

Quelques éléments sur les limites planétaires

Ivan Gentil.*

15 mai 2025

Résumé

Voici quelques réflexions autour d'un exposé donné le 17 septembre 2024 sur les limites planétaires pour le groupe de travail *Explorations écologiques*¹. Il s'agit ici de voir comment les notions de limites planétaires apportent une façon de comprendre et d'appréhender ce qui se passe lorsque l'on quitte l'holocène. Il semble que cette vision apporte un éclairage intéressant aux bouleversements écologiques, une façon de voir la santé du système terre un peu comme une prise de sang.

1 Un petit historique

On ne peut pas parler des limites planétaires sans faire un petit retour sur l'histoire. Il y a bien eu quelques personnes éclairées qui ont compris que la finitude de la terre était un problème. Citons par exemple John Muir² naturaliste du XIXe siècle. Il est à l'origine de la création du premier parc national, le parc de Yosemite. Citons aussi l'exemple de George Perkins Marsh, diplomate du XIXe siècle, qui va alerter sur l'écologie et la désertification en cas de déforestations excessives. Concernant l'économie moderne, lancée au XVIIIe siècle par David Ricardo et Adam Smith³, les trois points importants sont *La terre*, *le capital* et *le travail humain*. Mais rapidement, avec le progrès technique, le premier point sera considéré comme négligeable et sera oublié.

Ainsi, il faudra attendre la fin de la guerre et le rapport Meadows pour que la population et les pouvoirs politiques prennent conscience du problème avec des preuves scientifiques. J'ai bien conscience de faire quelques raccourcis.

Le rapport Meadows

Début de la prise de conscience. En 1971 l'UNESCO lance un vaste programme de recherche international visant à explorer les relations entre l'homme et la biosphère puis en 1972 se tient

*Institut Camille Jordan, Université de la résistance

1. On pourra consulter le site web de ce GT

https://math.univ-lyon1.fr/wikis/icj/doku.php?id=explorations_ecologiques

2. On pourra consulter la remarquable biographie de John Muir par Alexis Jenni, *J'aurais pu devenir millionnaire, j'ai choisi d'être vagabond*, Paulsen, 2020.

3. *La richesse des nations* est un de ses livres incontournables

à Stockholm la première conférence internationale, sous l'égide de l'ONU, sur l'environnement humain. C'est aussi cette année que le club de Rome⁴ dévoile le rapport Meadows.

Le rapport Meadows ou aussi appelé **rapport de la limite de la croissance** apporte un éclairage important sur l'évolution de notre planète. Sentant qu'une croissance exponentielle du PIB n'est pas tenable sur une terre finie, comme on peut s'en apercevoir avec ces indicateurs des paramètres sociaux économiques dont la croissance est exponentielle (voir la Figure 1), le club de Rome va demander à l'équipe du MIT dirigée par Dennis Meadows d'essayer de comprendre l'évolution de quelques indicateurs.

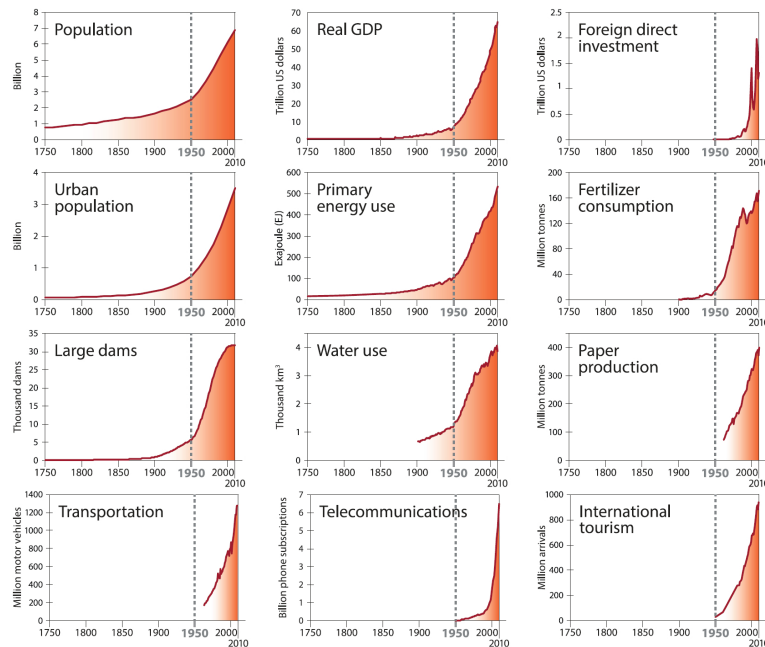


FIGURE 1 – Grande accélération des paramètres sociaux économiques

L'équipe de Dennis Meadows va s'intéresser à 6 indicateurs : **la population, la production agricole, la production de services, la production industrialisation, la pollution, la consommation de ressource non renouvelable**. Les auteurs de ce rapport vont tenter de modéliser l'évolution dans le temps de ces indicateurs⁵. Le résultat est obtenu est totalement effrayant (voir la Figure 2) car comme nous le voyons, un effondrement global (de ces indicateurs) est prévu à partir de 2020-2030 environ si rien n'est fait. Bien entendu rien n'a été fait mais ce ne sont que des simulations. Il est a priori difficile de simuler des ruptures de pentes comme des effondrements etc. Ce qui aussi préoccupant c'est que les simulations coïncident plutôt bien avec ce qui s'est passé après 1972, voir de nouveau la Figure 2. Ici, le but n'est pas de s'étendre sur l'analyse et les critiques de ce rapport.

4. Le club de Rome est un groupe de réflexion réunissant des scientifiques, des économistes, des fonctionnaires nationaux et internationaux, ainsi que des industriels de cinquante-deux pays, préoccupés des problèmes complexes auxquels doivent faire face toutes les sociétés, tant industrialisées qu'en développement. La première réunion se tient à Rome.

5. C'est un système d'équations différentielles de type Lotka-Volterra contenant 180 paramètres, les paramètres étant eux ajustés avec la connaissance du passé.

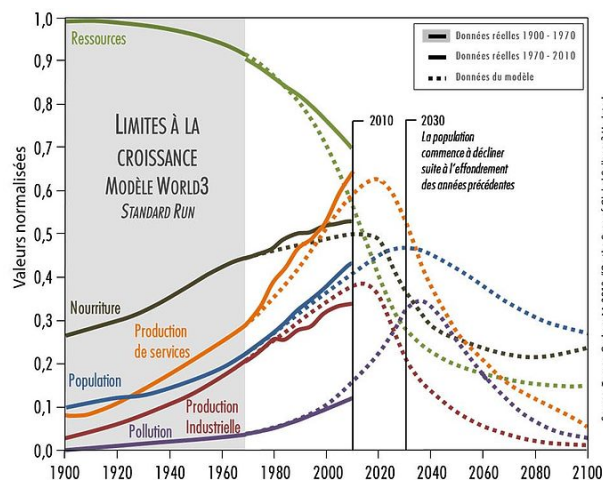


FIGURE 2 – Conclusions du rapport Meadows

L'impact du rapport Meadows

Ce rapport est à ma connaissance le premier à parler d'effondrement avec des termes que l'on peut qualifier de scientifiques. Il plaît dans nos sociétés techniques (même si rien a été fait concrètement) car il utilise les indicateurs qui représentent notre société industrielle et technique⁶. Avec seulement 6 indicateurs, on voit globalement se qui se passe !

C'est un évènement important et les institutions politiques⁷ commencent à comprendre l'ampleur du problème. L'image d'Épinal d'une croissance et d'une consommation infinies s'effondrent. Jimmy Carter, à ce moment-là président des USA fait un célèbre discours en juillet 1979 mettant en doute la politique de consommation dans son pays, on peut citer un passage : *L'identité humaine n'est plus définie par ce que l'on fait, mais par ce que l'on possède. Cependant nous avons découvert que posséder des choses et consommer ne satisfait pas notre désir de sens. Nous avons appris que l'accumulation de biens matériels ne peut combler le vide d'existences sans confiance ni but.* C'est un discours un peu étrange, piloté aussi une volonté d'un retour de la religion.

Du rapport Meadows aux limites planétaires

Il y a deux problèmes qui me semble fondamentaux dans ce rapport. Le premier est que le dérèglement climatique n'apparaît pas dans ces simulations. On ne peut pas trop leur reprocher car il n'était pas vraiment connu à ce moment là. Les sciences du système terre en sont à leur début après la guerre et donc l'augmentation des gaz à effet n'est pas encore totalement comprise⁸.

Le second problème est que les indicateurs sont anthropiques, ils ne désignent que ce qui

6. A l'Institut Camille Jordan ce rapport est étudié en stage de L3 par Louis Dupaigne et par Cédric Villani en cours de lecture en M1.

7. Il est fréquent de voir chez des personnes âgées ce rapport dans la bibliothèque

8. Les premières captations en continu du CO₂ dans l'atmosphère ont commencé en 1958 à Hawaï à 3350 mètres d'altitude.

intéressent les humains : la production industrielle, la production agricole etc. Finalement ils cachent ce qui se passe réellement sur la terre et dans son atmosphère, c'est-à-dire la santé de la terre n'est pas prise en compte. Les limites planétaires sont un moyen de pallier ce problème et permette d'étudier la santé de la terre un peu comme une prise de sang. On s'aperçoit que les paramètres du système Terre explosent aussi (figure 3)

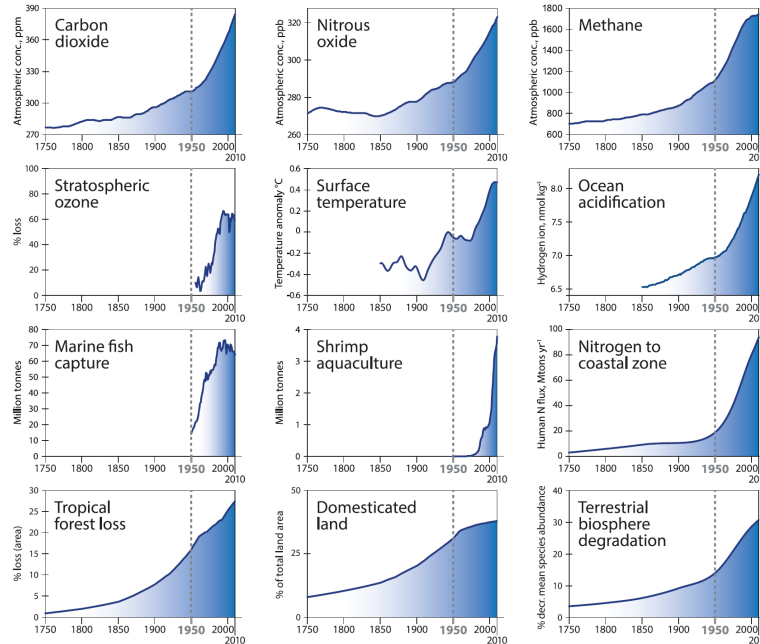


FIGURE 3 – Grande accélération des paramètres du système terre

2 Limites planétaires

2.1 Limites planétaires, introduction

Historique des limites planétaires

L'article de Johan Rockström et al de 2009⁹ est le premier papier qui introduit les limites planétaires, souhaitant tracer les contours d'un espace de vie acceptable pour l'humanité. Un autre article¹⁰, avec plus ou moins les mêmes auteurs, suivra ensuite en 2015 avec des données actualisées. Enfin en 2023¹¹ un dernier article complète le tableau. Notons un ouvrage intéressant qui m'a beaucoup inspiré pour écrire ces quelques pages, livre écrit en 2020 par Aurélien Boutaud et Natacha Gondan, *Les limites planétaires*.

9. Planetary Boundaries : Exploring the Safe Operating Space for Humanity, Ecology and Society 14(2) : 32, 2009

10. Will Steffen et al, Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet. Science, vol. 347, no. 6223

11. Earth beyond six of nine planetary boundaries, Sci. Adv. 9, eadh2458 (2023)

Contenu de ces articles

Dans ces papiers, les auteurs vont faire 3 choses :

- choisir les phénomènes complexes et interconnectés qu'il est nécessaire d'étudier,
- définir des limites à ne pas franchir pour ces phénomènes,
- établir si ces limites sont dépassées ou pas.

Enfin, ces articles contiennent des donuts permettant efficacement de visualiser les limites et de savoir si elle sont beaucoup dépassées ou pas. Dans la figure 4, on voit selon la couleur si une limite est dépassée ou pas.

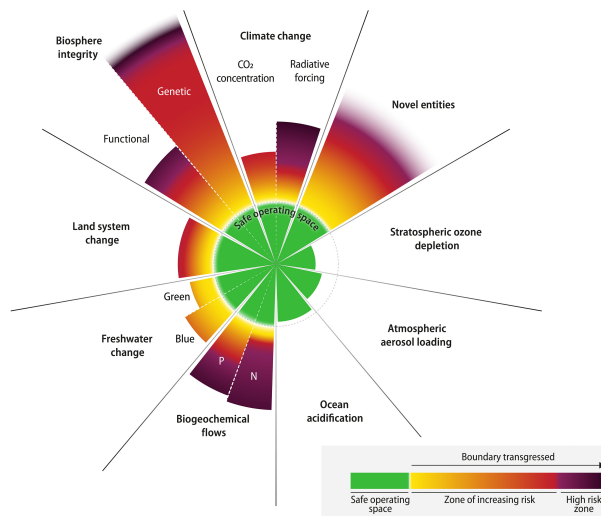


FIGURE 4 – Le donut proposé dans le papier de 2023

Définition d'une limite planétaire

Rappelons, comme cela est précisé par les auteurs, que *sans la pression humaine, l'holocène était prévue pour continuer au moins plusieurs milliers d'années*, (voir la représentation artistique 5). Ainsi, la terre quitte une période assez calme et ces limites planétaires permettent

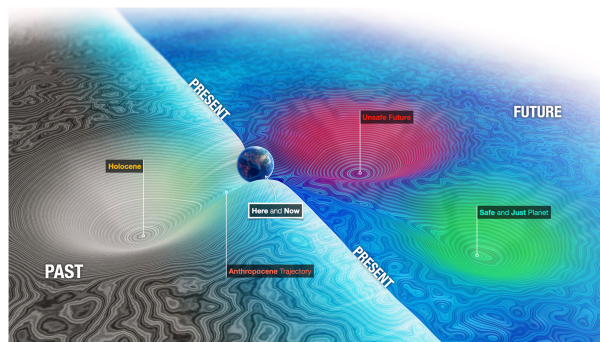


FIGURE 5 – Le système Terre quitte l'holocène

d'une part de prendre le poult de la terre et d'autres part d'identifier par des indicateurs les problèmes fondamentaux. Par ailleurs, les auteurs ne proposent pas de modéliser l'évolution de ces paramètres. En effet, si l'évolution des indicateurs est "assez simple" à comprendre pendant une période calme comme l'holocène, ils deviennent beaucoup plus difficile à comprendre au-delà de ces limites. C'est peut-être pour ces raisons que l'effondrement modélisé par le rapport Meadows n'est pas forcément réaliste. Cela ne veut pas dire qu'il ne va pas arriver mais que s'il arrive ce ne sera pas forcément en suivant les courbes proposées dans la Figure 2.

On peut aussi dire qu'une limite planétaire est le moment où justement on passe dans l'inconnu, où l'avenir est difficile à imaginer. Autrement dit, si l'évolution d'un paramètre évolue classiquement de façon linéaire dans une période calme, il peut ensuite évoluer de façon non-linéaire. **Un point de bascule** est un moment différent, c'est le moment où justement on sait que le système a radicalement changé. On peut aussi définir **des frontières** à la place des limites, c'est une région avec une plage d'incertitude.

On le comprend bien, la définition d'une limite planétaire est compliquée, il faut trouver des phénomènes associés pour la décrire. Deux cas de limites différentes sont identifiées, montrées dans la Figure 6. Dans le premier cas, on voit que le point de bascule se trouve à la fin de la zone d'incertitude. Par contre dans la seconde limite le point de bascule n'est pas clairement identifié.

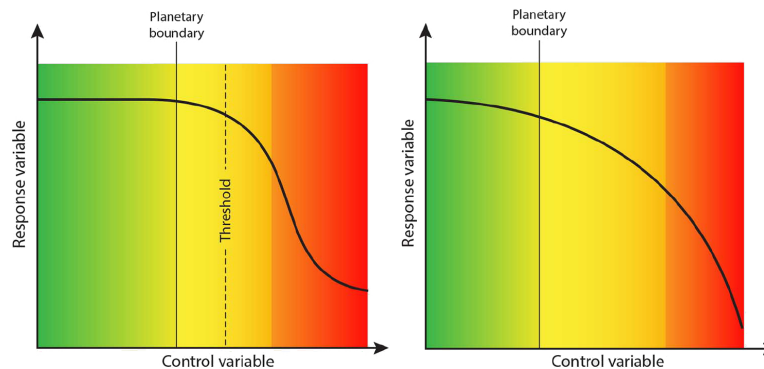


FIGURE 6 – Deux cas de limites

Phénomènes complexes et interconnectés choisis

Voici les 9 indicateurs choisis dans les articles :

1. l'appauvrissement de la couche d'ozone,
2. le changement climatique (réchauffement climatique) et forçage radiatif,
3. l'acidification des océans,
4. la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore,
5. l'utilisation mondiale de l'eau,
6. l'érosion de la biodiversité (extinction des espèces),
7. les changements d'utilisation des sols (déforestation),
8. l'introduction d'entités nouvelles dans l'environnement (pollution chimique)

9. l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère.

Le changement climatique, la couche d'ozone et l'acidification des océans impliquent des perturbations des systèmes de régulation du système Terre. La perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore et l'utilisation mondiale de l'eau ont des impacts plus régionaux mais impactent plus globalement la résilience du système terre (sa capacité à revenir au point d'équilibre). L'érosion de la biodiversité et les changements de l'utilisation des sols menacent quant à elles la biosphère, la vie sur terre. Les dernières limites ne sont pas encore établies correctement.

Remarque 2.1 (Diffusion des limites planétaires) *Rapidement ces limites ont été utilisées pour alerter¹² et communiquer sur la santé du système terre. Par exemple, le gouvernement français a commandé en octobre 2023 un rapport au Commissariat général au développement durable pour expliquer ces limites et montrer les avancées de l'Etat français¹³. Relevons seulement deux parties de ce rapport.*

- *Sur les émissions de CO₂ on peut lire : "Dans l'inventaire, les émissions moyennes annuelles de CO₂ (hors autres gaz à effet de serre) par habitant de France sont similaires à celles de la moyenne mondiale (4,7 t en 2021). Ainsi, pour 2021, en moyenne, les Français ont contribué autant que les autres habitants du monde au maintien des émissions au-dessus de la frontière planétaire. Dans cette optique, les efforts à produire pour descendre en deçà des seuils limites sont les mêmes en France, qu'en moyenne, dans le reste du monde."*

Ne compter que le CO₂ émis par la France et se permettre de conclure sans tenir compte de l'empreinte carbone est un peu douteux.

- *Sur les forêts on peut lire : "Concernant sa propre forêt (métropolitaine ou en outre-mer et notamment en Guyane), la France dispose d'un outil très protecteur avec un Code forestier qui encadre la gestion forestière pour que celle-ci soit conduite de façon durable et multifonctionnelle. Ainsi, tout défrichement de plus de 0,5 ou 4 ha doit faire l'objet d'une demande d'autorisation et d'une mesure compensatoire."*

Ainsi, si on coupe des arbres il faut soit en replanter ailleurs ou bien payer, on sait que ces mesures se servent pas à grand chose. On peut s'en apercevoir dans le cas de l'autoroute A69.

3 Détails des 9 limites planétaires

3.1 Limites liées aux émissions de CO₂ anthropique

Les 3 limites suivantes proviennent de l'activité humaine, elle perturbent les systèmes de régulation du système Terre.

12. La journaliste Paloma Moritz l'utilise pour alerter sur le média Blast, <https://www.youtube.com/watch?v=pnVEnLm9aWA>

13. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/la-france-face-aux-neuf-limites-planetaires/>

3.1.1 Cas de l'Ozone (O_3)

C'est une histoire connue depuis les années 80, la molécule d'ozone O_3 permet de capturer les UV nocifs du soleil. Le fameux trou dans la couche d'ozone, repéré dans les 80 et alimenté par les chlorofluorocarbures (CFC), a obligé les pays d'agir rapidement. Le protocole de Montréal de 1985 a imposé une réduction de la production CFC. Les CFC sont inertes, stables, ininflammables, non-toxiques et ont un très faible prix de fabrication, d'où leurs larges utilisations dans l'industrie comme dans l'industrie du froid. C'est un exemple emblématique, car les pays se sont très rapidement entendus pour agir. Les industriels ont rapidement trouvé des produits de substitution pour remplacer les chlorofluorocarbures, et ils ont pu produire de nouveaux appareils et même utiliser cette mésaventure pour augmenter le remplacement des produits.

Le problème du trou dans la couche d'ozone est que cela donne l'idée qu'il y a toujours une solution simple et applicable. Ce problème ne concernait qu'un nombre limité d'entreprises et pas l'ensemble du capitalisme industriel. Par ailleurs, les produits de substitution apportent maintenant un autre problème, l'augmentation des gaz à effet de serre.

La limite a été fixée à 95 % de la concentration de l'ère pré-industrielle, les unités sont un peu compliquées.

Ainsi, grâce à la mobilisation et l'utilisation des produits de substitution, la limite n'a pas été franchie pour la couche d'ozone !

3.1.2 Cas du dérèglement climatique, concentration du CO_2 et forçage radiatif anthropique

Pour le cas du climat, les auteurs s'intéressent à la concentration du CO_2 , principal gaz à effet de serre. La concentration du CO_2 est un régulateur important de la température et les auteurs remarquent que la cryosphère assure une stabilité du climat sur terre. Par ailleurs, les données sur le climat des 100 millions d'années passées montrent que la terre n'avait plus de glace quand la concentration en CO_2 était supérieure à 450 ppm avec une incertitude dans les relevées de 100 ppm. Ainsi, les auteurs placent la limite basse à 350 ppm et une limite haute à 450 ppm.

En 2009, l'année du premier papier, la concentration en CO_2 était de 385 ppm à la surface du globe, la limite basse était donc légèrement dépassée. En mai 2024 la concentration du CO_2 était de 426 ppm, ainsi la limite haute sera probablement dépassée rapidement.

Quelques remarques. L'incertitude des 100 ppm est difficile à comprendre elle est probablement liée aux mesures. La seconde chose remarquable est que cette limite est simple à exprimer, mettant en lumière qu'il ne faut pas forcément exhiber des calculs compliqués pour comprendre et alerter sur ce qui se passe. Enfin, les accords internationaux, comme l'accord de Paris, s'attardent sur la température, une variable d'état. Les dirigeants ne veulent pas discuter des émissions de CO_2 qui elle est une variable de contrôle.

Un autre indicateur est le **forçage radiatif** anthropique. Cet indicateur exprimé en W/m^2 , caractérise la puissance énergétique reçue sur la terre. Un forçage radiatif positif montre que la température va augmenter, il était nul avant l'ère industrielle. Le forçage est actuellement de $2.91 W/m^2$ alors que la limite planétaire a été fixée à $1 W/m^2$ avec une incertitude de 0.5. Je ne suis pas certain de comprendre cette limite, je pensais qu'elle devrait plutôt être nulle pour éviter un réchauffement.

Finalement, la limite a été franchie pour le CO₂ mais aussi pour le forçage radiatif!

3.1.3 Acidification des océans

L'eau de mer est alcaline avec un pH assez constant autour de 8.2. On estime qu'il oscille autour de 8.1 et 8.3 depuis 20 millions d'années. Ce pH basique, stable depuis longtemps, a fait qu'une vie particulière s'est développée dans les mers et les océans. Il permet en particulier aux organismes calcifiés de se développer : les animaux à coques comme par exemple les coquillages ou les coraux.

Les océans captent le surplus de CO₂, de façon biologique (la photosynthèse) mais aussi de façon chimique (absorption par l'eau de mer). L'équation qui produit un acide carbonique HCO_3^- est assez simple,



Ainsi, les océans sont de véritables puits de carbone ce qui permet à la concentration du CO₂ de ne pas trop augmenter. Mais cette absorption diminue le pH de la mer, c'est ce que l'on appelle l'acidification des océans. Nous sommes passés de 8.2 à 8.1 depuis l'époque pré-industrielle. Les estimations actuelles sont d'une diminution du pH de 0.2 en 2050 et de 0.4 de pH pour 2100 ce qui est un bouleversement important car l'échelle pH est logarithmique.

L'acidification due au carbonate gêne la capacité des organismes marins à coques à partir du carbonate de calcium CaCO₃ dont les deux formes les plus courantes sont la calcite et l'aragonite. Pour tester l'acidification des océans on mesure l'état de saturation de l'eau de mer de surface en aragonite. Le degré de saturation de l'eau de mer par le CaCO₃ est appelé « taux de saturation », qui est exprimé par la lettre grecque Ω . Si Ω est grand le minéral a tendance à se précipiter (se solidifier) et si Ω est petit le minéral tend à se dissoudre.

La variable choisie est la l'état de saturation de l'eau de mer en surface de **l'aragonite** exprimée en Ω_{arg} et la limite proposée correspond à 80 % de saturation en aragonite par rapport à l'ère pré-industrielle (3.44). La limite proposée par les auteurs est 80 % de saturation en aragonite, soit donc 2.75.

Actuellement, nous avons $\Omega_{arg} = 2.8$, la limite proposée est presque atteinte, le dépassement sera pour bientôt.

3.2 Perturbation des cycles et des écosystèmes

Les limites que nous allons décrire ici menacent la résilience du système Terre. Le retour en arrière vers un équilibre stable est alors menacé.

3.2.1 Perturbation du cycle de l'azote et du phosphore

Les ajouts, par les humains, de l'azote et du phosphore dans la nature perturbent les cycles globaux de ces éléments.

L'azote (ou bien nitrogène en utilisant une base latine nitrogenium) est un élément indispensable pour les plantes. Elle est naturellement dans le sol. Le cycle de l'azote est assez simple. Elle est présente dans l'atmosphère (77 %), fixée par certaines plantes comme les légumineuses, l'azote se répand dans la chaîne alimentaire des animaux, termine dans les urines ou matière fécales

et repart ainsi dans la terre (aussi par la décomposition de biomasse). Nous voyons souvent dans les campagnes des champs de luzerne, plante appartenant à la catégorie des légumineuses. Finalement des **bactéries nitrifiantes** vont terminer le cycle et transformer le l'amoniaque en nitrite (nitrate) et libérer le diazote N_2 dans l'atmosphère (cf. Figure 7).

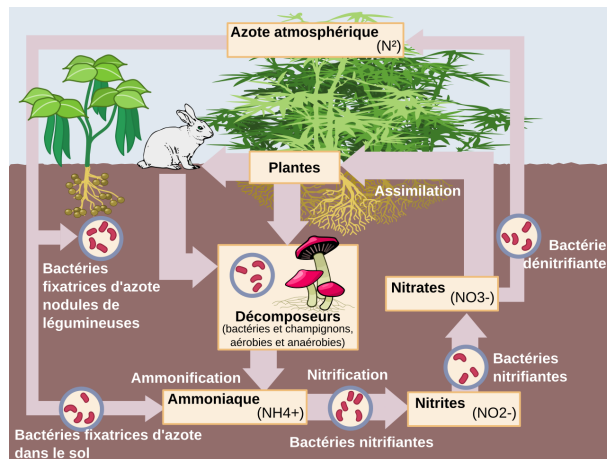


FIGURE 7 – Cycle de l'azote, source Wikipédia

Rappelons que l'azote est une nourriture indispensable des plantes. Rapidement, après les guerres, les biologistes remarquent que les engrais azoté, les nitrates d'ammonium, vont doper la croissance d'une plante (les nitrates d'ammonium sont les plus utilisés, ils sont créés à partir de l'ammoniac). Rappelons que c'est ce sont des produits toxiques utilisés aussi dans les préparation d'explosifs. On se souvient des explosions d'AZF en 2001 ou bien du port de Beyrouth en 2020 à cause du nitrate d'ammonium. Ainsi, chaque année 120 millions de tonnes de N_2 passe de l'atmosphère dans la terre perturbant ainsi le cycle de l'azote. Rappelons que la fabrication de ces engrais utilise l'azote de l'air et est très énergivore, il faut environ 1 kg de pétrole pour fabriquer 1 kg d'engrais même si ce chiffre ne veut pas dire grand chose car on ne connaît pas les concentrations.

Le surplus d'azote dans les sols va polluer les nappes phréatiques (en les rendant impropre à la population) et les cours d'eau (cette accroissement de nitrate va favoriser des algues qui vont elle s'accaparer l'oxygène au détriment des autres plantes). Le surplus d'azote provient aussi de la consommation des énergies fossiles rejetant ainsi des oxydes d'azote polluant l'atmosphère (responsable par exemple des pluies acides).

La limite proposée est de 62 Tg N/an (62 téragramme d'azote par an, 1 téragramme est 10^{12} grammes), limite que la biosphère semble capable de séquestrer. Il n'est pas évident de comprendre cette limite, il faut faire confiance aux scientifiques.

Nous sommes actuellement à 150 Tg N/an, ainsi la limite est largement dépassée.

Le Phosphore est lui un engrais minéral. Il est découvert au 17ème siècle au cours d'expérience à partir de l'urée. Une façon plus simple de l'obtenir est de l'obtenir à partir de roches phosphorées, il faut les chauffer à grande température ce qui est, comme les nitrates, une réaction très énergivore. Une des utilisations des plus connues du phosphore est l'allumette et dans les lessives pour avoir du linge bien blanc.

Le cycle du phosphore est différent de celui de l'azote. On peut s'intéresser rapidement au cycle terrestre. Il n'est pas présent en abondance dans l'atmosphère mais dans les roches. Par le ruissellement de la pluie sur les roches, le phosphore sous forme d'ions peut être alors absorber par les consommateurs primaires comme les plantes et devient alors du phosphate organique. Ce phosphate organique redevient roche par sédimentation de la matière organique ou bien les excréments d'animaux.

Il peut aussi faire quelque chose d'identique en passant par la mer, c'est le cycle marin. Le problème dans le cycle marin est que le phosphore peut être capturer et fossilisé au fond des mers. C'est un cycle ouvert, il peut être perdu pour le monde du vivant, car ce phosphore va rester au fond des mers (cf. Figure 8).

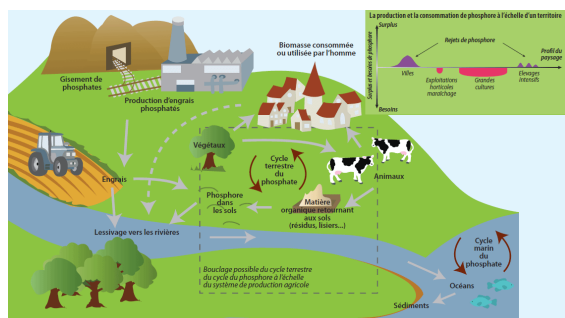


FIGURE 8 – Cycle du phosphore, source Alternatives Economiques

Le phosphore est indispensable pour les plantes pour la photosynthèse. De façon industrielle, les phosphates sont ajoutés comme engrais et vont augmenter très fortement la concentration du phosphore. Comme les nitrates, les phosphates partent à 99 % dans la nature. Ils dérèglent alors les écosystèmes jusqu'à la mer. Contrairement à l'azote, le phosphore est une ressource non-renouvelable, on serait déjà en déclin dans les mines de phosphore.

On extrait entre 120 et 170 millions de tonnes de terre phosphatées par année pour avoir entre 20 et 30 millions de phosphate pure par année. Les méfaits d'un surplus de phosphore est proche de celui de l'azote, modification pour longtemps d'un milieu naturel. Notons par ailleurs que le phosphore a beaucoup été utilisé dans les lessives cette utilisation était pour éviter que le calcaire se dépose sur les vêtements. L'utilisation des phosphates est normalement interdit pour la lessives des particuliers mais pas pour un usage industriel.

La limite proposée est de 6.2 Tg P/an, quantité maximale acceptée par les milieux d'eau douce. Nous en sommes actuellement à 22 Tg P/an, la limite est largement dépassée.

Il est intéressant de remarquer que la perturbation des cycles de l'azote ou bien du phosphore n'est pas tellement discutée. Ils sont moins dangereux que les pesticides et donc moins préoccupants pour les dirigeants et la population. Les algues vertes en Bretagne proviennent des augmentations des concentrations de nitrates et de phosphates dues à l'utilisation des engrais mais aussi aux élevages hors-sols dans la région.

3.2.2 Perturbation du cycle de l'eau douce

L'eau douce (ou l'eau bleue), est peu présente par rapport aux océans, elle est indispensable. C'est l'eau qui vient de la pluie, un cycle assez simple que l'on apprend à l'école.

C'est difficile de proposer une limite pour l'eau bleue, en effet celle-ci est assez locale. Si on assèche la région du Poitou, par exemple en puisant dans les nappes phréatiques pour alimenter des méga-bassines¹⁴, on va bouleverser la région mais pas trop ce qui se fait au Tibet. Ainsi au niveau de la planète, on a entre 12 000 et 15 000 km³/an d'eau douce disponible. La limite est fixée à 4 000 km³/an d'eau que l'on peut prélever sans trop de problème, il faut laisser entre 20 % et 50 % d'eau douce pour maintenir le fonctionnement des systèmes aquatiques. Actuellement nous sommes à 2 600 km³/an d'eau prélevé.

Ainsi la limite n'est pas dépassée mais le problème de l'eau est trop localisé pour pouvoir donner une limite mondiale.

3.3 Biosphère sous tension

On regarde maintenant les organismes vivants et comment ils sont sous tension.

3.3.1 Erosion de la biodiversité

Normalement, enfin au cours du temps passé, les extinctions étaient pour les animaux marins de 0.1 à 1 pour 1 million d'espèce par an. Pour les mammifère, cette fourchette passe 0.2 à 0.5. Actuellement, les estimations montrent que nous perdons actuellement entre 100 et 1000 pour 1 million d'espèces.

Bien entendu les pertes peuvent être très localisées¹⁵ mais dans tous les cas ça se propage sur l'ensemble du globe. Par exemple la perte de la biodiversité augmente la vulnérabilité des écosystèmes terrestre et aquatique.

Il est difficile de d'estimer la limite planétaire pour la chute de la biodiversité. Ce que propose les auteurs et de simplement mettre la limite à 10 fois supérieur à celle dans une période stable, soit donc environ à 10 extinctions pour 1 million. Ce nombre est arbitraire mais il correspond d'une part à une éthique environnementale (pour garder une grande diversité) et une borne utilitariste (diversité fonctionnelle). L'article daté de 2023 prend en compte ces deux limites.

Ainsi, la limite concernant la biodiversité est largement dépassée.

3.3.2 Changement d'affectation des sols et ses effets sur les processus de régulation du système Terre

Les sols changent dans le monde et le plus simple est de s'intéresser aux forêts. Dans les pays tempérés, comme la France, les forêts augmentent régulièrement. On a une augmentation de 3 millions d'hectares par an¹⁶, par ailleurs dans le même temps il y a une diminution de 7 ou 8 millions d'hectares par an dans les pays tropicaux. Comme souvent ce sont les pays

14. No Bassaran $\perp$

15. En effet, 80 % de la biodiversité que l'on trouve encore aujourd'hui sur la planète se trouve sur les terres des peuples autochtones qui représente moins de 5 % de la population, cf. <https://www.ifad.org/fr/web/latest/-/les-peuples-autochtones-protègent-la-biodiversité-une-recolte-apres-l-autre>

16. Sans aller plus loin, on peut aussi se poser la question de définir une forêt qui n'est pas la même chose qu'un champ d'arbres.

pauvres qui payent le prix le plus fort avec parfois la moitié de leur couverture forestière qui ont disparu. La disparition des forêts dans les pays tropicaux a plus d'impact que dans les pays tempérés.

Ainsi deux limites sont proposées. Pour les pays tempérés, la limite est fixée à 50 % par rapport à la couverture forestière avant l'ère pré-industrielle, ici 1700. La limite monte à 85% pour les pays tropicaux, à haute valeur environnementale. Les auteurs proposent de faire une moyenne pondérée et proposent une limite de 75 % pour le risque accru et de 54 % pour un risque élevé.

Actuellement, 62 % des surfaces forestière sont restées des forêts, contenu des incertitudes, la limite est bien dépassée et nous sommes dans un risque accru.

4 Revenons à la France

Comme nous l'avons déjà vu, le gouvernement français communique sur ces limites planétaires. En France, les limites ne sont pas brillantes, comme dans le reste du monde. Montrons simplement la représentation des limites sous forme du donuts, cf. Figure 9.

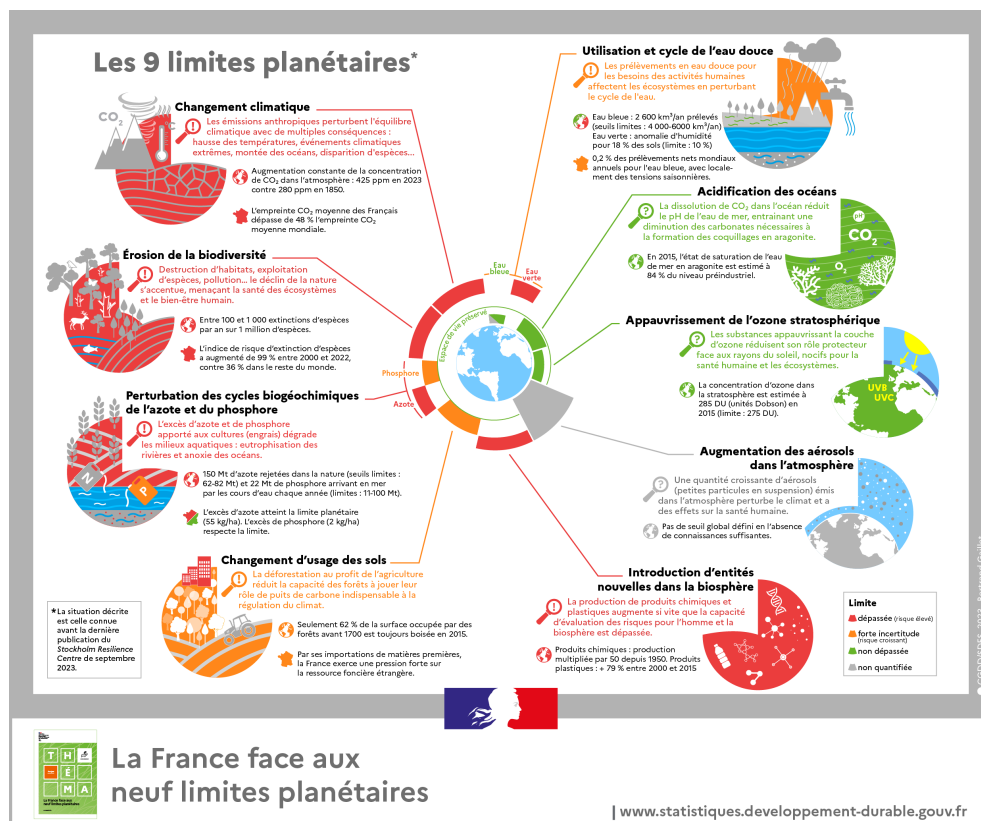


FIGURE 9 – Les 9 limites planétaires en France

5 Références

Voici les références utilisées pour élaborer ce texte.

1. Cours de Kévin Jean et Romain Jarrier, cours sous l'égide de Labo1point5, 2024.
2. Livre d'Aurélien Boutaud et Natacha Gondran : *Les limites planétaires*, La Découverte (2020).