

LES LIMITES A LA CROISSANCE

30 ans après

Résumé

L'association Réseau Mycélium a pour objectif d'accompagner les individus dans leur prise de conscience des crises écologiques actuelles. Pour cela, nous rédigeons et partageons des résumés de livres ou rapports afin de faciliter vos choix de lecture ou de vous donner accès aux grandes lignes de ces écrits sans avoir à les lire intégralement.

Pour plus d'infos sur Réseau Mycélium, rendez-vous sur notre site Internet :

<http://reseaumycelium.org/>



Ce document résume *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, écrit par **Dennis et Donella Meadows** ainsi que **Jorgen Randers**, et publié en **2002**, 30 ans après la parution du rapport du Club de Rome.

Tout d'abord, les notions classiques de dynamique des systèmes sont rappelées : limites, dépassement, boucles de rétroactions... Puis, la construction de la modélisation du système Terre est présentée, notamment en décrivant le fonctionnement du système économique et les différentes sources et exutoires terrestres. Ensuite, les hypothèses structurantes utilisées dans World3 sont exposées et les différents scénarios, dépendant pour la plupart de changement d'hypothèses sur la valeur de certains paramètres, sont décrits. Enfin, les auteurs concluent en comparant les scénarios qui aboutissent à un effondrement aux scénarios qui n'y aboutissent pas, et tentent d'en comprendre les conditions pour une transition de la durabilité.

Sommaire

1. Le dépassement	3
2. Le moteur : la croissance exponentielle	3
3. Les limites : sources et exutoires	6
Les ressources renouvelables	6
Les ressources non renouvelables	9
Exutoires pour la pollution et les déchets.....	10
4. World3 : la dynamique de la croissance dans un monde fini	11
5. L'histoire de la couche d'ozone ou la preuve qu'il est possible de redescendre en deçà des limites	14
6. La technologie, les marchés et le dépassement.....	15
7. Transitions vers un système soutenable	17
8. Transition vers la durabilité : les outils.....	18

1. Le dépassement

On parle de dépassement « lorsqu'on va trop loin, qu'on va au-delà de certaines limites de façon accidentelle, sans l'avoir voulu », par exemple, lorsque l'on a trop bu. Il y a 3 caractéristiques d'un dépassement :

- Une croissance, accélération et un changement rapide
- La confrontation à une limite que le système en mouvement ne peut franchir sans risque
- Un retard ou une erreur dans la prise de conscience et dans la mise en place de mesures destinées à maintenir le système en deçà de la limite
- Le changement et la limite peuvent être de nature physique, organisationnel, psychologique, politique... Nous franchissons régulièrement des limites et arrivons souvent à éviter ou réduire les conséquences. Par exemple, lorsqu'on a trop bu, on boit de l'eau avant de dormir, ou on prolonge la grasse matinée pour minimiser la gueule de bois au lever.

Ce livre se concentre sur le système planétaire, soumis à une croissance démographique et matérielle qui génère une accélération de l'augmentation de l'empreinte écologique, définie comme « la relation entre ce que l'humanité exige de la planète et ce que cette dernière peut lui fournir ». Cette accélération a déjà entraîné depuis plusieurs dizaines d'années un dépassement de ce que la Terre peut nous fournir durablement : nous puisons trop pour que celle-ci puisse dans le même temps régénérer ses ressources. Face à ce dépassement, il est possible d'atténuer prudemment notre empreinte, ou de s'exposer à un accident.

Le raisonnement et les conclusions exposées dans ce livre résultent de la considération de 4 éléments :

- Les théories scientifiques et économiques classiques sur le système mondial
- Des données sur les ressources mondiales et l'environnement
- Un modèle informatique permettant d'intégrer ces données et de faire une projection de leurs implications
- La « vision du monde » personnelle des auteurs, qui est une approche systémique

2. Le moteur : la croissance exponentielle

En mathématiques, la fonction exponentielle est égale à propre dérivée. Par conséquent, plus elle croît, plus elle croît vite, et inversement. L'exemple classique est celui du nénuphar dans une mare, dont la quantité double chaque jour. Le premier jour, il n'y a qu'un nénuphar, et la croissance est très faible. L'avant dernier jour, la moitié de la mare est recouverte, et la croissance est forte : le jour suivant, toute la mare sera recouverte. Le temps de doublement d'une fonction exponentielle est d'environ 72, divisé par le taux d'accroissement (en%).

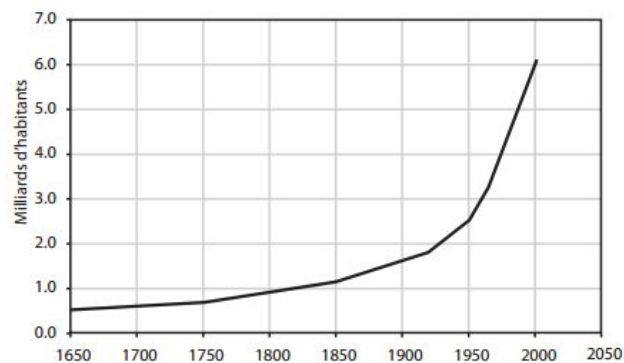
La population du Nigeria est passée de 36 millions en 1950 à 125 millions en 2000. A ce rythme, il y aura 1 milliard de Nigériens en 2087. A la différence que ce pays subit déjà des problèmes de faim et de détérioration de leur environnement, et il semble évident que cette croissance n'est pas réalisable. Cet exemple sert à illustrer « qu'une croissance exponentielle ne peut jamais continuer très longtemps dans un contexte d'espace et de ressources finis ».

En dynamique des systèmes, dès que le stock d'un système est pris dans une boucle de rétroaction positive, il a le potentiel de croître de façon exponentielle. Une telle boucle permet la réalisation de cercles vicieux ou vertueux. Inversement, une boucle de rétroaction négative a un caractère stabilisant.

Certaines croissances sont dites « inhérentes » car elles sont autoreproductrices, comme la population, mais aussi le capital industriel. En effet, la production de machines et usines permet d'accélérer la production de machines et d'usines. La violence et la corruption sont aussi des boucles de rétroaction positive.

Puis, il y a des croissances exponentielles entraînées, comme la production de nourriture, l'utilisation de ressources, la pollution et la production de déchets, qui sont toutes entraînées par la croissance démographique et économique. Autrement dit, l'empreinte écologique est entraînée par la croissance démographique et économique dans le système socio-économique actuel.

Voici l'évolution de la population mondiale depuis 1650 :



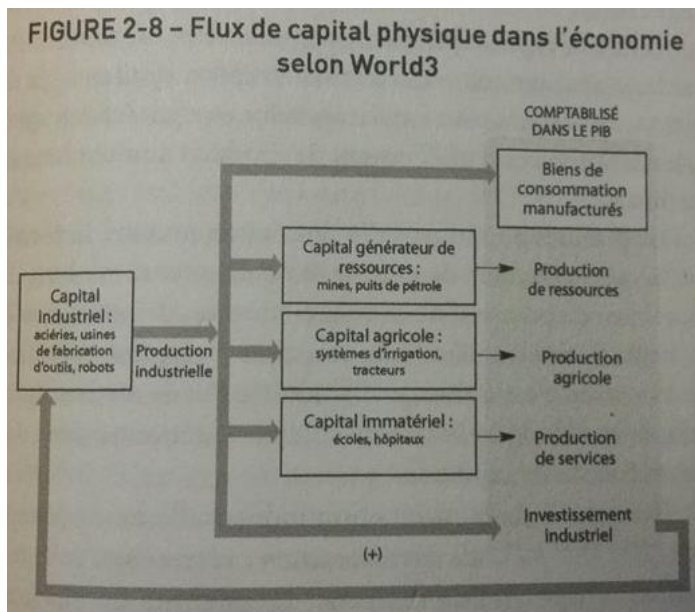
<https://www.consoqlobe.com/demographie-croissance-desequilibree-continue-1771-cq>

En plus d'être exponentielle, le taux d'accroissement a aussi augmenté entre 1650 (0,3%) et 1965 (2%). Cependant en 2000, il avait baissé (1,2%). On parle de transition démographique. Selon cette théorie, les sociétés préindustrielles connaissent des taux de fécondité et de mortalité élevés et une croissance démographique lente. Puis, à mesure que l'alimentation et les services de santé s'améliorent, la mortalité chute. Enfin, les individus et les modes de vie évoluant vers un modèle de société entièrement industrialisée, le taux de natalité baisse à son tour et l'accroissement naturel ralentit.

Dans les pays riches, les taux de natalité et de mortalité évoluent lentement (ils sont en légère baisse). Tandis que dans les pays plus pauvres, les taux de décès ont chuté brutalement, générant une croissance démographique élevée.

La baisse de natalité dans les pays industrialisés serait due à l'éducation, l'emploi (surtout pour les femmes), le RNB, la planification familiale, la faible mortalité infantile et une « distribution relativement égalitaire des revenus et des opportunités ».

World3 a modélisé l'économie ainsi :



L'accent est mis sur l'économie physique, et non sur l'économie monétaire. Le capital industriel renvoie aux machines et aux usines qui produisent des biens manufacturés. Ce capital industriel s'autoreproduit (boucle de rétroaction positive), et il est boosté par le taux d'investissement. A l'inverse, il est amoindri par la dépréciation (boucle de rétroaction négative).

World3 considère par défaut qu'une société préindustrielle développe son agriculture, puis lorsque la boucle de capital industriel se met en place, l'industrie se développe, puis le tertiaire, qui génère aussi des flux physiques, même s'ils sont moins visibles.

La croissance est nécessaire pour lutter contre la pauvreté. Mais dans le système actuel, elle est structurée telle qu'elle ne le permet pas. Les inégalités entre pays riches et pays pauvres continuent d'augmenter, et au sein des pays riches, les écarts se creusent entre les plus riches et les autres.

Selon les auteurs, les causes de ce phénomène sont structurelles. Dans nos sociétés, les privilégiés sont plus récompensés, ce qui leur donnent toujours plus de privilèges. Mais cela n'est pas pris en compte dans World3 car ce modèle ne traduit pas la dynamique des revenus, de la richesse ou de la répartition du pouvoir.

Cependant, il devient alors plus facile d'investir et de faire fructifier le capital pour les riches, qui ont acquis à fortiori un énorme stock de capitaux. Puis, dans les pays riches, la croissance démographique est lente, ce qui permet d'accorder plus de capitaux à la croissance économique qu'à la satisfaction des besoins « primaires » de la population.

Tandis que dans les pays pauvres, la croissance économique permet de développer des infrastructures, biens et services pour les besoins primaires (hôpitaux, écoles...), et peu de capitaux sont réinvestis dans l'industrie. La croissance n'est pas consacrée à l'investissement mais à la consommation. La boucle du capital industriel à du mal à s'accélérer et la croissance reste lente. Les pays pauvres sont « piégés ».

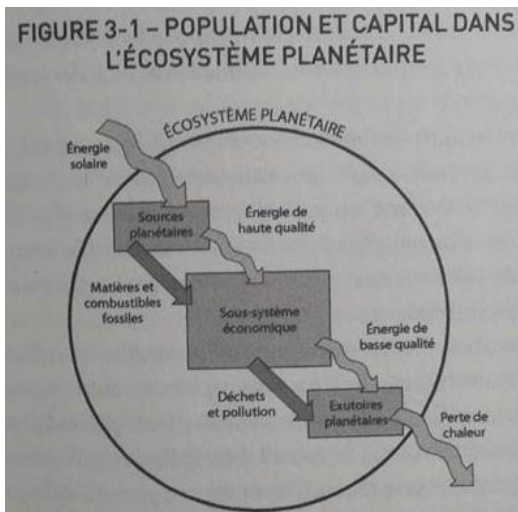
Ainsi, les pays riches ont une croissance économique forte et une croissance démographique lente, et inversement pour les pays pauvres.

Cependant, dans les deux cas, il y a croissance, et notamment croissance de l'empreinte écologique, qui ne peut pas augmenter indéfiniment et va s'arrêter. Elle entraînera l'arrêt des croissances industrielles (chute du taux d'investissement, dépréciation du capital) et démographiques (baisse de la natalité, augmentation de la mortalité). « Nous devons abandonner les causes de la croissance pour nous tourner vers les limites qui se posent à cette croissance ».

3. Les limites : sources et exutoires

L'accès aux matières premières va être de plus en plus cher, jusqu'à ce qu'il ne puisse plus supporter le besoin de l'industrie et que l'économie se contracte. Les auteurs précisent qu'ils n'ont pas de preuve absolue, mais présentent les indices qui crédibilisent cette conclusion. Deux types de ressources sont nécessaires à la croissance :

- Les ressources physiques : eau, écosystèmes, ressources minières, énergies, terres fertiles. Ces ressources sont tangibles, mais il est difficile d'estimer les quantités disponibles et certains Etats ne sont pas transparents pour des raisons économiques et politiques.
- Les besoins sociaux : stabilité sociale d'un pays. Ces ressources sont difficiles à estimer et World3 considère simplement que la situation sociale est idéale.



Les ressources physiques sont extraites des sources, transformées, puis terminent en déchets et polluants. Une partie de l'énergie est cependant perdue en chaleur.

Selon Daly, voici comment définir les limites soutenables :

- Concernant les ressources renouvelables, il ne faut pas qu'elles soient épuisées plus vite qu'elles ne se régénèrent.
- Concernant les ressources non renouvelables, leur utilisation ne doit pas dépasser le rythme auquel une ressource renouvelable peut les remplacer.
- Concernant les polluants, le rythme d'émission

dans les exutoires ne doit pas dépasser le rythme de recyclage, absorption ou de désintoxication des polluants.

Ces 3 limites ne sont pas étudiées dans World3, mais examinées par les auteurs dans ce chapitre.

Les ressources renouvelables

Les terres arables

Entre 1950 et 2000, la production de céréales a plus que triplé (+ de 2 milliards de t/an en 2000). Mais il y a eu un pic en production par habitants en 1985. Cependant, il y a largement assez de nourriture pour tous les habitants, seulement elle est mal répartie, la plupart des céréales sont destinés aux animaux, et on en jette entre 10 % et 40 %. La faim dans le monde n'augmente pas mais diminue lentement.

Environ 1,5 milliards d'hectares sont cultivés dans le monde, un chiffre constant depuis 30 ans, mais des rendements qui augmentent. Mais ce ne sont pas les mêmes terres. Les terres cultivées sont délaissées pour d'autres terres à cultiver : 2 milliards d'hectares auraient été transformés en terres incultes.

L'érosion des sols s'accélère. La perte d'humus s'accroît. En 1994, 38 % des terres agricoles étaient dégradées. La perte de sols est aussi engendrée par l'urbanisation, qui n'a pas encore été le sujet d'étude à l'échelle mondiale, mais qui est de l'ordre de milliers à millions d'hectares de terres cultivées perdus par an selon les pays.

Les rendements de certaines céréales comme le maïs ou le riz ralentissent ou stagnent. De plus, en considérant que les terres cultivables sont de l'ordre de 4 milliards d'hectares, il faudrait utiliser quasiment toutes ces ressources pour nourrir toute la planète en 2100 au niveau d'un Européen, si les rendements n'augmentent pas. Si la quantité de terres arables diminue (car on continue d'en consommer non durablement, l'érosion et le changement climatique agissent), nous pourrions avoir de graves problèmes d'approvisionnement en produits alimentaires.

Il existe d'autres limites à l'exploitation des sols : épuisements de ressources non renouvelables en eau, rejets de nutriments, et la raréfaction de l'énergie.

Alors que les pratiques biologiques permettent d'atteindre des rendements aussi élevés que l'agriculture conventionnelle, et de façon durable. Par contre, les biotechnologies semblent trop technologiques et coûteuses, et présentent de potentiels risques pour l'environnement.

L'eau

L'eau est vitale et non remplaçable. De plus, elle est utile pour de nombreuses activités humaines. La disponibilité en eau est une question locale, dépendant des réserves et des flux locaux, eux-mêmes dépendant de mécanismes locaux comme la vitesse d'infiltration des eaux souterraines et la vitesse de fonte des glaces.

Sur les 40700 km³ de flux annuel d'eau douce, seulement 11000 sont naturellement disponibles car les autres correspondent aux crues. Cependant avec l'installation de barrages, une partie des eaux perdues en crues est stockée, ce qui augmente cette limite. La salinisation est aussi un moyen de repousser la limite. Par ailleurs il faut soustraire à ces gains les eaux qui s'écoulent dans des régions du monde non exploitées comme en Amazonie, ou dans le cercle Arctique. Dans ces cas, le transport d'eau est aussi un moyen de repousser cette limite. Mais ces moyens de repousser sont chers et énergivores. La consommation annuelle en eau est de l'ordre de 7000 km³. Elle comprend les prélèvements aux cours d'eau non directement rendus, et la dilution de la pollution (mais pas le flux utilisé).

De plus, les aquifères sont surexploités à un rythme trop rapide pour qu'ils se régénèrent. Et la croissance démographique laisse présager de nombreuses pénuries avant 2100. Mais l'eau se raréfie déjà dans beaucoup de régions. Aux USA, il y a eu un pic de consommation globale en 1980. Le stress hydrique touche et va toucher de plus en plus de populations. Pour y faire face, certains pays comme l'Iran et l'Égypte importent leurs céréales pour ne plus irriguer ces productions.

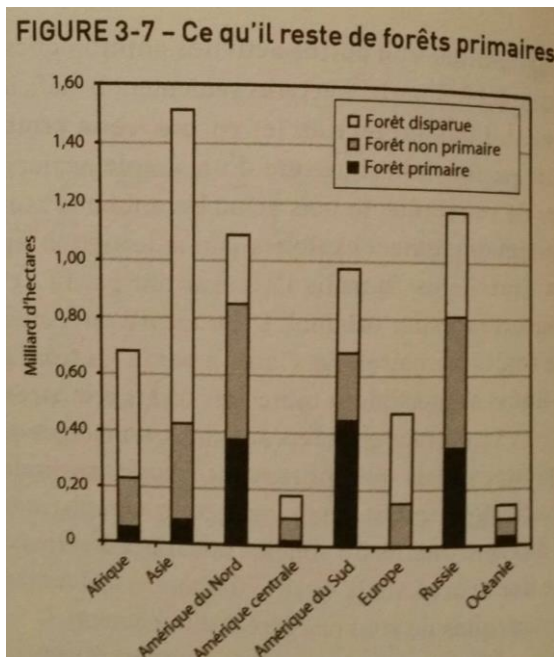
Il existe cependant de nombreuses solutions pour réduire la consommation d'eau : utiliser l'eau plusieurs fois selon la qualité et l'usage, opter pour l'irrigation goutte-à-goutte, utiliser des robinets, toilettes, lave-linges à faible débit, réparer les fuites des réseaux, planter des végétaux adaptés au climat, recycler l'eau (ce qui n'est pas fait partout) ou encore collecter les eaux de pluie dans les zones urbaines. Enfin, rien qu'en faisant prendre conscience au consommateur de sa consommation, avec une mise à disposition de compteurs notamment, l'expérience montre que la consommation peut être réduite de 30 à 40 % (exp. réalisée à NY et Denver).

Enfin, le changement climatique risque de perturber tout le cycle de l'eau. Protéger le climat, c'est aussi protéger l'accès à l'eau.

Les forêts

Les forêts régulent le cycle de l'eau (modèrent le climat, contrôlent les inondations, stockent l'eau pour lutter contre la sécheresse), atténuent l'érosion des sols par la pluie, empêche les glissements de terrain, stockent du CO2...

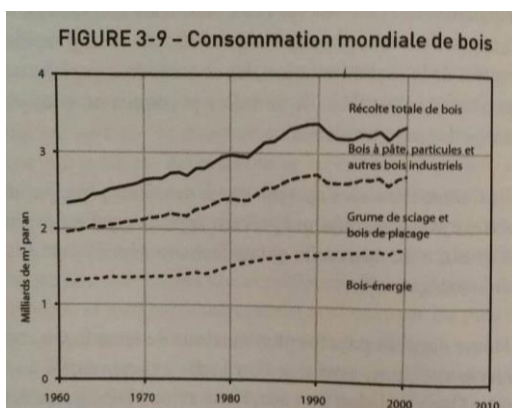
Voici un état des lieux de la situation des forêts dans le monde.



Concernant la vitesse de déforestation, les chiffres semblent controversés car difficiles à estimer, d'autant plus que certaines données sont polluées par la corruption. Entre 1980 et 2000, la déforestation aurait été de l'ordre de 11 millions d'hectares/an, avec un pic en 1985 de 20 millions d'hectares/an. Et c'est seulement en comptant la reconversion des surfaces en terres agricoles ou d'élevage, sans compter les feux de forêts (3,5 en 1997-1998 au Mexique, Amérique centrale et Amérique du Sud) et l'exploitation du bois. Bref, en considérant un rythme constant de disparition de forêt tropicale de 20 millions d'hectares/an, on calcule que la forêt aura presque disparue en 100 ans.

Il y a plusieurs responsables : les Etats qui cherchent des sources de revenus, les multinationales du bois et du papier, les agriculteurs et éleveurs, et les habitants.

La consommation de bois continue d'augmenter :



Un américain consomme 330kg de papier/an. Si la planète consommait comme les pays industrialisés, la demande doublerait.

Mais il existe des solutions. Le recyclage du papier est de 41 % en moyenne dans le monde. Et dans certains pays il est bien plus élevé, comme aux Pays-bas, de 96 %. L'efficacité de la scierie peut aussi progresser. Entre 40 et 50 % de bois traité vendable dans les scieries modernes, contre 25 à 30 % dans les pays en développement. Il est aussi possible d'améliorer l'efficacité des fours pour réduire la demande en bois

comme combustible. Puis, la moitié du papier et du carton est utilisée pour la publicité et les emballages, on peut envisager de réduire drastiquement ces usages. Enfin, il faut instaurer une tarification plus juste sur l'industrie du bois.

En plus de cette réduction de la demande, il faut continuer à développer l'exploitation raisonnée des forêts, qui consiste à couper de façon sélective pour conserver les atouts et la résilience de la forêt. Puis, il faut exploiter plus de forêts forestières pour plus protéger les forêts naturelles.

Les espèces et services écosystémiques

La liste des services écosystémiques est longue : purification de l'air et de l'eau, absorption et stockage d'eau, atténuation des sécheresses et des inondations, décomposition, décontamination et séquestration des déchets, régénération des nutriments du sol, constitution de la structure du sol, pollinisation, contrôle des nuisibles, dissémination des graines et des nutriments, modération de phénomènes climatiques extrêmes, fourniture d'une grande variété de produits agricoles, médicaux et industriels, développement et entretien de l'ensemble des systèmes qui fournissent tous ces services ou encore source d'inspiration éthique, spirituelle et intellectuelle. Robert Costanza a estimé la valeur économique de ces services à 33000 milliards de \$, le chiffre et la méthode sont controversés, mais cela donne un ordre de grandeur : les services de la nature ne valent pas moins que la production humaine.

WWF cherche à estimer la perte de ces services en estimant le taux d'extinction des espèces, sauf qu'on ne connaît que 1,5 millions d'espèces alors qu'on soupçonne qu'il en existe entre 3 et 30 millions. En extrapolant, WWF estime un déclin des populations de 37 % entre 1970 et 2000. On parle de 6ème extinction de masse. Le taux d'extinction serait 1000 fois plus élevé que le taux d'extinction de fond.

Les ressources non renouvelables

Les combustibles fossiles

La consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter depuis 1950. Les ressources fossiles représentent 80 % de la production d'énergie primaire. Elles ne sont pas renouvelables à l'échelle de temps humaine, donc les stocks sont finis. Un stock de matière dans la croûte terrestre se caractérise par une distinction entre les réserves et les ressources ultimes. Les réserves sont les stocks explorés, exploités ou supposés exploitables dans les conditions technico-économiques actuelles. Les ressources ultimes regroupent les réserves ainsi que les stocks non exploitables (dans le contexte actuel) et les stocks non explorés mais découverts.

Concernant les ressources fossiles, il y a débat sur l'épuisement des stocks car il y a une confusion entre ressources ultimes et réserves. Les réserves diminuent car on les exploite, mais augmentent car les techniques d'extraction évoluent, et les découvertes de nouveaux stocks viennent parfois s'ajouter aux réserves existantes. Ainsi, l'estimation d'une date de pénurie (réserve/production annuelle actuelle) s'est allongée durant les dernières décennies. Mais cela ne va pas durer. Les découvertes de nouveaux stocks sont beaucoup moins nombreuses que lors du siècle précédent. Les réserves exploitées sont de plus en plus difficiles d'accès (le Taux de Retour Énergétique augmente) et la production risque de ralentir au point d'atteindre un pic, avant de décroître. Concernant le pétrole, on parle d'un pic avant 2025. Concernant le gaz naturel et le charbon, les réserves sont encore largement abondantes pour ne pas poser de problèmes d'approvisionnement durant plusieurs décennies (voir plusieurs siècles) si la production n'augmente pas trop.

Sauf que le pic pétrolier risque de perturber le mix énergétique mondial. Il est possible que pour répondre à la demande mondiale, il soit rapidement remplacé par le gaz naturel. Puis, le

réchauffement climatique tend à réduire la part du charbon et du pétrole, et le gaz naturel, moins polluant, est envisagé pour les remplacer, au moins à moyen terme.

Mais globalement, la consommation de ces ressources est vouée à disparaître, que ce soit à cause des ressources ou de la pollution qu'elle engendre. Les solutions évoquées sont le développement des énergies renouvelables, très prometteuses, ainsi que l'efficacité énergétique, notamment des bâtiments et des moteurs thermiques. Mais ces deux solutions risquent de se développer trop lentement par rapport au déclin du pétrole et du charbon, et c'est pourquoi le gaz naturel est une solution transitoire qui semble pertinente.

Les métaux

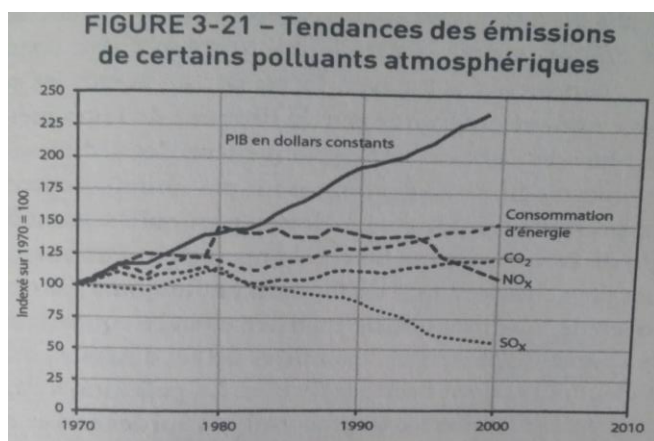
Les inégalités sont fortes concernant les métaux. Par exemple, si tout le monde consommait comme un américain, les productions d'acier, de cuivre et d'aluminium seraient multipliées par 5, 8 et 9. Pour la plupart des métaux, la croissance sur le dernier siècle est vertigineuse.

Cependant, on peut remarquer que la croissance de production d'acier s'est ralentie depuis les chocs pétroliers. Et cela illustre bien les évolutions auxquelles sont soumis les industriels du minéral : stagnation économique, élévation des prix, développement du recyclage, tendance à la dématérialisation et substitution par des matériaux plastiques ou composites. Par ailleurs, l'éco-conception permet de plus en plus de recycler plus de déchets, allonge la durée de vie des produits et les possibilités de réemploi.

Car, bien que les techniques d'extraction et de production évoluent, l'exploitation des minerais « a un coût de plus en plus élevé, un coût qui se mesure en énergie, en capital, en impact environnemental et en instabilité sociale ». Si les stocks de ressources se mesurent généralement en centaines ou milliers d'années, les stocks de réserves sont en dizaines d'années. La concentration des réserves chute, inversement proportionnel à la matière à extraire (et donc l'environnement à détruire, la quantité de déchets à gérer...) et à l'énergie à consommer.

Exutoires pour la pollution et les déchets

Les actions contre la pollution ont été nombreuses depuis des décennies, alors qu'en 1972, on ignorait globalement les questions environnementales, nous avons changé. Par exemple, dans les pays industrialisés, bien que le PIB ait continué à croître, les émissions de gaz stagnent :



L'empreinte écologique de nos cours d'eau a diminué (alors que les activités humaines continuaient à croître), au point que le saumon est de retour dans le Rhin ! La pollution de l'air a diminué aux USA et en Angleterre. Cependant, les pays émergents ne sont pas tous prêts à investir dans le combat de la pollution et dans ces pays, la pollution de l'air et de l'eau a explosé.

Puis, certaines problématiques restent non traitées. Personne ne sait correctement traiter

les déchets nucléaires, qui finissent entassés dans des piscines ou des entrepôts souterrains. Il existe plus de 65 000 produits chimiques industriels commercialisés. Certains sont toxiques, et empoisonnent les sols et les nappes phréatiques.

Et il y a les chlorofluorocarbones ainsi que les gaz à effet de serre, qui contaminent tout l'air de l'atmosphère. On sait maintenant que les émissions anthropiques génèrent l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, causant un réchauffement planétaire, une évolution des précipitations, la fonte des glaciers et une montée des eaux. Le réchauffement des eaux engendre la mort des coraux.

Concernant ce changement climatique, les faits évoqués précédemment sont certains. Leur quantification est néanmoins sujette à variabilité. Car il y a plusieurs incertitudes, et notamment l'ampleur et les limites des boucles de rétroaction positive (absorption du CO₂ par la biosphère et les océans) et négatives (augmentation de l'albedo et fonte du pergélisol).

En observant l'histoire de la planète, nous observons que de moindres et moins lentes évolutions des concentrations de gaz à effet de serre ont provoqué des évolutions considérables du climat. Les mécanismes et leur vitesse ne sont pas encore parfaitement connus, mais nous savons que nous allons vivre des changements historiques, à une vitesse jamais égalée depuis des centaines de milliers d'années, et qu'un équilibre de la planète tel qu'avant l'ère industriel ne pourra se retrouver que dans des milliers d'années.

Les industriels ont maintenant conscience de leur impact et tentent de le réduire pour des motivations écologiques et économiques (réputation, contraintes juridiques et combat du gaspillage). Et il reste des progrès à faire, qui sont possibles : « si la durée de vie moyenne de chaque produit circulant dans l'économie humaine pouvait être multiplié par 2, si on pouvait recycler 2 fois plus de matériaux, si on avait besoin de mobiliser moitié moins de matière pour fabriquer un produit, on pourrait diviser le flux de matière par 8. si l'utilisation de l'énergie était plus efficiente, si on utilisait davantage les énergies renouvelables, si la terre, le bois, la nature et l'eau faisaient l'objet de moins de gaspillage et si les forêts étaient restaurées, cela stopperait l'augmentation des gaz à effet de serre et de nombreux autres polluants ».

Ce chapitre a étudié l'empreinte écologique de chacune de ces exploitations séparément. Beaucoup de limites ont été dépassées. Il s'agit maintenant d'aborder la question en considérant l'ensemble.

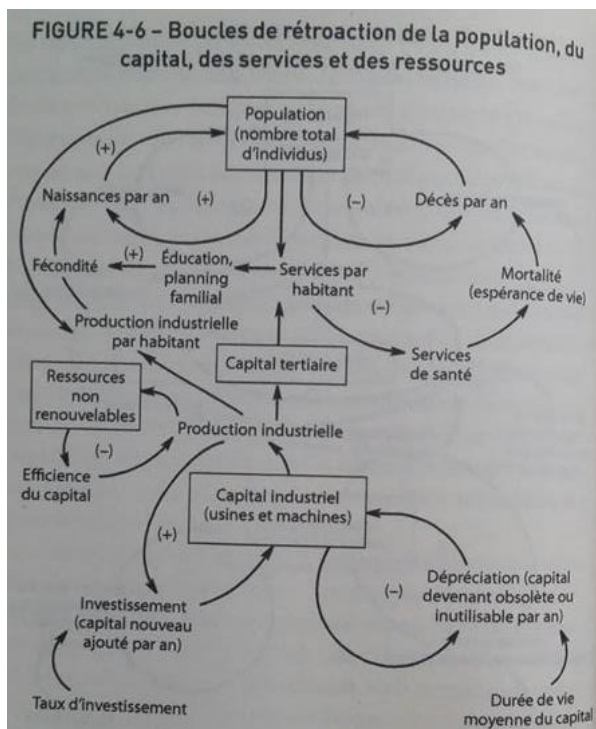
4. World3 : la dynamique de la croissance dans un monde fini

L'objectif n'est pas de prédire avec exactitude l'avenir, mais de l'évoquer dans les grandes lignes, « c'est à dire les différents modes ou schémas comportementaux qui vont présider à l'interaction entre l'économie humaine et la capacité de charge de la planète durant le siècle à venir ». Voici la question centrale à laquelle tente de répondre World3 : « comment la population mondiale et l'économie matérielle, toutes deux en plein essor, peuvent-elles interagir avec la capacité de charge limitée de la planète et s'y adapter durant les décennies à venir ? » Ce travail vise à informer et influencer les hommes, pour que les décisions futures augmentent les chances au système d'avoir un comportement soutenable.

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité. L'objectif de World3 est de répondre à un objectif précis. Il est conçu pour répondre à des questions précises. Il existe diverses formes de modèles : mentaux, verbaux, physiques, mathématiques... Les modèles mentaux sont les abstractions que produit notre cerveau. Le modèle informatique World3 a été construit à partir des modèles mentaux des auteurs. Il calcule les valeurs prises par chacune des variables tous les 6 mois à partir de 1900. Le modèle contient environ 200 équations. Un scénario correspond au calcul de l'évolution des variables avec un ensemble d'hypothèses donné. Pour un scénario, environ 80000 valeurs sont calculées.

Dans World3, les composantes et les liens sont simples lorsqu'on en observe qu'un à la fois. Ce qui rend le modèle complexe, c'est l'ensemble des liens. Les liens s'expriment par des formules mathématiques non linéaires et prennent en compte les effets de retard. Mais malgré cela, la réalité est très simplifiée. Par exemple, le modèle ne distingue pas les différentes zones géographiques et ne représente pas séparément les riches des pauvres. Il modélise la pollution avec deux variables : l'une représentant la pollution de l'air à court terme, et l'autre représentant les matières toxiques à vie longue. Il modélise les ressources avec seulement deux variables : l'une représentant les ressources renouvelables, l'autre représentant les ressources non renouvelables. Ces hypothèses sont simples et ont été choisies pour que le modèle soit interprétable et équilibré, c'est-à-dire que toutes les hypothèses aient un même niveau de simplicité.

Voici un schéma qui représente l'un des ensembles d'interactions entre certains éléments du modèle :



Les paramètres manipulés sont les processus de croissance, les limites, les retards et les processus d'érosion. Les processus de croissance de la population et de capital ont déjà été abordés dans le chapitre 2. Les limites environnementales du monde réel ont été décrites dans le chapitre 3, et leur modélisation est présentée ici.

La croissance économique exponentielle épuise les ressources, rejette des déchets et détourne les terres de la production de ressources renouvelables. L'environnement étant fini, l'économie exerce des pressions sur ce dernier. Ces pressions se font de plus en plus ressentir bien avant que tout croissance supplémentaire devienne impossible, et l'environnement envoie des signaux à l'économie. Par exemple, les aquifères se vident, les réserves de métaux

sont de moins en moins accessibles et concentrées et les terres sont de moins en moins arables. Ces signaux tendent à faire ralentir la croissance économique. Ils agissent comme des boucles de rétroaction négatives. Ces boucles de rétroaction agissent d'autant plus que les limites sont

proches. Les limites peuvent évoluer, notamment selon la technologie et la pollution. Voici les 5 limites standards du modèle :

- La terre cultivée est de 3,2 milliards d'hectares.
- La fertilité de la terre permet une production annuelle de 600 kg par hectare d'équivalent céréales sans apport d'engrais.
- Le rendement réalisable par unité de terre est jusqu'à 7,4 fois plus élevé que la fertilité de la terre.
- Les ressources non renouvelables sont 7000 fois plus élevées en 1900 que la production annuelle de l'époque.
- La faculté de la Terre à absorber la pollution est exprimée comme la demi-vie d'assimilation de la pollution par l'environnement. En 1970, World3 considère qu'elle était d'un an. Et en multipliant par 250 fois le niveau de pollution, elle passerait à 10 ans. Cette hypothèse est très incertaine.

Bien entendu, de nombreuses autres hypothèses ont été testées pour ces limites. Parmi tous les scénarios calculés, 11 ont été retenus car ils représentent qualitativement l'ensemble des scénarios possibles.

Le scénario « infinité en entrée, infinité en sortie » prend comme hypothèse que les prouesses techniques permettent de produire toujours plus avec toujours moins, et qu'elles se répandent très rapidement à toute la planète. On obtient une explosion du capital et de la démographie, jusqu'à stabilisation de la démographie et ralentissement de la production de capital car il n'y a pas assez d'humains pour continuer à assurer telle croissance. Puis, l'empreinte écologique finit par se réduire à la fin du 21ème siècle. Ce scénario est une « utopie technologique ». Le rythme d'évolution et d'amélioration de la technologie semble trop rapide par rapport au rythme actuel.

Lorsqu'un système physique atteint une limite, il suit une croissance sigmoïde s'il reçoit à temps les signaux qui préviennent cette limite. Mais dans la réalité, les signaux sont en retard. World3 prend en compte divers retard : le retard entre l'émission de polluants et la découverte de ses conséquences, puis de l'acceptation du problème et de la mise en place de mesures, le temps pour transformer une industrie, le retard entre évolution de la natalité et de la mortalité lors de la croissance démographique...

Ainsi, si le système régit avec un certain retard, ses limites sont dépassées. Si le dépassement n'est pas trop important, s'en suit une oscillation décroissante autour de la limite. S'il est trop important, s'en suit un effondrement. Plus concrètement, lors du dépassement le stress exercé sur l'environnement est excessif, et peut engendrer une érosion de l'environnement, qui entraîne un effondrement. Par exemple, la déforestation pendant une certaine durée peut ne pas impacter la capacité de la forêt à se régénérer.

Les réels retards qu'a notre système rendent probable le scénario de l'effondrement. Dans ce scénario, les hommes continuent à mettre en œuvre une croissance économique sans faire suffisamment d'efforts pour réduire leur empreinte écologique. La croissance continue jusqu'à un effondrement entre 2020 et 2030. L'élément déclencheur est l'épuisement des stocks de ressources non renouvelables, qui s'accélère au XXIème siècle et provoque une élévation des coûts d'extraction. Les investissements dans la production de ressources augmentent considérablement et sont nécessaires pour continuer à faire fonctionner l'industrie. Les investissements disponibles pour le reste de l'industrie se font plus rares et ne suffisent plus à compenser la dépréciation du capital industriel et c'est le déclin de l'industrie. Cela entraîne un

déclin des secteurs primaires et tertiaires car ils sont étroitement liés à l'industrie. Alors que la population augmente encore, il faut maintenir les rendements agricoles et pour cela, des intrants agricoles sont de plus en plus utilisés mais cela devient insuffisant pour nourrir tout le monde, et ce d'autant plus que la fertilité des sols se dégrade rapidement. Finalement, l'humanité n'a plus assez de nourriture.

Ce scénario décrit une crise de ressources non renouvelables. Mais quelles que soient les hypothèses concernant les stocks de ressources, l'effondrement finit par se produire si la trajectoire économique n'est pas modifiée.

En effet, en considérant des hypothèses de stocks suffisamment conséquents pour ne pas ralentir la croissance, la pollution atteint des niveaux tels que la fertilité des sols chute. Les investissements pour compenser cette chute deviennent conséquents, et le système industriel finit par s'effondrer, faute de réinvestissements. La santé des hommes est attaquée par la pollution, et il n'y a plus assez de nourriture.

Or nous sommes en dépassement : nous épuisons des stocks de ressources non renouvelables, nous polluons, nous travaillons et investissons de plus en plus dans des services qui ne sont plus fournis par la nature (pollinisation, traitement des eaux...) et avons de plus en plus de mal à exploiter des ressources, qui sont de moins en moins bonne qualité... Et nous risquons un effondrement.

Pour l'éviter, voici les grandes mesures à mettre en œuvre :

- La croissance de la population et du capital doit être ralentie puis arrêtée
- L'empreinte écologique doit être considérablement réduite, notamment en réduisant les flux d'énergie et de matière grâce à l'augmentation de l'efficacité du capital
- les sources et exutoires doivent être protégés
- Les signaux de dépassement doivent être mieux identifiés et nos réactions plus flexibles
- Les phénomènes d'érosion doivent être ralentis, arrêtés puis inversés

5. L'histoire de la couche d'ozone ou la preuve qu'il est possible de redescendre en deçà des limites

Les CFCs sont utilisés depuis 1928 dans l'industrie. Ils ont des propriétés intéressantes (chimiquement stables, ne corrodent pas, conductivité thermique basse...). En 1974, deux articles scientifiques sont publiés et expliquent que les CFCs se décomposent en atomes de Cl dans la stratosphère, et que les atomes de Cl peuvent réagir avec O₃ pour les détruire. C'est problématique car la couche d'ozone permet de réguler la quantité de rayons UV qui traversent l'atmosphère. Une exposition des êtres vivants trop importante les perturbe ou les tue. En 1985, un nouvel article prouve l'existence d'un trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique. Enfin en 1987, un article publie la corrélation forte entre les émissions anthropologiques de CFCs et le trou.

Une première réunion a lieu à Vienne en 1985 aboutie à un consensus des pays participants sur la nécessité de prendre des « mesures appropriées ». Puis, les articles de 1985 et 1987 et les pressions des ONG des du grand public encouragent les états à prendre de réelles mesures. En

1987, le Protocole de Montréal est signé par 47 pays. Il prévoit une réduction progressive précise des émissions de CFCs. De nouveaux articles paraîtront et alarmeront des évolutions inquiétantes du trou, ce qui contraindra les Etats à se réunir de nouveaux lors de nouvelles réunions pour se fixer des objectifs plus ambitieux, en termes de réduction mais aussi d'aide aux pays en développement.

Au total, ces actions ont coûté seulement 40 milliards de dollars. Aujourd'hui, les émissions ont été divisées par plus de 10 par rapport au niveau record de 1988. Les CFCs sont hautement taxés. Le frein à une réduction plus importante est la contrebande de CFCs, qui serait plus lucrative que le commerce de cocaïne. Le trou devrait atteindre un pic dans les 20 premières années du XXIème siècle, et retrouver son état antérieur aux alentours de 2050. Pendant ce temps, les industriels ont trouvé de nombreux substituts moins problématiques, dont les CFCs hydrogénés, et des moyens de réduire les émissions de tels produits.

De nombreux enseignements peuvent être tirés de cette expérience mondiale : il est possible d'accorder les volontés politiques à l'échelle internationale. Cela nécessite notamment une coopération scientifique internationale. Un tel accord nécessite les bons outils, les bonnes informations et une volonté forte. Le système peut changer vite, mais pas instantanément. Les projections dramatiques du changement de la part des industriels sont exagérées pour diverses raisons. Lors d'un changement tel, il est nécessaire d'effectuer un suivi et de réajuster les trajectoires.

6. La technologie, les marchés et le dépassement

La technique et les marchés forment une boucle de rétroaction négative : lorsqu'il y a un problème de raréfaction de ressource ou de pollution, les prix ont tendance à augmenter. Cela incite l'industrie à trouver de nouvelles technologies qui consomment moins de matière, consomment une nouvelle matière moins rare, polluent moins, et le recyclage. Le marché récompense les meilleures technologies capables de résoudre le problème. Que se passe-t-il si nous prenons en compte l'efficacité d'un tel couplage pour pallier la crise de pollution du scénario 2 ?

On considère que les technos de contrôle de la pollution sont développées. Le retard entre l'innovation et la diffusion à grande échelle prend 20 ans. Et l'efficacité des technos augmente de 4 % par an. Tout comme les ressources, on ne considère pas la diversité des technologies, mais seulement un type de techno de contrôle de la pollution. Dans ce scénario, la pollution est efficacement combattue. Cependant, la population continue de croître. Les sols s'appauvrissent ou s'artificialisent, et la nourriture finit par manquer. Les investissements pour compenser ce manque deviennent trop conséquents et l'industrie déprécie. L'effondrement est total. Ce scénario 3 a été appelé « crise alimentaire ». L'espérance de vie commence à chuter à la fin du siècle et la population décline.

On ajoute à ces technos des technos qui augmentent les rendements agricoles. Ces technos viennent compenser la baisse de fertilité des sols. Cependant, les sols finissent par se dégrader plus vite, c'est une boucle de rétroaction positive. Ce scénario 4 est une « crise d'érosion des sols ». La population chute à la fin du siècle.

On ajoute des technos de lutte contre l'érosion. Dans ce scénario 5, le coût des technos augmente. Les problèmes évoqués précédemment sont maîtrisés jusqu'à une raréfaction des ressources non renouvelables. Pour y faire face, il faut investir et c'est impossible car les autres

technos coûtent trop cher. C'est l'effondrement généralisé provoqué par la raréfaction des ressources.

On ajoute un programme de réduction de la consommation des ressources non renouvelables. Ce scénario 6 aboutit à la stabilisation de la population mais à une perte de confort. Les coûts des technos sont si élevés que la production de biens et services diminue, C'est une « crise de coûts ».

Pour rappel, World3 est un modèle, réaliste par certains aspects, irréaliste par beaucoup d'autres. Notamment, il ne prend pas en compte les inégalités mondiales, tant en termes de moyens pour mettre en place de nouvelles technos, qu'en terme d'exposition aux problèmes. En ne considérant pas ces inégalités, World3 néglige une inertie certaine. En réalité, l'humanité est beaucoup moins réactive étant donné ces inégalités.

De plus, World3 ne considère pas de conflits entre populations, ou de guerres pouvant détruire du capital. Puis, les décisions politiques de mise en place de nouvelles technos sont instantanées. Ces mises en place se font en douceur, avec succès, et sans effets secondaires.

Enfin, certains pourront critiquer que l'évolution de l'efficacité des technos est trop lente. Les auteurs prétendent que leurs hypothèses ne sont ni trop pessimistes, ni trop optimistes, mais qu'elles sont réalistes par rapport aux données.

L'ensemble de ces scénarios montrent que globalement, si on tente de repousser une limite, on finit par se confronter à une autre. Puis, plus on tente de repousser de limites, plus on risque de faire face à plusieurs d'entre elles à la fois. La techno ne pourra pas résoudre tous les problèmes. Voici 3 raisons :

- Une technologie répond à un objectif. Si l'objectif est d'exploiter la nature, les technos n'éviteront pas l'effondrement mais le précipiteront.
- Le coût d'une techno dépend du coût d'autres paramètres, comme celui des ressources ou de la dépollution. Or ce coût a tendance à augmenter de façon non linéaire lorsque l'on s'approche d'une limite. Cette augmentation peut être repoussée, mais pas indéfiniment. Ainsi, la croissance entraîne une augmentation des coûts non contrôlable par la croissance.
- La boucle de rétroaction marché-technos n'est pas aussi parfaite que celle modélisée dans World3. En réalité, elle est victime de distorsion et de retard de l'information, et peut elle-même engendrer dépassement et instabilités, comme ce fut le cas lors du choc pétrolier

Pour corroborer ces arguments, deux exemples :

- Les prix du pétrole ne prennent jusqu'à présent pas en compte l'évolution des réserves. De plus, les lois du marché incitent les pays producteurs à mentir sur leurs réserves pour ajuster leur production aux quotas. Le marché pétrolier est très inertielle. Lorsque l'offre est proche de sa capacité maximale, ce qui est souvent le cas, une trop forte augmentation de la demande n'est pas ajustable car pour augmenter les moyens de production il faut des investissements pour plus d'infrastructures. Inversement pour ajuster la demande à une offre trop faible, il faut adapter les technos en aval pour les rendre plus sobres et efficaces, ce qui prend du temps. En revanche, si à l'inverse, les capacités de production sont trop élevées, les prix chutent et les technos en aval n'ont plus besoin d'être sobres et efficaces. Le couplage marché-technos ne répond ici pour l'instant qu'à l'équilibre offre – demande.

- Concernant la pêche, le couplage marché – technos n'a pas permis de ralentir à l'approche de la limite. Les rendements de pêche en mer et les populations de poissons en chuté dans de nombreuses zones. Or les prix n'ont pas réellement explosé, et les technos permettent d'avoir toujours plus d'efficacité pour se rapprocher encore de la limite. En parallèle se sont développées les fermes d'aquaculture pour continuer à maintenir une offre élevée.

7. Transitions vers un système soutenable

Jusqu'à présent, les scénarios étudiés diffèrent par les hypothèses sur les valeurs numériques mises en jeu. Aucun de ces scénarios n'aboutit à un système durable. Les auteurs ont donc changé la structure du système, i.e. faire évoluer les boucles de rétroaction et les liens relatifs à l'information.

Dans le scénario 7, la croissance démographique est limitée à 2 enfants par femme dès 2002. Les autres hypothèses restent celles du scénario sont celles du scénario 2. La croissance industrielle aboutit aussi à une crise de pollution.

Dans le scénario 8, on cherche aussi à limiter la croissance industrielle. Pour cela, on établit un objectif fixe en matière de production industrielle par habitant. Le bien-être humain est prolongé jusqu'en 2040, mais la pollution finit par engendrer en stress trop important sur les ressources agricoles.

Dans le scénario 9, on garde ces deux hypothèses structurelles, et on considère des innovations technologiques sur la consommation de ressources, la pollution et les rendements agricoles. Ici, on finit par atteindre un équilibre. La crise de coûts du scénario 6 n'est pas atteinte car il y a suffisamment de capital disponible pour investir dans les nouvelles technologies, étant donné que ce capital n'est pas nécessaire à la croissance du scénario 6. Dans ce scénario, l'équilibre est approché vers 2040. Les ressources non renouvelables ont diminué, mais leur exploitation est réduite de 80 %. La pollution atteint un pic en 2040 avant de retomber. La population, la production industrielle et de nourriture, l'espérance de vie et l'indice de bien-être se stabilisent.

Ce scénario aurait aussi été possible si de tels changements avaient été opérés par la communauté internationale 20 ans plus tôt. L'équilibre aurait été atteint plus tôt, il aurait été plus éloigné des limites le niveau de bien-être aurait été plus élevé. World3 estime que si ces changements étaient enclenchés 20 ans après 2002, la soutenabilité ne serait plus atteignable.

Bref, plus on attend, moins il nous reste d'options. Et le niveau de confort matériel limité doit être suffisamment bas pour ne pas engendrer un effondrement. Ces conclusions sont évidemment qualitatives.

La définition d'une société durable adoptée par la communauté internationale en 1987 est la suivante : Une société durable est une société qui répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire les leurs.

D'après World3, cette société peut exister si et seulement si des efforts sont fait sur le capital, la technologie et la démographie. Selon Herman Daly, cela se traduit par le respect des 3 conditions suivantes :

- Les ressources renouvelables sont consommées à un niveau moins élevé que le niveau de régénération

- Les ressources non renouvelables sont consommées à une vitesse inférieure à la vitesse de mise en place d'un modèle de consommation alternatif durable
- Le niveau de pollution est à un niveau inférieur au niveau de traitement de cette pollution par la nature

Ces définitions et conditions ne sont cependant pas équivalentes à une croissance 0, qui est un concept ridiculement simpliste. Une autre croissance est possible, axée par exemple sur la qualité et non la quantité, les biens immatériels, la réduction des inégalités, la créativité, l'amélioration de l'art de vivre...

Le respect des conditions précédentes peut impliquer aux sociétés de faire des choix en apparence liberticides. Mais en réalité, il permettrait d'appliquer plus rigoureusement le principe suivant : la liberté des uns s'arrête là où la liberté des autres commence. Les mesures à prendre sont nombreuses et devraient s'adapter aux contextes locaux. Voici plusieurs grands principes qu'il faudrait suivre :

- Prendre en compte l'impact long terme dans nos choix
- Améliorer les signaux, repenser les indicateurs. Par exemple, internaliser les externalités environnementales dans les coûts.
- Accélérer les temps de réaction pour s'adapter aux problèmes qui ne peuvent être évités, notamment en flexibilisant les dispositifs institutionnels et techniques, et sensibilisant le grand public à la pensée systémique et développer l'esprit critique pour remettre plus facilement en question des aspects structurels du système
- Réduire la conso de ressources non renouvelables, développer le recyclage et des moyens de les remplacer
- Consommer durablement le renouvelable
- Ralentir puis stopper les croissances exponentielles de la population et du capital, et pour cela générer des changements institutionnels et philosophiques

Pour appliquer ce dernier principe, il faut revoir notamment nos modes de pensée concernant la pauvreté (prôner le partage et l'entraide), le chômage et le travail (prôner la réalisation de soi et l'utilité en société) et les besoins non matériels non satisfaits (retourner à la source des besoins matériels, qui sont non matériels, et trouver des alternatives non matérielles pour les satisfaire).

« L'âge de l'expansion cède la place à l'âge de l'équilibre » (Lewis Mumford). C'est un immense défi et une chance inouïe d'avoir à l'affronter. Comment rendre le monde durable ? Et surtout, comment faire en sorte qu'un tel monde soit désirable ?

8. Transition vers la durabilité : les outils

Beaucoup de gens agissent. Il existe de nombreuses initiatives et alternatives déjà existantes. Mais cela ne suffit pas car il faut ce changement structurel. Un tel changement s'est déjà opéré, dans les révolutions agricole et industrielle.

La révolution agricole a permis de nourrir plus d'humains et à la croissance démographique de continuer. Les modes de vie de chasseur-cueilleur sont remplacés. La nutrition est plus pauvre. Les premières pollutions apparaissent. L'organisation de la société est complètement restructurée avec la naissance de nouveaux outils et métier, de l'argent et de la hiérarchie. Les premières villes apparaissent.

La révolution industrielle permet de remplacer l'exploitation du bois par le charbon. L'exploitation du charbon crée de nouveaux secteurs d'activité et permet l'accès à l'énergie dense et abondante. Cette révolution place le commerce et l'argent devant la morale et les religions. Le capitalisme (ainsi que le communisme) apparaît. Les villes enflent. La nature devient réduite à une ressource dont l'exploitation peut générer du profit.

Pour cette révolution de la durabilité, il n'existe pas de mode d'emploi, mais des pistes, des outils. Les deux outils majeurs sont la transmission plus franche d'une information plus pertinente, et le courage de faire face à un système très réticent au changement. Puis, les outils suivants sont nécessaires : analyse rationnelle, collecte de données, pensée systémique, modélisation informatique et faculté à expliquer. Ensuite, 5 autres outils, moins rationnels, ont été identifiés :

- L'inspiration est essentielle, elle permet les innovations qui ont le potentiel de changer le système. Mais elle est insuffisante. Elle doit s'enchaîner d'une action. Et elle doit embarquer suffisamment de monde pour être impactante.
- Le travail en réseau : les réseaux informels peuvent être de plusieurs formes (numérique par exemple), de tailles diverses. Ils connectent les gens qui se rassemblent autour de valeurs ou d'objectifs communs. Ils permettent d'échanger des informations, des conseils, des outils, des moyens...
- L'honnêteté : le système est corrompu par des mensonges et ne peut réagir efficacement, c'est pourquoi il faut que l'information circule. Par exemple, il faut arrêter les préjugés comme la croissance va éradiquer la pauvreté, la technologie va résoudre tous nos problèmes, l'environnement est une ressource ou le niveau de vie matériel des riches est souhaitable.
- L'apprentissage : il s'agit de réaliser des actions avec une démarche expérimentale, et de s'en servir pour apprendre et avancer. C'est très peu le cas aujourd'hui, ou nos décideurs n'ont pas le droit d'être dans une telle démarche.
- L'amour : il s'agit de chercher les instincts les plus nobles chez nous et chez les autres, de penser et agir en bienveillance. Ce n'est pas facile actuellement car notre société s'est tournée vers d'autres qualités humaines. Mais pour changer de modèle, il faut revoir la nature humaine que la société humaine autorise et encourage.