
QUELQUES RÉFLEXIONS SUR LA CRISE ÉCOLOGIQUE

Hugo Viala

Table des matières

1	Point de situation climatique	2
1.1	Le carbone et notre niveau de vie	2
1.2	La nécessaire réduction des émissions	3
1.3	Les pays développés émettent le plus	3
1.4	Les conséquences d'un réchauffement	6
2	Technologies climatiques et limites systémiques	6
2.1	Technologies climatiques	6
2.2	Limites systémiques	8
3	Le monde de demain	11
3.1	Un monde en récession économique	11
3.2	Sobriété et résilience	12

Introduction

Voilà un sujet décidemment d'actualité : le changement climatique. Au-delà même des arguments des climato-sceptiques, il clive massivement la population sur des sujets bien disparates et des questions parfois mal posées. Entre les questions sur le climat, la biodiversité, les émissions de gaz à effet de serre, l'élévation du niveau des eaux, le nucléaire, l'économie mondiale ou encore la pollution, il n'est en effet pas facile de définir le cadre même de ce qu'on nomme *la crise écologique*.

Dans l'ensemble du texte, nous supposons que deux points sont bien connus et ne seront pas remis en question. Premièrement, le climat de la planète Terre se réchauffe et ce dans des proportions jamais observées auparavant. Deuxièmement, ce réchauffement est essentiellement dû aux émissions *anthropiques* de gaz à effet de serre (principalement le dioxyde de carbone, le méthane et la vapeur d'eau) [1] [2].

Le but de ce document est de clarifier les enjeux de la crise écologique en utilisant les données scientifiques à notre disposition. Montrer que l'enjeu est de taille et qu'il est important de se saisir des questions qu'il pose dans toute sa complexité. Qui émet quoi ? Comment ? Quels sont les objectifs que nous nous fixons ? Quelles sont les fausses pistes à ne pas emprunter et les pièges dans lesquels il vaut mieux ne pas tomber ? Il s'agira d'examiner des faits et de soulever les questions qui les accompagnent. En revanche, il n'est pas dans le but de cet article d'émettre des propositions concrètes de transition énergétique. Il prétend avant tout poser le cadre de contraintes dans lequel des propositions pertinentes peuvent être émises.

Nous allons donc explorer la situation actuelle, ses limites ; regarder de plus près certaines solutions proposées actuellement pour combattre le réchauffement ; et enfin nous attacher à comprendre le monde tel qu'il est, c'est-à-dire limité.

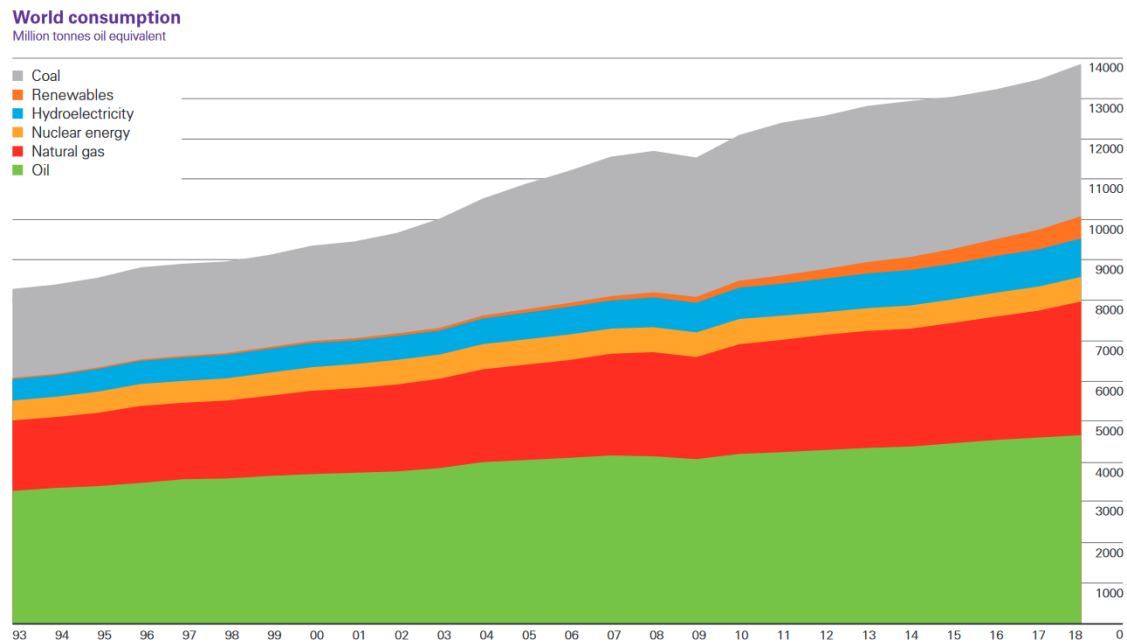


FIGURE 1 – Consommation d’énergie en millions de tonnes équivalent pétrole dans le monde en fonction du temps [4]

1 Point de situation climatique

Si nous voulons nous attacher à savoir comment agir pour le climat, il faut passer du temps à comprendre où nous en sommes exactement. Il s’agit donc ici d’apprécier ce que l’on doit aux énergies fossiles, d’essayer de peindre un tableau assez précis du problème et de voir dans quelle mesure nous continuons encore aujourd’hui à y contribuer.

1.1 Le carbone et notre niveau de vie

Estimez-vous que votre vie est bonne ? Assurément, notre niveau de vie, par rapport à celui d’un.e habitant.e du Bangladesh, reste envieux. Mais à quoi exactement doit-on notre niveau de vie ? “Au progrès !” répondront probablement certain.e.s. Mais à quoi doit-on le progrès technologique ? Principalement aux énergies fossiles.

Pour bien prendre la mesure de cette affirmation, il convient de donner plusieurs exemples. 95% des transports américains roulent aujourd’hui grâce à des énergies fossiles [3]. Ces transports conditionnent, à l’échelle mondiale, comment nous consommons, comment nous voyageons et ils ont même permis la création d’une activité industrielle récente dans l’histoire de l’espèce humaine : le tourisme. Grâce aux améliorations de rendements énergétiques du charbon ou du pétrole, nous avons pu rénover profondément le système agricole mondial : la productivité d’un.e agriculteur.trice – et donc sa capacité à nourrir plus de têtes – a augmenté, provoquant ainsi un phénomène d’exode rural. Le nombre d’emplois dans les services, plutôt que dans l’agriculture ou dans l’industrie, a décuplé.

On pourrait ainsi multiplier les exemples du même type : les modifications structurantes de notre société apparues grâce aux énergies fossiles ne sont pas moindres. La population mondiale a été multipliée par 4 depuis le début du XX^e siècle ; l’espérance de vie n’a eu de cesse de grimper en flèche ; les progrès de la médecine sont incontestables. Construire un logement prend aujourd’hui moins de temps qu’il y a un siècle. L’énergie a profondément modifié les lieux dans lesquels on échange et on interagit, ainsi que la manière dont on se nourrit, on consomme, on travaille, on se soigne et on structure notre économie.

Des systèmes de retraites, d’assurances chômage ou de congés payés sont bien apparus à partir du moment où plus de machines thermiques se sont mises à travailler pour nous, diminuant la contrainte humaine sur le travail à fournir pour subvenir à nos besoins. L’énergie a donc joué un rôle majeur dans la modification de notre environnement socio-économique depuis la révolution industrielle.

En clair, l’énergie de la mondialisation est avant tout le pétrole. Autrement dit, notre niveau de vie actuel repose sur un système énergétique fortement carboné. Même en France, où la production électrique au nucléaire reste très fortement

Émissions anthropiques mondiales de CO₂

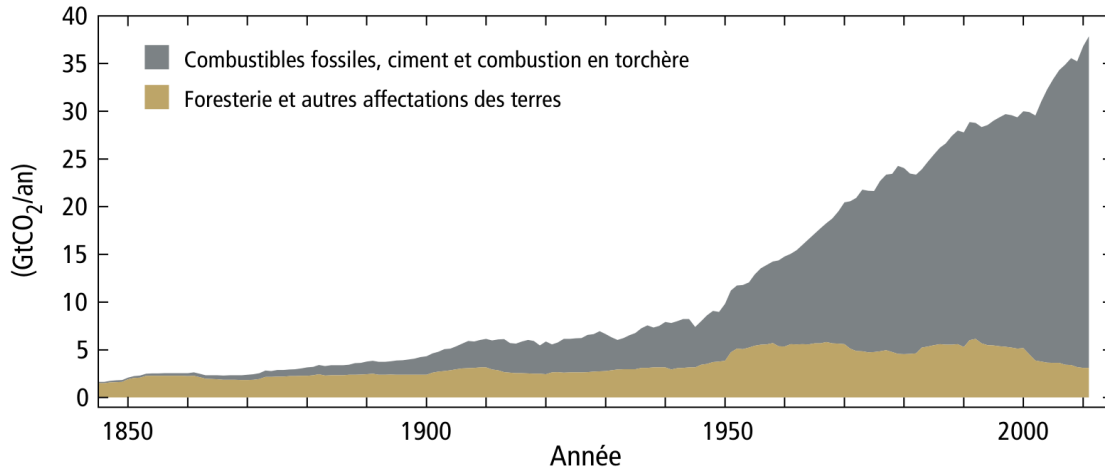


FIGURE 2 – Émissions anthropiques mondiales de CO₂ en fonction du temps [1]

décarbonée, 51% de notre consommation d'énergie primaire est d'origine fossile [4]. Pour le monde entier, cette valeur s'élève à près de 85% et cette consommation n'a fait que croître en valeur absolue dans le temps (figure 1).

Nous vivons actuellement sous perfusion énergétique.

1.2 La nécessaire réduction des émissions

Serions-nous capable d'assurer les mêmes services, publics ou privés, si nous n'avions plus de pétrole ou de charbon à disposition ? Plus que jamais, nous sommes dépendants des énergies fossiles. Or, l'utilisation de ces énergies est très fortement émettrice de dioxyde de carbone (CO₂).

Le Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC – IPCC en anglais) estime qu'"environ la moitié des émissions anthropiques cumulées de CO₂ entre 1750 et 2011 ont eu lieu au cours des 40 dernières années" [1]. Et d'ajouter que les combustibles fossiles en sont la principale cause. Les conséquences directes sont principalement un réchauffement de l'atmosphère terrestre et des océans ainsi qu'un impact sur les systèmes naturels et humains de tous les continents. Ce changement cause déjà des bouleversements irréversibles sur les écosystèmes. Ainsi, si nous voulons réduire notre impact sur la planète et limiter le réchauffement de son atmosphère, notre principal levier d'action est de réduire les émissions de CO₂ (figure 2).

L'Accord de Paris, pris en 2016 par un grand nombre de pays lors de la COP21, vise justement cet objectif. Il souhaite contenir l'élévation de température à moins de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et, si possible, poursuivre les efforts pour limiter la hausse des températures à 1,5°C [5]. Mais comment quantifier exactement ces objectifs en termes d'émissions de CO₂ ? Un rapport du GIEC sorti en octobre 2018 traite exactement de ce sujet [6]. Ses conclusions sont les suivantes : l'activité humaine a déjà provoqué un réchauffement entre 0,8°C et 1,2°C ; pour atteindre l'objectif de 1,5°C, il faut réduire nos émissions de 45% d'ici 2030 et ne plus émettre du tout de CO₂ d'ici 2050.

Concrètement, en analysant la figure 3, il apparaît que nous avons déjà émis depuis 1876 près de 2,220 GtCO₂. Restreindre le réchauffement à 1,5°C revient à avoir émis *en tout* 3,060 GtCO₂ dans l'atmosphère [7]. Il nous reste donc un budget carbone de 840 GtCO₂ à émettre pour contenir le réchauffement à hauteur de l'Accord de Paris. En 40 ans, nous avons déjà émis plus de 1000 GtCO₂. Pour les 30 prochaines années, nous devons donc émettre moins de CO₂ que les 40 dernières années sachant que nous sommes presque deux fois plus d'êtres humains sur Terre et que nous n'avons jamais autant émis de gaz à effet de serre qu'aujourd'hui.

1.3 Les pays développés émettent le plus

Qui émet ? Quel secteur économique, quel pays est responsable de ces émissions que nous devons réduire ?

La figure 4 présente les émissions de dioxyde de carbone par secteur d'activité dans le monde. D'après le rapport du GIEC, il faut diviser par deux ces émissions d'ici à 2030. Il est donc clair qu'il faudra bien agir sur tous les fronts en

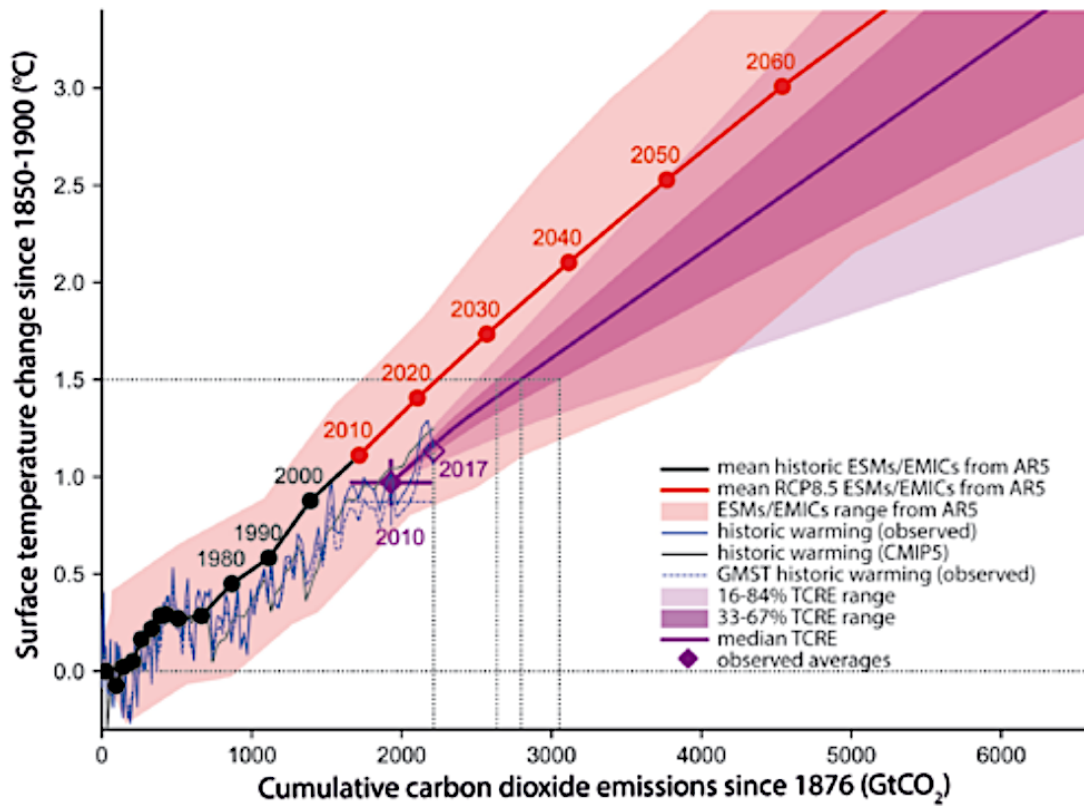


FIGURE 3 – Élévation de température en fonction des émissions cumulées de CO₂ [6]

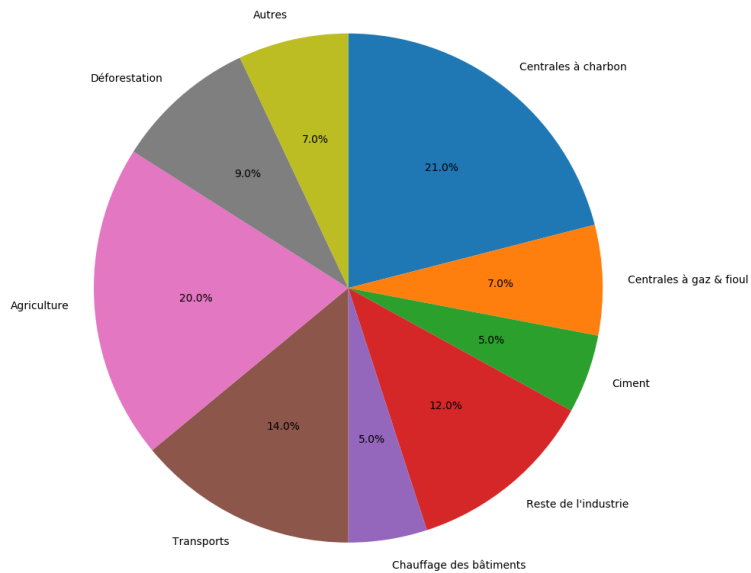


FIGURE 4 – Pourcentage des émissions de CO₂ dans le monde par secteur d'activité [8]

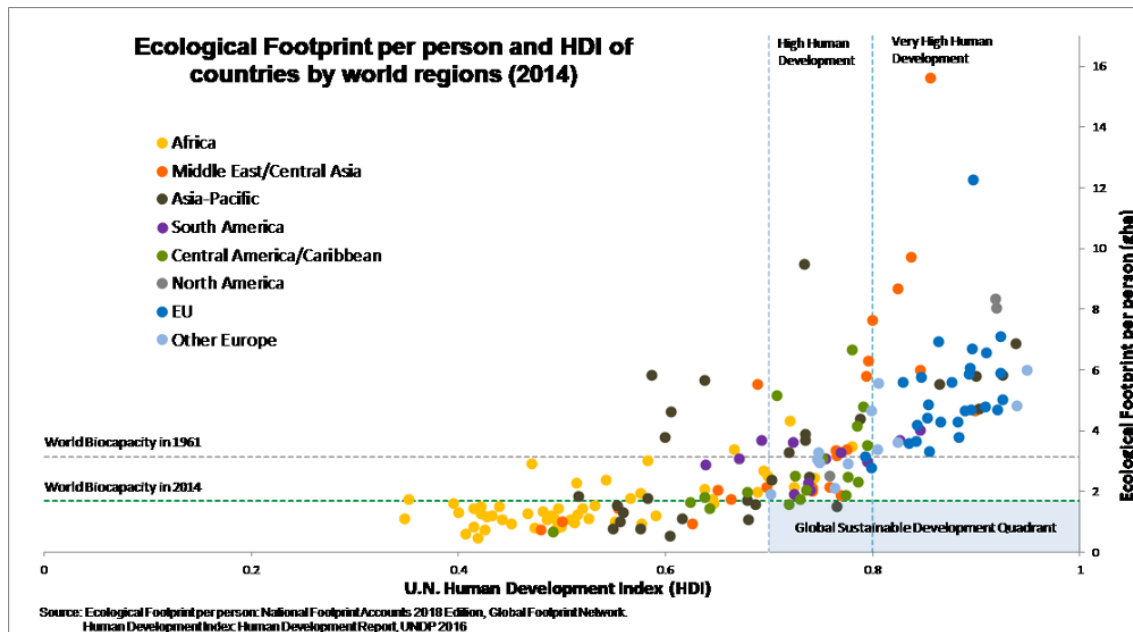


FIGURE 5 – Empreinte écologique par personne en fonction de l’indice de développement humain [11]

même temps, réduire les émissions d’un seul secteur ne suffira pas. Ce sont ces mêmes secteurs qui, comme on l’a vu précédemment, remplissent tous nos besoins modernes et nous ont amenés au niveau de vie où nous nous trouvons actuellement.

La France n’est pas exempte de leçons à prendre. Nous avons coutume de dire que, puisque nous avons une électricité produite au nucléaire décarboné – ce qui est vrai – alors nous émettons peu de CO_2 . Mais c’est oublier de prendre en compte les émissions importées. La mondialisation a provoqué une délocalisation massive des industries européennes typiquement émettrices vers d’autres pays, principalement la Chine. En net, cette délocalisation a produit une baisse des émissions directes sur notre territoire. Mais c’est oublier que la majorité des produits que nous consommons aujourd’hui sont passés par une manufacture chinoise. Nous sommes donc responsables des coûts d’émissions des produits que nous consommons. Le premier rapport du Haut Conseil pour le Climat chiffre précisément ceci : “les émissions liées aux produits importés et consommés par les Français ne sont pas explicitement prises en compte dans les objectifs nationaux chiffrés. En 2015, l’empreinte carbone de chaque Français est estimée à 11 tonnes de CO_2 -équivalent par personne et par an, lorsque la consommation finale sur le territoire est prise en compte, contre 6,6 tonnes de CO_2 -équivalent par personne et par an lorsque seules les émissions produites sur le territoire sont comptabilisées” [9]. En outre, “la baisse des émissions de 1,1% par an en moyenne pour la période 2015-2018 est beaucoup trop faible et très inférieure à la décroissance visée de 1,9% par an soutenant ce premier budget; elle doit démarrer ou changer d’échelle dans pratiquement tous les grands secteurs de l’économie pour dépasser les 3% par an d’ici 2025 afin de s’engager vers la neutralité carbone” [9]. Il ne s’agira pas de petits efforts individuels de consomm’acteurs [10], il faudra bien plus que cela. Selon Jean-Marc Jancovici, même “le niveau de vie du smicard français n’est pas tenable” [8], c’est-à-dire que si chaque français revenait au niveau de consommation énergétique d’un SMIC actuel, ce ne serait toujours pas suffisant. La France a donc des efforts à fournir.

C’est même un phénomène général à tous les pays développés. L’empreinte écologique est un indicateur qui mesure la quantité de surface terrestre qu’il faut pour subvenir à une demande donnée, d’un pays ou d’une activité spécifique. C’est un indicateur certes imparfait mais qui donne une idée générale de l’impact de nos actions sur notre environnement. Si l’on ne regarde pas les émissions directes ou indirectes mais l’empreinte écologique, on s’aperçoit (figure 5) que les pays avec un fort indice de développement humain sont aussi ceux qui ont la plus forte empreinte écologique. Les seuls pays qui arrivent aujourd’hui à avoir un bon indice de développement humain et une empreinte écologique basse sont le Costa Rica et Cuba. Finalement, 50% des émissions sont imputables aux 10% des habitants de la planète les plus riches [12]. Aujourd’hui, on ne sait toujours pas résoudre la double contrainte “avoir un niveau de vie élevé” et “avoir une empreinte écologique faible” dans le monde.

C’est donc bien à tous les niveaux, secteurs, comme pays développés, qu’il faudra demander des efforts.

1.4 Les conséquences d'un réchauffement

On pourrait croire que 1,5°C en plus, ça n'est finalement pas grand chose. En France, on peut facilement connaître 30°C d'écart entre l'été et l'hiver, rajouter 1,5°C ne va pas bousculer notre quotidien. Mais les élévations de température que le GIEC considère sont en réalité une *moyenne mondiale et annuelle*. Or il fait plus chaud en moyenne sur les continents que sur les océans. D'après le rapport du GIEC, sur les terres aux latitudes moyennes, même les nuits les plus froides pourraient se réchauffer de 4,5°C pour une trajectoire de 1,5°C [6]. Dans ce même rapport, à la section 3.4, le GIEC alerte sur un certain nombre de risques qui sont déjà présents et seraient aggravés si nous allions jusqu'à 1,5°C d'élévation et au-delà. Ces risques comprennent l'accessibilité des ressources d'eau – alors que le GIEC estime déjà que 80% des humains ont des menaces sérieuses sur leurs ressources d'eau, l'augmentation des événements météorologiques extrêmes comme les inondations et les sécheresses, les pollutions des nappes phréatiques, la qualité générale de l'eau, l'acidification des océans, l'élévation du niveau de la mer, les modifications de certains biomes, les décalages sur les rythmes saisonniers des espèces végétales, les extinctions massives de certaines espèces et les pertes des fonctions de stockage de CO₂ de certains systèmes. Un certain nombre de ces changements sont irréversibles. Limiter le changement à seulement 1,5°C en fournissant des efforts extraordinaires constitue déjà une altération majeure du climat.

Ces impacts sur nos écosystèmes bouleverseraient tout simplement les systèmes humains en place. Une élévation prévue entre 26 et 77 cm du niveau de la mer d'ici 2100 en respectant les 1,5°C générerait malgré tout plusieurs millions de réfugiés climatiques, dont les habitations se retrouveraient tout simplement dans l'eau. Une modification profonde des écosystèmes rendrait notre agriculture beaucoup moins performante. Que se passera-t-il quand nous commencerons à sentir les contraintes en approvisionnement en nourriture ? Qu'en sera-t-il de notre santé durant les vagues de chaleur plus longues et plus fortes ? Comment va réagir notre système économique à tout ceci ? Quid des tensions politiques lors de la baisse de l'approvisionnement en pétrole comme avoué dans le rapport 2018 du *World Energy Outlook* de l'International Energy Agency (IEA) [13] ?

En outre, ce constat ne prend pas en compte les *boucles de rétroactions positives*. Il s'agit d'un phénomène qui vient renforcer la cause qui l'a créé. Un exemple parmi bien d'autres sur le sujet qui nous concerne : les émissions de CO₂ réchauffent la planète, ce réchauffement fait fondre les glaces polaires et notamment le permafrost dont on estime qu'il renferme du méthane qui est, lui aussi, un gaz à effet de serre. La fonte de ce permafrost libérera donc des gaz à effet de serre qui réchaufferont la planète, feront fondre plus de permafrost, et ainsi de suite [6]. Il faut noter que le CO₂ émis est très stable dans l'atmosphère, ainsi, même si nous arrêtons *totalemment* d'émettre du CO₂ dès demain matin, nous éprouverions encore pendant plusieurs centaines d'années des taux atmosphériques de CO₂ élevés. Nous n'avons donc encore rien vu des conséquences du changement climatique.

Le Global Footprint Network se base sur la notion d'empreinte écologique pour évaluer la consommation de ressources de la planète. C'est ainsi qu'on estime que si l'humanité vivait comme un Européen moyen, il faudrait l'équivalent de 2,8 planètes pour satisfaire les besoins de tout le monde [14]. Pour l'humanité entière, cette moyenne est actuellement à 1,7 planètes, alors qu'il faudrait 5 planètes pour un américain moyen. Cela signifie bien une chose : notre mode de vie obtenu grâce aux énergies fossiles n'est pas durable et ne peut pas durer.

Notre planète est à bout et il est temps de réfléchir sérieusement à des solutions.

2 Technologies climatiques et limites systémiques

2.1 Technologies climatiques

Le problème climatique inquiète depuis longtemps et, heureusement, la communauté scientifique n'a pas attendu pour s'emparer du sujet et proposer des solutions. Nous allons en examiner quelques unes, sachant que, d'après ce que nous venons d'évoquer, toute solution devra répondre à au moins deux critères pour être considérée comme viable :

1. maintenir le "niveau de vie" le plus haut possible, au sens du Produit Intérieur Brut (PIB) ou de la consommation d'énergie
2. avoir une empreinte écologique ou une émission de CO₂ la plus faible possible

2.1.1 Les nouvelles énergies renouvelables

Quand on parle des nouvelles énergies renouvelables, on évoque principalement l'éolien et le solaire photovoltaïque. L'énergie hydraulique fait aussi techniquement partie de ces énergies renouvelables mais nous nous concentrerons principalement sur les deux premières dans ce document. Ces énergies peuvent-elles répondre favorablement aux deux critères évoqués ?

Type d'énergie	Émission du cycle de vie médian
Charbon	820
Gaz	490
Biomasse dédiée	230
Solaire photovoltaïque	41
Hydraulique	24
Nucléaire	12
Éolien <i>offshore</i>	12
Éolien <i>onshore</i>	11

TABLE 1 – Émissions de plusieurs formes d'énergie au cours d'un cycle de vie en gCO₂ par kWh produit [15]

Tout d'abord, il apparaît que ces solutions émettent très peu de CO₂ par rapport à la quantité d'énergie qu'elles apportent (table 1) relativement au gaz ou au charbon.

En revanche, ces énergies sont intermittentes. Quand il fait nuit, un panneau solaire photovoltaïque ne produit rien ; quand il n'y a pas de vent, une éolienne ne produit rien. Si "maintenir mon niveau de vie" signifie "avoir du courant dès que j'appuie sur l'interrupteur", alors il faut rajouter les coûts de stockage qui rendent les prix plus élevés et soulèvent d'autres problèmes que nous évoquerons ultérieurement. En outre, un panneau solaire produit le moins la nuit en hiver, alors que c'est précisément le moment où l'on a le plus besoin d'électricité pour se chauffer.

Il est également problématique que notre production mondiale de renouvelable, bien que grandissante, ne puisse encore être envisagée à l'échelle supérieure. Avoir une production 100% renouvelable revient à dire que la bande orange foncé de la figure 1 doit remplacer tout le reste de la courbe (sans s'y rajouter) en seulement quelques décennies. Ainsi, si l'on voulait remplacer la totalité de l'électricité mondiale (en 2011) par des panneaux solaires, il faudrait alors installer l'équivalent de cinq cent années de production actuelle de ces panneaux [16]. Il s'agit là d'un énorme passage à l'échelle. Ces panneaux seront à remplacer tous les 40 ans et puis "qui passera le balai à chaque tempête de sable sur les dizaines de milliers de kilomètres carrés de panneaux ?" [16]. Avons-nous en outre suffisamment de ressources minérales pour supporter cette production ? Cela pose aussi la question de la dépendance aux énergies fossiles : peut-on produire, installer, maintenir et recycler un tel réseau sans les transports qui fonctionnent au diesel et la fabrication aux énergies fossiles qui vont avec ?

Les coûts sont aussi plus importants. Jean-Marc Jancovici a ainsi calculé que si l'on voulait obtenir à nouveau la puissance française électrique aujourd'hui, il faudrait mettre dix fois plus d'argent sur la table pour tout investir dans l'éolien plutôt que dans nucléaire [17]. Aux échelles de temps qui nous concernent pour notre problème, la question est alors : peut-on faire une multiplication par 500 de notre production, une multiplication énorme de nos investissements et réaliser une maintenance indépendante des énergies fossiles tout en ayant à subir potentiellement des effets d'intermittences ?

Évidemment, des scénarios avec différents mix sont étudiés et envisageables, c'est le cas de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) [18] ou encore de l'organisation négaWatt [19]. Mais il faut bien noter que ces deux scénarios prévoient une consommation d'énergie à la baisse et non pas constante.

L'argument ici n'est évidemment pas de dire qu'il faut éviter à tout prix de se lancer dans l'éolien ou le photovoltaïque, il faut s'efforcer de développer ces technologies essentielles au défi climatique [20] [21]. Il s'agit simplement de dire qu'il n'est pas envisageable avec les nouveaux renouvelables d'avoir à la fois la consommation énergétique qui est la nôtre actuellement et, dans le même temps, cette énergie accessible de manière non-intermittente et décarbonée. Il va falloir faire un choix.

2.1.2 Le stockage électrique

Lorsque la production d'électricité est supérieure à la consommation de cette électricité, il serait avantageux de pouvoir stocker cette énergie, de manière à pouvoir la restituer lorsque la production est inférieure à la demande : ceci permet de répondre aux soucis d'intermittences de l'éolien et du photovoltaïque. Le moyen le plus employé actuellement pour stocker de l'énergie est d'utiliser des barrages réversibles, qui stockent de l'eau sous forme d'énergie potentielle. Mais ce moyen de stockage n'est pas portable : ce n'est pas un problème si l'on a besoin d'un approvisionnement fixe (une maison), mais ça l'est plus si l'on souhaite l'utiliser pour stocker l'énergie sur une voiture par exemple.

Les technologies récentes envisagent ainsi le stockage de l'électricité dans les batteries à lithium ou à hydrogène. Leur potentiel d'utilisation pour les véhicules électriques a lancé une vague de recherche et d'améliorations qui ont conduit à baisser tendanciellement les coûts. Le rapport spécial du GIEC évoque également ce sujet (section 4.3.1.4) [6] :

les technologies de stockage électrique sur batteries semblent prometteuses, mais elles doivent toujours démontrer qu'elles peuvent être déployées massivement, à faible coût, à large échelle et à moindre impact sur l'environnement, ce qui n'est pas encore le cas [22]. En outre, elles se heurtent une fois de plus à de nouvelles limites : selon Philippe Bihouix, "il n'y a pas assez de lithium sur terre pour équiper un parc de plusieurs centaines de millions de véhicules électriques, et pas assez de platine pour un parc équivalent de véhicules à hydrogène" [16].

2.1.3 Les puits de carbone

Les *puits de carbone* sont des endroits où le carbone est absorbé au lieu d'être émis. Ainsi, quand on parle de réduire à zéro les émissions, cela signifie que l'on peut encore émettre un petit peu de CO₂, il faut seulement être capable d'avoir des puits qui en absorbent tout autant voire plus. Les océans et les forêts remplissent typiquement ce rôle, mais les élévations de température vont gêner leur absorption de CO₂. Cependant de nouvelles technologies pourraient apparaître, afin d'augmenter cette absorption. Par exemple, la société Climeworks souhaite capter le carbone de l'atmosphère et l'enfouir à 700 mètres de profondeur. Malheureusement, les prix sont encore très prohibitifs par rapport à la simple plantation d'arbres, et pour agir significativement sur la part de CO₂ dans l'atmosphère terrestre, il faut effectuer un déploiement massif de ces technologies.

En outre, nous sommes encore très loin d'avoir un puit de carbone suffisant : les émissions totales en France avoisinent les 450 MtCO₂ par an quand le puit net français est de 40 MtCO₂ par an [23] [24]. Le GIEC estime que "les technologies de captation du carbone déployées à large échelle ne sont pas prouvées, et dépendre de telles technologies est un risque majeur dans notre capacité à limiter le réchauffement à 1,5°C" (Chapitre 2) [6].

2.1.4 La fusion nucléaire

Le nucléaire représente toute la part de la technologie qui consiste à récupérer l'énergie d'un atome lors de sa fusion ou de sa fission. En France, en 2017, 71,6% de la production électrique est due à la maîtrise de la fission nucléaire. Cette technologie a l'avantage d'être non-intermittente et décarbonée. C'est donc aujourd'hui un atout majeur dans la transition écologique française, même si elle n'est pas exempte de défauts : on cite en général le traitement des déchets radioactifs.

Mais la fission nucléaire repose sur la réaction de l'uranium 235, ressource limitée sur Terre et produisant un certain nombre de déchets radioactifs à haute activité. La fusion nucléaire quant à elle peut produire quatre fois plus d'énergie que la fission. Elle est basée sur des ressources en grande quantité : le deutérium, obtenu à partir de l'eau. Enfin, elle ne produit aucun déchet radioactif à haute activité [25].

En revanche, cette énergie est très difficile à maîtriser : il faut en effet porter les produits initiaux à des températures de plus de 100 millions de degrés celsius pendant de longues durées. Le projet ITER démarré en 1988 et dont la construction a débuté en 2013 veut être une première expérimentation de la fusion nucléaire. Cependant, les premiers tests sur le deutérium ne sont pas planifiés avant 2035 [26]. Si l'on estime que ces expériences sont concluantes, qu'il faudra encore du temps pour en effectuer des supplémentaires avant de lancer la construction et le déploiement de plusieurs réacteurs de fusion nucléaire, il apparaît que dans le meilleur des cas possibles la fusion nucléaire à grande échelle arrivera bien trop tard pour répondre aux besoins de la crise écologique.

2.2 Limites systémiques

Si plusieurs solutions technologiques sont intéressantes, elles ont aussi toutes leurs limites. Or, au-delà de quelques exemples spécifiques, des limitations systémiques apparaissent. Nous allons ici en examiner plusieurs.

2.2.1 La baisse du taux de retour énergétique

Le *Taux de Retour Énergétique* (TRE – EROI en anglais) est le rapport de l'énergie obtenue par la récolte d'une ressource sur l'énergie investie pour obtenir cette ressource. Par exemple, je dois fournir de l'énergie pour récupérer du pétrole ou miner de l'uranium.

Bien évidemment, pour capter de l'énergie, les hommes se sont empressés de récupérer ce qui était le plus facile à obtenir ; le TRE était alors très bon. Les premiers puits de pétrole étaient ceux le plus facilement accessibles par exemple.

Mais si l'on épuise un stock de ressources finies, alors ce TRE ne peut que diminuer, car les ressources deviennent moins facilement accessibles en s'épuisant. L'investissement à fournir est alors plus grand. Par exemple, pour le pétrole, ce taux était de 33 pour 1 en 1999 contre 18 pour 1 aujourd'hui – c'est-à-dire qu'il faut aujourd'hui investir un baril de pétrole d'énergie pour en récupérer 18. On exploite aujourd'hui beaucoup moins le pétrole dit conventionnel

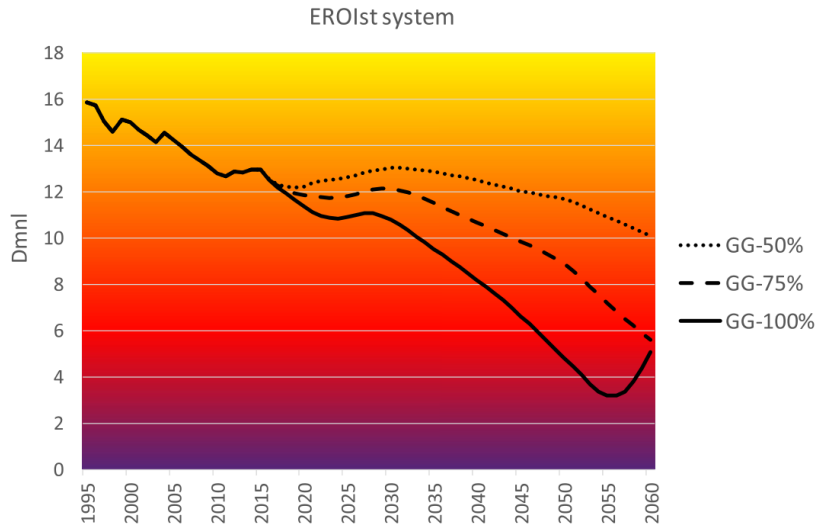


Fig. 9. Dynamic evolution of the EROlst of the full energy system for the scenarios GG-50%, GG-75% and GG-100% and different levels of systemic-risk as identified in the literature. These levels are indicative and evidently the risks are inversely proportional to the EROlst, similarly to the risks identified by the IPCC in the "Reasons for Concern" diagrams ([128,129]). Dmnl: dimensionless.

FIGURE 6 – TRE en fonction du temps selon différents scénarios de *croissance verte* (Green Growth (GG) en anglais) [27]

pour passer à des ressources pétrolières moins denses énergétiquement comme les sables bitumineux. Ainsi, plus le temps passe, plus il faut investir d'énergie pour en récupérer. Évidemment, lorsque ce taux atteint 1 pour 1, il n'est alors plus intéressant d'extraire la ressource en question pour des cas classiques, et il faut bien se tourner vers autre chose.

Maintenir une consommation, même constante, d'une ressource finie nécessite donc d'allouer de plus en plus d'énergie.

C'est une baisse tendancielle qui est déjà constatée empiriquement : depuis 1995, le TRE global est passé de 16 à 13 et des prévisions selon différents scénarios de déploiement des énergies renouvelables donnent des baisses encore plus fortes de celui-ci [27].

2.2.2 L'effet rebond

Une autre limite très connue est l'*effet rebond*, aussi appelé paradoxe de Jevons.

Prenons l'exemple des moteurs de voiture : ils sont bien plus performants et bien moins polluants aujourd'hui que dans les années 50. Il semble donc qu'on a bien répondu aux deux contraintes par cette optimisation technologique : le confort de l'utilisateur est augmenté et les émissions par kilomètre effectué diminuent. Peut-on donc espérer résoudre notre équation par des optimisations successives ?

Malheureusement quand on regarde de plus près, ce n'est pas si simple. Le gain d'efficacité de ma voiture va me permettre de consommer moins de carburant par kilomètre et donc de rouler plus, consommant ainsi davantage de carburant qu'initialement. Un gain d'efficacité net a provoqué une augmentation de la consommation et donc des émissions. C'est un effet que l'on peut retrouver dans plusieurs phénomènes. Un autre exemple : on peut croire que la hausse tendancielle du covoiturage est une bonne chose, car elle réduit l'émission nette d'un trajet par passager ; mais si le covoiturage se démocratise, un individu va sûrement avoir plus tendance à faire du covoiturage que si l'alternative n'existait pas. Arrive ainsi la conséquence fatale : davantage de trajets ont lieu [16].

L'optimisation marginale itérative n'est pas nécessairement une bonne mesure. Nous n'avons jamais stocké de manière aussi efficace un octet d'information qu'aujourd'hui grâce aux progrès faramineux de l'informatique ces dernières décennies. Pourtant, la quantité d'information stockée a cru bien plus vite que les gains d'efficacité du stockage. Aujourd'hui, des études s'inquiètent des émissions du numérique qui pourraient même dépasser celles de l'aviation au niveau mondial [28]. Selon une étude, entraîner des réseaux neuronaux émet jusqu'à 5 fois l'utilisation d'une voiture au cours de sa durée de vie [29]. La dématérialisation n'a jamais été aussi matérielle [30].

On ne peut pas simplement se poser la question de l'efficacité d'un seul usage, il faut aussi se préoccuper du nombre d'usages. Chercher l'efficacité marginale à tout prix n'a, en soit, pas de sens. Il faut la replacer dans un contexte plus large d'utilisations et de pratiques.

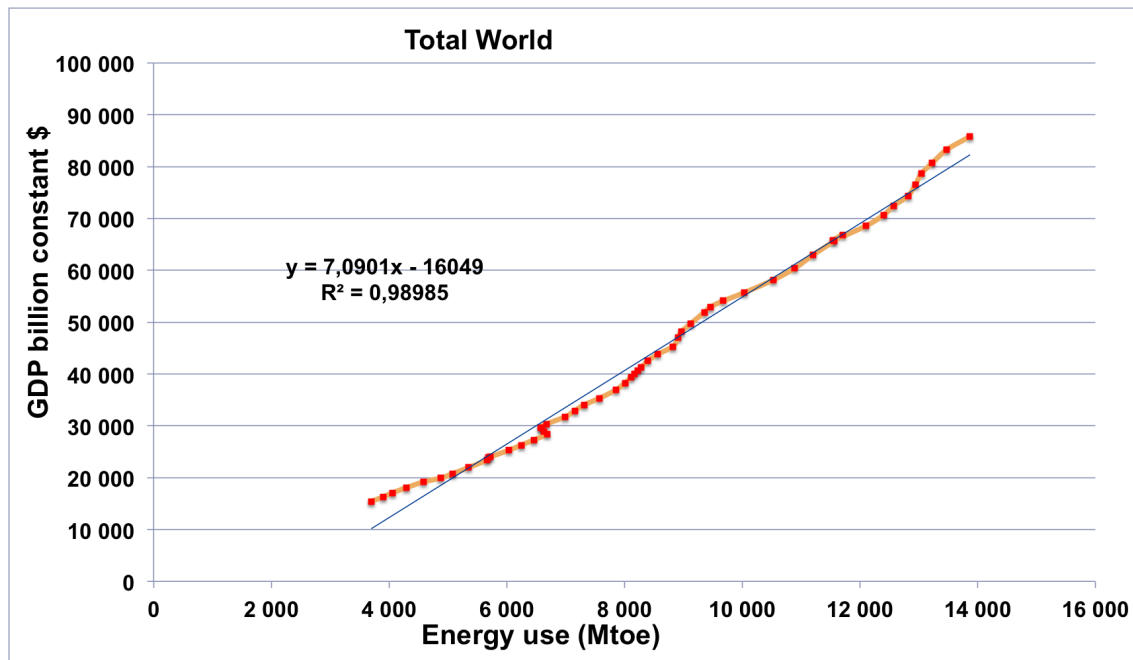


FIGURE 7 – PIB en fonction de l'utilisation d'énergie, chaque point correspondant à une année [31]

2.2.3 Le couplage de la croissance économique et des émissions

Peut-on obtenir une croissance de notre PIB sans pour autant émettre plus de CO_2 ? C'est ce qu'affirment les défenseurs d'une *croissance verte*. Il serait toujours possible de créer plus de valeur économique sans avoir à émettre nécessairement plus de gaz à effet de serre. L'enjeu serait alors de viser un *découplage* entre notre PIB et notre impact sur l'environnement. D'avoir un développement, oui, mais un développement durable.

Malheureusement, ce découplage ne reste qu'une hypothèse. Le premier souci est qu'il n'a jamais été observé en pratique. Jean-Marc Jancovici a rapporté dans la figure 7 l'utilisation énergétique en fonction du PIB et a obtenu une corrélation très frappante. Si un découplage est possible, il n'a toujours pas été observé empiriquement.

Ce qui est bien observé, c'est un découplage relatif mais pas absolu [32]. Un découplage relatif entre le PIB et les émissions de CO_2 signifie que lorsque le PIB grimpe d'un point, alors les émissions de CO_2 grimpent également, mais d'un peu moins d'un point. Si le découplage était absolu, on pourrait observer le PIB qui augmente et les émissions de CO_2 qui diminuent, ce qui n'est pas le cas.

Si l'on observe les ressources minérales, c'est encore pire car on a un *surcouplage*. En effet, l'International Resource Panel (IRP) a conclu dès 2016 que les flux de matières – c'est-à-dire l'extraction des ressources minières – ont cru plus vite que le PIB [33]. L'European Environment Bureau (EEB) donne, dans son rapport Decoupling Debunked, sept raisons de croire qu'un tel découplage n'est absolument pas possible [34]. La diminution du TRE et l'effet rebond, examinés précédemment, en font partie.

Autrement dit, si notre objectif est d'augmenter notre PIB – et par conséquent notre niveau de vie – on ne sait toujours pas aujourd'hui comment effectuer une croissance économique sans avoir un impact aussi lourd sur notre environnement. Que penser alors du fait qu'il est inscrit dans la Convention Climat des Nations Unies, article 3, alinéa 5, qu'"il appartient aux Parties de travailler de concert à un système économique international qui soit porteur et ouvert et qui mène à une croissance économique et à un développement durable de toutes les Parties" [35] ?

2.2.4 Les pressions sur les ressources minérales

Les ressources minérales sont les matériaux présents naturellement dans la croûte terrestre. Ces ressources minières sont disponibles en quantités finies dans les sols et, pour les récupérer, notre société fonctionne principalement sur un paradigme extractiviste. Or, la consommation de toute ressource finie ne peut pas durer indéfiniment. Même une consommation constante continue d'une ressource finie n'est pas possible. Notre seule certitude est que cette consommation devra mathématiquement retomber à zéro un jour ou l'autre. Toute la question est de savoir quand, à quel

rythme et avec quelles contraintes cela se produira. Ceci signifie donc que la consommation de toute ressource finie passera nécessairement par un maximum que l'on appelle communément le *pic* [16].

Or certaines limites commencent déjà à apparaître. Par exemple, l'utilisation intensive des batteries lithium pose des questions sur les réserves de lithium. La fin des réserves de cuivre, dont les usages sont massifs dans l'électronique, est estimée à 2039. Pour l'indium, principalement utilisé dans les écrans tactiles, on estime qu'il reste moins de 10 ans. En outre, les usages dispersifs empêchent les recyclages massifs et l'emploi de l'économie dite circulaire. Dans un téléphone portable, la majorité des métaux rares est recyclée à moins de 1% [16]. Le cuivre est recyclé à seulement 28% [27]. Le recyclage et l'économie circulaire ont également leurs limites.

Il se trouve que les nouvelles énergies renouvelables sont, par exemple, très gourmandes en néodyme, cuivre, siliçium, cobalt ou lithium ; augmenter leur déploiement, c'est également s'approcher plus rapidement du pic de ces ressources [36] [37] [38]. Ceci ne veut pas dire qu'il ne faut absolument rien déployer, mais qu'il faut être conscient des risques de pénurie et vigilant quant aux ordres de grandeurs d'utilisation que l'on souhaite avoir.

Notre mode de vie *high-tech* reposant sur plusieurs métaux en quantité limitée doit donc être remis en question par la recherche d'alternatives viables plutôt que de subir la baisse d'approvisionnement de ces métaux une fois le pic passé. [39]

2.2.5 La production à coût marginal nul

Jeremy Rifkin est un spécialiste de prospective économique et scientifique, il a conseillé la Commission européenne ainsi que la chancelière allemande Angela Merkel sur des questions de transition énergétique pour façonner ce qu'il appelle la *troisième révolution industrielle* [40]. Selon lui, nous allons atteindre une société de services où tout sera produit avec un coût marginal nul. En effet, les progrès en machine learning et l'interconnexion entre les individus permis par l'*internet des objets* permettront d'effectuer des gains d'optimisation sans précédent sur le partage et l'échange de biens. On peut penser par exemple à la *smart city* mais beaucoup d'autres sujets sont actuellement examinés [41]. De même, on peut arguer qu'il existe aujourd'hui marginalement de nombreuses manières de continuer à créer de la valeur sans gêner le climat. Rajouter un emploi d'infirmier.e ou de policier.e, c'est augmenter le PIB sans émettre plus de gaz à effet de serre.

Mais c'est oublier qu'une société comme celle-là doit être gérée par des flux physiques importants. Il faut bien des écoles, des hôpitaux et toute la production physique de bâtiments, de routes, de véhicules pour transporter ces nouveaux travailleurs. Il faut une agriculture intensive et productive pour les nourrir le soir. Même pour des réseaux informatiques *dématérialisés*, les câbles transocéaniques nécessitent des ressources matérielles. La *smart city* repose sur un réseau complexe d'approvisionnement en ressources bien physiques (capteurs, processeurs, ...).

★

La crise écologique est donc la découverte des limites technologiques et systémiques de notre monde.

Une fois de plus, il faut insister. Il ne faut pas croire que nous devons arrêter toute recherche technologique vers de nouvelles énergies, vers du *progrès* technologique ; ou bien qu'il faille à tout prix arrêter d'installer des éoliennes. Il reste possible ici et là d'obtenir des résultats qui peuvent nous aider à remplir nos objectifs. Mais entre une trouvaille dans un laboratoire et une mise en pratique dans le monde entier dans des proportions suffisantes, le passage à l'échelle peut être plus compliqué qu'il n'y paraît. Il faut bien comprendre où se trouvent les limites à ne pas dépasser et penser les solutions selon ces limites. Ce qu'il faut en revanche arrêter de croire, c'est qu'il sera possible de régler la question de la crise écologique sans faire aucune concession massive sur notre niveau de vie actuel.

3 Le monde de demain

3.1 Un monde en récession économique

La pire nouvelle de toutes est qu'il reste pourtant énormément d'énergies fossiles sous nos pieds pour nous permettre de garder notre niveau de vie actuel, contrairement à certaines ressources minérales. Cependant, d'après Jean-Marc Jancovici, "la combustion de l'ensemble des réserves prouvées de gaz, de pétrole et de charbon conduirait à 3000 milliards de tonnes de CO₂ : quatre fois plus que la limite physique pour les 2°C ! Il va donc falloir en laisser sous terre" [17]. En laisser sous terre, quand on sait que les alternatives énergétiques ne résoudront pas la totalité de l'équation, signifie bien qu'il faudra trouver un moyen de s'arrêter d'extraire ces ressources. Il ne suffira pas d'attendre que le prix augmente.

Or, aujourd'hui, au premier ordre, arrêter d'extraire ces ressources aura un impact direct sur le PIB : si l'on souhaite s'attaquer sérieusement au problème climatique, se forcer à arrêter d'extraire du pétrole revient à organiser une récession massive de notre économie. Voilà la vérité indiscible de la fameuse transition écologique.

Mais à quoi ressemble un monde en récession ? Au premier ordre, si le PIB diminue, il y a moins d'argent pour tout le monde. Dans un monde en croissance, tout le monde peut obtenir une augmentation salariale ; mais dans un monde en récession, demander une augmentation à son patron implique que quelqu'un d'autre aura nécessairement moins à la fin du mois. Moins de croissance, c'est de manière générale une offre qui diminue sur plusieurs services : logements, santé, transports, ...

On pourra rétorquer à ces arguments qu'ils sont obscurantistes ou anti-progressistes : qui voudrait d'un monde avec moins de services de santé ou de transports ? Il semble pourtant plutôt pertinent de penser les problèmes *avant* qu'ils ne se produisent, plutôt que d'ignorer qu'ils vont arriver. Prenons l'exemple de la santé : il vaut sûrement mieux s'attaquer dès aujourd'hui à l'élaboration d'une médecine post-pétrole (on parle aussi de *post-croissance*) plutôt que de vivre une contrainte en approvisionnement subie qui ne pourrait qu'être calamiteuse pour les populations en voulant à tout prix s'attacher à un modèle. Il ne s'agit évidemment pas, dans le cas présent, de nier les progrès incontestables de la médecine, il s'agit plutôt de réaliser qu'il n'est pas possible de garder l'efficacité qui est la nôtre actuellement ; autant alors penser en amont le système pour agir au mieux en condition de contrainte énergétique.

Préférons-nous nous poser la question de la répartition des ressources décroissantes dès maintenant, "qui a le droit de consommer quoi ?" ? Ou bien préférons-nous ne pas voir que la quantité de ressources va diminuer, de gré ou de force, et subir les conséquences de notre inaction ? Personne ne souhaite un monde physique fini, est-ce cependant une raison suffisante pour ne pas le *penser* ?

3.2 Sobriété et résilience

Bien évidemment, des propositions sont faites par plusieurs organismes ou acteurs, par exemple le Shift Project a publié un Manifeste pour décarboner l'Europe, qui regroupe neuf propositions intéressantes [42] ; on pourrait retenir l'autre exemple de Philippe Bihoux et de ses Low-Techs [16], pour faire moins, mais mieux.

Il est facile de trouver des personnes qui proposent des solutions et il n'est pas dans l'objectif de cet article de faire de même. Il s'agirait plutôt de faire ici une invitation à se reposer les bonnes questions. Ces dernières, pour le problème qui nous concerne, sont celles qui prennent en compte ce que nous avons énoncé plus haut : la finitude de notre monde, le fait que notre niveau de vie est fortement corrélé à nos émissions et que plusieurs solutions d'ordre technique ne suffiront tout simplement pas.

La première chose qu'il est possible de faire est de questionner nos usages. À quoi bon avoir des moteurs toujours plus performants si le poids des véhicules augmente sans cesse ? [16] [43]. Oui, il vaut mieux aujourd'hui rouler avec une voiture des années 2020 que des années 50, mais peut-on remettre en question le fait de rouler autant ? Sommes-nous prêts à bétoniser de plus en plus d'espaces pour satisfaire notre consommation démesurée ? Quelles technologies pour demain ? De quoi avons-nous fondamentalement besoin pour être épanouis ? Quels sont les besoins d'une société pour assurer sa pérennité et prospérité ? Dans un monde où nous ne cessons de chercher le *toujours plus* au dépend du climat et de la biodiversité [44], la *sobriété* cherche à remettre de la modération dans la consommation.

En outre, comme nous l'avons évoqué précédemment, nous vivons dans une société qui ne cesse de se complexifier [45] et donc de se fragiliser. Nous fonctionnons par approvisionnement à flux tendus ce qui nous rend plus vulnérables [46]. Un exemple : si le prix du pétrole grimpeait du jour au lendemain, pourrions-nous approvisionner les grandes villes en nourriture ? La *résilience* se définit comme la capacité d'une société à encaisser les chocs de tout ordre : économique, énergétique ou même climatique. C'est probablement un bon objectif à viser : être capable de subvenir aux besoins d'une population tout en s'assurant de résister au mieux à ce qui pourrait la détruire. Aujourd'hui, le climat est une de ces épées de Damoclès. L'approvisionnement en nourriture, en biens et en services à l'échelle locale est une question soulevée par cette notion de résilience.

Les ordres de grandeurs indiqués dans la première partie nous disent que l'échelle à laquelle penser ces changements est massive. Diviser nos émissions de CO₂ par deux en une décennie nécessite de radicalement revoir les notions de sobriété et de résilience dans notre société. Le changement imposé par la crise climatique demande de faire bien plus que quelques efforts personnels, efforts nécessaires mais non suffisants. Comment, dès aujourd'hui, préparer la société sans pétrole, sans extraction massive et sans high-tech de demain ? Comment gérer la descente énergétique à venir ?

Tant de choses sont encore à repenser et il reste encore des tonnes de questions à traiter. Comment motiver les populations à attaquer cette transition ? Qui doit faire des efforts en priorité [10] ? Comment agir en contexte de décroissance ? Quelles interactions devons-nous avoir avec le vivant ? Notre organisation sociétale et politique doit être revue pour coller aux objectifs que nous voulons nous fixer.

Mais par où commencer ? Comme point de départ, nous pourrions examiner la proposition faite par le Manifeste Convivialiste [47] qui invite à se poser quatre questions (plus une) de base :

Les quatre (plus une) questions de base

- *La question morale* : qu'est-il permis aux individus d'espérer et que doivent-ils s'interdire ?
- *La question politique* : quelles sont les communautés politiques légitimes ?
- *La question écologique* : que nous est-il permis de prendre à la nature et que devons-nous lui rendre ?
- *La question économique* : quelle quantité de richesse matérielle nous est-il permis de produire, et comment, pour rester en accord avec les réponses données aux questions morale, politique et écologique ?
- Libre à chacun d'ajouter à ces quatre questions, ou pas, celle du rapport à la surnature ou à l'invisible : *la question religieuse ou spirituelle*.

Voilà un point de départ intéressant.

Conclusion

La crise écologique est là, nous la traversons et elle s'impose à nous comme une évidence. La comprendre et la formuler l'est beaucoup moins, et il est facile de croire que les vieilles méthodes qui ont toujours marché fonctionneront à nouveau. Pourtant, l'enjeu est de taille et les intervalles de temps sur lesquels réagir sont relativement courts.

C'est un problème qu'il faut donc comprendre en profondeur. Notre niveau de vie, fortement consommateur d'énergies fossiles et très émetteur de gaz à effet de serre, est une véritable gabegie énergétique. Nous vivons bien mieux que nos ancêtres, mais notre impact sur notre environnement est d'autant plus immense. La technologie ne pourra pas tout et il devient plus qu'important de questionner nos besoins fondamentaux. Si notre monde entrait en décroissance, et que les différentes ressources à notre disposition venaient à manquer, il apparaîtrait vital de réfléchir à l'organisation sociétale à mener dans ce contexte, plutôt que d'en subir les conséquences catastrophiques. Il devient primordial de commencer à penser le monde physique tel qu'il est, non pas tel que nous voudrions qu'il soit.

★

Merci d'avoir pris le temps de lire cet article. Bien que je me sois efforcé d'écrire avec la plus grande rigueur, je ne reste qu'un modeste ingénieur, soumis à ses propres biais de confirmation. Aussi, si vous n'êtes pas d'accord avec certains points, que vous avez des sources scientifiques solides pour étayer votre argumentaire et que vous êtes prêts à les exposer calmement et avec respect, j'adorerais les entendre pour construire une réflexion encore plus solide, voire compléter et préciser cet article si cela s'avérait pertinent. Si c'est votre cas, n'hésitez pas à me contacter à : hugo point viala arobase gmail point com.

Références

- [1] GIEC – Rapport de Synthèse 2014
- [2] XKCD – Earth Temperature Timeline
- [3] U.S. Energy Information Administration - Transportation sector energy consumption
- [4] BP Statistical Review of World Energy 2019
- [5] Paris Agreement
- [6] IPCC – Global Warming of 1.5°C
- [7] Le Quéré et al. – Global Carbon Budget 2018
- [8] Vidéo YouTube : Jean-Marc Jancovici – A quand la rupture énergétique ?
- [9] Haut Conseil pour le Climat – Agir en cohérence avec les ambitions
- [10] Carbone 4 – Faire sa part ? Pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l'État face à l'urgence climatique
- [11] Emmanuel Pont – Démographie et climat
- [12] Oxfam – Inégalités extrêmes et émissions de CO₂
- [13] International Energy Agency – World Energy Outlook 2018

- [14] Global Footprint Network – EU Overshoot Day
- [15] IPCC – Assessment Report 5 – Working Group 3 – Annex III
- [16] Philippe Bihouix – *L'Âge des Low-Techs* – Éditions du Seuil – 2014
- [17] Jean-Marc Jancovici – *Dormez tranquilles jusqu'en 2100* – Odile Jacob – 2017
- [18] ADEME – Un mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations
- [19] Scénario négaWatt 2017 - 2050
- [20] Kris De Decker – How Sustainable is PV solar power ? – Low-Tech Magazine
- [21] Alain Grandjean – L'avenir radieux de l'énergie solaire photovoltaïque
- [22] Peters et al. – The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters - A review
- [23] Carbone 4 – Oui, la neutralité carbone est plus ambitieuse que le facteur 4
- [24] Commissariat général au développement durable – Chiffres clés du climat – France, Europe, Monde
- [25] ITER – Avantages de la fusion
- [26] ITER – FAQ – When will ITER be operational ?
- [27] Capellán-Pérez et al. – Dynamic Energy Return on Energy Invested (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies
- [28] The Shift Project – Pour une sobriété numérique
- [29] Strubell et al. – Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP
- [30] Magee et al. – A simple extension of dematerialization theory: Incorporation of technical progress and the rebound effect
- [31] Jean-Marc Jancovici – Post LinkedIn
- [32] Gaël Giraud, Zeynep Kahraman – How Dependent is Growth from Primary Energy ?
- [33] International Resource Panel – Global Material Flows and Resource Productivity
- [34] European Environmental Bureau – Decoupling Debunked
- [35] Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
- [36] ADEME – Impacts environnementaux de l'éolien français
- [37] Kris De Decker – How to Make Wind Power Sustainable Again – Low-Tech Magazine
- [38] Leena Grandell, Mikael Höök – Assessing Rare Metal Availability Challenges for Solar Energy Technologies
- [39] Graedel et al. – Criticality of metals and metalloids
- [40] Jeremy Rifkin – *La Nouvelle Société du coût marginal zéro* – Les liens qui libèrent – 2016
- [41] Rolnick et al. – Tackling Climate Change with Machine Learning
- [42] The Shift Project – Manifeste pour décarboner l'Europe
- [43] Nicolas Meilhan – Comment faire enfin baisser les émissions CO₂ des voitures
- [44] Report of the Plenary of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on the work of its seventh session
- [45] Philippe Bihouix – *Le Bonheur était pour demain* – Éditions du Seuil – 2019
- [46] Vidéo YouTube : Designing Lucid hopes for the future | Arthur Keller | TEDxToulouse
- [47] Manifeste Convivialiste