



ÉCONOMIE CIRCULAIRE ET INNOVATION

SESSION 3

1.1. FINITUDE ET LIMITES DES RESSOURCES

Ce document contient les transcriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « Finitude et limites des ressources » de la semaine 1 du MOOC « Économie circulaire et innovation ». Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs.

La finitude des ressources : les énergies fossiles et les métaux

Dominique Bourg

Professeur – Université de Lausanne

Nous allons aborder maintenant la pression que nous exerçons sur deux types de ressources qui sont vraiment essentielles à nos activités économiques. Le premier type de ressource, ce sont les énergies fossiles et le second ce sont les métaux et les minerais sous-jacents. Commençons par les énergies fossiles. Le panorama est un petit peu paradoxal, d'une certaine manière nous avons déjà exercé une pression très forte et en même temps, concernant les seules énergies fossiles si on prend en compte le climat, nous avons trop d'énergies fossiles. Mais déjà, commençons à comprendre, je vais donner une image un peu simplette, mais qui va vous faire comprendre le problème. Commençons par l'énergie. Comme vous le savez, les hommes ne sont pas capables de produire de l'énergie. Ils sont capables de la capter, de la transformer et de la transporter. Chacune de ces opérations elle-même coûte de l'énergie. Capturer l'énergie pour ce faire, on a besoin d'énergie. La transformer, on a besoin d'énergie. La transporter, on a besoin d'énergie.

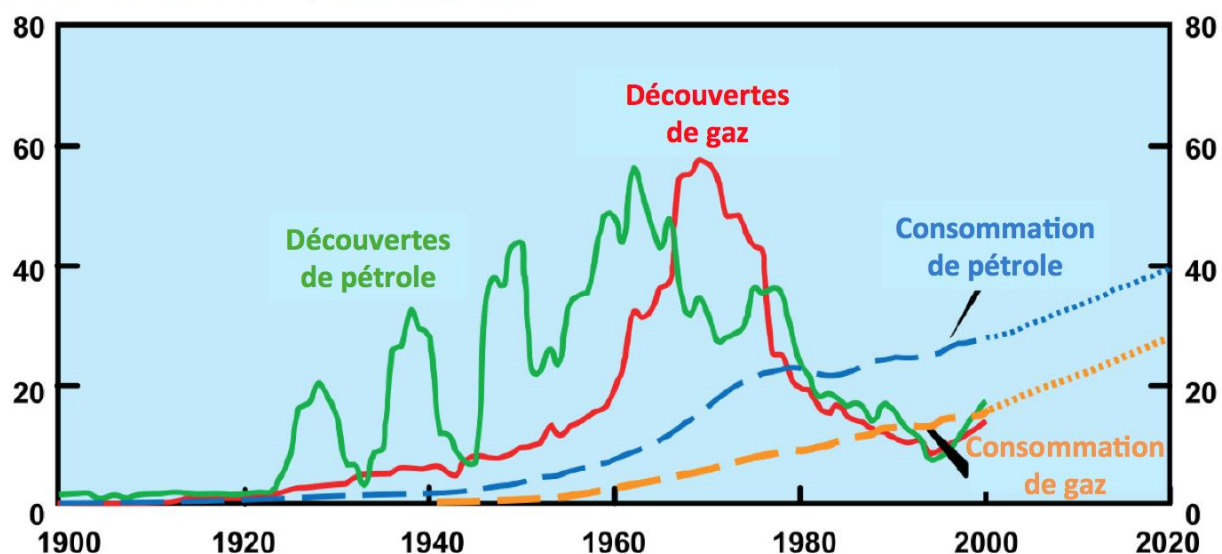
Donc la question énergétique est en quelque sorte un ratio. D'une part je vais chercher de l'énergie et puis j'en utilise donc qu'est-ce qu'il me reste ? Prenons le pétrole parce que c'est très simple. Autrefois, il y a 40, 50 ans dans la plupart des champs pétrolifères, quand j'investissais un baril, j'en retirais 100. On parle de EROEI, Energy Return On Energy Investment. La donne énergétique, c'est

toujours un ratio. Il faut bien avoir ça en tête. Quand même, je reviens sur la question du pétrole par exemple, liquide, on va aller le chercher. Pour aller le chercher, on a besoin d'énergie. C'est ce qu'on appelle le EROEI strict. Si je prends en compte l'énergie dont j'ai besoin pour transporter, transformer, on va parler d'EROEI étendu parce que j'élargis à d'autres activités qui elles-mêmes aussi consomment de l'énergie. De manière générale, il y a trop de pétrole sur Terre. Le GIEC demande à la communauté internationale qui d'ailleurs fait la sourde oreille de laisser 80 % des énergies fossiles, pas que le pétrole, mais aussi le charbon facilement accessibles dans le sous-sol. Nous y reviendrons.

Reprenons maintenant la donne générale, qu'est-ce qui se passe ? Pour le faire comprendre, on va parler du pic pétrolier même si finalement la question du pic pétrolier ne se pose pas vraiment. Mais on aura peut-être des pics miniers. Donc on va essayer d'exprimer ça d'une façon un peu simplette en imaginant un pot de yoghourt. Et puis imaginez que par exemple si on parle d'énergie, imaginer que la cuillère elle-même soit en yoghourt. Et vous allez très vite comprendre que quand on commence, on a un rythme d'augmentation. Une fois qu'on a atteint le yoghourt, la moitié du yoghourt, c'est là qu'on ramasse le plus avec sa cuillère. Et plus on va commencer à exploiter l'autre moitié, surtout quand on va commencer à racler les bords, vous imaginez bien qu'à un moment donné, ça deviendrait absurde si la cuillère était elle-même en yoghourt. C'est-à-dire que je ramènerai moins de yoghourt que la cuillère n'en contient. Cela, c'est vraiment la donne énergétique. Et ça vaut aussi pour les minéraux.

En d'autres termes quand on a affaire à un gisement que ce soit les énergies fossiles ou que ce soit des métaux, au début de l'exploitation de ce gisement, on peut augmenter la quantité qu'on retire. Et puis, en gros une fois qu'on arrive vers la moitié, on va devoir progressivement diminuer la quantité soit d'énergie, soit de minerais qu'on va transporter. Et on a pendant très longtemps parlé de pic pétrolier. On voulait dire par là que lorsqu'on allait atteindre à peu près la moitié des réserves, on allait commencer cette fois-ci à voir nos capacités d'extraction diminuer. C'est bel et bien ce qui s'est produit. Si on regarde, je vous le disais tout à l'heure, autrefois, j'investissais un baril, j'en retire cent. Si on regarde toujours encore une fois le pétrole conventionnel, en moyenne aujourd'hui quand on a investi un baril, on en retire en moyenne à peu près 25. Et là, on est encore une fois pour les pétroles faciles à extraire, ce qu'on appelle les pétroles conventionnels. Sur le schéma que vous avez, vous voyez en vert la courbe pour les pétroles.

Milliards de barils équivalent pétrole

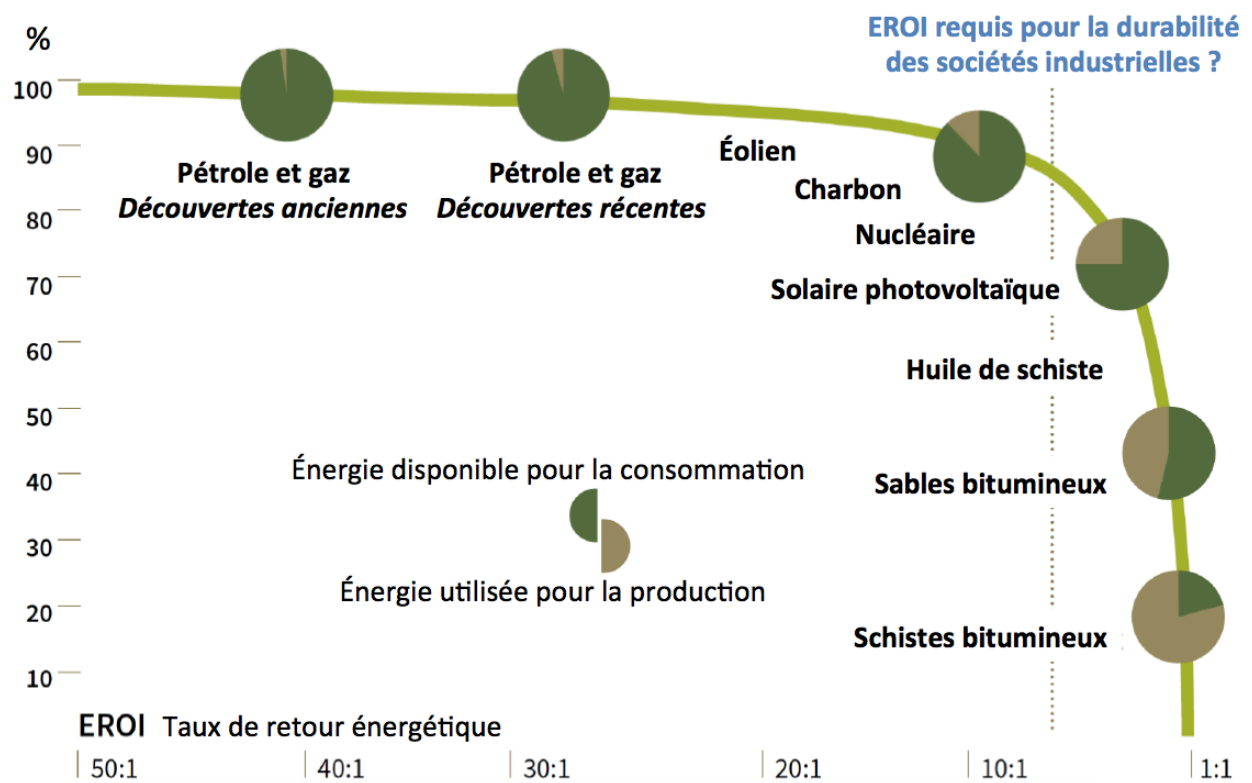


Source: Exxon Mobil, 2002

Vous voyez qu'à partir de 1964, petit à petit, le taux de découverte diminue. Et ça va être la même chose pour le gaz naturel, mais là, avec un écart de quinze années à peu près. Au bout de ces quinze ans, on voit aussi la courbe de découverte de gaz naturel diminuer. Et puis là, c'est au bout d'un moment, quand on arrive vraiment cette fois-ci à la moitié même des réserves, on a des difficultés.

C'est probablement ce qui s'est produit, mais on ne peut pas en tirer les conséquences qu'on a tirées pendant des années. On a beaucoup spéculé sur ce pic pétrolier. En fait non de façon générale on a trop d'énergie fossile dans nos sous-sols. Et si vraiment on voulait en retirer l'essentiel, on ne pourrait pas tout retirer. Je pense que vous l'avez compris avec mon histoire du yoghourt. Mais si on voulait en retirer tout ce qu'on pourrait en retirer, on aurait l'augmentation de la température moyenne d'au moins 10 degrés. On ne peut pas imaginer plus grande catastrophe, ça serait très probablement la disparition de l'humanité. Donc nous avons trop d'énergie fossile, mais n'empêche quand même, nous avons un autre problème, c'est-à-dire que le coût d'extraction de ces énergies fossiles ne cessent de s'élever.

C'est-à-dire que la quantité d'énergie qu'on utilise par rapport à celle qu'on retire ne cesse de diminuer. Par exemple si je suis du côté des sables bitumineux de l'Alberta, quand j'investis un baril, j'en retire entre quatre et cinq. Or si je prends en compte les infrastructures, le transport, en fait au bout du compte, un baril comment dire... Je n'investis pas simplement un baril en fait. Pour en retirer quatre à cinq, c'est trois. On voit bien que le solde est très maigre. On a cette difficulté-là même si encore une fois on n'a plus à se soucier du pic parce que de toute façon nous avons trop de réserve. Quand même, la qualité de l'énergie fossile que l'on peut retirer du sol maintenant n'est pas la même que celle d'autrefois. Elle nous coûte beaucoup plus énergétiquement. Donc le solde d'énergie qu'on peut utiliser est beaucoup plus réduit à ce qui pouvait être le cas autrefois. Et là ça va largement au-delà du pétrole. C'est vrai de façon générale pour l'ensemble des énergies. Plus on va et plus finalement le fameux EROEI, la quantité vraiment disponible d'énergie, ne cesse de diminuer.



Et si vous voyez là, si on regarde l'éolien, si on regarde le solaire photovoltaïque, ils ne sont pas à niveau aussi bas que les schistes bitumineux. Mais on est très loin quand même des débuts de la saga du pétrole. Pour ce qui est de l'éolien, on est sur une technologie aujourd'hui qui est à maturité. Mais en revanche, si on regarde le solaire et le solaire photovoltaïque, on a des marges devant nous. Aujourd'hui, c'est très difficile à calculer parce qu'évidemment le solaire c'est intermittent suivant l'année et la météo, on ne va pas retirer la même quantité d'énergie. Mais grosso modo, on parle d'un EROEI qui se situerait entre sept et huit. On espère d'ici quinze ans arriver à quinze, et encore quinze ans, les quinze années suivantes, donc trente ans en tout probablement se stabiliser vers trente. Et donc là, on aurait une énergie d'une qualité tout à fait correcte. Mais évidemment pas du tout avec la même quantité, la même abondance. C'est le même taux d'augmentation d'extraction annuelle que ce qu'on a connu au début de la saga du pétrole.

Donc de façon générale en matière d'énergie, on est plutôt sur une pente descendante. Et on a sans doute mangé une part de notre pain blanc sans qu'on voie se profiler devant nous un monde sans énergie, mais un monde qui sera sans doute plus rare en termes d'énergie. Pour les métaux, le raisonnement est analogue. Pour aller chercher les métaux, cela coûte aussi de l'énergie. De façon un peu abstraite et globale, les métaux en dehors du fer avec peut-être le magnétisme, le centre de la Terre, mais les métaux selon le second principe de la thermodynamique devraient être relativement répandus de façon homogène à la surface de la Terre et à l'intérieur de la croûte. Dieu merci pour nous, pour des raisons telluriques parfois aussi pour des raisons bactériennes, il y a certaines concentrations près de la surface de la Terre. Ce sans quoi d'ailleurs nous n'aurions jamais pu inventer la métallurgie. Les premiers métaux qu'on a exploités, c'est à partir d'une très forte concentration dans des météorites par exemple. Et donc Dieu merci pour nous il y a des endroits sur Terre où effectivement on rencontre une plus grande concentration.

Et du coup l'énergie qu'on va dépenser est moins grande pour deux raisons. D'une part, on excave moins, plus ce qu'on va chercher est près de la surface, moins on va retirer de terre d'une part. Et d'autre part, plus le métal est concentré dans un minerai et moins on a à retirer aussi de terre. En revanche, plus le degré de concentration s'affaiblit, donc plus on va aller profondément et plus on va devoir consommer d'énergie. Aujourd'hui, on dépense 10 % de l'énergie primaire que l'on produit au monde pour nos activités extractivistes. S'il fallait par exemple chercher le cuivre dans son état de dispersion naturelle, s'il fallait qu'on produise les seize millions de tonnes que l'on produit chaque année, mais cette fois-ci on devrait aller chercher qu'un degré de dispersion important, c'est toute l'énergie primaire que l'on produit au monde qu'il faudrait dépenser. Donc on voit bien là qu'on a une limite. La limite, elle n'est pas simple. Je ne vais pas la désigner du doigt pour chaque métal. Dans X années, nous ne pourrons plus, et cetera. Mais on voit bien que la tendance sur laquelle on est d'une consommation énergétique de plus en plus grande. Par exemple pour certains métaux, il faut aller les chercher à moins 400, à moins 600 mètres sous le sol. On ne pourra pas le faire indéfiniment et pour tout. À cela s'ajoute que certains des métaux très importants aujourd'hui, par exemple tout ce qui est les high-tech, tout ce qui nous permet justement de consommer moins d'énergie, ces métaux sont des coproduits. On ne peut pas aller les chercher pour eux-mêmes. Mais on ne peut que les trouver parce qu'on exploite d'autres métaux.

Donc on est là confrontés à une donne assez délicate, un petit peu comme pour l'énergie ou alors comme pour les ressources halieutiques. De manière générale, les ressources enfin un peu moins les ressources du vivant qu'on a vues précédemment, nous avons exercé une forme de razzia. Et puis on commence à voir certaines butées arriver encore une fois. Ce n'est pas des butées simples. C'est des butées qui sont à la croisée entre plusieurs facteurs, notamment la profondeur, la baisse des degrés de concentration et l'énergie qui du coup est requise pour aller chercher et ensuite traiter ces minerais. Donc, on voit bien de ce fait compte tenu de cette raréfaction progressive, de ce coût énergétique croissant de nos activités minières, on voit bien non seulement l'intérêt et l'opportunité, mais même au bout du compte la nécessité d'une économie plus circulaire parce qu'à un moment donné, on va totalement buter. Et si je veux donner une sorte d'illustration tout à fait générale, en globalisant toutes les ressources avec un taux de croissance de 2 % de nos consommations de ressources, on tiendrait au mieux quelques centaines d'années sur une planète vierge. Ce n'est pas le cas. Et X population, peut-être pas très importante d'ailleurs. Et puis même comme pour reprendre le calcul d'un physicien, Gabriel Chardin eh bien au bout même de quelques milliers d'années, 5 à 6000 toujours avec ce taux de croissance de la consommation des ressources, en 5 ou 6000 ans, on aurait dévasté, ratiboisé, détruit l'univers autour de nous avec un rayon de dix milliards d'années-lumière. Ce qui est quand même pas mal. Oui, l'économie circulaire c'est une nécessité et pas dans x temps, mais maintenant.

Changement climatique et biodiversité

Dominique Bourg

Professeur – Université de Lausanne

Nous allons aborder maintenant la thématique des limites planétaires. Qu'entend-on par limites planétaires ? Ce sont les limites que nous devrions ne pas dépasser pour éviter un changement d'état du système terre, ce qui ne serait pas tout à fait, c'est le moins qu'on puisse dire, à notre avantage. En d'autres termes, ces limites planétaires, nous en allons dénombrer neuf, ce sont les neuf indicateurs qui nous permettent de comprendre depuis quand et puis comment à l'avenir nous basculerons dans ce qu'on appelle l'Anthropocène. En d'autres termes, l'Anthropocène c'est l'ère géologique qui aurait commencé avec ce qu'on appelle la grande accélération durant les années 50 du siècle dernier, du vingtième siècle, cette grande accélération, c'est-à-dire l'explosion de nos activités économiques, l'explosion de la démographie humaine ont fini par exercer un effet massif sur le système Terre. C'est précisément cet effet massif que l'on mesure avec ces limites planétaires.

Les deux articles qui sont à la source, l'un s'affiche, le dernier, le premier c'était celui de Johan Rockström qui portait justement le nom de limite planétaire, Planetary Boundaries. Cet article qui a été publié en 2009, vous en trouverez la référence en bibliographie, a été revu et corrigé, toujours Rockström dans l'équipe, mais cette fois-ci conduite par Will Steffen qui était dans la publication précédente, cette nouvelle publication a eu lieu en janvier 2015. On verra que là où nous avions, en 2009, franchi trois limites, force est de constater que depuis 2015 nous en avons franchi une de plus.

Ces limites nous font quitter ce qu'on appelle l'Holocène, c'est la période qui aura duré 11 700 ans, qui nous sépare de la fin du précédent âge glaciaire et qui aurait été caractérisée par une relative stabilité des conditions sur Terre et qui aura aménagé les conditions très propices à l'épanouissement de l'agriculture et partant des grandes civilisations. Les deux premières de ces limites, qui je le rappelle ont été franchies, je dirai qu'à elle seule, une seule de ces limites nous fait changer, nous fait basculer, rentrer dans un autre état du système Terre. On bascule dans un autre état du système Terre parce qu'on exerce une influence massive sur ledit système, mais évidemment le système en question va réagir. On entreverra quelques-unes des réactions, on ne les connaît pas toutes, en dénombrant ces différentes limites. Les deux premières limites, celle concernant le changement climatique, celle concernant la biodiversité, même déjà l'érosion des populations, nous les avons déjà franchies et à elles seules, elles nous font basculer dans un état irrémédiablement différent par rapport à celui plus paisible et plus favorable de nos activités que nous avons connu. On va commencer par le climat.

Je vais les prendre assez larges c'est-à-dire que parfois je vais ajouter des choses que vous ne trouverez pas dans les papiers de Rockström ou de Steffen, mais l'idée est de vous donner vraiment les connaissances fondamentales dans le domaine. On va commencer par la première des limites, celle qui concerne le changement climatique et celle qui découle du changement de la composition chimique de l'atmosphère dû à nos émissions de gaz à effet de serre. Je vous rappelle les connaissances fondamentales qui datent du dix-neuvième, un petit peu au-delà du milieu avec Tyndall en 1866, on stabilise nos connaissances sur les principaux gaz à effet de serre, leurs effets. On peut montrer expérimentalement par exemple en quoi le CO₂ piège le rayonnement infrarouge que la Terre restitue à partir de son réchauffement solaire.

Ces connaissances sont assez anciennes, depuis le début des années 70. On a fait un effort de modélisation. Au début, il y avait deux modèles au début des années 70. Il y en a maintenant une cinquantaine qui nous permet de modéliser, de mieux comprendre et d'essayer de discerner les tendances en cours. Je vous rappelle les quatre effets majeurs et directs de ce qu'on appelle le changement climatique, une élévation moyenne de la température. Nous avons déjà connu depuis les années 70 du siècle dernier pratiquement une hausse d'un degré. On peut redouter une hausse de 4 à 6 degrés. On peut espérer aussi que les résultats de la COP 21 nous rapprocheront de l'objectif, les deux, voire un et demi-degré, qu'elle nous permettra de nous éloigner le moins possible des 2 degrés. Encore une fois ici, on est sur une moyenne. Par exemple, durant les époques géologiques précédentes, quand on passe d'un interglaciaire à une ère glaciaire ou vice versa, la température moyenne monte d'un degré pour mille ans. Là, nous serons peut-être à 2, 3, 4 degrés en un siècle. Ça change tout.

Pour avoir une petite idée de l'effet de cette élévation des températures, pensez à la température du corps. C'est un peu une sorte d'analogie. Donc montée générale des températures moyennes, montée du niveau des mers, ensuite modification du régime des pluies et puis quatrième conséquence directe, des événements extrêmes dont les plus extrêmes sont plus nombreux. Si on se fie aux indicateurs donnés par les grands réassureurs mondiaux, Swiss Re, Munich Re, il y aurait désormais trois fois plus d'événements extrêmes qu'il y a une trentaine ou une quarantaine d'années. Ce sont les effets directs du climat.

Maintenant ce qu'il faut bien comprendre, c'est comme je vous l'ai dit tout à l'heure, le changement climatique fait basculer l'ensemble du système. Il faut bien comprendre aussi qu'on est sur une très longue durée, donc 1800 ans, il y aura toujours 65 % du surcroît de gaz à effet de serre que nous aurons injecté dans l'atmosphère. Compte tenu de l'inertie du système, si par exemple on atteint au cours du siècle prochain une élévation moyenne de la température de 5 degrés, ces 5 degrés, on va probablement les garder pendant plusieurs milliers d'années, probablement 5 000 ans, ensuite avec un lent decrescendo. Il faut 100 000 ans pour qu'un surcroît important de dioxyde de carbone soit absorbé par la biosphère et il n'est pas en totalité absorbé, il reste toujours une sorte de solde au bout du compte.

On est vraiment sur des changements très importants, des changements qui sont des changements irréversibles. Ce qu'il faut voir aussi en cette matière, même si on a des connaissances générales qui sont stabilisées, en revanche c'est une mécanique tellement complexe, le climat, qu'on n'est pas à l'abri de surprises et parfois de mauvaises surprises. On

a pu constater dans la littérature, au début de l'année 2016 que probablement il fallait revoir le rôle des nuages parce que dans les nuages, il y a à la fois des gouttelettes d'eau qui exercent l'effet de serre et des cristaux de glace qui au contraire renvoie l'énergie solaire dans l'espace, mais il semblerait que l'effet gouttelettes soit plus important que l'effet cristaux. Si tel était le cas, il faudrait vraiment revoir tous nos modèles et tout ce qu'on appelle la sensibilité du climat aux émissions que l'on envoie dans l'atmosphère. Voilà pour la première des limites, celle-là nous l'avons excédée. Il aurait fallu pour ne pas l'excéder, ne pas dépasser les 350 ppm d'équivalent carbone, c'est-à-dire 350 molécules de dioxyde de carbone pour un volume d'un million de molécules d'air. On a maintenant sensiblement dépassé les 400 ppm. Ça, c'est encore une fois pour la première des limites que nous avons dépassées, celle qui concerne le changement climatique.

La deuxième limite que nous avons dépassée concerne la biodiversité. On va distinguer trois choses en matière de biodiversité. On va distinguer l'érosion des populations sans prendre en compte la diversité génétique. On va distinguer ensuite le rythme d'érosion des espèces et donc aussi partant la diversité génétique. On considérera ensuite les effets en termes de biodiversité fonctionnelle même s'ils sont plus difficiles à comprendre.

On va commencer par l'érosion des populations. Je vous propose de voir ça très rapidement. Vous avez devant vous une carte qui vous indique la richesse halieutique au début du vingtième siècle et regardez maintenant ce qu'il en est au début du vingt et unième siècle. On n'a pas vidé les océans, mais ça n'est pas très, très loin et c'est très symptomatique de ce que nous avons fait. Quand on parle de vivant et de biodiversité, on met de côté le socle bactérien de la vie. On regarde la disparition des espèces plus complexes pluricellulaires. Maintenant je reviens, je laisse tomber la diversité génétique. Je ne considère que l'érosion des populations et l'érosion des populations sauvages. Entre 1970 et 2010, c'est la moitié des mammifères, la moitié des oiseaux, la moitié des poissons, vous l'aviez sur ces transparents, la moitié des amphibiens, la moitié des reptiliens qui ont disparu et comme vous le savez, ce n'est pas beaucoup mieux pour les populations d'insectes. On touche vraiment à un élément essentiel à la vie. Une partie de ces populations sauvages qui ont disparu ont été, entre guillemets, compensées, mais ça n'a rien à voir en termes de diversité génétique par les populations domestiques. On constate une érosion très forte. Évoquons désormais l'érosion de la biodiversité à proprement parler, c'est-à-dire le rythme de disparition des espèces et donc derrière de la richesse génétique. Je vais prendre un critère qui n'est pas exactement celui mobilisé par les deux articles, ceux de Rockström et ceux de Steffen. Je vais en prendre un autre et je vais prendre l'indicateur qui concerne le nombre d'espèces disparaissant en un siècle sur 10 000. Avant de vous donner ce chiffre, je voudrais rappeler une chose qui est extrêmement importante, quand on parle d'érosion de la biodiversité, on ne prend pas en compte le socle bactérien qui est vraiment la base du vivant. On ne décompte que l'érosion des organismes pluricellulaires plus complexes.

Durant l'histoire de la Terre, les espèces disparaissaient au rythme suivant, deux espèces sur 10 000 par siècle. Suivant les catégories qu'on considère, on est au moins à 100 espèces sur 10 000 par siècle et dans certains cas, on peut même monter à 800 000 disparitions d'espèces par siècle. On est vraiment sur une accélération tout à fait notable du rythme de la biodiversité

qui nous renvoie aux grandes extinctions du passé. Nous serions dans une sixième extinction en cours auquel le changement climatique que nous venons de voir va lui aussi contribuer. Là aussi, on est vraiment dans un basculement. Vous vous en souvenez, on est dans le deuxième domaine où nous franchissons une limite.

À ces aspects qu'on vient d'envisager, érosion des populations en général, érosion de la biodiversité et donc réduction de la diversité génétique sous-jacente, on doit aussi ajouter les effets sur la biodiversité fonctionnelle, c'est-à-dire sur les services que nous rendent les écosystèmes et sans lesquels nous et les autres espèces ne pourrions pas vivre sur Terre. Il y a trois catégories essentielles, la première ce sont les services de fournitures, les fibres, le lin, le chanvre, le coton, le bois de chauffe, le bois de construction, les différentes molécules qu'on utilise, les céréales, les légumes, le cheptel, etc. Ça, c'est la première catégorie de services. La seconde, ce sont les services de régulation, régulation du climat à l'échelle locale, régulation des populations pathogènes, régénération de la fertilité des sols, épuration de l'eau, etc. Et troisième catégorie, c'est plutôt ce qui renvoie à la culture, par exemple pour nous les aménités que nous procure la nature dans le cadre du tourisme ou au quotidien, la préservation de telle espèce animale, végétale pour tel ou tel peuple, et puis dessous les très grands services fondamentaux. Or sur ces 24 services, déjà dès 2005 on devait dénombrer 15 qui sont déjà surexploités et les autres en voie de surexploitation.

D'une façon générale on voit bien que tout ce qui touche le vivant, qui est aujourd'hui en train de subir des changements profonds et violents, qui comme avec le climat nous font basculer dans un état du système Terre qui ne nous sera pas favorable et comme pour le climat, les raisons du basculement sont déjà là, les mécanismes sont là, mais les conséquences se déploient toujours avec quelques décennies de retard, mais nous commençons à les voir arriver.

Autres changements globaux

Dominique Bourg

Professeur – Université de Lausanne

Nous allons aborder maintenant la troisième des limites planétaires que nous avons outrepassée. C'est celle qui concerne deux grands cycles biogéochimiques : celui du phosphore et celui de l'azote, les deux étant très directement liés à nos activités agricoles, en d'autres termes aux activités qui nous permettent de nous nourrir. Alors on avait déjà abordé un autre cycle, grand cycle biogéochimique, celui du carbone. Celui du carbone est sur une durée très longue, là on touche plutôt le vivant, mais cela dit les conséquences sont déjà importantes, ces perturbations du cycle de l'azote, du cycle du phosphore, multiplient sur Terre les milieux anoxiques, si vous voulez asphyxiants, et si ça changeait d'échelle ça deviendrait relativement inquiétant. Donc ça, c'est la troisième des limites que nous avons outrepassée. [SEP] Nous allons aborder désormais une quatrième limite, que nous avons là aussi outrepassée, et ce n'était pas le cas en 2009, avec la publication du premier papier de Johan Rockström, mais c'est le cas depuis janvier 2015 avec la publication du papier de Will Steffen, celles-ci concernent le changement d'occupation des sols et évidemment au premier chef celui de la déforestation. La déforestation de la forêt amazonienne, par exemple, qui était un régulateur dans le système du régime mondial des pluies, a une influence non négligeable sur ce régime mondial des pluies et le modifie. On est là, encore une fois, dans une limite, un franchissement de limite, qui a une portée systémique même si elle est moins importante que, comme nous l'avons vu, celle de la biodiversité ou celle du climat. Donc ça, c'est la quatrième limite que nous avons franchie sur neuf.

Maintenant concernant les limites qui suivent, on va voir que soit nous ne les avons pas encore franchies, soit qu'on ne sait pas déterminer le seuil de franchissement. Alors concernant la consommation d'eau douce, évidemment il y a quinze mille kilomètres cubes qui sont disponibles d'eau douce, pour tout le vivant, et sur ces quinze mille il faudrait que les activités humaines ne dépassent pas les quatre mille kilomètres cubes. Pour le moment on en est à deux mille six cents, tout simplement parce qu'il faut que le reste du vivant, et la végétation, puissent vivre. Or, si l'on regarde certaines tendances, si l'on regarde certains calculs, pour deux raisons : d'une part l'augmentation de la démographie mondiale, l'augmentation de nos activités, mais aussi effectivement l'augmentation de la végétation, qui par certains côtés est due à l'enrichissement de l'atmosphère en dioxyde de carbone, pourrait nous amener peut-être vers le milieu du siècle à dépasser cette limite fixée aux occupations humaines, et aller peut-être jusqu'à quatre mille six cents kilomètres cubes d'eau consommés par l'Humanité. Alors ça, c'est donc la dernière limite qu'on vient d'envisager. Encore une fois nous ne l'avons pas dépassée, mais on peut imaginer qu'il nous serait possible de la dépasser dans les décennies qui viennent.

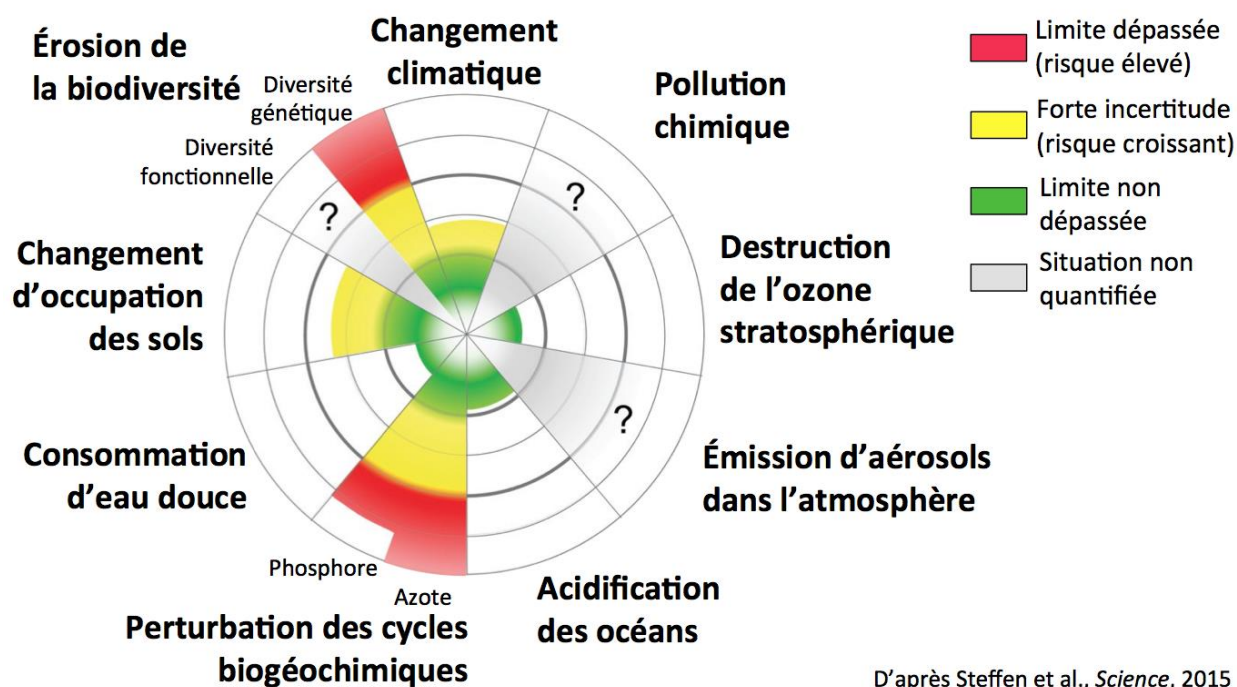
Autre limite, cette fois-ci celle-ci on n'a pas la possibilité de la quantifier. Alors dans le papier de Rockström, on parlait de pollution chimique, d'ailleurs on vous a laissait l'expression

pollution chimique. On parle plutôt aujourd'hui, et dans le papier de Steffen, celui de 2015 et non 2009, on parle plutôt d'introduction de matériaux étrangers. Parce qu'il n'y a pas que les pollutions chimiques, on peut avoir des métaux lourds, on peut avoir aussi d'autres choses, par exemple la radioactivité, par exemple les nanoparticules, et cetera. On introduit dans le système Biosphère, qui va donc du système Terre, c'est notre façon de le nommer, des éléments étrangers dont on sait qu'ils peuvent perturber, mais on n'arrive pas, comme je vous le disais, à fixer le seuil à partir duquel ces perturbations commenceraient à avoir un effet global dangereux, faisant basculer à leur tour aussi le système Terre.

Alors autre limite encore, c'est la destruction de l'ozone stratosphérique. Là c'est un des premiers soucis de dégradation globale que nous ayons eus à connaître, dès les années quatre-vingt. Il y a eu le protocole de Montréal, donc on a réduit vraiment nos émissions et là c'est le seul domaine par rapport auquel évidemment nous n'avons aussi pas dépassé la limite, mais on a même régressé dans nos dégradations, dans nos destructions. C'est sur les neuf limites c'est la seule qu'on puisse considérer avec un petit peu plus d'optimisme.

Alors on passe à la suivante. Là aussi les émissions d'aérosols dans l'atmosphère. Alors elles peuvent être d'origine industrielle, elles peuvent être d'origine agricole, du coup on forme des petits aérosols qui vont en fait renvoyer une partie de l'énergie solaire dans l'espace, réduire la photosynthèse, de façon très modérée, mais quand même la réduire. Aujourd'hui c'est plutôt ce qu'on appelle encore, même si ce n'est plus très approprié, le Sud, qui est à l'origine de l'essentiel des émissions d'aérosols dans l'atmosphère. Et comme ces aérosols ont un effet nuisible sur la santé humaine, pas absurde de penser qu'on va réussir à les réduire dans les décennies qui viennent, mais du coup on induira aussi une petite augmentation de l'effet de serre et du réchauffement de la planète.

Enfin dernière limite, celle-ci que nous n'avons pas encore franchie, c'est celle qui concerne l'acidification des océans. L'acidification des océans c'est tout simplement une conséquence directe du changement climatique et de la cause du changement climatique, le changement de la composition chimique de l'atmosphère, le dioxyde de carbone, on l'appelait autrefois l'acide carbonique. Donc effectivement c'est acide, ça change très légèrement le pH des océans, et effectivement si on continuait sur cette lancée on finirait par intensifier ce qu'on a commencé à faire, c'est-à-dire fragiliser certains fondements de la chaîne trophique marine, puisqu'on vient empêcher les organismes qui se structurent de pouvoir le faire. Donc c'est la dernière des neuf limites que nous avons envisagées, et maintenant nous allons résumer l'ensemble avec le dernier des tableaux, que je vais un tout petit peu vous commenter.



Donc là c'est le tableau général sur les fameuses neuf limites : la zone en vert, c'est la zone qu'il ne faudrait pas dépasser, compte tenu des différentes incertitudes, on rentre dans la zone de danger, tout d'abord dans une zone intermédiaire, celle où on a un certain nombre d'incertitudes. C'est la zone jaune, et donc là vous le voyez, elle a été franchie pour quatre domaines. Et puis même pour certains de ces domaines, par exemple là les perturbations du cycle de l'azote et du phosphore, par exemple pour l'azote, le cycle de l'azote est aujourd'hui deux fois et demie ce qu'il serait sans les activités humaines, alors que par exemple en revanche si l'on regarde le dioxyde de carbone on a fait entre guillemets qu'ajouter 40 % de dioxyde de carbone de plus dans l'atmosphère. Donc on n'est pas dans les mêmes ordres de grandeur. Mais comme je l'ai dit tout à l'heure, là on est avec les perturbations de cycles biogéochimiques sur une durée plus courte parce que ça touche quand même essentiellement le vivant, alors que le cycle du carbone est un cycle au très long cours, nous l'avons vu tout à l'heure.

Donc au-delà de ces zones d'incertitude, il y a un moment donné où on sait qu'alors vraiment le basculement est gigantesque et là on rentre dans la zone rouge. On l'a fait pour la diversité génétique, on l'a fait pour ces deux grands cycles biogéochimiques, ceux de l'azote et ceux du phosphore. Donc ce schéma-là est plus approprié, plus nuancé, que le schéma de 2009 pour lequel il n'y avait eu que trois franchissements. Là si on compte le jaune, l'entrée dans la zone de danger, on a quatre franchissements sur quatre. Nous avons franchi quatre des neuf limites, pour trois je vous le rappelle, et on l'a vu, on ne s'est pas fixé le seuil. Donc nous avons, si on se fie à cette batterie d'indicateurs, nous avons vraiment basculé dans un système différent, nous avons vraiment basculé dans l'Anthropocène.