au bois, le bois qui se décompose de façon naturelle sous l'action des bactéries émet également du CO₂.

18 Ce cycle court comprend en outre la dégradation de la matière organique par les bactéries ; si cela se produit en milieu sans oxygène, c'est du méthane (CH₄) qui sera dégagé et non du gaz carbonique (CO₂).

point 15)]. L'« *animal humain contemporain* » a un besoin de plus en plus immodéré en énergie. L'énergie peut se présenter : 1) sous forme de force liée à la **gravitation** ; 2) sous forme de **radiations : nucléaires** (rayons α, β, γ) issus de la désintégration de noyaux d'atomes (réactions de **fusion** d'atomes légers au cœur du soleil, réaction de **fission** d'atomes lourds dans le manteau terrestre, chacune de ces deux réactions libérant des radiations énergétiques) + **rayons ultraviolets**, (invisibles à la vue, mais responsables des coups de soleil et de la détérioration de nombreux matériaux) **rayons lumineux, rayons infrarouges** (= chaleur).

Sur notre planète, ces différentes formes d'énergie existent, ce sont :

-1) celles liées à la gravitation, -de notre satellite préféré : la lune (les marées) et -de la terre elle-même (le courant des fleuves et des rivières, les chutes d'eau, l'énergie mécanique libérée par les éboulements, glissements de terrains, mouvements des glaciers) ;

-2) celles liées aux rayonnements nucléaires : a) du soleil (342 W/m^2 en moyenne) sous forme de rayonnement, de l'infrarouge à l'ultraviolet, et b) dans une moindre mesure de la terre ($0,06 \text{ W/m}^2$)¹⁹, liées à la désintégration d'atomes radioactifs (potassium, uranium) dans le manteau, dégageant de la chaleur, responsable : du volcanisme, de la tectonique des plaques, de la géothermie. Une partie de l'énergie radiative (lumineuse, thermique) du soleil va se transformer en énergie mécanique (courant marin, houle, vent), ce qui est la manière que le système terre a trouvé pour re-équilibrer le surplus qui arrive à l'équateur vers les hautes latitudes.

Ce sont finalement les organismes qui récupèrent l'énergie lumineuse du soleil grâce à la photosynthèse (par des mécanismes électriques et photochimiques très complexes qui se passent dans les chloroplastes des bactéries et des végétaux) qui sont les plus « malins », car au plus près de la source primaire (le photon de lumière).

Les humains ont bien sûr tenté de maîtriser, avec plus ou moins de succès, tous les systèmes (en plus de celui de leur métabolisme d'animal) pour accaparer de l'énergie, depuis les plus simples (brûler du bois) jusqu'aux plus sophistiqués (la fission et la fusion nucléaires), en passant par la consommation de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz), l'énergie hydraulique (force gravitaire de l'eau dans sa chute), éolienne, solaire thermique, solaire photo-voltaïque, la force marémotrice et la géothermie.

3) Histoire d'atmosphère primitive, de vie et de fer

Rappelons d'une façon un peu différente ce qui a été explicité dans le texte précédent (*la saga de l'atmosphère et de la vie terrestre*) : la façon dont l'atmosphère terrestre, depuis ses origines, s'est appauvrie en gaz carbonique et s'est enrichie en oxygène, en détaillant quelques points particuliers non abordés dans le précédent. Notre planète s'est formée, comme ses consœurs, au moment de la naissance du système solaire, il y a 4,56 milliards d'années, à partir de l'agglomération de poussières et de gaz issus de précédentes implosions et explosions cataclysmiques d'étoiles plus anciennes, alors en fin de vie (les *supernovae*).

Nous n'avons aucun témoin direct (roches, minéraux) de ce qui s'est passé durant les 300 - 400 premiers millions d'années de l'histoire de notre planète, mais uniquement des déductions (fiabiles) par la physique et la chimie²⁰, les plus anciennes roches connues ayant autour de 3,9 milliards

19 Donc 3500 fois moins (en moyenne).

20 La Terre hadéenne de 4,56 Ga à 4,0 Ga - par Hervé Martin : <https://www.youtube.com/watch?v=LMz2zq37uCM>

d'années et certaines d'entre elles renfermant des minéraux qui ont 4,2 milliards d'années (témoins de roches antérieures désagrégées par un cycle d'altération). Une vie est apparue il y a un peu moins de 4 milliards d'années sous une forme primitive dont nous ne savons pas grand-chose, faute de fossiles, à une période où l'atmosphère terrestre était très différente de l'actuelle²¹ : celle-ci était constituée essentiellement de gaz carbonique et de vapeur d'eau ; l'oxygène (O₂) était absent, les radiations cosmiques rendaient toute vie en surface impossible. Cette vie primitive est née sans aucune relation directe avec l'atmosphère terrestre, vraisemblablement dans les grands fonds marins, à proximité des sources chaudes des cheminées hydrothermales riches en soufre, en consommant justement du soufre (bactéries sulfato-réductrices). Les bactéries, de différents types, ont dominé la vie sur terre durant 1,5 milliard d'années. Les archéobactéries (ou archées) ont constitué un important groupe de bactéries primitives qui consommaient du gaz carbonique et rejetaient du méthane, un gaz à effet de serre encore plus impactant que le CO₂. Un groupe de bactéries : les cyanobactéries (anciennement qualifiées d'« algues bleues » : elles ont été longtemps classées dans les algues, du fait qu'elles vivent en chapelets ressemblant à s'y méprendre à des algues) ont été parmi les premiers organismes à utiliser la photosynthèse. Toutes ces bactéries se distinguent des organismes qui apparaîtront plus tard par le fait que ce sont des organismes unicellulaires **sans noyau** dans la cellule (les **procaryotes**) ; il existera plus tard des organismes unicellulaires avec noyau, puis, avec la complexification du vivant, des organismes pluricellulaires (avec un noyau par cellule) qui évolueront en végétaux, champignons, animaux. Vers -3,6 milliards d'années, des colonies de ces bactéries ont déjà formé des constructions en boules appelées **stromatolithes**²², ressemblant à des récifs de coraux : ce sont les premiers organismes connus à utiliser du gaz carbonique pour fixer de la calcite (et donc fabriquer du calcaire, premier puits de carbone minéral) et, par un processus parallèle, à libérer de l'oxygène du fait de la photosynthèse.

Mais ensuite... car il y a un « mais », que s'est-il passé pendant presque 2 milliards d'années ? Des organismes ont fabriqué du dioxygène (O₂) et quasi rien ne s'est senti dans l'atmosphère terrestre ! Et pourtant, deux milliards d'années, c'est long ! Les premiers organismes s'étaient donc adaptés à une vie anaérobie (sans oxygène) et sans photosynthèse, parallèlement les cyanobactéries marines vivaient et puisaient leur énergie par la photosynthèse en consommant du gaz carbonique et en libérant du dioxygène, mais il se trouve que ce dernier était immédiatement capturé dès qu'il était libéré. Résultat : non seulement aucune molécule d'oxygène n'arrivait jusqu'à l'atmosphère terrestre, mais l'eau des océans ne s'oxygénait pas non plus, Pourquoi ? À cause du fer ! Car le fer existe sous deux états²³ : le fer ferreux (soluble) et le fer ferrique (en précipité), et le fer ferreux est extrêmement avide d'oxygène, et, qui plus est, le fer est un métal très abondant sur terre ! Donc tant qu'il y a eu du fer ferreux à oxyder en fer ferrique, tout l'oxygène libéré par les cyanobactéries a servi à cela ! Et ceci a pris deux milliards d'années, jusqu'à ce que quasiment tous les atomes (des ions) de fer ferreux soient transformés en fer ferrique (ceci vers -2,4 milliards d'années). Les témoins en sont d'énormes épaisseurs de couches d'oxydes de fer rouges, en Afrique du Sud et en Australie, où des roches de ces périodes anciennes affleurent encore en surface. Mais à partir du moment où les eaux des océans se sont oxygénées et où l'atmosphère s'est enrichie en oxygène, ce fut en réalité une crise écologique majeure car plus de 90 % des organismes s'étaient parfaitement adaptés à un mode de vie anaérobie : l'oxygène leur était toxique (comme pour nous l'oxyde de

21 Les cycles circadiens étaient également très différents, du fait de la proximité de la lune : les jours étaient plus courts et plus nombreux durant une année.

22 <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/stromatolithes.xml>. Ces organismes existent encore de nos jours. La plage australienne de **Shark Bay** lui doit une célébrité mondialement reconnue ! http://www.bourlingueurs.com/australie/western-australia/page_17.htm

23 Le fer ferreux est le fer ⁺⁺ [ou fer (II)] : il lui manque deux électrons, alors que le fer ferrique est le fer ⁺⁺⁺ [ou fer (III)] : il lui manque trois électrons.

carbone ou le gaz carbonique), même dissout dans l'eau : un grand nombre d'espèces a donc disparu, laissant la place à celles qui se sont adaptées à l'oxygène (dont nous sommes les très lointains héritiers).

Précisons pour terminer que la majeure partie des groupes de bactéries évoquées plus haut existent toujours, que nous les côtoyons en permanence sans même les remarquer et qu'ils font partie de la biodiversité au même titre que les orchidées, les mésanges et les rhinocéros (on connaît par exemple 7500 espèces de cyanobactéries ; les coulures noires fréquentes sur les roches calcaires sont des colonies de cyanobactéries).

4) Photosynthèse et respiration : le cycle court du carbone et le rôle du sucre

Considérons le cycle court du carbone : on peut le résumer de la façon suivante en **deux équations-bilans complémentaires** simples, bien que résultant de processus très complexes dans le détail (le cycle de Calvin²⁴ et le cycle de Krebs²⁵) :

La photosynthèse : $6 \text{ CO}_2 + 12 \text{ H}_2\text{O} + \text{énergie lumineuse} > \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$
(gaz carbonique + eau + énergie) > (sucre + oxygène + eau)

La respiration : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2 > \text{énergie thermique et mécanique} + 6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$
(sucre + oxygène) > (énergie + gaz carbonique + eau)

1) l'équation-bilan de la **formation du sucre** dans le monde végétal, à partir d'eau et de gaz carbonique grâce à l'énergie lumineuse du soleil : la photosynthèse²⁶ (la formation d'oxygène étant en quelque sorte le « déchet » de cette réaction), et 2) son corollaire, celle de la **respiration**, qui revient à consommer le sucre produit dans la réaction précédente, en s'aidant de l'oxygène comme **comburant** (oxygène qui était le « déchet » de la réaction précédente), pour en récupérer l'énergie « déstockée ». L'eau et le gaz carbonique deviennent en quelque sorte, à leur tour, des « déchets » de cette seconde réaction. L'énergie libérée par la respiration est alors utilisée dans le monde végétal pour sa croissance et sa reproduction et, en plus de cela, sous forme de chaleur et de mouvement dans le monde animal. **Les déchets des uns sont la nourriture des autres**. Tout cela se passe à l'intérieur même des cellules des organismes : les **chloroplastes** « fabriquent » les sucres à partir d'énergie et les **mitochondries** détruisent les sucres pour obtenir de l'énergie. Sans l'implication excessive de l'espèce humaine, le bilan de ces deux équations est à l'équilibre au cours du temps : pour faire simple, les sucres (et leurs dérivés) et l'oxygène produits par les végétaux sont pour une part consommés par le monde animal, pour une autre part dégradés par des bactéries et retournent sous forme de CO₂ et de vapeur d'eau dans l'atmosphère, dans un cycle perpétuel. Ces deux simples équations conditionnent à elle seules le fonctionnement du vivant sur notre planète : pas de sucre sans énergie pour les végétaux, pas d'énergie sans sucre pour les animaux, les molécules simples d'eau de gaz carbonique et d'oxygène (H₂O, CO₂ et O₂) servant de base pour les molécules organiques plus complexes.

24 photosynthèse et chlorophylle, les bases https://www.youtube.com/watch?v=wbY_FSEzC3c photosynthèse et oxydoréduction, la complexité https://www.youtube.com/watch?v=_hsV6zi_KHk

25 respiration et fermentation, première partie <https://www.youtube.com/watch?v=IAeePSIdAOI> respiration et fermentation, deuxième partie <https://www.youtube.com/watch?v=qIBMtWsHMOs>

26 <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/manipulations-en-svt/la-photosynthese-generalites>

Dans ces deux équations, on comprend bien que le « stockeur » d'énergie est la **molécule de sucre**. Dans le gaz carbonique, le carbone est présent sous forme minéral (C_{\min}) alors que dans le sucre (et les molécules plus complexes qui en sont dérivées), plusieurs atomes de carbone ont créé entre eux des liaisons chimiques : on parle alors de carbone organique (C_{org}) : **de l'énergie** (qui était au départ de l'énergie lumineuse²⁷) **est « stockée » dans ces liaisons chimiques de ces atomes de carbone** entre eux, énergie qui sera libérée ensuite si l'on casse ces liaisons (« combustion lente » des animaux, combustion rapide du feu et des moteurs thermiques, avec, à chaque fois, l'apport d'oxygène comme comburant et la libération de CO_2 et de vapeur d'eau comme « déchets »).

Dans ces deux réactions, 1) les déchets des uns sont indispensables aux autres ; 2) le carbone organique (dans le sucre) a stocké de l'énergie provenant du soleil que les animaux vont pouvoir utiliser à leur tour en le rejetant ensuite sous forme de carbone minéral (le CO_2) pour un nouveau cycle. Le bilan est équilibré, aussi bien en énergie qu'en oxygène et en gaz carbonique. Seuls le carbone des organismes qui meurent et qui vont sédimenter au fond des océans, qui entrent alors dans la constitution des roches sédimentaires, sont soustraits de ce cycle équilibré, mais de façon insignifiante à l'échelle du temps des humains. Ce fut, à l'échelle des temps géologiques (le milliard d'années) un des deux « puits de carbone », c'est-à-dire une des façons que notre planète a eu pour appauvrir l'atmosphère terrestre en CO_2 , donc une des façons de restreindre l'effet de serre qui crée de la surchauffe.

Revenons sur ces deux dynamiques complémentaires : la photosynthèse et la respiration. Par la **photosynthèse**, les organismes vivants chlorophylliens (c'est donc bien plus large que les seuls végétaux, puisque cela comprend aussi les bactéries et les algues primitives, qui l'ont fait plusieurs milliards d'années avant les végétaux « supérieurs » que l'on côtoie) ont réussi le tour de force de se nourrir uniquement d'eau (enrichie de quelques sels minéraux) et d'air, en s'aidant de l'énergie lumineuse : arriver à faire du sucre avec uniquement de l'eau et de l'air, c'est tout de même magique lorsqu'on y pense. On dit souvent : ma plante verte a soif, elle manque d'eau, il faut que je l'arrose : oui, elle a soif, mais elle a faim aussi, car l'eau lui sert à **boire** et à **manger** !

À quoi la plante utilise-t-elle l'eau qu'elle puise par ses racines ? À plusieurs choses. Une plante transpire et évapore (c'est l'évapotranspiration²⁸) de la vapeur d'eau par les stomates²⁹) situés sur ses feuilles : lors d'un jour ensoleillé, un tilleul évapore en moyenne **200 litres d'eau** et ce chiffre peut atteindre **1000 litres** pour un gros chêne. Une grande partie de l'eau que les racines ont pompée repart ainsi par les feuilles sous forme de vapeur, en s'étant délestées au passage des sels minéraux (potassium, phosphore, calcium, azote) qu'elle avait transportés en solution. Cette transpiration lui est **nécessaire** puisque l'eau, en s'évaporant, actionne en quelque sorte une pompe : l'eau qui s'évapore est remplacée par celle de la sève montante (sève brute), ce système de pompage utilisant la capillarité, arrivant ainsi à vaincre la gravité : l'eau, puisée dans le sol par les racines et les radicules, et enrichie en sels minéraux [tout cela avec l'aide du mycélium des champignons : une association « donnant-donnant » (= symbiose) entre racine et mycélium appelée : mycorhize], peut ainsi parvenir jusqu'aux feuilles des frondaisons les plus hautes et c'est

27 Cette énergie lumineuse (les photons) qui arrive jusqu'à nous résulte d'une réaction thermonucléaire qui se passe au cœur du soleil : la réaction du fusion nucléaire : des atomes d'hydrogène s'assemblent pour former un atome d'hélium en libérant de l'énergie.

28 L'évapotranspiration (comme d'ailleurs l'évaporation tout court) des arbres amène sous leur frondaison une sensation (qui est plus qu'une sensation!) de fraîcheur qu'un parasol ne peut pas procurer, car l'évaporation nécessite de l'énergie, et cette énergie est de l'énergie thermique soustraite de son environnement immédiat, donc cela se traduit par une baisse de température, des plus agréables au moment de grosses chaleurs.

29 Ils sont constitués de l'agencement de deux cellules en forme de minuscules « bouches » ; il y a 50 à 500 stomates par mm^2 sur une feuille (ce nombre varie selon le climat et selon les espèces).

alors que s'opère véritablement le travail d'élaboration du sucre : gaz carbonique + eau + énergie > **sucre** + oxygène + eau qui peut être écrit : $6 \text{CO}_2 + 12 \text{H}_2\text{O} + \text{énergie lumineuse} > \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$: 6 molécules de gaz carbonique captées par les stomates + 12 molécules d'eau pompée par les racines + l'énergie lumineuse captée par les chloroplastes, [et avec l'aide des sels minéraux amenée (phosphore, azote, potassium) avec l'eau jouant le rôle de catalyseur] vont produire une molécule de glucose, 6 molécules d'oxygène et 6 molécules de vapeur d'eau : la moitié de l'eau utilisée va donc être rendue. Deux molécules de glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$) vont s'unir et se transformer en une molécule de saccharose ($\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$), soluble, afin de pouvoir être transportée par la sève élaborée jusqu'aux différents organes de la plante pour être ensuite transformée en molécules plus complexes à l'aide d'enzymes : amidon, cellulose, tannins, lignine (= bois), lipides, et enfin protides avec l'adjonction d'azote : bois, fibre, nouvelles feuilles, fleurs, fruits, graines participent à la vie de la plante. La plante aura besoin d'énergie pour cela et les cellules vont alors utiliser les mitochondries qu'elles renferment (et non plus les chloroplastes) pour la respiration, tout comme les animaux le font (c'est pour cette raison qu'une plante dégage du CO_2 la nuit).

Si nous pensons « *respiration* », nous pensons immédiatement « *poumons* » ; pourtant la **vraie respiration** ne se passe pas dans les poumons, mais dans les **mitochondries**, ces minuscules organites qui sont présentes dans les cellules des animaux ; d'ailleurs, la plante (avec ses propres mitochondries) respire la nuit sans avoir de poumons ! Par la respiration, nous (les êtres vivant du monde animal), et avec l'aide de l'oxygène que nous apportons jusqu'à chaque cellule de notre corps, transformons des **sucres** et ses dérivés (produits par le monde végétal) en gaz carbonique et en vapeur d'eau (des déchets), et nous gagnons ce qui est recherché, de l'énergie : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 > \text{énergie thermique et mécanique} + 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$. Les être vivants du monde animal trouvent ainsi leur ressources énergétiques pour garder leur organisme à une température constante, pour se mouvoir et pour grandir (fabriquer des protéines) en dégradant les atomes de carbone d'une molécule de sucre en plusieurs molécules de gaz carbonique (chimiquement, c'est une oxydation). Il reste beaucoup de points en suspend, mais une se pose tout de même immédiatement : lors de la photosynthèse et de la respiration, les échanges gazeux (oxygène et gaz carbonique) entre l'organisme (assimilation et déchets) et l'atmosphère sont relativement faciles pour la plante (capture du CO_2 de l'air, rejet d'oxygène et inverse la nuit), par le biais des milliers et des milliers de stomates des feuilles, mais beaucoup plus difficiles pour les animaux ! C'est ici que dans le monde animal le système sanguin, avec son réseau capillaire ramifié, entre en action afin d'amener cet oxygène jusqu'à chaque cellule pour que la réaction décrite ci-dessus puisse avoir lieu, et afin d'évacuer le gaz carbonique (le déchet) qui y a été produit. Et c'est ici que les globules rouges, et donc le fer, entre en jeu.

Revenons à nos besoins d'énergie, qui ont dépassé ceux d'un animal « ordinaire ». Sauf à capter l'énergie des photons sans l'intermédiaire des plantes (panneaux solaires) ou l'énergie mécanique³⁰ du vent (éoliennes), ou encore à casser ou fusionner³¹ les atomes (énergie nucléaire) et non plus les molécules de carbone, la quête d'énergie de l'humanité est donc passée et passe encore par la quête de sucre (et de ses dérivés simples ou complexes) issu du monde végétal vivant. Ce sont les glucides, les lipides (et protéines, par l'ajout d'azote) pour se nourrir, c'est la lignine du bois pour chauffer l'espace domestique ou transformer cette énergie thermique en énergie mécanique par le biais de la vapeur. Et c'est finalement le carbone organique fossilisé, c'est-à-dire stocké et transformé en profondeur : les hydrocarbures (charbon, pétrole et gaz), qui sont extraits et brûlés

30 Le vent (courants thermiques) n'existent sur notre planète que du fait qu'un excédent l'énergie solaire arrive aux basses latitudes alors qu'il a déficit aux hautes latitudes : ces mouvements de masses d'air sont qu'une tentative de ré-équilibre perturbée par une terre en rotation (la force de Coriolis) : ce n'est donc encore une fois au départ « que » de l'énergie solaire (transformée en énergie mécanique).

31 Cette fusion d'atome est justement ce qui se passe au cœur du soleil, comme nous l'avons déjà mentionné.

afin de casser les liaisons entre les atomes de carbone pour en libérer l'énergie piégée, mais la conséquence inévitable de toutes ses réactions est la libération de gaz carbonique dans l'atmosphère par cette oxydation : les lois de la thermodynamique ne sont pas négociables ! Ce qui change dans cette suite, ce sont les quantités consommées (et consommées). Les besoins énergétiques des animaux (et de l'homme « primitif ») peuvent se résumer ainsi : l'énergie pour se maintenir en vie, l'énergie pour se mouvoir à la recherche de nourriture, l'énergie pour croître jusqu'à l'âge adulte afin de se reproduire et perpétuer l'espèce. Les « besoins » énergétiques des humains modernes (pas tous) sont sortis de ce schéma au point qu'il conviendrait de réfléchir sur la notion même de « besoin ». Besoins accrus entraînent inévitablement consommations accrues donc émissions de CO₂ accrues, et ceci, historiquement, selon une courbe exponentielle.

5) Qu'est-ce qui différencie le dérèglement du climat dû à l'homme des variations naturelles du climat

Le climat change continuellement sur terre ; le nier serait une absurdité. La différence majeure entre variation naturelle et variation anthropique est la temporalité : il y a plusieurs grands cycles de variation naturelle du climat : ils se mesurent pour certains en **centaines de millions d'années**, pour d'autres en **dizaines / centaines de milliers d'années** et ils peuvent, bien sûr, se superposer / se cumuler, s'annuler (du moins momentanément) partiellement. Le dérèglement actuel dû à l'homme s'est produit de façon exponentielle sur une échelle de temps de l'**ordre du siècle** (ce qui est très différent du cycle naturel court qui se compte en milliers, voire dizaines et de centaines de milliers d'années) et ses effets sont mesurables sur une temporalité de l'**ordre de la décennie** : du jamais mesuré sur terre. Certains diront : ce n'a jamais été mesuré ! bien sûr puisque nous n'étions pas là pour le faire, mais les **archives géologiques** le prouvent (entre autres celles des carottes de glace³² pour le dernier million d'années et celles des carottes de sédiments marins pour les périodes plus anciennes).

Les cycles les plus longs sont liés à la tectonique des plaques, à la position des continents et des océans par rapport aux pôles, à leur position entre eux (regroupés ou dispersés), à la façon dont les courants marins peuvent circuler, à la présence ou non de chaînes de montagne, à la quantité de matière qui s'altèrent sur les continents. Au vu de la vitesse de mouvement des plaques (de l'ordre de 5 à 10 cm par an), on comprend que les changements soient très lents, imperceptibles y compris à l'échelle de l'espèce humaine (c'est-à-dire sur les trois derniers millions d'années).

Les cycles plus « courts » (pluri-millénaires) sont liés à la mécanique céleste : mouvements de la terre autour du soleil et sur elle-même, perturbés sur des cycles de 25 000, 40 000 et 100 000 ans, principalement par les grosses planètes (Jupiter et Saturne) et par la lune.

Ces trois mouvements cycliques sont :

- 1) la variation de la forme de l'ellipse que parcourt la terre autour du soleil lors de sa révolution annuelle, plus ou moins ronde, plus ou moins elliptique (sachant que le soleil occupe un des deux foyers de cette ellipse) sur un cycle de 100 000 ans. Il s'ensuit donc qu'à un moment de l'année la terre est le plus proche du soleil et que 6 mois plus tard elle est le plus loin ; on

³² Les calottes de glace du Groenland et surtout de l'Antarctique ont accumulé, année après année, de très grandes épaisseurs de glace, correspondant à des échelles de temps longues pour l'histoire de l'espèce humaine (pour l'Antarctique : ce sont plus de 3 km d'épaisseur et 800 000 ans documentés ; et même potentiellement plus au point baptisé «*Little Dome C*»). Par des analyses physiques complexes des composants de l'eau (la proportion des isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène), chaque strate de glace peut nous informer sur la température qui régnait au moment des précipitations neigeuses qui en sont l'origine. De plus, ces strates de glace accumulées ont piégé des bulles de l'atmosphère terrestre de l'époque en question, ce qui permet de connaître la teneur en CO₂ de l'atmosphère à cette période précise.

comprend que lorsque l'ellipse est proche du cercle, cette différence de distance est petite et que le rayonnement du soleil est mieux réparti au cours de l'année sur les deux hémisphères de la terre que lorsque l'ellipse est marquée, et que cette différence de distance est plus grande : ce qui amène une succession de cycles avec alternance de saisons mieux marquées et de saisons moins bien marquées.

2) l'obliquité de l'axe de rotation de la terre ; chacun sait que l'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné, sinon il n'y aurait pas de saisons : les jours seraient égaux à eux-mêmes. On nous a appris au collège que cette inclinaison était autour de 23° : elle est actuellement de $23^\circ 26'$ exactement. Mais cette inclinaison change au cours du temps, passant de $22^\circ 30'$ à 24° , ce qui n'est pas négligeable, et cela sur un cycle de 40 000 ans : là encore, on comprend aisément que lorsque l'angle est égal à 24° , les saisons sont plus contrastées que lorsque l'angle n'est que de $22^\circ 30'$.

3) le troisième cycle est plus difficile à saisir (bien que connu depuis l'antiquité grecque) : la terre tourne sur elle-même comme une toupie en environ 26 000 ans, et de façon rétrograde par rapport à sa rotation journalière. Il s'ensuit que la durée de l'année solaire (= temps qu'il faut pour retrouver l'équivalent du début de la même saison l'année suivante) est de 20 minutes plus courte que la durée nécessaire à la Terre pour occuper la même position dans l'espace chaque année (= année sidérale) d'où l'appellation de « précession des équinoxes » pour ce phénomène (déjà noté par Hipparque au II^e siècle av. J.-C.), avec pour conséquence majeure, sur le temps long, que nous avons alternativement (tous les 13 000 ans) l'hiver dans l'hémisphère nord quand la terre est le plus près du soleil (saisons adoucies, ce qui est le cas dans les temps actuels) puis l'hiver quand elle est le plus loin du soleil (saisons plus contrastées). Une conséquence (mineure) de la précession des équinoxes est que l'« étoile polaire » n'est l'étoile polaire (cas actuel) que tous les 26 000 ans et qu'imperceptiblement la direction du pôle décrit un cercle dans le ciel. À d'autre période de ce cycle, c'est Véga de la constellation de la Lyre qui est ainsi l'étoile polaire.

Les trois cycles se combinent et la conséquence est une différence d'ensoleillement cyclique arrivant dans les hautes latitudes respectives des deux hémisphères du globe. Étant donné que les deux-tiers des continents émergés se situent dans l'hémisphère nord (avec une grande partie aux hautes latitudes : Sibérie, Scandinavie, Amérique septentrionale) contre un tiers dans l'hémisphère sud (avec très peu de terres aux hautes latitudes -Patagonie-, à l'exception de l'Antarctique) et que cette différence d'insolation saisonnière affecte beaucoup plus fortement les surfaces continentales (effet albédo) que les océans >>> les deux hémisphères se comporteront différemment. Pour le dire autrement, quand les saisons seront moins marquées et les étés seront moins chauds dans l'hémisphère nord, la neige fondra moins et l'effet albédo renverra plus de rayonnements lumineux (donc moins de rayonnement solaire sera transformé en infrarouge, donc la terre se refroidira plus, avec un effet cumulatif d'une année sur l'autre (rétroaction positive) et la glace s'accumulera, et inversement quand les saisons seront mieux marquées. Les conséquences en sont les cycles de glaciations / déglaciations du Quaternaire, sur les périodes de l'ordre de la centaine de milliers d'années et les cycles interstadias moins marqués (radoucissement au cours des glaciations). L'homme de Néandertal³³, en tant qu'espèce humaine, aura traversé au moins deux de ces cycles en Europe, mais cela n'aura pas été sensible à l'échelle d'une génération humaine. *Homo sapiens* aura traversé au moins un cycle, mais en majeure partie sous les cieux africains plus cléments ; il aura toutefois subi en Europe la dernière récurrence très froide de la dernière glaciation, il a 20 000 ans. L'étude du fonctionnement du cycle des glaciations passées (par les archives des glaces et des

33 <https://www.babelio.com/livres/Slimak-Neandertal-nu/1374777> ; <https://www.youtube.com/watch?v=K4KT9D--qXk>

sédiments) nous apprend en outre que les entrées en glaciation ont été longues et progressives, mais que les déglaciations ont été bien plus rapides, comme si un cumul de processus de rétroaction se mettaient alors en œuvre.

À l'échelle de l'histoire, des événements tels que des éruptions volcaniques exceptionnelles, entraînant des refroidissements brusques dus aux particules émises faisant écran dans la stratosphère, vont se marquer, mais les conséquences n'en seront que passagères (cf. point 11).

Lors des modifications naturelles du climat à l'échelle des millénaires, dues à des causes « astronomiques » (la mécanique céleste) extérieures au système « atmosphère – biosphère – lithosphère », les teneurs en CO₂ de l'atmosphère ont varié de **180 ppm**³⁴ (pendant les glaciations) à **280 ppm** (dans les périodes interglaciaires), ce qui était donc la « norme » au début de l'ère industrielle : nous sommes en effet en période interglaciaire depuis 12 000 / 14 000 ans. Le petit événement climatique, connu sous l'acronyme de « **PAG** », pour « **Petit Âge Glaciaire** » (1250 – 1850 environ), qui a marqué l'histoire récente (après l'« **optimum climatique de l'an mil** »), avec une avancée notable des glaciers alpins³⁵, n'était pas une « glaciation » au sens où l'on entend des grandes glaciations du Quaternaire.

Ces variations de la teneur en CO₂ entre périodes glaciaires et périodes interglaciaires ont été la résultante des modifications de la température, alors que ce que nous vivons au XX^e - XXI^e siècle (l'effet de serre) est exactement l'inverse : la hausse de la teneur en CO₂, dont les teneurs dépassent maintenant 410 ppm, entraîne la hausse des températures par effet de serre. *Explication*

6) Climat et météo : quelles différences ?

Dans les discussions et les commentaires sur le changement climatique, on peut se rendre compte que pour certaines personnes, il y a parfois confusion (involontaire ou volontaire) entre **météo** et **climat** : au moindre coup de froid ou chute de neige à Paris, aux moindres jours de « temps pourri » en juillet, on est certain de lire des commentaires pour dénigrer le réchauffement climatique.

Climat et **météo** sont de fait souvent confondus dans la mesure où ils concernent tous les deux « *le temps qu'il fait* », selon que l'on considère le très court terme ou le long terme (à l'échelle d'une vie humaine et non pas de l'histoire géologique de la terre), et étant donné que « le temps qu'il fait » est en grande partie basé sur la température. La météo est soumise à quantité d'aléas à très courts termes et de plus très localisés dans l'espace, dus aux déplacements rapides des masses d'air, ce qui fait que, paradoxalement, d'une part il est plus « facile » de modéliser et prédire le climat dans des décennies à l'échelle du globe (des moyennes bien sûr) que la météo locale pour le mois suivant, d'autre part, il est facile de se tromper de cible (surtout avec la mémoire courte qui nous caractérise, nous humains) : un coup de froid passager sur l'Europe dû à un déplacement d'air sibérien peut très bien masquer (très momentanément) un réchauffement à l'échelle du globe.

Climat et **météo** découlent de deux notions bien distinctes, et cela depuis la Grèce antique : l'époque où les premiers voyageurs-géographes ont consigné par écrit leurs observations. Il suffit de se pencher sur l'étymologie de ces deux termes pour le saisir.

34 Pour rappel : 1 ppm (v) = une partie par million (en volume).

35 Leroy Ladurie E. (1967) – Histoire du climat depuis l'an mil, Paris, Flammarion.

D'abord la **météo**. Le terme vient du grec « météore ». Un météore, c'est, étymologiquement, « ce qui est suspendu au ciel » (d'où les **Météores** en Thessalie, qui sont ces formations rocheuses sculptées par l'érosion et occupées à leur sommet par des monastères chrétiens orthodoxes) : les phénomènes célestes tels que la pluie, la grêle, la neige, la foudre sont donc des météores au sens premier du terme ; les météorites (avec la terminaison « ite », raccourci de « lithe », puis « lite », du grec *lithos* : pierre) sont des pierres qui viennent du ciel.

Ensuite, le **climat**. Le terme nous vient aussi du grec (racine : *Klinein* incliner, *Klino*, *Klima*), en passant par le latin, dans le sens d'inclinaison, pente, degré (la direction des rayons du soleil qui arrivent à la surface du sol) : les voyageurs-explorateurs de l'Antiquité, comme **Pythéas** (voyageant vers le nord) ou **Ératosthène** et **Ptolémée** (voyageant vers le sud) ont, les premiers, proposé une zonation de la terre (explorée dans l'hémisphère nord, depuis la Nubie jusqu'à la Scandinavie), en zones climatiques en fonction du degré d'inclinaison des rayons du soleil à une saison équivalente ; ils en ont déduit le symétrique pour l'hémisphère sud (qu'ils ne connaissaient pas). En grec moderne, on retrouve la racine KLIMA pour la traduction d'« échelle » (d'un plan d'architecte, d'une carte topographique). En français « climat » dans le sens de « zonation » est conservé dans le vignoble de Bourgogne (climat = parcelle, terroir viticole) ; la racine se retrouve aussi dans « climax », qui est l'aboutissement d'une succession : en écologie, le climax est le stade ultime d'un couvert végétal laissé à lui-même sans l'emprise de l'homme.

7) Le très grand « puits à carbone » (ou piège à carbone) : le cycle complet de la formation des calcaires

Pourquoi parler ici de ce sujet ? Parce que sans les calcaires, l'effet de serre « naturel » sur terre serait monstrueux, rendant la planète invivable au type de vie que nous lui connaissons. Il a été mentionné dans le premier texte que la formation du calcaire, cette roche que nous pouvons parcourir sur de vastes territoires, qui forme de hauts massifs montagneux, a été le plus grand « **piège à carbone** » que le système terre a mis progressivement en place depuis plus de trois milliards d'années : en effet, l'atmosphère de la terre primitive renfermait plus de 30 % de CO₂ alors qu'elle n'en renfermait, avant les émissions modernes dues à l'homme (1850), plus que 0,03 %³⁶, donc 1000 fois moins. Nous avons expliqué comment les micro-organismes planctoniques, entre autres ceux dont le squelette est le constituant quasi unique de la craie, ont largement contribué à ce processus. Mais si cela est expliqué trop rapidement et en raccourci, sans tous les tenants et les aboutissants, ceci peut être trompeur, et même intellectuellement déstabilisant : car, comme pour le cas de la fabrication du sucre par la photosynthèse, il y a plusieurs réactions chimiques et biochimiques qui se succèdent et s'enchaînent, dont le résultat final est le stockage du gaz carbonique de l'atmosphère, mais ce n'est pas du tout évident si on « loupe » des étapes ou si l'on ne regarde que la dernière. Et du fait que pour la formation des calcaires, cela se fait sur le temps très long (des millions d'années) alors que dans le cas de la photosynthèse et du sucre, l'enchaînement des réactions se fait sur le temps court (des minutes, des heures).

Regardons donc cela d'un peu plus près : si l'on se penche sur la dernière réaction qui se produit, par exemple quand les micro-organismes marins fabriquent leur coquille ou leur squelette en calcite : **ions bicarbonates + ions calcium = calcite + gaz carbonique**, on remarque que la fabrication de calcite **libère du CO₂**, alors que l'on nous explique que le **calcaire est un puits à carbone** ! Il y a là un gros « hic » ! Et si on écrit CaO (chaux) + CO₂ (gaz carbonique) = CaCO₃ (calcite), on a bien une réaction qui stocke du carbone, mais qui n'est pas « correcte » dans le

36 chiffre passé depuis à 0,04 %, dû à une augmentation de 30 %.

monde réel [par contre, la réaction $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ (fabrication de la chaux / ciment par calcination du calcaire) est juste dans le monde réel (mais, dans cette deuxième réaction, on oublie de mentionner l'énergie nécessaire pour qu'elle puisse se produire)].

La raison est que l'on ne regarde pas les « choses » de façon « globale » au sens du globe terrestre avec toutes ses couches : atmosphère, biosphère, hydrosphère, lithosphère, donc de façon pas assez systémique. Reprenons donc le piégeage du carbone au début de son cycle. Il faut remonter un long chemin à rebours : des océans aux fleuves, des fleuves aux surfaces des continents et des continents à l'atmosphère pour cela ! Mais repartons dans le bon sens :

1) **L'atmosphère** : les précipitations : pluie, neige (H_2O) piègent du gaz carbonique (CO_2) de l'air, pour donner de l'acide carbonique : H_2CO_3 . Avec deux conséquences, a) le gaz carbonique ainsi piégé n'est plus dans l'atmosphère, ce qui diminue l'effet de serre, b) l'eau (en principe neutre chimiquement, ce qui n'est qu'à moitié exacte) est devenue un acide faible, avec des propriétés qu'elle n'avait pas auparavant.

2) **La surface des continents** : cette eau acide va avoir le pouvoir d'altérer les minéraux constitutifs des granites de la croûte continentale (action sur le très, très long terme), avec pour conséquence : a) de « fabriquer » des **argiles** et b) de libérer des ions [éléments chimiques qui entraient auparavant dans la structure des minéraux (feldspaths, micas, etc.) constitutifs des granites mais qui n'entrent plus dans la structure des argiles nouvellement formées]. Ces ions sont, entre autres : le **sodium** (qui va saler la mer en se combinant avec du chlore émis par les volcans), le **calcium** (c'est lui qui nous intéresse ici), le **potassium**, etc.

3) **Les rivières et les fleuves** : lors de l'altération des roches, la réaction³⁷ a permis de passer de l'acide carbonique (H_2CO_3) aux bicarbonates (HCO_3^-) en libérant des protons H^+ qui ont œuvré à la destruction des roches : les cours d'eau transportent donc jusqu'à la mer (action sur le très, très long terme), entre autres, des ions *calcium* et des ions *bicarbonates*.

4) **Les océans** : les ions bicarbonates et les ions calcium vont se combiner, réaction favorisée par l'action biologique des (micro)-organismes marins : ions bicarbonates + ions calcium = calcite + gaz carbonique (action sur le très, très long terme).

Il y aura effectivement libération de gaz carbonique lors de la dernière réaction de la chaîne explicitée ici, mais si l'on reprend les réactions depuis le début en bon chimiste, avec les quantités en moles (et non « à la louche »), les équations nous disent que pour deux moles de CO_2 piégées dans les bicarbonates, une d'entre elles est rejetée sous forme de CO_2 au moment de la formation de la calcite, mais **l'autre est piégée dans la calcite elle-même**, donc, dans le calcaire de nos paysages, il y a bien stockage de carbone si l'on regarde la chaîne dans son entier !

Si l'on raisonne en terme de *temps de résidence* (par exemple, le temps de résidence de l'eau dans le Léman est de 11 ans, ce qui correspond au temps nécessaire pour le renouvellement complet des eaux du lac en fonction du débit du Rhône), pour le carbone contenu dans tous les calcaires du globe, ce chiffre est de l'ordre de 500 millions d'années, ce qui veut dire que lorsque du carbone provenant du gaz carbonique de l'air est intégré dans des roches calcaires, il est, à l'échelle du globe, « séquestré » pour un demi-milliard d'années³⁸. Nous sommes là dans des échelles de temps

37 Pour être exact et complet : 1 feldspath calcique ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) + 3 eau ($3\text{H}_2\text{O}$) + 2 gaz carbonique (2CO_2) >>>
> 1 argile kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) + 1 ion calcium (Ca^{2+}) + 2 ions bicarbonates (2HCO_3^-)

38 Jérôme Gaillardet : la séquestration géologique du carbone atmosphérique. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/sgf-2004-Gaillardet.xml>

qui n'ont rien à voir avec celles des générations humaines, ni des civilisations historiques, ni même de l'espèce humaine. Autrement dit, ce processus, aussi efficace soit-il sur le (très) long terme pour décarboner l'atmosphère de la terre, ne contribuera pas à décarboner les excédents (30 % de surplus rejetés par l'homme sur un laps de temps de quelques décennies) à une échelle de temps qui puisse satisfaire les exigences requises pour limiter la hausse des températures à l'échelle d'un siècle : selon Jérôme Gaillardet : « *il faudra attendre un million d'années probablement pour que l'excès de CO₂ que l'homme a injecté dans l'atmosphère soit complètement résorbé de l'atmosphère par les réactions géologiques* »³⁹.

8) Hydrocarbures et moteurs thermiques

Comme mentionné dans la premier document, le deuxième piège à carbone que la terre fait fonctionner depuis 3 milliards d'années est celui qui transforme en profondeur la matière organique produite pas la biosphère en hydrocarbures stockés dans la lithosphère.

Nous avons aussi expliqué brièvement que le fonctionnement d'un moteur thermique pouvait être « assimilé » (toute proportion gardée) à de la respiration (cellulaire) : consommation (consumation) de produits complexes riches en carbone, qui vont être scindés (c'est en effet la scission de la liaison qui existe entre les atomes de carbone du produit de départ qui produit l'énergie) en produits plus simples (gaz carbonique et vapeur d'eau) en libérant de l'énergie utilisée ensuite sous forme de chaleur et/ou de mouvement (pour rappel : énergie provenant au départ de la lumière solaire, transformée et stockée par la photosynthèse en sucre dans les liaisons entre atomes de carbone). Historiquement, nous avons ajouté au sucres simples (amidon, etc.) comme producteur d'énergie : le bois, puis le charbon, et enfin le pétrole et gaz : on passe ainsi des anciennement nommés hydrates de carbone (sucres, graisses, bois) aux hydrocarbures.

Comparons les réactions-bilans de la respiration (combustion de sucre) et du fonctionnement d'un moteur thermique (essence) :

-pour la combustion d'une molécule de sucre :



-pour la combustion d'une molécule d'octane :



Mais quelle(s) différence(s) entre ces deux groupes ? Le premier contient de l'hydrogène, de l'oxygène et du carbone, le second uniquement de l'hydrogène et du carbone⁴⁰. Mais cette nuance compte. Les hydrocarbures ne sont pas donc oxydés alors que les hydrates de carbone le sont. Leur combustion, qui est une oxydation [qui produit de l'énergie (en cassant des liaisons chimiques)] + du CO₂ + de la vapeur d'eau, va être démultipliée par rapport à celle des hydrates de carbone qui produisent tout de même de l'énergie : les hydrocarbures sont donc des « hyper-substituts » de sucres à la puissance XXL [lorsque l'on brûle du bois, l'énergie, dans un premier, sert surtout à évaporer de l'eau (contenu dans la structure de la molécule, même dans du bois « sec ») pour

39 <https://video.umontpellier.fr/video/0039-osu-oreme-conference-de-mr-gaillardet-jerome-le-language-des-fleuves/>

40 Il faut se souvenir qu'en chimie, une terminaison en *ate* sous-entend quelque-chose d'oxydé, alors qu'une terminaison en *ure*, au contraire, quelque-chose de réduit [= non oxydé] (exemples : carbonate de calcium CaCO₃ et carbure de calcium CaC₂ ; sulfate de fer FeSO₄ et sulfure de fer FeS₂).

transformer le bois en charbons de bois ; ce n'est que dans un deuxième temps que le carbone est consommé (= oxydé)]. C'est la raison pour laquelle le charbon de bois (dans lequel l'étape de pyrolyse a déjà été effectuée, a un pouvoir calorifique supérieur à celui du bois).

On peut d'ailleurs se poser la question de comment s'est faite cette transformation de la biomasse de départ en hydrocarbures. D'abord, cette biomasse provient soit directement de la mort de micro-organismes marins (plancton animal et végétal) accumulée dans les grands fonds marins, soit de restes végétaux continentaux apportés par les fleuves et accumulés au large de leur delta (aujourd'hui : le delta de l'Amazonie ou le golfe du Bengale). Cette matière organique est tout d'abord dégradée dans les boues marines par des bactéries anaérobies (milieu sans oxygène) et une partie se transforme alors en *kérogène* (à ne pas confondre avec le *kérosène* des avions), perd une part de son oxygène, puis continue son long chemin d'enfouissement vers la profondeur, donc vers des pressions et des températures de plus en plus élevées (à raison d'un gradient de 3°C pour 100 m d'enfouissement en moyenne) à une vitesse de quelques mètres ou quelques dizaines de mètres par million d'années. Quand la température atteint la fourchette de 50°C – 120°C, la réaction de **pyrolyse** produit du pétrole, du gaz naturel, du CO₂ et de l'eau. Le gaz naturel est plus long à produire que le pétrole et se trouvera en général plus profondément enfoui. Les hydrocarbures mettent des millions d'années à s'élaborer et les pétroles exploités ont entre 20 millions d'années et 300 millions d'années.

En passant de la consommation animale d'hydrates de carbone végétaux (par exemple le foin pour nourrir les chevaux de trait et les bœufs) à la consommation d'hydrocarbures dans des moteurs thermiques, on a démultiplié l'énergie fournie sans vraiment en payer le **prix réel** : Jean-Marc Jancovici nous démontre⁴¹, chiffres à l'appui, que « *le contenu énergétique d'un litre d'essence à 1,5 € [2 à 4 kWh] est le même [] que le travail de 10 à 100 personnes sur un jour* » (selon que ces personnes font travailler leurs bras ou leurs jambes). Nous ne nous rendons plus compte que notre confort d'occidentaux d'à partir les Trente-Glorieuses est en grande partie la résultante de ce pétrole (trop !) bon marché (même si l'essence paraît chère lorsque l'on doit prendre sa voiture pour aller travailler, ce qui est aussi une réalité, tout en étant un effet paradoxal)⁴².

9) Qu'est-ce-que véritablement « l'effet de serre » ?

Rappelons tout d'abord le côté extrêmement bénéfique de l'effet de serre naturel pour la vie sur terre : sans effet de serre naturel, la température moyenne sur le globe serait de -18° C au lieu de + 15° C et les écarts de température entre équateur et pôles, jour et nuit, été et hiver seraient encore beaucoup plus accentués qu'ils ne le sont : la vie telle que nous la connaissons serait totalement remise en question. Le phénomène qui induit le réchauffement climatique actuel : l'accumulation de gaz à effet de serre émis par les activités humaines (qui seront définis au point suivant) a pour cette raison été nommé « **effet de serre additionnel** », afin de bien le distinguer de l'effet des serre naturel.

Quel est le principe des gaz à effet de serre ? La terre reçoit des rayonnement lumineux du soleil. Une partie de ces rayons est directement stoppée par la haute atmosphère et renvoyée avant de nous atteindre ; la plus grande partie arrive à la surface de la terre (sol, forêts, mers, déserts, glaciers, etc.). Selon l'**albédo** des surfaces qui reçoivent ces rayons lumineux (voir point 12), ceux-ci seront soit renvoyés dans la haute-atmosphère (si l'albédo des surfaces est proche de 1), soit transformés

41 <https://jancovici.com/transition-energetique/l-energie-et-nous/combien-suis-je-un-esclavagiste/>

42 Sujet qui mériterait une plus longue réflexion, surtout depuis début mars 2022.

en rayons infra-rouges (si l'albédo est proche de 0), -avec, bien-sûr, tous les cas intermédiaires- et renvoyés, eux aussi, vers l'atmosphère. Les gaz à effet de serre (naturels ou additionnels) n'empêchent pas la lumière du soleil d'atteindre la surface de la terre, mais, par contre, sont opaques aux rayonnements infrarouges re-émis par la terre : ils feront donc écran, comme un couvercle, au surplus de chaleur qui ne pourra donc pas en être évacuée. La zone altitudinale où vont se concentrer les gaz à effet de serre est bien délimitée dans l'atmosphère terrestre. Il convient de noter ici que la quantité de chaleur totale re-émise par la terre dans l'atmosphère ne change pas, ce qui sous-entend qu'une accumulation de chaleur sous le couvercle, près du sol, entraîne une diminution de température dans la très haute atmosphère (au-dessus du couvercle), et comme l'intensité des cyclones, typhons et autres tempêtes est justement liée à la différence de température entre la basse et la haute atmosphère, dans la mesure où cette différence augmente, l'intensité de ce type d'événements catastrophiques ne peut que s'accroître.

10) D'où proviennent les gaz à effet de serre émis par l'homme ? Où vont-ils se retrouver ? Où va se dissiper l'énergie libérée par le réchauffement ?

Rappelons la répartition des gaz à effet de serre dus à l'activité humaine, par nature et par origine :

- gaz carbonique (CO₂) : 77 % dont :
 - combustibles fossiles : 57 %
 - déforestation et dégradation de la biomasse des sols : 17 %
 - carbone des ciments : 3 %
- méthane : 14 % ;
- protoxyde d'azote : 8 % ;
- gaz fluorés : 1 %.

Les **combustibles fossiles** sont responsables de 57 % des gaz à effet de serre (donc de la majorité), mais **l'agriculture joue une part qui est loin d'être négligeable** si l'on fait le décompte : une grande partie des 14 % dus au méthane + une grande partie des 8 % dus aux protoxyde d'azote + l'essentiel des 17 % dus à la déforestation et à la perte du carbone des sols (donc **plus de 35 %** au total), auquel s'ajoutent le combustible des engins agricoles mécanisés et l'énergie fossile pour les fabriquer si l'on veut être exhaustif.

Les émissions humaines de CO₂ sont captées par l'océan et par la surface des continents pour un total de 56 %. Le reste des gaz à effet de serre additionnel est stocké dans l'atmosphère, augmentant par là sa concentration (d'où le passage de 280 ppm de CO₂ en 1850 à 412 ppm en 2020).

La capture du CO₂ (et plus accessoirement de l'azote anthropique N₂O) par l'océan entraîne son acidification, car, comme mentionné précédemment : **eau (H₂O) + gaz carbonique (CO₂)** donne de **l'acide carbonique (H₂CO₃)**. L'écosystème océan fonctionne en milieu basique ; avant les émissions excédentaires de CO₂, son pH moyen était de 8,25 ; actuellement, son pH moyen est de 8,14⁴³. Tout en restant basique, son acidité a doublé (car l'échelle est logarithmique) ; de plus, l'acidification n'est pas uniforme sur la surface des océans, ce qui fait que certaines régions du globe en subissent plus fortement les conséquences que d'autres. Comme le pH de l'océan s'acidifie, de nombreux dysfonctionnements interviennent chez les organismes qui synthétisent le

43 Pour ceux qui l'ont oublié (ou ne le savent pas), rappelons que l'échelle du pH est logarithmique : dans l'échelle du pH, qui va de 0 à 14 avec un pH neutre à 7, **un pH de 7 est donc 10 fois plus acide qu'un pH de 8.**

carbonate de calcium : les coraux (habitat essentiel pour environ 25 % de la vie océanique) et les organismes à coquilles ou à squelette calcaires (plancton, mollusques, etc.).

La biosphère, à la surface des continents, capture une partie du CO₂ (environ 25 % parmi les 56 % mentionnés plus haut). Cet enrichissement peut conduire à un « verdissement » passager de la planète (phénomène observé et documenté entre 1982 et 2009), par augmentation du nombre de feuilles sur les arbres (aubaine pour les « théories » des climato-sceptiques) du fait d'un « effet de fertilisation » du CO₂, petit effet positif à court terme au milieu de nombreuses conséquences négatives ! Mais sur le long terme cela paraît beaucoup plus problématique⁴⁴, dans un contexte où s'annoncent des sécheresses à répétition : en effet, en situation de stress hydrique au niveau des racines, ou de température élevée au niveau des feuilles, ou encore de surabondance de CO₂, les stomates, ces minuscules et très nombreuses « bouches » situées à la surface des feuilles, se ferment (pour la sauvegarde de l'organisme) et les échanges gazeux (CO₂, O₂, H₂O) ne fonctionnent plus : la machine est alors à l'arrêt !

L'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre est à l'origine d'une accumulation d'énergie sous forme de chaleur à la surface du globe. C'est encore une fois l'océan, comme pour les excédents de CO₂, qui joue le plus le rôle de « stockeur » de cette énergie : **93 %** de l'énergie calorifique produite par l'homme depuis 50 ans est **actuellement stocké par les océans** [les 7 % restants se partagent entre les surfaces continentales, les glaces des calottes et des glaciers d'altitudes ainsi que l'**atmosphère** (seulement 1 % pour cette dernière)]. Cette ponction par l'océan de l'énergie thermique émise par l'homme entraîne le réchauffement des 1000 m supérieurs de celui-ci, avec, par voie de conséquence, sa dilatation ; cette dernière est une des principales cause de la hausse du niveau des mers, aussi importante que la fonte de glaces des calottes.

La question de la diminution de la surface de la glace de banquise ne joue bien sûr pas sur la hausse du niveau des océans (puisque c'est de la glace de mer) mais a une conséquence qui est très loin d'être négligeable par le biais de l'« **effet albédo** » : moins de surface blanche de banquise en été, due à sa diminution, entraîne une proportion moindre du renvoi de la lumière émise par le soleil, donc plus de transformation de celle-ci en infrarouges, donc un réchauffement accru, donc sa diminution (cas école de rétroaction positive !).

11) Pourquoi il n'est pas correct de dire : « crise climatique » et pourquoi faut-il dire : « dérèglement climatique » ?

Tout simplement parce qu'une crise est quelque chose de passager (comme une « crise de foie »), alors que, malheureusement, le climat perturbé par l'homme le restera sur le long terme (à l'échelle des humains), du fait qu'il y a :

- 1) l'inertie des gaz accumulés dont le temps de dégradation est long (à l'échelle humaine) ;
- 2) l'inertie de l'océan, qui joue pour l'instant le rôle de tampon thermique (jusqu'à quand ?) ;
- 3) les nombreuses rétroactions, dont celles liées à l'albédo (comportement différentielle des surfaces claires/sombres vis-à-vis de l'absorption des rayons lumineux) et celles liées à la fonte progressive du **permafrost** [ou *pergélisol* = les terrains de l'arctique (Canada, Alaska, Sibérie) continuellement gelés à -40°C, parfois sur 1000 m d'épaisseur, depuis les dernières glaciations] ;
- 4) les mécanismes de « point de bascule », qui sont encore très mal connus à l'échelle d'un « super-système » comme le système terre, et qui sont en lien avec le troisième point mentionné précédemment, peuvent rendre irréversibles les phénomènes engendrés. Nous reviendrons sur quelques-uns de ces différents points ci-dessous.

⁴⁴ https://www.lemonde.fr/planete/article/2016/04/27/la-terre-verdit-grace-aux-emissions-de-co2_4909274_3244.html

Il s'ensuit que, même si l'on ne relâchait plus un seul gramme de carbone à partir de demain matin (ce qui ne sera pas le cas), il faudrait attendre des millénaires pour revenir à l'équilibre d'avant ! Bien plus long qu'une simple crise ! La neutralité carbone dont on parle ne sera qu'une limitation de l'intensité de la crise en amplitude, mais en aucun cas sa suppression par une baguette magique.

Dans le cas du climat, une crise climatique serait par exemple les conséquences d'une éruption volcanique exceptionnelle, comme celles qu'a connues la terre aux périodes historiques (celle-ci amènerait par ailleurs plutôt un refroidissement qu'un réchauffement). Avec des répercussions mondiales, mais passagères à l'échelle du temps humain : quelques années pour les plus modestes, quelques générations pour les plus intenses.

Deux exemples :

-Éruption du Samalas (Indonésie, 1257), début du « Petit Âge Glaciaire », famine en Angleterre, etc.

-Éruption du Tambora (Indonésie, avril 1815) > 1816 : « l'année sans été » : perte des récoltes, famines, migrations.

Pour en revenir aux **questions d'inertie**, qui font que, même si nous n'émettions plus un gramme de gaz à effet de serre dès demain matin, la question du réchauffement ne serait pas résolue, n'abordons pour l'instant que la question de l'atmosphère et le point concernant les gaz accumulés afin de bien saisir que nos émissions de gaz à effet de serre n'induisent pas une simple « **crise** » climatique, mais **quelque chose de plus grave**. Pour comprendre cela, il convient d'expliquer ce qu'est la durée de séjour d'un gaz à effet de serre (additionnel dans le cas présent).

La « **durée de séjour** » est le temps que met un gaz pour que la moitié de sa quantité émise se soit dégradé (c'est exactement comme l'effet des médicaments chimiques dans l'organisme).

Par exemple, si la durée de séjour d'un gaz est de 100 ans, au bout de 100 ans après l'émission la moitié aura disparu, au bout de 200 ans la moitié + la moitié de la moitié, donc les 3/4, et ainsi de suite... : $0,5 + 0,25 + 0,125 + 0,062 + 0,031 = 0,968$: il faudra donc 500 ans pour que 97 % du gaz aient disparu.

***N.B.** : la courbe de neutralisation de la fraction de ce gaz prend bien sûr en considération aussi le tronçon entre 0 et 100 ans.*

-Pour le gaz carbonique, la durée de séjour est justement de 100 ans :

-il faudra 700 ans pour que 99 % soit éliminé.

-Pour le méthane : (12 ans) >>>>>

-il faudra 84 ans pour que 99 % soit éliminé.

-Pour le protoxyde d'azote : (120 ans) -il faudra 840 ans pour que 99 % soit éliminé.

-Pour le Fréon : (50 000 ans) >>>>> -il faudra 350 000 ans pour que 99 % soit éliminé.

Pour un gaz à effet de serre, il convient de tenir compte de deux paramètres : la durée de séjour est une chose, l'effet de serre réel en est un autre > pour le dire autrement, il y a des gaz qui ont une capacité d'effet de serre plus fort que le CO₂, mais une durée de séjour plus courte (exemple le méthane), qui cumulent donc un avantage et un inconvénient par rapport au CO₂. Ce qui fait que pour connaître l'effet de serre, non pas instantané, mais sur la durée, il faut intégrer la durée de séjour de ce gaz et sa capacité d'effet de serre.

Afin de tenir compte de ce double aspect, les climatologues ont donc créé un « indice » : Le **potentiel de réchauffement global** ou **PRG** (en anglais : le **global warming potential** ou GWP), qui intègre ces deux paramètres et prend comme référence (donc égale à 1) le pouvoir réchauffant du CO₂ sur 100 ans⁴⁵.

Il s'ensuit que :

- pour le CO₂, le PRG est égal à **1** (par définition)
- pour le méthane, le PRG est égal à **23**
- pour le protoxyde d'azote, le PRG est égal à **296**
- pour un des gaz du groupe du fréon (HFC-23), le PRG est égal à **14 800**
- pour l'hexafluorure de soufre, le PRG est égal à **22 800**

Quelle est la provenance de ces autres gaz à effet de serre dont on parle moins :

Le **méthane** est libéré par les fermentations en milieu anaérobie (= *milieu sans oxygène*) ; il existe en effet de nombreuses bactéries (un vaste monde que l'on ignore généralement, -y compris dans notre intestin et sur notre peau d'ailleurs-) qui en sont restées pour certaines d'entre elles au fonctionnement d'avant la présence de l'oxygène sur terre et pour qui l'oxygène est un « poison »)⁴⁶.

Le **méthane anthropique** (direct ou indirect) provient surtout de :

- l'estomac des ruminants,
- les rizières et zones inondées,
- les zones de dégel superficiel dû à la fonte du permafrost (effet de rétroaction positive),
- la libération de méthane sous-marin stocké (autre effet de rétroaction positive) ; ce sont les « *clathrates d'hydrate de méthane* »⁴⁷,
- des « **pertes collatérales** », très peu prises en compte jusqu'à aujourd'hui, dans l'extraction du charbon, gaz et pétrole⁴⁸

Le **protoxyde d'azote** est libéré par les sols du fait de **surplus d'engrais azotés, d'épandage de lisier**, mais aussi lié au fonctionnement des moteurs.

La liste complète des gaz à effet de serre (dont certains ne sont produits qu'en très faibles quantités) est longue :

https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?prg.htm

45 voir : https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiel_de_r%C3%A9chauffement_global

46 https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tabolisme_m%C3%A9thanog%C3%A8ne

47 <https://www.notre-planete.info/actualites/818-clathrates-hydrate-methane-energie-climat>

48 Le Monde du 25/02/2022 : « *Climat : les émissions de méthane issues du secteur de l'énergie sous-estimées et en hausse. Les émissions de méthane issues du secteur de l'énergie sont 70 % plus élevées que les quantités déclarées officiellement par les gouvernements, révèle le « Global Methane Tracker 2022 » publié par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), mercredi 23 février 2022. Or, la quasi-totalité des rejets de ce gaz à effet de serre très puissant, provenant des activités pétrolières et gazières, pourrait être évitée sans coût net, étant donné les prix élevés actuels du gaz naturel, assure l'institution. Le secteur de l'énergie provoque 40 % des émissions de méthane d'origine humaine, derrière l'agriculture. Ces rejets sont issus de l'extraction, de l'exploitation ou du transport du charbon, du pétrole et du gaz. Si tout le méthane rejeté dans l'atmosphère en 2021 avait pu être récupéré puis vendu, le marché aurait ainsi bénéficié de 180 milliards de mètres cubes de gaz naturel supplémentaires (équivalent de tout le gaz nécessaire au secteur électrique en Europe en 2021), a calculé l'AIE – le gaz naturel est principalement constitué de méthane ».* Voir le document source : https://iea.blob.core.windows.net/assets/b5f6bb13-76ce-48ea-8fdb-3d4f8b58c838/GlobalMethaneTracker_documentation.pdf

Il en résulte que certains gaz à effet de serre qui sont produits par l'homme le sont en quantités que l'on pourrait croire **négligeables** (si on les compare au CO₂ émis), mais ils ont un potentiel de réchauffement global **beaucoup plus élevé que celui du CO₂** !

Pour continuer sur la **question de l'inertie**, quittons l'atmosphère et regardons cette fois du côté des océans. Nous avons mentionné plus haut que **93 %** de l'énergie calorifique produite par l'homme depuis 50 ans est **actuellement stocké par les océans** alors que l'**atmosphère** n'en a stocké que 1 % (avec les conséquences déjà désastreuses que l'on connaît). Les océans jouent donc le rôle de « volant d'inertie » pour ce surplus de chaleur induit par l'activité humaine du dernier siècle (rappelons toujours son facteur exponentiel). La question est justement : jusqu'à quand va-t-elle jouer ce rôle ? Sans parler de l'excédent de chaleur due à l'activité humaine, les océans jouent un rôle très important de « répartiteur » de chaleur à la surface du globe ; sans eux les contrastes entre équateur et pôles seraient encore plus marqués. C'est un grand circuit⁴⁹, de forme complexe, qui parcourt le globe de l'Antarctique au Groenland, dont ce que l'on nomme le *Gulf Stream* n'est qu'un court tronçon. On estime que le tour complet de l'eau dans ce circuit prend entre 1 000 ans et 1 500 ans, ce qui donne une idée du système d'inertie de l'océan. Dans les océans, comme dans l'atmosphère, les répercussions des modifications de l'homme du XX^e-XXI^e siècle se feront sentir sur des temps longs.

Pour continuer sur ce point qui concerne le fait que nous entrons dans un dérèglement qui est beaucoup plus grave qu'une crise passagère qui va se régler à coup de décrets dans les ministères, il convient de parler brièvement des rétroactions (dont celle liée à l'albédo), ce qui nous amènera à parler des « points de bascule ».

12) Albédo, rétroactions et point(s) de bascule

Rétroaction est en réalité un terme un peu mal choisi, car on pense immédiatement à « effet rétroactif », dans le sens utilisé dans notre quotidien, alors qu'il faut le comprendre un peu différemment : il n'y a pas dans le monde physique d'« effet rétroactif » comme il peut y en avoir dans les réglementations et les lois humaines. Prenons la définition de Wikipédia (pas des plus claires, il faut l'avouer...) : « *La **rétroaction** (en anglais **feedback**) est un processus dans lequel un effet intervient aussi comme agent causal sur sa propre origine, la séquence des expressions de la cause principale et des effets successifs formant une boucle de rétroaction* ». Lorsque que les effets successifs amplifient le phénomène de départ, on **parle de rétroaction positive par itération**. Dans le cas inverse (plutôt rare), ce sera une rétroaction négative. Le cas le plus parlant d'une rétroaction positive est celui de l'« **effet albédo** » à la surface du globe, point sur lequel nous nous attarderons un peu, mais ce n'est pas le seul. Pour comprendre l'effet albédo, il faut se rappeler qu'une surface blanche réfléchit les rayons lumineux qu'elle reçoit du soleil, alors qu'une surface noire les absorbe dans un premier temps, les transforme ensuite puis les renvoie sous forme de rayonnement infrarouge, donc de chaleur. L'albédo se traduit par un indice qui va de 0 (pour une surface parfaitement noire) à 1 (pour une surface parfaitement blanche). Il faut aussi savoir que *la surface des océans a un indice d'albédo se rapprochant de celui d'une surface noire alors que la neige qui recouvre les calottes et la banquise a un albédo se rapprochant de celui d'une surface blanche*. Donnons quelques chiffres de cet indice : l'albédo moyen de la terre est de 0,3 ; la lave a un albédo de 0,04 ; la surface de la mer de 0,05 à 0,15 ; une forêt de conifères de 0,05 à 0,15 et une forêt de feuillus de 0,15 à 0,20 ; le sable de 0,25 à 0,3 ; enfin, la neige tassée a un albédo de 0,4 à

⁴⁹ Appelé « boucle thermohaline » (car les deux paramètres qui contrôlent sa circulation sont la température de l'eau et sa salinité, chacun ayant une influence sur sa densité : une eau très salée est plus lourde qu'une eau peu salée et une eau chaude est moins dense qu'une eau froide) ou « circulation méridienne de retournement ».

0,7 et la neige fraîche de 0,75 à 0,9. Nous voyons immédiatement l'enchaînement produit par une amorce de refroidissement sur le globe qui augmente les étendues de neige (cas de l'entrée en glaciations) et, inversement, les conséquences d'une amorce de réchauffement qui réduit à terme l'étendue des surfaces enneigées au détriment de surface de terre et de mer, de lacs et de forêts de conifères, tout du moins une partie de l'année plus conséquente qu'auparavant (c'est exactement ce que nous connaissons aujourd'hui). D'autres exemples de rétroactions positives « néfastes » sont identifiés, comme par exemple la fonte du pergélisol dû au réchauffement qui entraîne la libération de CO₂ et de méthane, gaz à effet de serre encore plus puissant que le précédent, qui participent donc au réchauffement, et ainsi de suite.

Évoquons maintenant ce que sont les « points de bascule⁵⁰ » (ou « points de basculement ») d'un système, qui sont liés à des rétroactions positives. Un point de basculement est « *un seuil qui, lorsqu'il est franchi, entraîne de grands changements, souvent irréversibles (point de non-retour), qui modifient qualitativement l'état ou l'évolution d'un système* ». Tout d'abord, dans un système complexe tel que celui du climat de notre planète, il n'y a pas UN point de bascule, mais plusieurs : « *une quinzaine de points de bascule ont été identifiés et tous sont scrutés car ils pourraient faire basculer la machine climatique* (B. Gaborit). Tous ces points sont susceptibles d'entraîner un emballement du système climatique. Citons-en quelques-uns : la fonte de la glace des calottes polaires : Groenland, mais surtout Antarctique⁵¹, la régression de la banquise arctique, le fonctionnement de la forêt amazonienne⁵², la fonte du pergélisol en Arctique, la modification de la circulation océanique. Certains d'entre eux, s'ils ne font pas basculer la machine climatique, feront basculer les écosystèmes : c'est par exemple le cas de la mort probable à terme des récifs coralliens : « *même avec une hausse de la température moyenne limitée à 1,5 °C, objectif le plus ambitieux de l'accord de Paris, plus de 99 % des coraux seraient incapables de se remettre des vagues de chaleur marines* », selon une étude récente⁵³. Il faut savoir que les récifs coralliens, outre leur beauté incomparable, constituent, avec la forêt amazonienne, un des écosystèmes les plus riches de la planète : ils abritent 25 % des espèces marines de la planète sur moins de 0,2 % de la superficie des océans (et par ce biais la survie d'un demi-milliard d'humains dépend de leur existence).

13) Méthane, bétail, agriculture industrielle, engrais azotés

Le **méthane** (CH₄) est responsable de 14 % de l'effet de serre additionnel. Une vache émet environ **500 litres de méthane** par jour ; ce n'est pas rien ! Mais, pourquoi donc une vache émet du méthane (CH₄) alors que nous avons expliqué, avec équation-bilan à l'appui, que les animaux, en consommant des aliments qui sont des dérivés des sucres produits par les plantes, dégagent du CO₂ et de la vapeur d'eau ? Les vaches seraient-elles si différentes de nous dans leur métabolisme ? Pourtant les bovins ont bien des poumons comme nous, respirent comme nous et émettent du CO₂ comme nous ! Y aurait-il un « *hic* » quelque part ? Probablement ! Les bovins ont en partie un

50 Rousseau Ch. (2021) – Le point de bascule. <https://accromath.uqam.ca/wp-content/uploads/2021/10/bascule.pdf>

51 La calotte glaciaire antarctique est un cas très particulier, car, bien que la majeure partie soit continentale, sur une partie (l'Antarctique occidental) la glace repose sous le niveau de la mer. Avec le réchauffement climatique, l'océan érode et ronge le glacier en sappe. <https://bonpote.com/antarctique-un-point-de-bascule-climatique-inevitable/>

52 Il semblerait que la forêt amazonienne brésilienne, du fait de la déforestation, commence à émettre plus de CO₂ qu'elle n'en consomme. [Yuanwei Qin et al. (2021) – Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Climate Change*, 11, pp. 442-448].

53 Dixon A.M., Forster P.M. *et al.* (2022) – Future loss of local-scale thermal refugia in coral reef ecosystems, *PLOS Climate*, Published: February 1, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000004>

métabolisme similaire au notre... et en plus de ça un métabolisme différent du notre. Car les vaches broutent de l'herbe, mais, étonnamment, ne se nourrissent pas de l'herbe qu'elles broutent ! Dans le microbiote du *rumen* (des ruminants), des microbes⁵⁴ dégradent la cellulose de l'herbe que broutent ces « herbivores » (chose que les herbivores sont incapables de faire eux-même) ; « *Ainsi, sous ses allures herbivores, la vache digère-t-elle en fait... des microbes : elle est microphage, nourrie de microbes qu'elle élève elle-même à l'herbe []* »⁵⁵. Le méthane libéré lors des éructations est en fait un « déchet » de ces fermentations anaérobies.

Que les vaches émettent du méthane, ce n'est pas nouveau, mais ce qui est nouveau, c'est qu'il y a maintenant sur terre 1,8 milliard de bovins : le cheptel est de ce fait responsable du tiers des émissions de méthane anthropique de la planète et contribue pour 5 % à l'effet de serre induit par l'homme. C'est une des raisons qui fait qu'un non-végétarien est moins responsable du dérèglement climatique s'il mange une cuisse de poulet (pas n'importe lequel !) à la place d'un steak de bœuf ! (mais bon... il y a tout de même 20 milliards de poulets sur la planète).

Et oui, les humains et leur cheptel ont littéralement colonisé la planète au détriment de la faune sauvage (que certains appellent même « gibier »). Si l'on raisonne en tonnes de carbone (comme outil de comparaison), la biomasse des mammifères sur terre est actuellement la suivante :

- mammifères sauvages : **7 millions** de tonnes de carbone (MtC) ;
- humains : **60 millions** de tonnes de carbone ;
- bétail : **100 millions** de tonnes de carbone.

Donc : humain + bétail = **160 MtC contre 7 MtC** : donc, parmi les mammifères terriens, **4 % pour le sauvage et 96 % pour le «non-sauvage»** : le sauvage ne fait plus le poids au XXI^e siècle ! (alors qu'il y a quelques millénaires les proportions étaient l'inverse).

Passons à l'agriculture pour les besoins alimentaires des humains. Le **protoxyde d'azote** (ou oxyde nitreux : N₂O) est responsable de **8 % de l'effet de serre** additionnel (et il est, de plus, le premier contributeur à la **destruction de la couche d'ozone** depuis l'interdiction d'émission des CFC⁵⁶). En France, l'agriculture contribue à hauteur de 86 % aux émissions de N₂O du fait de la transformation des produits azotés (engrais, fumier, lisier, résidus de récoltes) épandus sur les terres agricoles. L'utilisation inconsidérée d'engrais azotés a donc un effet doublement néfaste : 1) l'émission de protoxyde d'azote (N₂O) d'un côté (sous forme gazeux dans l'atmosphère) et 2) de nitrates (NO₃) de l'autre (pollution des nappes aquifères et des sols). Ces effets néfastes des engrais s'ajoutent à l'érosion des sols agricoles résultant des techniques de labour excessives (trop profondes, trop fréquentes), entraînant une perte du carbone des sols et, de plus, une perte de sa composante minérale fine, ces deux composantes étant pourtant d'une grande importance pour la fertilité du sol⁵⁷ : d'après Philippe Bihouix, pour une tonne de nourriture produite en France, une tonne de terre

54 Le microbiote du *rumen* d'un bovin (dont le volume avoisine 200 litres) contient : des bactéries (entre 1 million de milliards et 10 millions de milliards par litre), des protozoaires (entre 10 millions et 1 milliard par litre), des champignons (entre 1 million et 100 millions) et des virus (entre 10 milliards et mille milliards par litre), ainsi que des archées (ou : «archéobactéries» qui participent au maintien du milieu anaérobie du rumen. Ce sont elles qui produisent le méthane «éructé» par les bovins [tout ce beau monde dégradant l'herbe et se mangeant entre eux : les virus et les protozoaires consommant les bactéries].
<https://planet-vie.ens.fr/thematiques/animaux/systeme-digestif/la-digestion-ruminale-des-aliments>
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00889884/document> ; <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/methanogenese.xml>

55 Selosse M.-A. (2017) – *Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux, les civilisations*. (voir le chapitre : « *dessine-moi une vache* »), Éditions Actes Sud, 365 p.

56 CFC = Chlorofluorocarbures (Fréon) utilisés dans les aérosols et dans l'industrie du froid, **interdit** depuis le Protocole de Montréal (1985).

57 Les sols : ces compagnons que nous méconnaissons [Marc-André Selosse] https://www.youtube.com/watch?v=0mJ_VXYBHF8

arable part à la mer par érosion, et ce chiffre monte même à 4 tonnes de perte par tonne de nourriture produite au niveau mondial. Dans le monde, on estime la quantité de sol érodée chaque année à 5 tonnes par habitant et en zone tempérée, on perd en moyenne 1 tonne de terre par an et par hectare, ce qui est supérieur au taux de formation du sol à partir du substrat⁵⁸.

Nous tombons ici à nouveau dans un cercle vicieux : les sols s'appauvrissent par érosion, nécessitent plus d'engrais, dont une partie participe à l'effet de serre, l'autre à la pollution des nappes phréatiques d'eau potable.

14) Le changement (climatique), c'est maintenant !

« *Le changement, c'est maintenant !* », comme slogan, on l'a entendu souvent en politique, mais on a peu vu ses effets ! Par contre, à chaque été qui passent et surtout en 2022, on commence VRAIMENT à ce dire que le changement **climatique**, c'est MAINTENANT : températures à la hausse, records de températures régulièrement battus (que ce soit des moyennes mensuelles, annuelles, ou des maxima locaux) aires géographiques qui se réchauffent plus vite que la moyenne, sécheresses récurrentes entraînant incendies et méga-feux, baisses des nappes de surface et de profondeur, assèchement des sources, étiages des fleuves et rivières, donc pénuries et restriction d'eau d'un côté, événements extrêmes tels que orages, tornades et pluies diluviennes d'autres, avec ci-dessous quelques exemples parmi d'autres :

Des réchauffements inégaux selon les aires géographiques : en Arctique, **durant les deux dernières décennies**, la température de l'air près du sol **s'est accru de plus de deux fois celle de la moyenne enregistrée à la surface du globe**, avec pour conséquences des rétroactions positives⁵⁹ sur la banquise, la couverture neigeuse (modification de l'albédo), la perte de glace de la calotte groenlandaise, le réchauffement du pergélisol (possible libération de méthane et de CO₂), l'intensification des feux de forêt et les modifications de l'hydrologie (Sibérie, nord du Canada), la modification des écosystèmes marins, l'acidification des eaux ; le cas de l'Antarctique pourrait aussi être mentionné, avec déstabilisation, peut-être irréversible, de plusieurs grandes parties de la calotte suite à l'accélération du mouvement des masses de glace vers l'océan⁶⁰. Les conclusions d'études spécialisées se bousculent et on peut lire le 11 août 2022 « *L'arctique s'est réchauffé quatre fois plus vite que le reste de la planète au cours des quarante dernières années. Les conclusions de cette nouvelle étude font craindre une sous-estimation des modèles climatiques des pôles, dont le réchauffement a une influence prépondérante sur la hausse du niveau des mers* »⁶¹. Le pourtour méditerranéen, de même que les Alpes, se réchauffent également plus vite que la moyenne du globe.

15) Le sol, ce grand oublié

58 <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/gestion-de-l-environnement-pollution/la-degradation-des-sols-en-france-et-dans>

59 07_SROCC_Ch03_FINAL : « *Arctic surface air temperature has likely increased by more than double the global average over the last two decades, with feedbacks from loss of sea ice and snow cover contributing to the amplified warming* ».

60 07_SROCC_Ch03_FINAL : « *There is limited evidence and high agreement that recent Antarctic Ice Sheet (AIS) mass losses could be irreversible over decades to millennia. Rapid mass loss due to glacier flow acceleration in the Amundsen Sea Embayment (ASE) of West Antarctica and in Wilkes Land, East Antarctica, may indicate the beginning of Marine Ice Sheet Instability (MISI), but observational data are not yet sufficient to determine whether these changes mark the beginning of irreversible retreat* ».

61 Cité par le Nouvel Observateur,

Lorsque l'on pense « sol », on pense souvent « sol agricole » (« la production des sols », etc.), plus rarement sol en général ; le paradoxe est que sur une surface travaillée de façon agro-industrielle, avec labours profonds, intrants chimiques et pesticides, il n'y a quasi plus de sol, dans sa vraie définition et dans sa vraie identité : il ne reste qu'un reliquat de « terre de surface ». Le sol, c'est le sol forestier ici, le sol de montagne là, le sol de milieu humide, etc. C'est une entité que l'on néglige souvent, du fait de sa faible épaisseur : un liseré de quelques décimètres ou un peu plus. C'est pourtant la seule « interface » qui fait le lien entre le monde minéral et le monde aérien, par le biais du monde biologique. Mais c'est une biologie qui se cache, à la différence des arbres et des mammifères, car constituée d'organismes microscopiques, pourtant extrêmement nombreux. C'est effectivement une interface, mais c'est en réalité beaucoup plus que cela : c'est un monde en soi, avec plusieurs « étages » centimétriques ou décimétriques, extrêmement riche en biodiversité (bactéries, champignons, petits arthropodes, racines et radicelles des végétaux, etc.). Marc-André Selosse⁶² nous explique que **75 % de la biomasse vivante terrestre**, ainsi que **25 % de la biodiversité actuellement connue**, se trouvent dans les sols.

Mais les sols se dégradent : quelques chiffres clés mentionnés par l'initiative 4 pour 1000⁶³ :

-24% des sols mondiaux sont dégradés à des degrés divers, dont près de la moitié des sols agricoles [source: Bai et al., 2013].

-1500 milliards de tonnes de carbone sont stockées dans la matière organique des sols mondiaux, soit plus de deux fois le carbone du CO₂ atmosphérique [source : GIEC, 2013].

-**1,2 milliard de tonnes de carbone par an** pourraient être stockées dans les sols agricoles (cultures et prairies) soit un taux annuel de stockage d'environ 4 pour 1000 par rapport à l'horizon de surface du sol [source : GIEC, 2014].

-24/40 millions de tonnes de grain supplémentaires pourraient être produits chaque année en Afrique, Asie et Amérique du Sud en stockant une tonne de matière organique par hectare [source : Lal, 2006].

-1,2 milliard US \$ de perte économique en grains liée à la dégradation des sols [source : FAO, 2006].

Les sols se dégradent de plus en plus alors que leur bonne gestion pourrait être une des solutions pour contrecarrer le réchauffement climatique dans la mesure où le stockage de carbone dans le sol pourrait être le puits à carbone le plus efficace à mettre en place à l'échelle du temps humain. D'après M. Trouillet et H. Saint-Macary⁶⁴ « Un taux de croissance annuelle du stock mondial de carbone des sols de « 4 pour mille » permettrait d'absorber et de stocker l'équivalent des émissions anthropiques annuelles de CO₂ soit 75 % des émissions de gaz à effet de serre. Accroître la teneur en carbone des sols agricoles permet également d'améliorer la sécurité alimentaire, de s'adapter aux dérèglements climatiques et de développer la biodiversité des sols. »

16) Le métabolisme du vivant

Que vient faire la notion de métabolisme ici ? Si l'on parle d'émissions de protoxyde d'azote, puissant gaz à effet de serre, de pollution des nappes phréatiques et des sols et des cours d'eaux aux nitrates et aux phosphates, on est obligé de parler de métabolisme.

Le métabolisme, c'est « l'ensemble de toutes les transformations chimiques, décomposables en réactions simples, qui se produisent dans une cellule ou un organisme » et il en a beaucoup ! Que nous parlions de photosynthèse chez les bactéries et les plantes, de respiration chez les plantes et les animaux (dont les humains !), il convient d'aborder succinctement ce qu'est le **métabolisme**. Entre

62 Selosse M.-A. (2021) – *L'origine du monde. Une histoire naturelle du sol à l'intention de ceux qui le piétinent (chapitre XIV)*, Éditions Actes Sud, 478 p. et https://www.youtube.com/watch?v=0mJ_VXYBHF8

63 Trouillet M., Saint-Macary H. – *Initiative : « 4 pour 1000 » Des sols riches en carbone pour la sécurité alimentaire et le climat.*

64 Trouillet M., Saint-Macary H. – *ibid.*

autre pour la raison que pour nourrir 8 milliards d'humains et non plus quelques millions comme au début des périodes historiques, il est important de savoir comment fonctionnent ces transformations chimiques et quels éléments (sels minéraux, métaux, etc.) entrent en jeu. Nous verrons alors à quel point cela est crucial ! Chacun sait que pour une agriculture agro-industrielle (production céréalière, maraîchage, arboriculture, élevage), il faut des engrais, des « intrants », comme disent les agriculteurs ; et tout le monde connaît la combinaison « magique » : NPK (azote, phosphore, potassium) pour remplacer les sels minéraux qui sont ponctionnés à chaque récolte.

Dans le cycle naturel du fonctionnement du sol, les organismes se débrouillent sans l'homme, et souvent en symbiose (bactéries, champignons, végétaux, animaux ; voir point précédent), afin d'extraire les sels minéraux dont chacun a besoin : l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le sodium, le fer, le soufre et quelques oligo-éléments indispensables en dosages plus ou moins importants, voire infinitésimaux (le cuivre, le cobalt, le manganèse, etc.), pour chacun. Pour la plupart (à l'exception de l'azote), ce sont les roches fragmentées et altérées du sol et du sous-sol qui en sont la source, sachant que dans la nature, **ce qui est extrait est rendu en fin de cycle** (la feuille d'un arbre rendra l'azote, le phosphore et les autres sels minéraux au sol chaque année au moment où les feuilles tombent au sol en automne et sont dégradées au printemps suivant par les micro-organismes -bactéries, champignons-) alors que ce qui est ponctionné par les humains en agriculture industrielle (récolte annuelle de céréales, légumes, oléagineux, viande et produits laitiers des troupeaux) **n'est pas rendu au destinataire**.

Dans le métabolisme de la plante et de l'animal, pour la photosynthèse comme pour la respiration, pour produire du sucre, puis des molécules plus complexes comme pour casser des molécules complexes et consommer des sucres, il faut des aides : il y a réactions chimiques en chaînes, et qui dit réactions chimiques dit souvent « oxydo-réduction », et qui dit oxydo-réduction dit transfert d'**électrons**, comme dans **une pile**. Il faut donc des catalyseurs, des enzymes, des molécules qui jouent le rôle de pile. Et c'est là que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) vont jouer un rôle **indispensable**.

Mais comme nous ponctionnons à chaque récolte ces éléments qui entrent dans notre métabolisme d'humains et dont les excédents partent... dans les stations d'épuration, nous sommes « contraints », en agriculture agro-industrielle, de remplacer ce qui a été ponctionné par des « intrants » de synthèse : les fameux sacs d'engrais NPK, tout en sachant que :

- a) la production d'engrais azotés (le « N ») est **extrêmement coûteuse en énergie** ;
- b) le phosphore (« P ») n'est pas inépuisable. C'est le Maroc qui possède les trois-quarts des réserves mondiales et le **pic du phosphore devrait être atteint autour de 2030**.

Nous sommes, avec cette agriculture industrielle, très très loin du « *donnant-donnant* » de l'activité mycorhizienne⁶⁵ (la symbiose du végétal et des champignons au niveau des racines du végétal) : dans l'activité mycorhizienne, le champignon aide le végétal à soustraire du sol les sels minéraux qui lui sont indispensables, en échange de sucres que lui apporte le végétal par ses racines.

17) Énergie, exponentielle, numérique et soit-disant « dématérialisation »

La courbes des émissions mondiales de CO₂ dans l'atmosphère est **exponentielle** depuis 1850, comme la tendance de la plupart des courbes qui caractérisent nos activités d'humains du XX^e-XXI^e siècle. L'Agence Internationale de l'Énergie prévoit que la demande des **vingt-cinq**

65 Diversité microbienne & mycorhizes, par Marc-André Selosse : https://www.youtube.com/watch?v=_FqjReupbVw

prochaines années nécessitera une production énergétique égale à celle des **cent cinquante années d'exploitation des combustibles fossiles**.

Avant d'aller plus avant, réfléchissons à ce que veut dire vraiment « **exponentiel** » : une croissance économique à **taux constant de 3 % par an** (ce que prônent nos politiques) est une **exponentielle** car elle double tous les 23 ans (car $2 \approx 1,03^{23}$). Et « *la croissance française devrait atteindre 6,7% en 2021, la plus élevée depuis plus de 50 ans* » pouvait-on lire dans les dernières nouvelles de décembre 2021. Pour la suite du raisonnement, il faut se rappeler l'« énigme » du nénuphar sur un étang : un pied de nénuphar double sa surface tous les jours ; connaissant sa surface et la superficie de l'étang, au bout de combien de temps aura-t-il couvert l'étang ? Ou bien celle de l'inventeur du jeu d'échecs : *selon la légende, le grand vizir Sissa Ben Dahir, ce brillant mathématicien, demande au roi indien Shirham, en récompense de sa découverte, un grain de riz pour la première case de l'échiquier, 2 grains pour la deuxième, 4 grains pour la troisième et ainsi de suite (un complément à cette légende dit que le roi fut d'accord à condition que le vizir compte lui-même les grains). Combien de grains se trouveront sur la 64ème case ?* Pour ce dernier petit « exercice », chacun peut s'amuser à faire le calcul... et est même autorisé à s'arrêter en cours de route.

Avec une croissance du PIB de 3 %, celui-ci double donc tous les 23 ans, comme mentionné plus haut : sachant que la consommation d'énergie n'a jusqu'à présent JAMAIS été dé耦plée de la croissance du PIB, les extrapolations donneraient donc : une consommation d'énergie doublée en 2045, quadruplée en 2068, multipliée par 8 en 2091, multipliée par 16 en 2114, par 32 en 2037, par 64 en 2160. La sortie de route risque probablement d'arriver bien avant ! Autre façon de voir la question : l'an mil, ce n'est pas très loin en arrière ; et de l'an mil à l'utilisation du charbon, la croissance a été très faible. Extrapolons l'équivalent en temps vers le futur : dans un millénaire, avec une croissance annuelle de 2 %, nous doublerons tous les 37 ans et dans 1000 ans, nous aurons multiplié... par 390 millions !⁶⁶

Prenons la question autrement. D'après les données des économistes, la « richesse » a été **multipliée par 145** depuis le XVIII^e siècle. Léonard de Vinci a vécu de 1452 à 1516. Imaginons (c'est de la pure fiction rétrospective !) que son génie lui ait permis de faire une découverte extraordinaire dont les conséquences auraient été qu'à partir de 1500 l'humanité ait mis en place une croissance continue comparable à celle qui est la norme et la « religion » d'aujourd'hui, c'est-à-dire 3 %. Cette croissance continue aurait fait en sorte que nous consommerions en l'an 2000 quatre millions de fois plus d'énergie et de matières premières qu'à l'époque de Léonard de Vinci. Autant dire que si cela avait été le cas, la terre aurait été épuisée et l'humanité aurait disparu au XVIII^e siècle !

Venons-en au numérique. Guillaume Pitron⁶⁷ (2021) écrit : « **10 % de l'électricité produite dans le monde est mobilisé aujourd'hui pour les technologies numériques ; son empreinte en eau, matériaux et énergie est trois fois celle d'un pays comme la France** ». D'après Françoise Berthoud (directrice de EcoInfo, CNRS)⁶⁸ « *Le secteur des nouvelles technologies représente à lui seul près de 4 % de nos émissions de gaz à effet de serre (dont 30 % sont dus aux data centers qui hébergent nos données), avec 5 à 7 % d'augmentation tous les ans* ». Du point de vue « croissance » et « exponentielle », c'est déjà plus que l'exemple cité plus haut ! Et l'empreinte environnementale du

66 Philippe Bihouix : *Le mensonge de la croissance verte ?* <https://www.youtube.com/watch?v=Bx9S8gvNKkA>

67 Pitron G. (2021) – *L'enfer numérique. Voyage au bout d'un like*. Éditions Les Liens qui Libèrent, 345 p.

68 Conférences de Françoise Berthoud (CNRS) : « *Virage numérique, gouffre écologique ?* » <https://www.youtube.com/watch?v=wBX9C2D9UQA> et « *Le numérique : menace ou espoir pour l'environnement ?* » - Françoise Berthoud – Ecoinfo <https://www.youtube.com/watch?v=b8yL-ikvszE>

numérique ne doit pas se mesurer à sa seule consommation d'énergie (carbonée ou non carbonée). Elle doit aussi prendre en considération toute la chaîne de fabrication, d'utilisation et de recyclage⁶⁹ des matériaux et des métaux rares.

En 2020, les **TIC (Technologies de l'Information et de la Communication)** utilisent 12,5 % de la production mondiale de cuivre, 15 % de celle du palladium, 23 % de celle de l'argent, 40 % de celle du tantale, 41 % de celle de l'antimoine, 42 % de celle du béryllium, 66 % de celle du ruthénium, 70 % de celle du gallium, 87 % de celle du germanium et 88 % de celle du terbium⁷⁰ (Pitron 2021)⁷¹.

Et, s'il y a une croissance qui double bien plus vite que les autres, c'est bien la croissance des fameux « TIC » : « *En 2025, les technologies numériques consommeront 20 % de la production mondiale d'électricité et contribueront à 7,5 % des émissions globales des gaz à effet de serre* » (Pitron, *ibid.*).

Les données et prévisions du *Statista Digital Economy Compass* (2019) concernant le volume de données numériques (en zettaoctets⁷²) créées dans le monde (dont une grande partie est stockée dans des *data centers*) sont éloquentes, [ce qui compte ici est la progression ; chacun peut essayer de construire l'exponentielle comme exercice] :

- 2010 : 2 Zo
- 2015 : 12 Zo
- 2018 : 33 Zo
- 2020 : 47 Zo
- 2025 : 175 Zo
- 2030 : 612 Zo
- 2035 : 2142 Zo

18) Le « piège » des énergies décarbonées et de la soit-disant « transition verte »

L'énergie carbonée (charbon, pétrole, etc.) est responsable d'émissions de CO₂ qui sont elles-mêmes responsables d'environ 57 % de l'effet de serre actuel ; elles sont donc pour une grande part responsables du dérèglement climatique. D'où une nécessité : diminuer le plus possible l'extraction et la combustion de ces sources d'énergie.

Mais on entend trop dans les discours officiels de nos dirigeants le credo suivant : remplaçons ces énergies carbonées par des énergies décarbonées et le problème du dérèglement climatique sera en grande partie résolu, ce qui totalement faux, car :

- 1) il y a les 43 % autres qui en sont aussi responsables (point 13) ;
- 2) l'inertie du système terre est lancé, avec ses rétroactions positives, comme nous l'avons mentionné (points 11 et 12) ;

69 Numérique et environnement : Comment évaluer l'empreinte de la fabrication d'un serveur, au-delà des émissions de gaz à effet de serre ? <https://boavizta.org/blog/empreinte-de-la-fabrication-d-un-serveur>

70 Voir plus loin ces métaux aux noms barbares.

71 Il faut savoir qu'un téléphone portable de confection actuelle renferme 54 des éléments du tableau périodique (Pitron 2021). Voir aussi : la conférence de Patrice Christmann : *Terres rares. Enjeux stratégiques pour le développement durable* : <https://www.youtube.com/watch?v=ALJBt9TzJZc>

72 Un zettaoctet = 10²¹ octets = 1000 milliards de milliards d'octets, est donc égal à un million de milliards de mégaoctets (un texte de 15 pages = 50 Ko (kilo-octets), une photographie numérique sur un appareil ou un téléphone = 5 à 8 Mo) (mégaoctets).

3) le fonctionnement avec des énergies « décarbonées » et « renouvelables » nécessite beaucoup de métaux non renouvelables et beaucoup d'énergie pour les extraire et les raffiner⁷³.

Décryptons donc ce que sont ces énergies décarbonées qui remplaceront potentiellement les précédentes. Elles sont de plusieurs types :

-l'*énergie nucléaire* d'un côté (basée sur la libération des forces contenues dans les liaisons des particules entre elles au sein du noyau des atomes),

-les *énergies éoliennes et photovoltaïques* de l'autre.

[car les énergies hydrauliques (barrages, conduites forcées) sont déjà utilisées quasiment au maximum de leurs potentialités].

Les énergies éoliennes et photovoltaïques sont sans cesse évoquées comme « *énergies vertes* » et révolutionnaires « *pour une transition énergétique écologique* ». D'abord un point d'histoire à ne pas oublier : l'énergie éolienne n'est pas révolutionnaire : les bateaux à voile et les moulins à vent en ont été les témoins historiques, pour un usage immédiat et décentralisé qu'il est bon de rappeler⁷⁴ ; quant au photovoltaïque, l'homme souhaiterait faire aussi bien que ce qu'opèrent les bactéries et les végétaux depuis des milliards d'années par le biais de la photosynthèse chlorophyllienne, mais les réactions mises en œuvre sont d'une telle complexité que, même si les scientifiques en ont compris les mécanismes et les processus⁷⁵, leur réplique technique n'est pas envisageable, ni pour aujourd'hui, ni pour demain matin.

S'il est vrai que les énergies « décarbonées » en elles-mêmes peuvent être considérées comme des ressources potentiellement *illimitées dans le temps*, à la différence des « énergies fossiles », car le soleil continuera à briller très longtemps après que l'espèce humaine aura disparu de la surface de la terre (5 milliards d'années !), il en va tout autrement si l'on considère les matériaux et l'énergie indispensables aux techniques de capture et de stockage de ces énergies, lesquels sont ponctionnés sur une planète aux réserves non renouvelables. L'humanité a bénéficié (et bénéficie encore), avec le pétrole, d'une énergie *très concentrée*, relativement « facile » (« *les énergies fossiles sont des énergies faciles* », nous explique Matthieu Auzanneau⁷⁶) à extraire et à raffiner, et surtout *très facile à stocker temporairement* pour les besoins à court terme de son utilisation, ce qui n'est pas le cas de l'électricité, quelque soit la façon dont elle est produite.

L'énergie éolienne transforme l'énergie mécanique du vent en électricité, de même que l'énergie photovoltaïque fournit de l'électricité à partir de la lumière. Mais qui dit production d'*électricité* dit *stockage* de celle-ci dans des *batteries*, et qui dit batterie dit *matériaux* adaptés à cette fonction de *stockage*⁷⁷. Le stockage d'énergie électrique est donc une des « pierres d'achoppement » des

73 Emmanuel Hache : *Les matériaux de la transition énergétique : remplacer un problème par un autre ?* Guillaume Pitron : *"Métaux rares, une contre-histoire de la transition énergétique"* Philippe Bihouix : *Le mensonge de la croissance verte ?* Philippe Bihouix : *Le monde vers une pénurie de métaux ?*
<https://www.youtube.com/watch?v=tr-NFiLU4Yk> ; <https://www.youtube.com/watch?v=LWjQ6kF6xi4><https://www.youtube.com/watch?v=Bx9S8gvNKkA> <https://www.youtube.com/watch?v=LsWc-9CrRkk>

74 Jean-Baptiste Fressoz : *Une histoire politique du CO2. Comment sommes nous entrés dans l'Anthropocène ?*
<https://www.youtube.com/watch?v=6Wjy-CvebQY>

75 <https://www.youtube.com/watch?v=6Wjy-CvebQY>

76 Matthieu Auzanneau : Histoire du pétrole et son impact global | UPA <https://www.youtube.com/watch?v=I9vDPdGSqCQ> Le pétrole, le sang de l'humanité ? https://www.youtube.com/watch?v=TObfFD_ac8Y

77 Par exemple, une batterie de voiture électrique est aujourd'hui composée d'environ 160 kg de matériaux extraits de mines aux quatre coins de la planète, puis traités, raffinés, etc. dont : graphite (52 kg), aluminium (35 kg), nickel (29 kg), cobalt (8 kg), lithium (6 kg).

« énergies vertes ». Il nécessite des batteries performantes, grosses consommatrices de métaux (lithium, cobalt, etc.) qu'il faut donc extraire et raffiner.

L'autre pierre d'achoppement de ce type d'énergie concerne les matériaux nécessaires pour sa « capture », puis son *transfert*. Sans compter le fait que les énergie décarbonées sont beaucoup plus dépendantes du numérique que les énergies carbonées. On se trouve donc devant le dilemme suivant : dans un monde où la croissance continue à être le moteur de l'économie, et afin de remplacer une énergie carbonée fossile (responsable du réchauffement climatique et de surcroît limitée) par des énergie décarbonée (potentiellement illimitées et en principe évitant l'aggravation du dérèglement climatique), les techniques modernes mises au point pour capter ce nouveau type d'énergie, les transférer et les stocker nécessitent l'*utilisation de nombreux nouveaux matériaux (métaux essentiellement) qui sont présents en quantité limitée dans le sous-sol et qu'il faut extraire au prix d'énergies décuplées et de risques de pollution élevés*. Quels sont ces nouveaux matériaux nécessaires aux énergies décarbonées ?

À l'exception du **silicium**, les matériaux nécessaires à la capture, au transfert et au stockage de ces nouvelles énergies sont pour la plupart des métaux peu abondants dans la croûte terrestre et difficiles à extraire, à traiter et à purifier. Et pour faire face à la demande, la quantité de métaux qu'il va falloir extraire du sous-sol durant les *trois prochaines décennies sera équivalente à celle que les humains ont extraite depuis l'aube de l'humanité jusqu'à aujourd'hui*⁷⁸. Ce XXI^e siècle sera donc le siècle de l'extractivisme. Et en particulier celui de l'extraction des métaux⁷⁹

Parlons tout d'abord de l'exception : le silicium⁸⁰, qui est très abondant (il constitue en effet 28 % de la croûte terrestre). Il est extrait de la silice (dioxyde de silicium : le quartz sous forme de sable siliceux pur). Le problème n'est pas sa rareté en tant qu'élément, mais le fait que : -d'une part les gisements de **silice relativement pure** s'épuisent, car il n'y a que certains sables siliceux particuliers qui répondent à ces exigences, -d'autre part l'extraction du *silicium-élément* à partir de l'*oxyde de silicium* (le quartz) fait intervenir des procédés coûteux en énergie (très hautes températures : selon les procédés et les étapes : 950°C, 1700°C, 3000°C) et en eau. La principale raison en est que le degré de pureté du silicium doit être extrêmement élevé pour son usage dans le photovoltaïque et dans l'électronique : respectivement 99,999 9 % et 99,999 999 99 % !

Mais revenons aux métaux : d'une part, la demande de métaux utilisés déjà anciennement suit actuellement une progression exponentielle (3 % pour le cuivre à titre d'exemple)⁸¹, d'autre part l'éventail des métaux non utilisés auparavant mais indispensables aujourd'hui (principalement pour les besoins des **TIC**) s'est démultiplié par rapport à ce qu'il était il y a un siècle, avec une demande exponentielle encore plus forte que pour les autres (27 % en Chine pour les terres rares en 2020⁸²). Et dernier point, le recyclage n'est que partiel et effectué de façon très disparate selon les métaux

78 Pitron G. (2018) – *La guerre des métaux rares. La face cachée de la transition énergétique et numérique*, Éditions Les Liens qui Libèrent, 296 p.

79 <https://www.youtube.com/watch?v=7bh3Z78e68Q> ; https://www.youtube.com/watch?v=FkiMqLD3_YQ

80 Qui n'est pas un métal : les chimistes le classent dans les *métalloïdes*, un groupe d'éléments intermédiaire entre les métaux (par exemple le calcium, le sodium ou le fer) et les non-métaux (par exemple le carbone, le phosphore ou le soufre).

81 Pour rappel : doublement de la production tous les 23 ans si cela restait à 3 %, mais le taux de croissance lui-même va être exponentielle.

82 Ce qui donne un doublement tous les 3 ans.

(pour diverses raisons⁸³). De plus, étant donné la croissance exponentielle de la demande, même un recyclage complet resterait très insuffisant pour satisfaire la demande⁸⁴.

D'abord, comme le montrent les chiffres suivants, il y a une très grande disparité de demande, de production (et donc de prix !) d'un métal à un autre (qui est bien sûr aussi en lien avec la disparité des teneurs, nous le verrons plus bas). Exemples de quantités de métal « produites » (c'est-à-dire que l'on a extrait de la roche sous forme de minerai, puis séparé mécaniquement, puis purifié chimiquement -opérations coûteuses en énergie... et souvent polluantes-) :

- fer : 1,6 milliards de tonnes en 2017
- cuivre : 21 millions de tonnes en 2018
- titane : 190 000 tonnes en 2018
- tantale : 1800 tonnes en 2018
- palladium : 210 tonnes en 2018
- rhodium : 23 tonnes en 2017
- iridium : 3 tonnes

Ensuite, si l'on veut comprendre la question des ressources métalliques et de leur probable pénurie à plus ou moins long terme, il convient de préciser plusieurs points :

- 1) la teneur des éléments dans la croûte terrestre ;
- 2) la notion de gisement métallifère ;
- 3) la notion de ressources et de réserves.

Premier point : les teneurs. Les éléments métalliques et non métalliques qui constituent la croûte terrestre⁸⁵ y sont présents en « abondance » extrêmement variable : quelques chiffres (liste non exhaustive, estimations⁸⁶) donnent des *ordres de grandeur de leur concentration* (en pourcentages) des plus abondants aux plus rares :

-plus de 10 %

- oxygène : 46 %
- silicium : 28 %

-plus de 1 %

- aluminium : 8 %
- fer : 5 %
- calcium : 4 %

-au moins 0,1 %

- phosphore : 0,1 %

-au moins 0,01 %

- carbone : 0,05 %

83 Comme le souligne Philippe Bihoux et pour le dire simplement : il était plus facile et moins coûteux de récupérer et de recycler le fer et cuivre d'une 2CV qu'il ne l'est aujourd'hui de séparer et recycler les 50 métaux contenus dans un « smartphone ». En 2017, il s'en est vendu 171 000 par heure (Françoise Berthoud) ; chaque téléphone contient une dizaine de terres rares différentes. Seul 1 % des terres rares est recyclé à l'heure actuelle.

Romain *et al.* (2017) – Critiques mais non recyclées : expliquer les limites au recyclage des terres rares en Europe. *Flux*, 108 (2), pp. 51-63. <https://www.cairn.info/revue-flux-2017-2-page-51.htm>
https://www.lemonde.fr/planete/article/2011/10/17/le-recyclage-des-terres-rares-un-enjeu-strategique_5982025_3244.html

84 « *Le numérique : menace ou espoir pour l'environnement ?* » - Françoise Berthoud – Ecoinfo <https://www.youtube.com/watch?v=b8yL-ikvszE>

85 La croûte continentale mesure en moyenne 30 d'épaisseur. La mine d'or la plus profonde d'Afrique du Sud (Tau Tona) approche des 4 km et la mine à ciel ouvert la plus profonde, aux États-Unis (Bingham Canyon, Utah), avoisine le kilomètre.

86 https://fr.wikipedia.org/wiki/Abondance_des_%C3%A9l%C3%A9ments_dans_la_cro%C3%BBte_terrestre

-au moins 0,001 %

- cuivre : 0,005 %
- néodyme : 0,004 %
- cobalt : 0,002 %
- lithium : 0,002 %
- niobium : 0,002 %
- praséodyme : 0,001 %
- plomb : 0,001 %

-au moins 0,0001 %

- erbium : 0,0004 %
- ytterbium : 0,0003 %
- étain : 0,0002 %
- tantale : 0,0002 %
- germanium : 0,0002 %
- terbium : 0,0001 %

-au moins 0,00001 %

- thallium : 0,00006 %

-au moins 0,000001 %

- argent : 0,000007 %
- mercure : 0,000005 %

-au moins 0,0000001 %

- platine : 0,0000003 %
- or : 0,0000001 %
- ruthénium : 0,0000001 %

-au moins 0,00000001 %

- palladium : 0,00000006 %
- iridium : 0,00000003 %
- rhodium : 0,00000002 %
- osmium : 0,00000001 %

Vous aurez remarqué que la croûte terrestre est constituée pour près de la moitié (en poids) d'oxygène (sous forme d'oxydes) alors que l'oxygène ne constitue que 21 % de l'air que nous respirons et qu'il y a 4,6 milliards de fois moins du métal *osmium* (le dernier de la liste) que d'oxygène (le premier de la liste). Et si vous faites des rapports de la concentration des différents métaux entre eux, vous remarquerez, par exemple -que le cuivre est 1600 fois plus rare que l'aluminium, -que l'argent est 700 000 fois plus rare que le fer et que l'or est 80 millions de fois plus rare que l'aluminium (d'où l'adage bien connu : « ce qui est rare est cher »). Dans la partie inférieure de la liste (tous n'ont pas été mentionnés ici), et parmi les métaux « rares », l'humanité, pendant très longtemps, n'a connu (et utilisé) que l'**or**, l'**argent** et le **mercure**, puis le **platine**. Par contre, au XXI^e siècle, près d'une vingtaine de ces éléments aux noms barbares sont utilisés dans les « nouvelles technologies ».

Deuxième point : les gisements. Les teneurs sont des moyennes. Par chance pour les humains, de nombreux processus géologiques font qu'il existe dans la croûte terrestre des *anomalies localisées* où les métaux se sont concentrés à des teneurs bien plus élevées que les moyennes mentionnées plus haut : ce sont les **gisements métallifères**, renfermant des **minerais** pris dans une gangue. Ces gisements sont de types très différents selon les contextes géologiques : il peut y en avoir de grands (en volume) avec des teneurs peu élevées, des petits avec des teneurs très élevées, et bien sûr tous les cas intermédiaires. Ces concentrations métallifères peuvent être superficielles ou très profondément enfouies. Il y a des concentrations particulières de différents métaux dans différents contextes et selon certaines affinités connues, car les éléments chimiques du tableau de Mendeleïev

sont dans le sous-sol un peu à l'image des humains (ou bien est-ce l'inverse ?) : *qui se ressemble s'assemble* (pour les métaux entre eux) et *qui se complète s'assemble* (entre métaux et non métaux et entre métaux et métalloïdes), ce qui fait qu'en sachant lire correctement ce fameux tableau, on peut savoir **quoi trouver avec quoi** (et **où** si on est géologue). Le gisement renferme donc des minerais et le minerai contient le métal, mais là encore, il y a une grande disparité de concentration :

- une tonne de minerai de fer donne 400 kg de fer,
- une tonne de minerai de cuivre en fournit 8 à 15 kg,
- une tonne de minerai d'or en fournit 1 à 5 g.

Il peut y avoir le minerai (ou plusieurs) d'un métal abondant et plusieurs « sous-minerais » de métaux rares dans le même gisement.

Précisons ici que **sept métaux** étaient déjà connus (et exploités) dans l'antiquité (et même bien avant pour certains), et associés par les Babyloniens (puis les grecs et les romains) aux sept astres mobiles du ciel visibles à l'œil nu : le soleil, la lune et les planètes ; l'**or** (6000 av. J.-C.) est associé avec le soleil, l'**argent** (4000 av. J.-C.) avec la lune, le **mercure** (750 av. J.-C.) avec mercure, le **cuivre** (4200 av. J.-C.) avec vénus, le **fer** (15 00 av. J.-C.) avec mars, l'**étain** (1750 av. J.-C.) avec jupiter et le **plomb** (3500 av. J.-C.) avec saturne. Les gisements les plus faciles à extraire (superficiels, petits mais à concentration élevée) ont déjà été épuisés dès l'antiquité. Par exemple tout porte à croire que les nombreux filons de cuivre du massif des Grandes-Rousses⁸⁷ (Isère et Savoie), parmi les plus importants du quart sud-est de la France, étaient déjà épuisés avant 1500 av. J.-C.

Depuis les périodes protohistoriques jusqu'à l'époque moderne (et en extrapolant pour les prochaines décennies), on passe donc de l'exploitation de gisements riches et superficiels (même s'ils sont petits), à coût énergétique d'extraction peu élevé (et pour lesquels la question de la pollution ne se posait pas !) à l'exploitation de gisements à faible teneur, si possible importants en volume, parfois difficiles d'accès (profondeur), et pour lesquels la question de la pollution devrait (en principe) être prise en compte, tout ceci induisant un coût énergétique élevé, et, il ne faut pas l'oublier, avec une demande exponentielle.

À titre d'exemple, pour le cuivre, on exploitait durant la protohistoire des gisements qui titraient à 20 % ou 30 %, en 1800 des gisements qui titraient à 8 %, puis à 6 % en 1880, à 2 % en 1930, à 1 % en 1975, enfin à 0,1 % en 2000 (ce qui ne veut pas dire que des gisements actuellement exploités n'ont pas encore pour certains des teneurs plus élevés, par exemple en République Démocratique du Congo). Le cuivre (avec le cobalt) est un des métaux « clé » pour les prochaines décennies du fait, entre autres, de sa très forte demande pour les véhicules électriques : la quantité de cuivre dans une voiture à moteur thermique varie de 20 à 30 kg ; c'est 80 kg pour une voiture électrique de petite taille et **170 kg dans une SUV électrique**⁸⁸ : dans les trente prochaines années nous allons consommer en cumul **90 % des réserves mondiales de cuivre** identifiées à ce jour⁸⁹ (ainsi que 83 % des réserves mondiales en cobalt, ceci en grande partie pour les batteries des véhicules électriques⁹⁰).

87 Moulin B., Thirault E., Vital J. (2012) – *Quatre années de prospection sur les extractions de cuivre de l'âge du Bronze ancien dans le massif des Rousses en Oisans (Isère et Savoie, France)*. <https://www.academia.edu/7865415/>

88 <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/cuivre-transition-energetique-metal-essentiel-structurel-et-geopolitique>

89 Emmanuel Hache : Métaux rares : un risque de pénurie ? <https://www.youtube.com/watch?v=anE1PUNX4yU>

90 <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/cobalt-transition-energetique-quels-risques-dapprovisionnement>

Troisième point : ressources et réserves. Il y a fréquemment confusion entre ces deux termes, ce qui peut créer des malentendus. La **ressource** désigne « *la quantité totale d'un minerai existant dans une zone donnée, sans considération des possibilités d'exploitation présentes ou futures* » alors que les **réserves** sont « *des ressources ayant la particularité d'être techniquement et économiquement récupérables. Les estimations de la quantité de minerai disponible dans une réserve sont subjectives et temporelles par nature* »⁹¹. Ce qui fait qu'en fonction de l'évolution des techniques, des « besoins » et de l'offre financière du marché, une ressource qui n'était pas comptabilisée dans les réserves peut le devenir.

Actuellement, **17 % de l'énergie mondiale sert uniquement à l'extraction des métaux** (sans parler ni du **traitement** ni du **raffinage**). Nous avons déjà évoqué la demande exponentielle actuelle en métaux. Avec les véhicules électriques, les éoliennes, le photovoltaïque et le numérique cumulés (sans oublier l'usage militaire !), cette exponentielle va « décoller ». En 2060 nous allons consommer 5 fois plus de cobalt qu'en 2011, mais aussi 9 fois plus de tungstène, 35 fois plus de vanadium et 180 fois plus de lithium⁹². il resterait ici à quantifier ce que cela demandera en énergie (qui sera en partie de l'énergie carbonée !) et en eau, dans une période à venir où la gestion du stress hydrique sera un défi inédit pour les populations de nombreuses parties du globe.

19) La question sous-jacente des terres rares

La question des « **terres rares** » a été abordées à plusieurs reprises sans que ces dernières aient été explicitées de façon claire et précise. Cela nécessite d'y revenir un peu plus longuement, car ces terres rares sont omniprésentes dans notre quotidien tout en étant invisibles et de ce fait peu connues. Les **terres rares** ne sont en fait ni des « terres », ni forcément toutes rares (bien que ce soit le cas pour certaines). C'est un groupe de 17 métaux aux noms imprononçables (mais peut-être fort utiles à connaître sur le bout des doigts pour les joueurs de scrabble⁹³) constitutifs (en très petites teneurs) de la croûte de notre planète, aux propriétés voisines entre elles, généralement associés dans les mêmes minerais et de ce fait très difficiles à séparer⁹⁴ (ce qui complique beaucoup les techniques de raffinage afin de les isoler). Ces métaux jouent un rôle clé dans l'électronique en général et dans tous les secteurs des « technologies de pointe » : « TIC », éoliennes, domaine militaire, etc.). Ils sont, sauf exception (ceux entrant dans les aimants permanent des éoliennes⁹⁵), utilisés en très faibles quantités dans des alliages, ce qui fait qu'ils sont souvent surnommés les « *vitamines de l'ère moderne* ».

Il y en a par exemple une dizaine d'entre eux dans un « smartphone », parmi les 54 éléments qui le constituent.

-l'écran (écran tactile + couleurs) : *indium, yttrium, lanthane, terbium, praséodyme, europium, dysprosium, gadolinium* ;

91 https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressource_min%C3%A9rale ;

<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/epuisement-metaux-mineraux-201706-fiche-technique.pdf>

92 Guillaume Pitron : *L'enfumage de la transition écologique ?* <https://www.youtube.com/watch?v=2IHThINmNVk>

93 Et qui sont, pour 15 d'entre elles (les *lanthanides*, bien alignés horizontalement dans le bas du tableau périodique des éléments) : **lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, prométhium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, et lutécium**, auxquels s'ajoutent l'**yttrium** et le **scandium**.

<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/terres-rares-et-metaux-strategiques>

94 Christmann conférence

95 Les aimants permanents sont l'application principale des terres rares au niveau mondial. Ils représentent 89 % des applications pour le néodyme et 98,5 % pour le dysprosium.

-les composants électroniques du même téléphone (circuits intégrés, vibreur, son, etc.) : *dysprosium, praséodyme, terbium, néodyme, gadolinium* ;

Les lampes « basse consommation », qui ont remplacé les ampoules à incandescence, contiennent des « poudres luminophores » : ce sont pour la plupart (en plus du mercure) des terres rares : *cérium, europium, terbium, yttrium*.

Les aimants permanents sont les plus gros consommateurs de certaines terres rares : selon le type d'aimant, il renferment : du *néodyme* (90 % de la production totale de ce métal), du *dysprosium* (98,5 % de la production totale), du *praséodyme*, du *samarium* dans leurs alliages (en plus du fer, de l'aluminium, du cobalt, du nickel et du bore). Et les éoliennes en mer sont les plus grosses consommatrices en aimants permanents utilisant des terres rares (jusqu'à 600 kg de *néodyme* et quelques dizaines de kg de *dysprosium* par turbine). Ce qui rend l'énergie éolienne très dépendante des terres rares. La plupart des moteurs des voitures électriques renferment des aimants aux terres rares. La Chine extrait actuellement 99 % du *dysprosium* et du *terbium* utilisés dans le monde, ce qui n'est pas sans risque de pénuries d'ordre « stratégique ».

20) Des questions sociétales

Bien que ce texte n'ait pas voulu jusque-là entrer dans le vif des questions sociétales qui sont souvent sous-jacentes à chaque point de la présentation des données, il y a tout de même quelques points qu'il convient d'aborder ici avant de conclure.

L'effet rebond :

L'effet rebond ou « *paradoxe de Jevons* » est un mécanisme, entre autre comportemental (individuel et collectif), baptisé d'après le nom de *William Stanley Jevons*, qui met en évidence, en 1865, le fait que l'introduction de la machine à vapeur de *James Watt*, au rendement plus efficace que la précédente, a induit une augmentation de la consommation de charbon au lieu de la faire diminuer du fait que les gains énergétiques, et donc financiers, de cette nouvelle machine à vapeur ont eu comme effet de généraliser son utilisation et donc d'accroître la consommation totale de charbon en Angleterre. Les exemples de l'effet rebond sont nombreux dans notre quotidien moderne (déplacements, numérique, etc.). Prenons seulement un exemple : l'amélioration des performances énergétiques des voitures ne réduit pas la demande en carburant. Les automobilistes font plus de kilomètres ; l'impact sur les émissions de CO₂ de l'automobile ne diminue donc pas. Ce phénomène s'applique à tous les domaines, mais c'est surtout dans le domaine du numérique qu'il est le plus flagrant. De plus, l'effet rebond est un mécanisme dont usent et abusent les concepteurs et vendeurs de tout poil et prend une proportion hallucinante dans notre quotidien numérique, faisant entrer le consommateur lambda dans une exponentielle énergétique souvent à son insu : par exemple, une image numérique de 150 ko est bien suffisamment « pixelisée » pour être regardée sur un écran d'ordinateur, *a fortiori* sur un écran de téléphone portable, mais... le téléphone portable produit une image de 5 à 8 Mo (la personne qui a pris la photo ne sait d'ailleurs souvent même pas le poids numérique de cette dernière), qui va être envoyée : le résultat est que 97 % du poids numérique de l'image aurait pu être économisé pour le même résultat final (cela, bien-sûr, multiplié des millions de fois chaque heure sur la planète), obligeant des réseaux toujours plus performants, plus coûteux en matière première et plus énergivores. Les journaux numériques en ligne proposent chaque fois une image (souvent parfaitement inutile) en plus du texte, et maintenant, quasi systématiquement

une petite vidéo (souvent parfaitement inutile aussi) se met en route sans notre avis : de l'énergie (et du temps) gaspillée. Cela n'étant que l'arbre qui cache la forêt !⁹⁶

Des questions de vocabulaire et un flou « artistique » entretenu :

Chacun aura remarqué l'évolution du vocabulaire véhiculé cette dernière décennie concernant l'énergie et la « transition »⁹⁷: *renouvelable, décarboné, bas-carbone, propre, vert, durable, soutenable, écologique, écosystèmes, biodiversité, etc.*, **mais** toujours associé avec : *croissance, start-up, « innovations de rupture », investissements, numérique, etc.*

Quelle transition nous prépare-t-on ? La transition écologique promise dérive très vite vers une transition énergétique et surtout « tout-numérique », pas si écologique que l'on veut bien nous le faire croire⁹⁸, car toujours basée sur la croissance et l'exponentielle. Dans les discours, le « décarboné » est automatiquement « vert », « propre », sans se poser la question de savoir : 1) si l'énergie décarbonée ici ne provient pas d'une énergie carbonée ailleurs (comment a été produite l'énergie qui a permis la construction de ce véhicule électrique, de sa batterie ? et comment est produite l'électricité qui le fait rouler ? etc.), 2) si le « décarboné propre en CO₂ » n'est pas, de manière cachée, très sale (pollution, exploitation des enfants, etc.) en terres rares extraites et raffinées en Chine et en cobalt extrait au Gabon, 3) quelle est le bilan total en carbone de la chaîne de ce véhicule électrique : depuis l'extraction des métaux jusqu'à son recyclage.

Des liens trop étroits entre « énergies renouvelables » et « numérique » pour que ce soit « honnêtes » !

Du point de vue technique et sociétal, il serait certainement possible de concevoir une production d'énergie renouvelable qui ne soit pas si directement et intimement intriquée au numérique que celle que nos « élites » nous « proposent » (sans que nous ayons une grande latitude de choix), car dans ce qui nous est proposé, c'est une transition pieds et poings liés avec le numérique hypercentralisé à la manière « Linky ».

Recyclage et « mine urbaine » :

Le recyclage pose différentes questions. Prenons ici en considération uniquement les métaux nécessaires pour les énergies dites renouvelables et les « nouvelles technologies ». Car, comme nous l'avons mentionné, les énergies dites renouvelables, fortement intriquées avec le numérique, nécessitent l'extraction (énergivore) et le raffinage (énergivore) de matières premières minérales (cuivre, cobalt, nickel, lithium, terres rares, platine, or, argent) qui sont peu abondantes dans la croûte terrestre et qui ne sont pas renouvelables.

96 Pitron G. (2021) – *L'enfer du numérique. Voyage au bout d'un like*, Éditions Les Liens qui Libèrent, 345 p.

97 Voir le discours d'Emmanuel Macron à l'Élysée, 12 octobre 2021 : France 2030. <https://www.youtube.com/watch?v=v9mQlu-EQ-I>

98 Discours d'Emmanuel Macron à l'Élysée, extrait : « *Pour réussir cette nouvelle révolution de l'alimentation saine, durable et traçable, qui sont les trois objectifs que nous devons nous donner pour 2030, [] nous devons investir dans trois révolutions qui vont en quelque sorte être la suite de la révolution mécanique et de la révolution chimique qu'on a connue : le numérique, la robotique, la génétique* ».

Tout d'abord, il y a la nuance entre « recyclable » et « recyclé »⁹⁹ : tout ce qui est recyclable n'est pas recyclé ! Ensuite il y a la question du coût énergétique du recyclage, du lieu (tiers-monde ?) où il est effectué. Enfin, il y a la question de la complexité technique des méthodes. Comme nous l'avons déjà mentionné, il était beaucoup plus facile de recycler le fer et le cuivre d'une 2CV qu'il ne l'est maintenant de recycler les 50 métaux contenus dans un « smartphone » et en moyenne seul **1 % des terres rares** est recyclé à l'heure actuelle. Pourtant, les déchets électroniques de nos sociétés sont parfois, voire souvent, plus riches en métaux rares que les gisements exploités : Alain Geldron nous explique¹⁰⁰, avec exemples à l'appui, que certains métaux précieux et « stratégiques » (or, platinoïdes, terres rares, indium, tantale, cobalt, lithium) sont présents dans les déchets électroniques en teneurs plus importantes que dans les minerais de ces mêmes métaux :

-comparaison de teneurs moyennes dans les minerais (1^{er} chiffre) et teneur moyenne en métal dans les déchets (2^{ème} chiffre) :

-or :	1 à 10 g/t	1 à > 200 g/t
-platinoïdes :	1 à 8 g/t	100 à 260 g/t
-indium :	1 à 100 g/t	175 g/t
-tantale :	250 g/t	3000 g/t

L'empreinte carbone :

Après avoir évoqué la question des « énergies non carbonées », revenons brièvement sur la question des émissions de gaz à effet de serre, sur celle de l'empreinte carbone liée en partie à l'utilisation des énergies carbonées, et sur la notion de croissance.

L'empreinte carbone individuelle correspond à l'équivalent en **CO₂** de la somme des émissions de gaz à effet de serre additionnels que chaque individu émet en une année [gaz qui contribuent donc au dérèglement climatique (réchauffement, accentuation des événements extrêmes et leurs conséquences, etc.)]. Elle est mesurée en **poinds de carbone** que nous transformons à partir de carbone « inerte » (hydrocarbures : charbon, pétrole, gaz ; hydrates de carbone : aliments, etc.) en carbone gazeux [dioxyde de carbone **CO₂**, méthane **CH₄** (dont celui émis par les bovins), etc.], ces derniers étant actifs sur l'effet de serre.

Dans cette empreinte carbone, il convient d'ajouter à notre *empreinte carbone « personnelle »*, sur laquelle nous avons des leviers d'action [nourriture, déplacements, chauffage, biens de consommation qui vont des vêtements à l'électronique], l'*empreinte carbone collective*, induite par des services auxquels chacun de nous « bénéficie » (santé, administration, éducation, voirie, etc.,... sans oublier l'armée) par l'intermédiaire de l'état, de la région, des départements et des communes, empreinte qui est en quelque sorte mutualisée entre chaque individu d'une nation, mais sur laquelle nous n'avons aucun pouvoir d'action direct à titre individuel (si ce n'est peut-être à moyen terme, en votant, à chacun des échelons, pour le candidat d'un parti politique susceptible de prendre des mesures sociétales qui vont dans le sens que nous souhaitons). Cette dernière part (l'empreinte carbone « collective ») est de 1,5 t/an en France.

99 Voir les conférences de Philippe Bihouix, déjà citées.

100 Voir : Gedron A. (016) – Métaux stratégiques : la mine urbaine française. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 2, pp. 67-76. <https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement-2016-2-page-67.htm>

L'**empreinte carbone moyenne** d'un français est d'environ **9,5 tonnes/an** : « *Alors que l'empreinte carbone d'un Français était de l'ordre de 9 tonnes en moyenne en 2019, selon le ministère de la transition écologique, il faudrait ramener ces émissions à moins de 2 tonnes d'équivalent CO₂ par personne pour s'inscrire dans « un style de vie soutenable (...) à l'équilibre avec la capacité naturelle de notre pays à absorber nos émissions », estime l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) »¹⁰¹. L'objectif fixé pour un réchauffement de la planète limité à 1,5° est la **neutralité carbone** en 2050. « *En signant l'Accord de Paris, les pays se sont engagés à limiter l'augmentation de la température moyenne à 2°C, et si possible 1,5°C. Pour cela, ils se sont engagés, conformément aux recommandations du GIEC, à atteindre la neutralité carbone au cours de la deuxième moitié du 21ème siècle au niveau mondial. Les pays développés sont appelés à atteindre la neutralité le plus rapidement possible. La France s'était engagée, avec la première Stratégie Nationale Bas-Carbone adoptée en 2015, de (sic) **diviser par 4 ses émissions GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990.** »¹⁰²**

Mais qu'entend-on par « neutralité carbone » ? « *La **neutralité carbone** est définie par la loi énergie-climat comme « un équilibre, sur le territoire national, entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre ». En France, atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 implique une **division par 6 des émissions de gaz à effet de serre** sur son territoire par rapport à 1990. »¹⁰³*

« L'empreinte carbone est ainsi constituée :

-des émissions directes de GES des ménages (principalement liées à la combustion des carburants des véhicules particuliers et la combustion d'énergies fossiles pour le chauffage des logements) ;

-des émissions de GES issues de la production intérieure de biens et de services destinée à la demande intérieure (c'est-à-dire hors exportations) ;

-des émissions de GES associées aux biens et services importés, pour les consommations intermédiaires des entreprises ou pour usage final des ménages ».¹⁰⁴

L'empreinte carbone individuelle est par contre très inégalement répartie selon les revenus : alors que les 50 % les moins riches de la population (en dessous du revenu médian) émettent **5 t/an**, les 10 % les plus riches émettent **25 t/an** et les 40 % restants (au-dessus du revenu médian) émettent 9 t/an¹⁰⁵.

Dans la société française actuelle, nous nous trouvons donc face au dilemme suivant : le **PIB augmente de 3% par an** (postulat de fonctionnement de la société libérale préconisée par nos élites), alors que les émissions de CO₂ doivent baisser de 7 à 8% par an (respect de +1,5°C de l'Accord de Paris). Le rapport de **Carbone 4** (« *Découplage et croissance verte* »), dont quelques

101 https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2022/08/04/alimentation-transport-chauffage-evaluez-si-vos-emissions-de-co2-sont-vraiment-soutenables_6137122_4355770 ; <https://datagir.ademe.fr/blog/budget-empreinte-carbone-c-est-quoi/> (test que tout un chacun peut faire à titre indicatif, afin de prendre conscience de son empreinte personnelle)

102 <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

103 *Ibid.*

104 https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2021_Indicateurs%20de%20r%C3%A9sultats_SNBC-vF.pdf#page=4 (Stratégie nationale bas-carbone)

105 Il est parfois difficile, dans les études sur le sujet, de savoir si l'empreinte collective (les 1,5 t/an) a été incluse ou non dans les chiffres mentionnés.

extraits (soulignés par nous) sont cités ci-après, résume bien la situation : « *Les scénarios bas-carbone actuels associent donc un **PIB croissant de manière exogène** et une **contrainte carbone respectée par ailleurs**. Cette posture pose donc la question de la possibilité d'un découplage absolu et rapide entre le PIB et les émissions de CO₂. [] L'hypothèse de prolongement des tendances historiques en matière de croissance économique mais également de constance de cette croissance est un pari extrêmement fort. En effet, nous nous approchons des limites planétaires, susceptibles précisément d'empêcher la poursuite de la croissance et de contribuer à une forte "imprévisibilité" de l'avenir économique. Les perturbations seront en particulier liées aux multiples impacts physiques d'un réchauffement, même limité à +1,5°C ou 2°C []*.

C'est []le caractère exogène du PIB qui s'avère problématique. [] Tout d'abord, cette hausse du PIB ne tient pas compte des stocks et des rythmes de renouvellement des ressources naturelles (minerais, biomasse, ressources halieutiques, etc.) La croissance économique est donc décorrélée du monde physique. Or, les sous-jacents nécessaires à cette hausse du PIB sont matériels. Dans les modèles utilisés pour les scénarisations évoquées ici, c'est la hausse du PIB mondial – exogène – qui se traduit en une augmentation de la consommation d'énergie (endogène), d'objets produits (par exemple des tonnes de métal, des m² résidentiels et tertiaires) et de flux de transports (par exemple des passagers-kilomètres).

Ce parti-pris conduit en pratique à une simplification de taille, à savoir qu'une croissance matérielle infinie est concevable dans un monde fini. Dans les faits, il n'est pas imaginable que les gains d'efficacité-matière puissent être soutenus indéfiniment : ils atteignent nécessairement un plafond. Autrement dit, pour fabriquer une voiture il faut une épaisseur minimale d'acier ; donc, passés les premiers gains, il faudra toujours plus d'acier pour fabriquer toujours plus de voitures. »

Et en conclusion : [] Les scénarios énergie-climat publics proposent la vision d'un découplage PIB-CO₂ aisé et rapide, "sans douleur". Cette vision n'est pas exempte de raccourcis et d'hypothèses fortes, qui sont parfois inévitables dans ce type de modélisation, et dont il faut avoir conscience [].

Au-delà de la place du PIB dans notre économie, se pose surtout la question suivante : "à quoi voulons-nous donner de la valeur ?" Est-il opportun de penser le découplage à partir d'un indicateur qui n'est pas, en l'état, un indicateur de prospérité ? L'ambition du découplage est également l'occasion d'envisager un indicateur (ou plusieurs) de bonne santé de nos sociétés et de nos écosystèmes plus robuste que le PIB pour orienter nos choix. Cela contribuerait à relever le défi du siècle : inventer des systèmes socio-économiques permettant de vivre une vie épanouissante à l'intérieur des limites planétaires. »¹⁰⁶.

21) En guise de bilan final

Ce bilan de début du XXI^e siècle n'est pas des plus optimistes. Concernant notre consommation d'énergie carbonée, nous sommes sortis progressivement, puis de façon exponentielle, il y a maintenant un siècle et demi, avec l'ère du charbon puis du pétrole (si l'on fait abstraction des déboisements, pillages dans les colonies, etc.), d'un fonctionnement équilibré des échanges entre atmosphère et biosphère (bactéries, champignons, végétaux et animaux) basé sur la fabrication de sucre par les plantes à partir de la photosynthèse (énergie solaire), ces sucres, complexifiés par les processus biochimiques, servant de base au métabolisme du vivant. Il en résultait des échanges à bilan neutre entre gaz carbonique (CO₂) et oxygène (O₂) de l'atmosphère, produits et consommés avec l'intervention de l'eau. Ce cycle court venait se superposer à un cycle géologique très long à

106 <https://www.carbone4.com/publication-decouplage>

l'échelle humaine (le demi-milliard d'années), qui avait permis dans un passé lointain de stocker l'immense majorité du carbone de l'atmosphère (présent sous forme de CO₂ et responsable d'un effet de serre puissant) en calcaire inerte. Les bactéries primitives avaient fabriqué de l'oxygène (O₂) et l'ozone (O₃) de l'atmosphère terrestre, permettant le développement de la vie animale sur terre ferme.

La croissance matérielle du mode de vie humain (surtout dans les pays riches et dans une partie privilégiée de la population), basée en grande partie sur une énergie bon marché stockée dans l'or noir depuis des centaines de millions d'années, a induit une explosion exponentielle de consommation, de « besoins », de déplacements inconsidérés des marchandises et des personnes, donc d'extraction de matière première minérale, de ponction sur le vivant, de déchets, etc., **dont le dérèglement climatique et ses conséquences néfastes ne sont que la partie la plus visible de l'iceberg** (mais pas la seule, loin de là).

Les politiques des états, pour ne pas remettre en cause le modèle économique de croissance, est de vouloir supplanter « coûte que coûte »¹⁰⁷ une économie basée sur les énergies carbonées fossiles par une économie basée sur des énergies décarbonées. Ce basculement est qualifié de « **transition énergétique verte** » ou de « **transition écologique** » sur la base d'énergies soit-disant « **propres** ». Ce nouveau modèle, indissociable pour ceux qui le mettent en place d'une « **transition numérique** » (n'entrons pas dans le sujet du contrôle par le numérique¹⁰⁸), aura pour conséquence une **frénésie extractive de nouveaux métaux rares** au prix d'un besoin en eau disproportionné, d'un coût énergétique et d'une poursuite de la destruction des écosystèmes (voir les projets d'extractions sous-marines¹⁰⁹) dans un monde dans lequel : 1) les courbes exponentielles vont continuer à se redresser et 2) les fragilités induites par le dérèglement climatique vont s'accroître. Il va falloir de plus en plus d'énergie pour extraire des métaux à partir de gisements à teneurs de plus en plus faibles, métaux qui entreront dans des appareils censés nous économiser de l'énergie carbonée pour limiter l'effet de serre : c'est le paradoxe de l'Ouroboros, mais pas dans sa version la plus réjouissante !

Après la lecture de l'ouvrage de Fred Vargas¹¹⁰, on pourrait certainement voir le problème sous un angle nouveau. Cette auteure, en bonne archéologue (son premier métier avant celui d'écrivaine de polars) qui déchiffre et chiffre le passé, se fait futurologue et chiffre l'avenir proche (2050). Elle nous propose une extrapolation de la deuxième moitié du siècle avec un mode de vie où l'énergie du pétrole sera en très fort déclin et où la production d'énergie électrique ne suffira pas à remplacer celle procurée auparavant par les énergies fossiles, car le pic des métaux rares suivra de peu (quelques décennies) le pic pétrolier, avant que les miraculeuses « technologies du futur » dont certains rêvent¹¹¹ ne soient au point.

107 « *Coûte que coûte* » n'est pas à considérer ici en espèces sonnantes et trébuchantes (bien que généralement ponctionnées dans les impôts du contribuable lorsqu'il s'agit par exemple des budgets attribués lors des confinements pour « soutenir » l'économie... donc la croissance), mais en coût écologique (pertes d'écosystèmes, raréfaction, voire disparition d'espèces, etc.) : « *parmi les « mesures d'urgence temporaire » (cf. la crise du gaz russe, renchérissement des coûts des matériaux) le projet de texte (mesures Borne) propose d'alléger les exigences environnementales imposées jusqu'à présent aux petits projets solaires et éoliens* ».

108 <https://www.nbr.org/publication/chinas-digital-ambitions-a-global-strategy-to-supplant-the-liberal-order/> voir la version française

109 <https://reporterre.net/La-ruée-miniére-sur-les-oceans-s-amorce-au-prix-probable-de-l-environnement>

110 <https://www.vargas.fr/> Vargas F. (2022) - *Quelle chaleur allons-nous connaître ? Quelles solutions pour nous nourrir ?*

111 <https://www.arte.tv/fr/videos/079395-000-A/maitriser-l-energie-des-etoiles-la-revolution-de-demain/>

NB : Les données présentées ici sont toutes tirées de sources vérifiées qui ont été, le plus souvent possible, référencées ; cependant certaines idées avancées ne concernent que l'auteur de ces lignes.

Lozeron, novembre 2021- août 2022

Bernard Moulin
53, Chemin de la Calade
Lozeron le haut
26400 GIGORS-et-LOZERON

(merci de vos retours éventuels) : bernard.moulin88@sfr.fr