

L'Avenir de la planète : population, climat, énergie

Jacques TREINER – 25 janvier 2020
Physicien - Président du Comité d'experts du Shift project

Résumé rédigé par Jacques Treiner



Les groupes humains ont de tout temps modifié le milieu dans lequel ils se développaient, mais ces modifications demeuraient locales, soit dans l'espace, soit dans le temps. L'Anthropocène, c'est cette ère nouvelle dans l'histoire de la Terre où l'humanité dans son ensemble est devenue une force géologique capable d'approcher et, dans certains cas, d'atteindre les limites du système-Terre. Le cas emblématique est sans doute le climat, dont le changement actuel est dû principalement à l'augmentation d'origine anthropique de la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre. Des limites sont également perceptibles dans l'utilisation des ressources minérales, associées notamment au fonctionnement des systèmes énergétiques, dans l'accumulation des déchets de toutes natures et dans les perturbations globales apportées à la biosphère. Cet environnement de l'humanité (ce qu'on nomme souvent la nature), ne peut plus être considéré comme infini, et ces effets de taille finie, souvent irréversibles, constituent la caractéristique de l'Anthropocène.

L'humanité à grande échelle de temps

Les démographes sont capables de reconstruire l'évolution de la population au cours des 60 à 70 000 dernières années. Jusqu'à la révolution néolithique, les groupes humains s'adaptaient aux ressources disponibles immédiatement, par cueillette ou chasse. Ces groupes devaient se déplacer au gré des aléas climatiques, avec risque de disparition complète.

La révolution néolithique a été préparée par des améliorations techniques concernant l'outillage et les armes, et ces améliorations ont permis un accroissement de la population mondiale, qui franchit ainsi le million d'individus il y a environ 35 000 ans. Le développement de l'agriculture, à partir de 7000 av. J.-C., a marqué une première « mise à distance » des contraintes naturelles par la possibilité de stocker la nourriture et d'utiliser la traction animale. C'est ainsi que la barre des 100 millions d'individus a été franchie vers l'an 0.

Au cours des siècles suivants, et notamment à partir de l'an 1000, l'appropriation de nouvelles formes d'énergie, notamment les moulins à eau dont toute l'Europe s'est garnie entre le 11^e et le 13^e siècle, ont permis de développer les premières formes de métallurgie, de dégager des surplus agricoles et de constituer des grandes cités, notamment au cours de la Renaissance. La grande étape suivante est liée à la « révolution industrielle », fondée sur les progrès des sciences et des technologies propres aux Lumières.

La maîtrise de formes d'énergie de plus en plus concentrées s'accompagne non seulement d'une augmentation de la population, mais aussi de ce que les démographes appellent la **transition démographique**. Les projections que font les démographes pour le siècle à venir indiquent que la population des pays de l'OCDE et de la Chine va demeurer en gros constante, que celle de l'Afrique va atteindre 2 milliards d'individus en 2050 et près de 4 milliards vers 2100, tandis que celle de l'Inde doit atteindre 2 milliards vers la fin du siècle. Ces chiffres sont obtenus en prolongeant les tendances actuelles, notamment concernant les taux d'urbanisation qui sont des indicateurs robustes. Mais ils supposent une évolution pacifiée du monde, et l'absence de crise alimentaire grave, générée par des

ruptures dans l'approvisionnement en ressources de l'agriculture ou par le changement climatique. Ces projections ont en tout cas le mérite de pointer les zones de tensions futures.

Le changement climatique

Il convient, avant toute chose, de préciser la distinction entre météorologie et climatologie. La **météorologie** s'efforce de suivre **UNE** trajectoire particulière de l'atmosphère. Comme le système relève de ce que les physiciens appellent le « chaos déterministe », la prévision ne dépasse pas, avec les meilleurs ordinateurs dont nous disposons, une dizaine de jours. En effet, des petites incertitudes sur les conditions initiales ont la propriété de se propager de façon exponentielle au cours du temps, si bien que la prévisibilité se perd rapidement.

La **climatologie** se pose des questions différentes : elle s'intéresse, non à une trajectoire particulière, mais à l'**ENSEMBLE** des trajectoires possibles de l'atmosphère, en termes de valeurs moyennes et de variabilité. Les programmes informatiques utilisés sont les mêmes qu'en météorologie, mais en changeant la question posée, on peut obtenir des réponses fiables en termes de tendance. Pour donner un exemple trivial, il est impossible de prévoir ce que sera la météorologie 6 mois à l'avance, mais partant d'un jour d'été, on peut affirmer que six mois plus tard il fera plus froid (dans l'hémisphère nord). En effet, à la variabilité naturelle imprévisible se superpose le changement d'intensité du rayonnement solaire reçu par chaque mètre carré de sol, lequel détermine la tendance à cette échelle de temps.

De nombreux phénomènes ont eu, et ont encore pour certains, une incidence climatique parfaitement identifiée : augmentation de l'irradiance solaire (+ 30 % depuis la formation du système solaire), tectonique des plaques (le climat n'est pas le même si les terres émergées forment un super-continent ou si elles sont morcelées en îles-continent), variation des caractéristiques de l'orbite terrestre (cycles de Milankovitch), changements naturels de la composition de l'atmosphère en gaz à effet de serre (effet de serre naturel). Ces facteurs de changement se déploient sur des échelles de temps caractéristiques distinctes : milliard d'années pour la variation de l'irradiance solaire, centaine de millions d'années pour la tectonique, dizaines et centaines de milliers d'années pour l'orbite terrestre. La composition de l'atmosphère a subi des variations à toutes les échelles de temps, mais le changement d'origine anthropique se déroule sur une échelle de temps plus rapide que ce que les enregistrements passés ont jamais enregistré.

Les principaux **gaz à effet de serre** sont aujourd'hui la vapeur d'eau, le gaz carbonique, le méthane, les oxydes nitreux, les CFC (chlorofluorocarbures) et quelques autres gaz à l'état de traces. L'effet de serre est un phénomène dont la compréhension fait appel à des théories physiques bien établies, autant dire qu'il est bien compris. L'augmentation - d'origine anthropique - de la concentration en gaz à effet de serre depuis l'ère pré-industrielle (gaz carbonique + 40 %, méthane + 150 %) conduit à un changement climatique qui a des conséquences prévisibles : augmentation des températures, fonte des glaces continentales, augmentation du niveau des mers, même si ces évolutions sont affectées d'une variabilité imprédictible.

On s'attend à ce que les conséquences du changement climatique présentent de fortes variations régionales. La diminution des surfaces glacées diminue leur albédo et augmente l'absorption du rayonnement solaire, induisant ainsi une rétroaction positive, ce qui se traduira par une plus forte augmentation de température aux hautes latitudes ; aux basses latitudes, certaines régions cesseront d'être habitables, d'autres risquent de devenir arides, avec des conséquences d'autant plus difficiles à gérer que ces évolutions se feront sur une échelle de temps rapide au regard de celle de l'évolution du vivant. Les modèles climatiques, dont la discrétisation spatiale est de l'ordre de la centaine de kilomètres, peinent à représenter ces variations régionales. Une solution intéressante consiste à mettre en place des groupes d'étude faisant appel à la fois aux scientifiques de la « grande échelle » et aux experts de terrain, lesquels connaissent, à travers la variabilité naturelle du climat, les zones plus ou moins fragiles ou résilientes, seule façon de développer régionalement une culture du risque.

L'énergie, mode d'emploi.

Le changement climatique actuel est dû à l'utilisation massive de combustibles fossiles – 80 % de notre énergie primaire – qui augmente la concentration en CO₂ (dioxyde de carbone) de l'atmosphère. Se rajoutent, pour 25 % en équivalent CO₂, les émissions de gaz à effet de serre dues à l'agriculture et à l'élevage. Limiter, puis réduire nos émissions de gaz à effet de serre suppose de substituer aux sources d'énergie fossiles des sources d'énergie décarbonées. Substituer certaines sources d'énergie par d'autres ne s'est jamais produit dans le passé. Lorsqu'une source d'énergie nouvelle a été découverte, elle est venue se rajouter aux précédentes, sans s'y substituer. Le charbon est venu s'ajouter à l'énergie hydraulique, le pétrole est venu s'ajouter au charbon, puis le gaz et l'énergie nucléaire aux sources déjà présentes. Décarboner nos sources d'énergie implique de **laisser dans le sol** une grande partie des ressources fossiles qui s'y trouvent, disponibles mais néfastes. Cela représente un défi extrêmement difficile à relever. Il convient donc de passer en revue toutes les sources d'énergie dont nous disposons, et d'examiner leurs caractéristiques et leurs potentialités.

L'énergie n'est pas « une chose matérielle », c'est un concept qui permet de quantifier les transformations de la matière. Toute transformation donne ainsi naissance à une double comptabilité : l'une en terme monétaire (contribution au PIB), l'autre en terme énergétique. Le passage de l'une à l'autre est analogue à un changement d'unité. Depuis plus de 60 ans, en moyenne mondiale, il faut 1,6 kWh pour générer 1 \$ de PIB. Dans les conditions actuelles, faire du PIB, c'est donc dérégler le climat.

Charbon, pétrole, gaz, uranium constituent des **stocks épuisables** dont nous **contrôlons** les rythmes d'extraction et leurs mises en œuvre. Ces sources sont donc pilotables. Les **énergies de flux** (hydraulique, solaire, éolien, biomasse, géothermie, marine) constituent des sources inépuisables (à l'échelle humaine) mais **leurs flux sont imposés par la nature**. Le terme « énergies renouvelables » est en partie trompeur, car leur mise en œuvre requiert pour nombre d'entre elles l'utilisation de matériaux en partie recyclables, mais non renouvelables. Comme l'électricité ne se stocke pas (c'est un mouvement de charges électriques), un réseau électrique fonctionne en assurant **à chaque instant et en tout lieu** l'égalité entre production et consommation. Les sources de flux ne peuvent donc être mises en place de façon importante que si leurs fluctuations sont gérées par l'existence de sources pilotables. La quantité de matière qu'il faut transformer pour produire une unité d'énergie utilisable dépend des interactions fondamentales sous-jacentes. Ainsi, le fonctionnement d'un système électrique fournissant une puissance d'un GW requiert, au choix :

- 50 kg de tritium (fusion nucléaire, non disponible aujourd'hui) par an,
- 27 tonnes d'uranium (fission) par an,
- de 100 à 300 tonnes de combustible fossile à l'heure,
- 1200 tonnes d'eau tombant de 100 m de hauteur par seconde,
- 1000 éoliennes de 5 MW,
- 30 km² de panneaux solaires (latitudes moyennes).

Ces exemples illustrent la notion de « concentration de l'énergie ». Les principaux moyens de stockage de l'énergie sont les suivants :

- batteries électrochimiques,
- STEP (stations de transfert d'énergie par pompage),
- air comprimé,
- hydrogène.

Il est important de fixer les ordres de grandeur en jeu : par exemple, l'énergie totale contenue dans toutes les batteries électrochimiques du monde est d'environ 1 TWh, alors que le stockage de 1 % de la consommation électrique française nécessiterait de disposer de 5 TWh !

L'analyse des caractéristiques des systèmes énergétiques permet d'interroger la pertinence de certains scénarios : ainsi, la comparaison France/Allemagne est particulièrement instructive.

Biosphère, agriculture, élevage

Le changement climatique affecte les conditions dans lesquelles les espèces vivantes, animaux, végétaux, champignons, microorganismes, se développent. Lorsque des zones arides se désertifient, lorsque certaines zones tempérées deviennent arides, ces changements s'effectuant sur des échelles de temps rapides par rapport aux évolutions naturelles, les espèces vivantes ont le choix entre se déplacer ou disparaître. Une forêt peut se déplacer à une vitesse de quelques dizaines de kilomètres par siècle, par dissémination des graines. Si la température change de telle sorte que les conditions favorables se déplacent plus rapidement, la forêt meurt, ainsi que les espèces qui s'y trouvent, ou est remplacée par un autre écosystème forestier appauvri avec des espèces pionnières adaptées, à dispersion longue et croissance rapide.

Mais le climat n'est pas le seul indicateur de l'Anthropocène : l'humanité modifie la biosphère aussi par la mobilisation de grandes « surfaces agricoles utiles », dont environ 30 % en terres arables et le reste en pâturages, l'ensemble représentant 50 % des terres émergées libres de glace de la planète. Ainsi, la biosphère est globalement affectée, directement et indirectement, par l'agriculture végétale et animale (élevage) qui sont deux activités couplées et indispensables à notre survie. Directement, par l'étendue des surfaces qu'elles mobilisent, ce qui revient à éliminer de nombreux écosystèmes et la biodiversité qu'ils abritent. Indirectement, par la perturbation des grands cycles biogéochimiques qui modifie la composition physicochimique des eaux, de l'air et des sols et l'environnement nutritif des espèces. Agriculture végétale et animale ont la particularité d'être à la fois peu consommatrices d'énergie, tout en ayant de grands effets environnementaux : elles ne consomment que quelques pourcents de notre énergie primaire, mais sont responsables de près de 25 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (principalement méthane et oxyde nitreux), et des modifications profondes de la bio-géochimie planétaire.

Perturbation des cycles naturels et découplage entre agriculture végétale et animale

La perturbation des cycles « naturels » remonte à l'invention de l'agriculture, et elle s'est intensifiée avec son industrialisation. Auparavant, les groupes de chasseurs-cueilleurs ne faisaient que prélever une petite partie de ce que la nature avait à leur offrir. Les minéraux nécessaires à la pousse (azote, phosphore, potassium...) étaient recyclés, après la mort des plantes, par l'activité métabolique des animaux, des bactéries et des champignons présents dans le sol. Mais avec l'agriculture, ce cycle est rompu car la récolte et le transport de la production prévient le retour des éléments nutritifs vers le sol, de même que l'exploitation des sols agricoles conduit à des pertes de nutriments. Il faut donc renouveler la fertilité des sols agricoles en réintroduisant des nutriments minéraux après chaque récolte.

L'élevage vient remplir plusieurs fonctions : traction animale, utilisation des déjections comme engrais, fourniture de viande qui n'est à l'époque pré-industrielle qu'un coproduit des fonctions précédentes. Jusqu'au début du 20^e siècle, les minéraux constituaient le facteur limitant de la production agricole. Diverses techniques ont cherché à pallier les manques, notamment l'introduction des légumineuses capables de fixer l'azote atmosphérique dans des rotations de grandes cultures qui, elles, en sont incapables. Cultures végétales et élevage constituaient donc des activités impérativement couplées sur un même territoire.

Au début du 20^e siècle, Fritz Haber et Carl Bosch, mirent au point la synthèse chimique de l'ammoniac, point de départ de la fabrication d'engrais azotés directement assimilables par les plantes. Dès lors, le découplage des deux activités agricoles peut s'effectuer à grande échelle, d'autant que la motorisation va dans le même sens en permettant de s'affranchir de l'énergie musculaire des animaux de trait : les animaux ne sont plus nécessaires là où s'effectue la production agricole végétale. Les territoires se spécialisent, céréales ici, élevage là, et la population paysanne diminue drastiquement. Quant à l'énergie, l'agriculture est devenue quasi-totalement dépendante de sources extérieures (fossiles), à la fois pour les travaux des champs et pour le transport des marchandises. La disponibilité alimentaire sur le marché

mondial s'est beaucoup améliorée avec l'abondance des apports de nutriments et d'énergie par l'agrochimie et les énergies fossiles. En revanche, cette abondance a engendré, en plus des impacts environnementaux évoqués, des modifications structurelles du métabolisme de l'agriculture qui en font aujourd'hui un système énergétiquement intenable sans recours aux énergies fossiles.

« Printemps silencieux »

En octobre 2017, une étude allemande a montré que, dans des zones protégées, la population d'insectes volants d'Europe, toutes espèces confondues, a diminué de 75 % au cours des 27 dernières années. Cette diminution spectaculaire est corrélée avec la dégradation générale des ressources disponibles, par une intensification grandissante des pratiques agricoles (monocultures, homogénéité des paysages etc.). Mais elle est aussi corrélée avec l'utilisation d'une nouvelle catégorie d'insecticides, dits systémiques, apparue dans les années 1990, et massivement généralisée dans les années 2000, les néo-nicotinoïdes. S systémiques, car ils ne s'appliquent pas aux insectes directement, ils s'incorporent à la plante à partir de la graine et la rendent elle-même insecticide. L'efficacité est des milliers de fois plus grande que le DDT, si bien que de toutes petites quantités sont efficaces, et peuvent s'accumuler dans les sols.

Le récent rapport de l'IPBES (Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques, rapport 2019) évalue, en cas d'absence de pollinisation animale, à plusieurs centaines de milliards de dollars par an les pertes économiques pour les consommateurs et les agriculteurs. C'est le même ordre de grandeur que la contribution de la totalité de l'agriculture au PIB mondial... Sans compter que la réduction de ces populations animales affecte également les zones non-agricoles, par conséquent une grande partie des plantes sauvages à fleurs de la planète.

En guise de conclusion

Pour conclure, insistons sur quelques caractéristiques des évolutions présentes, que l'on ne retrouve pas dans le passé de l'humanité sur Terre.

La première concerne l'**échelle de temps du changement climatique**. Le réchauffement par rapport à la période pré-industrielle est aujourd'hui de 1 °C, nous sommes engagés sur une trajectoire d'environ 3 °C, et la rapidité de cette évolution n'a pas de précédent, même si la sortie de la dernière période glaciaire a pu s'accompagner d'événements brutaux à l'échelle géologique. Ainsi, le niveau des mers a augmenté d'environ 120 m en environ 12 000 ans, ce qui représente une augmentation de 1 cm/an, alors que cette augmentation est estimée aujourd'hui à quelques mm/an. Mais aujourd'hui, une augmentation significative du niveau des mers affecterait des centaines de millions d'individus, contraints de quitter des littoraux devenus inhabitables pour se répartir sur des terres... déjà occupées par d'autres.

La seconde caractéristique concerne l'**irréversibilité de ces évolutions**. Dans la mesure où la durée de vie de l'excédent de gaz carbonique dans l'atmosphère est de plusieurs milliers d'années, le changement climatique – qui dépend pour une part de ce que l'humanité va faire dans les prochaines décennies – doit être considéré comme irréversible. Du coup, les deux chantiers que sont, d'une part, les réductions des émissions et, d'autre part, l'adaptation au changement déjà joué compte tenu de nos émissions passées, doivent être traités de concert.

La troisième caractéristique concerne la **réduction des émissions**. Elles requièrent de substituer aux combustibles fossiles des sources non carbonées. Mais les systèmes énergétiques sont conçus pour une durée de vie qui se chiffre en décennies, et leur remplacement ne peut également se concevoir qu'à ces échelles de temps. Le parc nucléaire français de 63 GW, qui a bénéficié de conditions particulièrement favorables (volonté d'un État, standardisation de la mise en œuvre par un exploitant unique), a été installé en environ 3 décennies. Est-il possible d'imaginer un pareil rythme de développement à l'échelle mondiale ? Quant aux énergies renouvelables électrogènes, leur possibilité de déploiement massif en vue d'une décarbonation de l'électricité butte sur leurs besoins en matériaux divers et sur leur intermittence, laquelle constitue un obstacle important en l'absence de technologies de stockage pour de grandes quantités d'énergie.

L'énergie, on l'a vu, n'est pas un secteur comme un autre et, en particulier, il est erroné de mesurer son importance à sa contribution au PIB. En rester à cette conception, ce serait comme mesurer l'importance du sang ou du cerveau à leur poids relatif dans le corps. Vu l'importance des enjeux, l'énergie devrait dorénavant être considérée comme un **Commun** relevant de politiques publiques planificatrices.

Résumé rédigé par Études et Recherche



Jacques TREINER nous a dressé un « **état des lieux de la planète** », point de départ indispensable avant de trouver et mettre en œuvre des solutions réalistes et adaptées.

La population : combien serons-nous en 2050 ?

Depuis les origines, la population mondiale a augmenté de manière irrégulière, avec trois sauts démographiques associés à la possibilité d'utiliser une plus grande quantité d'énergie : l'apparition des outils et des armes au paléolithique (600 000 habitants), le développement de l'agriculture et de l'élevage au néolithique (10 millions d'habitants) et ensuite la révolution industrielle (7,5 milliards d'habitants aujourd'hui). Le terme de « **transition démographique** » traduit cette augmentation de la population, à un rythme jamais connu auparavant (x 10 entre 1700 et 2000).

Les démographes prévoient entre 9 et 11 milliards d'individus à la fin du siècle, avec sans doute une stabilisation, en prenant en compte la diminution de la fécondité et l'augmentation de l'espérance de vie. C'est une projection basée sur une évolution pacifiée. Mais le changement climatique avec l'épuisement des ressources agricole et en eau, les conflits... influent aussi sur l'avenir.

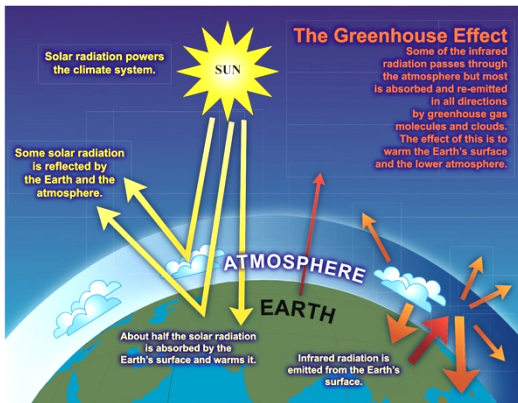
Cette augmentation de la population va surtout concerner certaines régions de la planète (Afrique et Inde), qui vont connaître une urbanisation de plus en plus forte et un développement économique important d'où une augmentation de la consommation d'énergie.



Le climat de la Terre

Il faut d'abord bien distinguer la **météorologie**, qui étudie l'évolution d'un état de l'atmosphère localement, sur une dizaine de jours (bulletin météo journalier) et la **climatologie** qui s'intéresse à l'ensemble des trajectoires possibles de l'atmosphère, en termes de moyennes et de variabilité (évolution du climat de la terre).

De nombreux facteurs naturels influent sur le climat depuis les origines : l'augmentation de l'irradiance solaire, la tectonique des plaques, les variations de l'orbite terrestre, les variations de la composition de l'atmosphère. La terre a ainsi connu des périodes glaciaires et interglaciaires.



L'**effet de serre** permet à la terre d'avoir une température moyenne d'environ 15 °C. En effet, l'énergie solaire est en partie réfléchiée par la terre et l'atmosphère mais aussi en grande partie absorbée par la surface terrestre. En conséquence, la surface de la terre émet un rayonnement infrarouge vers l'atmosphère qui en réémet la majeure partie vers la terre et contribue ainsi au réchauffement terrestre. C'est l'effet de serre naturel (https://wg1.ipcc.ch/publications/wg1-ar4/faq/wg1_faq-1.3.html).

Les principaux **gaz à effet de serre** sont la vapeur d'eau (H₂O), le gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), l'ozone (O₃), les CFC (chlorofluorocarbures)... C'est l'augmentation anthropique des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (CO₂, CH₄, N₂O... et non H₂O, déjà présente en grande quantité) qui est **responsable du réchauffement climatique**. La température moyenne de la terre a augmenté de 1 °C depuis la fin du 19^e siècle, avec une augmentation du CO₂ de + 2 % par an ! Dans ces conditions, l'objectif de l'accord de Paris de limiter le réchauffement à + 1,5 ou + 2 °C en 2100 est intenable ; on est sur une trajectoire de + 3 °C ou peut-être même + 4 ou + 5 °C. Par comparaison, depuis la dernière période glaciaire, la température moyenne a augmenté de 5 °C, la fonte des glaciers a fait monter le niveau de la mer de 120 m ! La fonte des glaces du Groenland ferait monter le niveau de la mer de 7 m, celles de l'Antarctique de 54 m ! Paris est à 25 m d'altitude...

L'énergie

L'énergie n'est pas une « chose matérielle » mais un concept qui permet de quantifier les transformations de la matière. La production des biens et des services nécessite de l'énergie. Le PIB mondial est directement corrélé à la consommation d'énergie. Or 80 % de l'énergie utilisée est issue des combustibles fossiles. Dans les conditions actuelles, « faire du PIB c'est dérégler le climat » !



Actuellement, à l'échelle mondiale, les sources d'énergie sont à 80 % les combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz), et 20 % pour les autres (biomasse 10 %, nucléaire 5 %, hydroélectricité 3 %, solaire et éolien 2 %). L'utilisation des combustibles fossiles produit énormément de CO₂ et contribue fortement à l'effet de serre, avec l'agriculture et l'élevage qui produit du méthane.

Le charbon, le pétrole, le gaz et l'uranium sont des **énergies de stock, limitées**, épuisables et dont le pic de ressources a été ou va être très prochainement dépassé. Leur utilisation est relativement simple, ne demande pas beaucoup d'autres matériaux et on sait en maîtriser les flux pour les adapter à la demande.

Les autres sources d'énergie dites « **renouvelables** » (hydroélectricité, éolien, photovoltaïque, biomasse) sont des **énergies de flux, illimitées**, inépuisables. Mais leur utilisation nécessite beaucoup de matériaux (béton, métaux...) qui sont des ressources terrestres limitées ; ces énergies de flux ne sont donc pas vraiment « renouvelables » ! De plus, leur utilisation pose des problèmes en raison de leur caractère **intermittent** : on ne maîtrise pas leurs flux qui dépendent du vent, du soleil...

À part l'énergie des combustibles fossiles qui peut être utilisée directement, toutes les autres formes d'énergie sont transformées en **électricité** dont le stockage est difficile et très limité (batteries, systèmes de transfert d'énergie par pompage...). Or, le réseau électrique doit pouvoir s'adapter instantanément à la demande, ce qui nécessite des systèmes maîtrisables. Dans ces conditions, tout miser sur le « renouvelable » paraît illusoire, voire impossible. Voir le cas de l'Allemagne qui a dû rouvrir des centrales à charbon après avoir fermé ses centrales nucléaires... L'abandon des combustibles fossiles nécessite donc de maintenir voire de développer à l'échelle mondiale l'**énergie nucléaire, seule énergie de stock non carbonée** et de continuer la recherche de solutions efficaces.

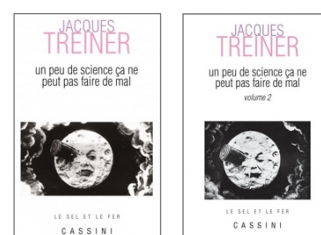
Quelques chiffres pour terminer : la consommation mondiale d'énergie est aujourd'hui de 13,7 gigatonnes d'équivalent pétrole par an, dont 2,3 Gtep/an d'énergies « renouvelables » ; elle sera d'environ 20 Gtep/an en 2050, compte tenu de l'augmentation de la population et du développement économique. Or le potentiel total des « renouvelables » est de 9 Gtep/an. La question est donc :
« comment obtenir 20 Gtep/an sans les combustibles fossiles et sans le nucléaire ? ».

En résumé, le changement climatique actuel se déroule sur une **échelle de temps très courte**, en comparaison avec les changements qui ont eu lieu au cours des temps géologiques. Ces évolutions sont **irréversibles** et il faut impérativement **réduire les émissions** des gaz à effet de serre.

Quelques références

Quelques ouvrages de Jacques Treiner

- Un peu de science, ça ne peut pas faire de mal – Cassini 2017
- Un peu de science, ça ne peut pas faire de mal (volume 2) – Cassini 2019



Liens internet

- The Shift Project
<https://theshiftproject.org>
- INED (Institut national d'études démographiques)
<https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/jeux/population-demain/>
- Site de Jean-Marc Jancovici, président du Shift Project, associé fondateur de Carbone 4
<https://jancovici.com>

