

Construire un autre monde nous est possible

Fiche de lecture

Référence du livre ou de l'article:

« *Éléments de base de l'énergie au 21^e siècle* », cours sur l'énergie et le climat donnés en 2019 à l'école d'ingénieurs Mines Paris Tech.

La transcription des cours est disponible ici :

<https://jancovici.com/publications-et-co/cours-mines-paristech-2019/cours-mines-paris-tech-juin-2019/>

Ce document est issu des transcriptions des cours de Jean-Marc Jancovici à l'école des Mines Paris Tech, placées sous licence CC-BY-NC-SA., et est à ce titre placé sous la même licence. Il est librement distribuable, sauf à des fins commerciales.

Auteur: Jean-Marc Jancovici

Jean-Marc Jancovici est ingénieur spécialisé sur les sujets d'énergie et de climat. Il est co-fondateur et associé du cabinet de conseil *Carbone 4*, fondateur et président du groupe de réflexion sur la transition bas carbone, *The Shift Project*, et membre du Haut Conseil pour le climat. Il intervient en tant qu'enseignant ou conférencier dans de nombreux établissements d'enseignement supérieur.

Il est l'auteur ou le co-auteur de neuf ouvrages, dont *Le plein s'il vous plaît ! La solution au problème de l'énergie*, et *C'est maintenant ! 3 ans pour sauver le monde*, tous les deux écrits avec Alain Grandjean, et publiés aux Éditions du Seuil, respectivement en 2006 et 2009.

Sujet:

Jean-Marc Jancovici expose la place des énergies et particulièrement des énergies fossiles dans notre modèle de société, les enjeux qui y sont liés. Il rappelle la perspective prochaine de sortie des énergies fossiles en raison à la fois de la raréfaction des ressources et du changement climatique. Il explique la difficulté de les remplacer par des énergies renouvelables et le nucléaire, et estime indispensable une politique de sobriété.

Synthèse:

Depuis qu'il a découvert comment utiliser les énergies fossiles, l'homme n'a cessé d'augmenter sa consommation d'énergie, de multiplier les machines à son service et de transformer son environnement. Tout son mode de vie en a été modifié et est devenu entièrement dépendant de ce flot d'énergie.

Quand nous parlons d'énergie, nous pensons d'abord à notre facture d'électricité ou de gaz, ou à l'essence que nous allons mettre dans notre voiture. Mais en réalité la totalité de ce que nous achetons implique une consommation d'énergie, et en dépend.

Plus largement c'est tout notre environnement qui est modelé et maîtrisé grâce à l'énergie via diverses machines: frigidaire ou radiateur pour modifier la température, voiture pour déplacer objets et personnes rapidement, pelleteuse pour changer la forme du sol, emboutisseuse pour modifier la forme d'une tôle, etc.

L'énergie, avant d'être une facture ou un objet de débat, est une grandeur physique, qui quantifie le changement d'état d'un système. Dire que l'énergie est une grandeur physique veut dire qu'elle est gouvernée par des lois que nous ne pouvons pas changer: inutile d'essayer de négocier, mieux vaut les connaître.

La première loi est le premier principe de la thermodynamique ou « loi de conservation de l'énergie ». Elle implique que les hommes ne peuvent fabriquer de l'énergie; ils ne peuvent qu'extraire de l'environnement une énergie qui existe déjà: l'énergie primaire. Ils peuvent ensuite la transformer et l'utiliser pour faire fonctionner une machine: cette énergie transformée est dite énergie finale.

Historiquement, les seules énergies primaires que les hommes savaient mobiliser étaient la nourriture et la chaleur du soleil, et la seule « machine » à leur disposition étaient eux-mêmes. Ensuite, ils ont domestiqué le bois, puis d'autres organismes vivants comme les animaux de trait, puis le vent et l'eau avec des moulins. Toutes ces énergies étaient renouvelables. Enfin, il y a deux siècles, ils ont inventé des machines faites de métal, alimentées avec des combustibles fossiles.

Depuis nous ne cessons de consommer de plus en plus d'énergie.

La première raison est que nous utilisons toujours plus de machines. Nous augmentons toujours plus l'énorme exosquelette¹ mécanique que nous avons créé à notre profit. Nous vivons désormais dans un monde de machines; chacun de nos actes quotidiens mobilise des machines ou des objets fabriqués par des machines et donc de l'énergie. Si on privait instantanément le monde d'énergie, plus rien ne fonctionnerait, il n'y aurait plus ni banques, ni réseaux d'eau, ni hôpitaux, ni transports, ni chauffage. Ce serait le chaos.

Un terrien utilise aujourd'hui, tous usages confondus, aux alentours de 20 000 kWh par an, quatre fois plus qu'avant l'ère industrielle. Un Français en mobilise le triple, importations comprises.

La seconde raison est que nous sommes de plus en plus nombreux: un milliard en 1800, 3 milliard en 1960, presque 8 milliard aujourd'hui. C'est d'ailleurs grâce à l'accès à une énergie abondante que la population mondiale a pu ainsi croître. La question se pose donc de savoir comment la maintenir à un tel niveau, si cette énergie vient à manquer ou que nous sommes obligés de renoncer à son emploi.

Cette abondance énergétique a profondément transformé notre mode de vie.

La structure de l'emploi a été bouleversée. Depuis 1945 le nombre d'agriculteurs a

1 Ndlr : les hommes ont inventés des exosquelettes biomécaniques qui visent à apporter une assistance physique à des militaires ou à des personnes en situation de handicap. Jean-Marc Jancovici désigne ainsi, par extension du terme, tout le réseau de machines que chacun d'entre nous mobilise quotidiennement (directement ou à travers les objets que nous utilisons)

fortement baissé; le nombre d'emploi dans l'industrie a fortement augmenté, avant que la tendance ne s'inverse en raison de l'automatisation; les emplois dans les services ont augmenté et augmentent toujours, car ils sont en grande partie liés au flux de production qui continue lui-même de croître.

La nature et le prix de notre alimentation ont évolué. En 1950, l'alimentation représentait 20% du budget des ménages; aujourd'hui, ce n'est plus que 10% bien que la consommation de viande ait explosé. La structure du prix aussi a changé, puisque la quasi totalité revenait aux producteurs, alors que ce n'est plus que 3% à 30% actuellement.

La façon de se déplacer a changé, avec des moyens de transports de plus en plus gourmands en énergie, la voiture consommant 5 fois plus que le train, et l'avion 6 fois plus².

L'accroissement de l'industrie et des services a produit un développement urbain considérable, puisqu'il est plus aisé de produire et de commercer en ville. Les deux tiers de la population habite aujourd'hui en ville, contre un tiers dans les années 60. La forme urbaine aussi s'est trouvée impactée par le développement de la voiture individuelle: les villes récentes peu denses comme Los Angeles ont été conçues pour son usage et en sont dépendantes, contrairement au Paris d'Hausmann.

La taille des logements a augmenté: en France chaque personne disposait en moyenne de moins de 30m² dans les années 80, et de plus de 40m² 20 ans plus tard. Et les objets présents dans nos logements ne sont plus les mêmes: si nous devions retirer tous ceux qui contiennent du pétrole sous une forme ou une autre, il n'en resterait guère.

Enfin, toute cette énergie nous³ a permis de gagner du temps, de faire des études, d'avoir une retraite, des loisirs, de faire du tourisme.

La production économique est strictement dépendante de la disponibilité énergétique et toute réduction de celle-ci l'entrave. Or cette baisse est inéluctable concernant les énergies fossiles et il est peu probable que les énergies renouvelables, structurellement plus coûteuses, puissent la compenser avec une performance économique équivalente.

Aujourd'hui nous sommes devenus tellement productifs et tellement nombreux, que nous vidons certes les stocks de ressources non renouvelables mais aussi de ressources renouvelables, telles que les forêts ou les poissons. De plus, notre production s'accompagne de sous-produits indésirables, ces pollutions de diverses natures qui altère notre environnement et donc nos ressources.

Or nous avons adopté un système économique qui comptabilise les flux de production (le PIB⁴), mais qui ne comptabilise pas les ressources qui sont détruites par leur exploitation ou altérées par la pollution. Ce système économique tel qu'il est conçu permet de modéliser une production infinie pourtant impossible en réalité. Aujourd'hui, bien que notre mode de comptabilisation économique ne nous le dise

2 Moyenne par passager et par kilomètre, avec les taux de remplissage moyens actuels.

3 Ndlr : le « nous » vise les classes moyennes et supérieures des pays dits développés

4 Produit intérieur brut

pas, les ressources, y compris énergiques, sont devenues un facteur limitant de la production. Si elles viennent à manquer, rien ne permettra de relancer la production quels que soient les efforts financiers ou humains consentis.

Si on trace une courbe avec en ordonnée le PIB mondial et en abscisse la consommation d'énergie mondiale, on obtient une droite. C'est logique, puisque le PIB et l'énergie mesurent le même flux, le premier monétairement et la seconde physiquement: celui des transformations physiques opérées.

Si on examine les variations dans le temps du PIB et de la consommation énergétique par personne, on constate de même que ces variations sont liées. On constate également qu'elles sont en baisse tendancielle, avec des chutes en 1974 et en 2006 conduisant à chaque fois à des paliers inférieurs. Ce phénomène est encore plus marqué dans la zone OCDE: la consommation d'énergie comme celle du PIB n'y augmentent presque plus depuis 2006.

On voit aussi que les variations de consommation énergétique précèdent un peu celles du PIB⁵, ce qui signifie que la disponibilité de l'énergie conditionne la hausse de production – et non l'inverse.

Ainsi, l'impact majeur des chocs pétroliers n'est pas tant l'épisode de hausse des prix généré que l'arrêt d'une croissance rapide du PIB, due à la baisse de la disponibilité en énergie primaire.

Dans notre système économique, l'énergie primaire est gratuite: le vent, le soleil, le pétrole sont fournis gratuitement par la nature. Quand on paie l'énergie, on paie du travail humain et des rentes humaines pour accéder à une énergie qui elle, est gratuite.

Par conséquent le prix d'une énergie ne dépend pas de son abondance, mais de la facilité à l'extraire, à l'acheminer et à l'utiliser. Une source d'énergie existante dans l'environnement sous une forme très concentrée et aisément accessible sera peu chère. A l'inverse, une énergie peu accessible ou très diffuse coûtera cher à extraire de l'environnement. C'est pourquoi le coût d'un kilowatt-heure extrait du vent, source diffuse, est nécessairement plus élevé qu'un kilowatt-heure provenant d'un puits de pétrole, source très concentrée. De ce point de vue, les caractéristiques physiques des énergies fossiles sont supérieures aux caractéristiques physiques des énergies renouvelables⁶.

C'est pour cette raison que l'Homme est passé des énergies renouvelables aux énergies fossiles. Il y a deux siècles, les transports, l'agriculture, la construction étaient renouvelables. On est passé au 100% énergie fossile parce que c'était plus efficace. La question se pose donc de savoir si on pourra faire le chemin inverse sans que le niveau de vie n'en soit impacté.

Aujourd'hui les énergies fossiles constituent toujours l'essentiel de

5 NDLR: ce n'est pas tout à fait systématique sur la courbe présentée par Jean-Marc Jancovici, mais c'est effectivement le plus souvent le cas

6 Le rendement global du pétrole est de 10 pour 1 aujourd'hui (100 pour 1 dans les débuts de son extraction), celui du nucléaire 60 pour 1, celui du gaz 30 pour 1, celui du photovoltaïque de 3 ou 5 pour 1 (entretien inclus)

l'approvisionnement énergétique mondial, le pétrole pour les transports et le charbon pour l'électricité. Or le pic de production du premier est passé, comme celui du gaz, et le charbon est la plus néfaste de toutes les énergies pour le climat.

Les approvisionnements mondiaux en énergie primaires reposent aujourd'hui encore à plus de 80% sur les énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz). Le reste provient principalement du bois, de l'hydroélectricité et du nucléaire. La part du vent et du solaire sont encore minimales.

Historiquement chaque source nouvelle d'énergie s'est ajoutée aux autres pour satisfaire des besoins croissants. Seul le recours au bois a diminué (du moins en consommation par personne), remplacé partiellement par le charbon bien plus performant.

Les énergies renouvelables n'ont aucunement remplacé les énergies fossiles. Entre 2000 et 2017, le recours au charbon a augmenté 14 fois plus que le solaire et 6 fois plus que l'éolien. Le charbon est la ressource la plus utilisée pour la production d'électricité, qui en consomme les deux tiers. Même les pays qui n'en utilisent plus sur leur sol, ou presque comme la France⁷, y recourent indirectement à travers les objets importés, notamment de Chine.

Le pétrole joue un rôle primordial, non seulement parce qu'il est la source la plus utilisée⁸, mais parce que ses caractéristiques en font l'énergie de la mobilité. Il a la meilleure densité énergétique par unité de volume, et il se stocke et se transporte très facilement puisqu'il est liquide à température ambiante. La première voiture à avoir dépassé les 100 km/h dans le monde était une voiture électrique, et le rendement du moteur électrique est trois à quatre fois supérieur au rendement du moteur à pétrole. Ce n'est donc pas parce que le moteur à pétrole est intrinsèquement supérieur qu'il a supplanté le moteur électrique il y a un siècle, mais parce que l'électricité est plus difficile à transporter. Aujourd'hui, la moitié du pétrole utilisé l'est pour la mobilité et 98% de ce qui roule, vole ou navigue, utilise du pétrole.

Le pétrole et le gaz qui ont d'abord été exploités étaient de l'huile ou du gaz piégés dans une roche poreuse. Ils sont dits pétrole conventionnel ou gaz conventionnel, par opposition au pétrole ou gaz de schiste. Ceux-ci sont piégés dans une roche-mère marneuse ou argileuse, non poreuse, et sont plus difficiles à extraire.

On ne peut connaître les réserves prouvées de pétrole, et notamment de pétrole conventionnel, car leurs propriétaires ne communiquent pas les données exactes. En particulier, les pays de l'OPEP, ayant convenu de se répartir les quotas de production au prorata de leurs réserves, déclarent depuis des années des réserves constantes, ce qui n'est guère crédible.

On sait toutefois qu'on découvre de moins en moins de réserve de pétrole ou de gaz

7 La France a encore 4 centrales électriques au charbon, dont deux doivent fermer en 2021 et 2022, et les deux autres à l'horizon 2026

8 Le pétrole représente plus du tiers des énergies primaires utilisées dans le monde

conventionnel depuis les années 70. On sait également que chaque réserve a une limite et par conséquent qu'elle a un pic d'exploitation. Observer l'évolution de la production des pays qui consentent à fournir ces données permet de constater quand ce pic (ou ces pics si le pays a plusieurs réserves) est franchi.

Le pic de production a d'ores et déjà été franchi dans de nombreux pays producteurs: aux USA en 1970, au Royaume Uni en 1985 et 2000, au Mexique en 2004, en Argentine en 2001, en Égypte en 1993, au Venezuela en 1970 et 1998, en Afrique en 2009, et en Europe (mer du Nord) en 2000. En fait la seule production qui augmente encore significativement est celle de l'Irak.

Un rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie, "*World Energy Outlook*", dit que la production mondiale de pétrole conventionnel est en déclin depuis 2008.

Le pétrole de schiste des USA a permis de reporter un peu le pic global. Mais cette production est à surveiller, car l'équilibre financier des entreprises exploitantes n'est pas assuré. En effet, la nécessité de multiplier les puits pour exploiter ce type de gisement les a conduit à s'endetter fortement. Il se pourrait donc que le pic global soit en train d'être passé.

On pourrait penser qu'après le passage du pic, nous serons encore tranquilles quelques temps, tant que les réserves ne sont pas épuisées. Mais en réalité il suffit que la production cesse d'augmenter, pour que le fonctionnement de l'économie soit profondément perturbé. Tel a été le cas avec le choc pétrolier de 1974 consécutif au pic de production des États Unis⁹.

On va donc vers une raréfaction du pétrole. Cela n'implique cependant pas une augmentation continue des prix. En effet une telle raréfaction provoque une contraction de l'économie, puisque le pétrole est le fluide qui permet l'organisation du système physique mondial de production: l'économie mondiale est aujourd'hui complètement dépendante du transport des ressources, des marchandises et des personnes, donc du pétrole. De ce fait, le prix du pétrole devient instable: il monte, donc la demande baisse, donc le prix baisse, donc la demande monte, donc le prix monte, etc.

Pour ce qui est du gaz, le pic de la Mer du Nord a été passé en 2005. Depuis la consommation de gaz européenne baisse, ce qui ne s'était jamais produit auparavant. Cette baisse sera accrue par le passage du pic de la Norvège, prévu en 2020.

L'Europe peut difficilement trouver d'autres sources d'importation, pour des raisons autant pratiques (nécessité de gazoduc) que géopolitiques. Donc le gaz y remplacera difficilement le charbon ou le nucléaire.

Le charbon pour sa part est une énergie principalement utilisée par le pays qui la produit. Dix pays seulement détiennent 90% des réserves, et cinq en possèdent les trois quarts: les États-Unis, la Chine, la Russie, l'Australie et l'Inde (par ordre décroissant du volume des réserves). Leurs réserves sont encore importantes, mais le charbon est l'énergie la plus néfaste pour le climat. Notre avenir climatique dépend

⁹ Ndlr : cela a créé un contexte favorable à la pression exercée par les pays arabes à partir de 1973 à l'encontre des pays qui soutenaient Israël, via une hausse du prix du pétrole et un embargo sur les exportations

donc grandement des choix qui seront faits dans ces pays.

La hausse continue de notre consommation énergétique s'accompagne d'une hausse des émissions de gaz à effets de serre. Ceux-ci s'accumulent durablement dans l'atmosphère, générant une hausse moyenne de la température de la Terre qui bouleverse le climat.

L'effet de serre est identifié depuis les années 1900. Il est dû à certains gaz présents dans l'atmosphère, qui ont la propriété d'absorber les rayons infrarouges de la terre, dont notamment le CO₂ et le méthane. Avant la période industrielle, le taux de ces gaz dans l'atmosphère était à peu près constant, et assurait les conditions climatiques favorables au développement de la vie avec une température moyenne de 15°C. Il s'opérait un équilibre entre les émissions naturelles de ces gaz, et leur absorption par les océans et les plantes. Cette capacité d'absorption étant limitée, le CO₂ émis en surplus s'accumule, et il reste longtemps: la moitié est encore présente après un siècle, un cinquième après un millénaire, et un dixième 10 000 ans plus tard.

En 1896, un suédois, Mr Arrhenius, calcule que si on double la quantité de CO₂ dans l'atmosphère, la température moyenne de la terre augmentera de 4°. Il calcule également que plus la température est basse plus elle augmentera: elle augmentera donc davantage aux pôles, plus en hiver qu'en été, plus la nuit que le jour.

De fait, sous l'impact des activités humaines, la concentration atmosphérique en CO₂ croît régulièrement depuis 1995¹⁰. Les conférences des parties, qui réunissent régulièrement depuis 1995 les pays signataires de la convention climat de Rio, n'ont pour l'heure influé en rien sur ce rythme, qu'elles soient une réussite ou un échec. Et de fait, la température moyenne de la terre a augmenté de 1,5° depuis le début de l'ère industrielle.

L'homme est ainsi devenu un agent climatique. Il est en train de changer le climat, même si cela ne lui avait pas été jusqu'ici perceptible, car nos sens ne perçoivent que la météo, et le climat n'est pas la météo. Nous ne percevons le climat que de façon indirecte, par exemple en observant la végétation. Il nous faut donc l'étudier. Or l'étude du climat est complexe et nécessite le croisement d'analyses de spécialistes de multiples sciences: c'est la fonction du GIEC (groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat).

Les émissions de CO₂ sont principalement dues à la déforestation, au labourage, à l'usage de combustibles fossiles, et à la fabrication du ciment¹¹. Elles sont, comme la consommation d'énergie, parfaitement corrélées au PIB. Elles n'ont cessé de croître, sauf au moment des crises ou guerres mondiales et les seules périodes où elles ont baissé de plus de 4%, qui est l'objectif de baisse annuelle que nous nous sommes

10 La concentration en CO₂ est passé de 280 parties par millions à l'ère préindustrielle à 415 en 2019, soit une hausse de bientôt 50%

11 Contribution aux émissions par secteur: centrales à charbon 20%, centrales au gaz: 7%, cimenterie: 6%, autres industries: 12%, chauffage 6%, transports: 14%, agriculture: 20% et déforestation 10%

fixé, sont celles de la crise de 1929 et de la guerre de 1940.

Les émissions de CO₂ sont liées à plusieurs facteurs : la population et le niveau de production par personne, la quantité d'énergie que cette production demande, et la quantité de CO₂ que cette énergie émet. L'équation de Kaya¹² exprime cela en disant que les émissions de CO₂ sont le produit de quatre facteurs: la population, le PIB par personne, l'intensité énergétique du PIB et l'intensité en CO₂ de l'énergie.

$$\text{CO}_2 = \text{POP} \times (\text{PIB}/\text{POP}) \times (\text{E}/\text{PIB}) \times (\text{CO}_2/\text{E})$$

Depuis la révolution industrielle, les deux premiers facteurs croissent plus vite que les gains d'efficacité qui ont pu être fait sur les deux autres. Par conséquent les émissions mondiales de CO₂ croissent.

Les effets sur le climat de cette accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont calculés grâce à des modèles mathématiques de plus en plus évolués, qui prennent maintenant en compte les rétroactions: par exemple si la concentration en GES augmente trop vite, les écosystèmes se dégradent et absorbent moins de CO₂, augmentant encore davantage leur concentration. Par contre ces modèles n'intègrent pas l'impact sur le PIB, qui pourtant existera nécessairement; ainsi scénarios du GIEC les pires pour le climat correspondent à une économie florissante, ce qui n'est guère réaliste.

Selon le scénario le plus favorable, dans lequel nous baissons très vite et drastiquement nos émissions, la hausse de la température moyenne à la fin du siècle pourrait être limitée à 1,5°. Si nous ne faisons que les maintenir au niveau de 2000 (sachant que depuis elles ont augmenté de 30% environ), elle sera de 3°. Et si elle double d'ici 2050 par rapport à 2000, la hausse sera de 5°.

D'aucuns pourraient estimer que quelques degrés de plus ne devraient pas être un souci. Cela va pourtant avoir des impacts majeurs sur les écosystèmes, le niveau des océans, les courants marins et donc les climats régionaux, la fréquence et l'intensité des phénomènes extrêmes, le trou dans la couche d'ozone, la santé humaine... sans parler de l'acidification des océans, et des risques géopolitiques.

Quand la météo annonce une hausse de 2 ou 3°C pour le lendemain, cela ne nous impressionne guère. Alors il est difficile de réaliser qu'une hausse de 2 ou 3°C sur la température moyenne terrestre est une catastrophe, et que cela va modifier l'équilibre climatique que nous connaissons. Tel est pourtant bien le cas, et nous voyons déjà, avec une hausse d'à peine plus de 1°C, les premiers signes de déstabilisation climatique.

Avec une hausse de quelques degrés de la température moyenne, l'été caniculaire de 2003 deviendra l'été normal, ce qui signifie que la moitié des étés seront plus chauds

12 Wikipédia : Yoichi Kaya est un économiste et chercheur japonais, il a élaboré en 1993 cette équation, utilisée depuis par le GIEC pour analyser les évolutions des émissions de CO₂ (https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quation_de_Kaya)

encore. Cela sera destructeur pour les forêts et pour une partie des récoltes. La hausse des températures augmente l'évaporation et aggrave la sécheresse des sols, comme on le constate déjà par exemple dans le sud des États Unis, en Australie, au Brésil. Le risque d'incendie va croître partout. En France les forêts d'Aquitaine brûleront en 2040 aussi facilement que celles de la cote d'Azur actuelle, et celle de Fontainebleau aussi facilement que l'Aquitaine aujourd'hui.

Plus d'évaporation signifie davantage de précipitations, mais elles seront réparties différemment, avec plus de précipitations dans les hautes latitudes et la bande équatoriale, et moins dans les bandes tropicales, dont le bassin méditerranéen.

Pour la survie des écosystèmes, le problème est la vitesse à laquelle cette hausse de la température terrestre se produit. Auparavant les variations étaient de quelques fractions de degré par siècle, et la végétation avait le temps de s'adapter. Comme ce ne sera pas le cas, la végétation va changer ; mais comme l'adaptation prend du temps, une grande partie va disparaître, à cause du dessèchement, des maladies sur des sujets fatigués par le stress hydrique, du feu... Pour survivre, une espèce doit pouvoir se déplacer plus vite que l'évolution du climat. Le GIEC a examiné la plage de migration possible en km/année pour chaque espèce, et a montré que la survie des arbres et des herbacées est menacée.

Tout cela implique une baisse des rendements agricoles.

Comme toute la biodiversité, la biodiversité microbienne va évoluer. Cela se produira d'une façon très difficile à prévoir, ses liens avec le climat n'étant pas évidents et identifiés seulement après coup. Il a été observé par exemple une relation entre le phénomène El Nino et la prévalence du choléra au Bangladesh, le nombre de cas augmentant avec la température du Pacifique.

Une conséquence plus connue est la hausse du niveau de la mer. Deux facteurs se conjuguent: le volume de l'eau augmente avec sa température et les glaciers, la banquise ainsi que les calottes glacières fondent. Une hausse de 2° entraînera une élévation de 5 à 6 mètres d'ici le milieu du millénaire.

Prévoir cette élévation du niveau de la mer est difficile, car ce n'est pas forcément progressif; ça peut être brutal, notamment à l'occasion d'une tempête. Or beaucoup d'équipements essentiels au fonctionnement de l'économie sont dans les ports: entrepôts, raffineries, centrales électriques, silos agricoles, sans parler de toutes les villes situées sur les littoraux.

Les phénomènes climatiques tels que les ouragans, tornades et orages vont croître en fréquence et en intensité. En effet, la température de surface de la terre augmente et celle de la stratosphère diminue, donc l'écart s'accroît et les mouvements convectifs de même.

Les océans vont s'acidifier en absorbant plus de CO₂, puisque le CO₂ est un acide: l'acide carbonique. Or le pH des océans a toujours été très stable. L'acidification en cours est donc disruptive et met en danger les coraux, ainsi que certains planctons. Enfin, il n'est pas impossible que *Le jour d'après* devienne autre chose qu'une fiction. Le Gulf Stream fait partie d'un grand mouvement de circulation des eaux dans les océans: les eaux arctiques, étant plus froides et plus salées que les eaux atlantiques, sont plus denses; les premières plongent donc sous les secondes, créant une

aspiration des eaux atlantiques vers le nord. Ce courant d'eau chaude tempère le climat de notre secteur, et lui permet de bénéficier d'une température supérieure d'environ 15° à celle du Canada. Or la fonte de la banquise diminue la densité des eaux arctiques. Ainsi, ce courant pourrait ralentir. Personne ne prévoit d'arrêt brutal, mais il faut noter que cela s'est déjà produit, suite à une débâcle d'iceberg qui avait diminué la salinité de l'eau.

Ce qui est en jeu, c'est l'habitabilité de la Terre pour l'homme. En aucun cas cela n'est pris en considération dans notre comptabilité économique. Cette habitabilité n'a d'ailleurs pas de prix. Pour s'en convaincre, on peut tenter une estimation sur la base du coût de la station spatiale internationale, qui assure à 6 personnes des fonctions de survie minimalistes. Cette station vaut 100 milliards de dollars, soit plus de 16 milliards par occupant. Admettons que l'habitabilité de la terre vaut cela, bien que ce soit un strict minimum, l'habitabilité de la Terre étant bien meilleure ! Si on considère que l'on en détruit un millième chaque année, cela signifie nous détruisons une valeur de 16 millions par personne par an. Cela pour produire une valeur de 11 000 dollars par personne...¹³

Nous devrions prendre en compte la raréfaction des ressources naturelles et la dégradation de l'habitabilité de la Terre dans la formation des prix, avec des dotations aux amortissements pour comptabiliser la diminution des stocks, et des provisions pour risques pour comptabiliser les coûts des perturbations et dégradations à venir.

Pour préserver l'habitabilité de la Terre, nous devons diviser au plus vite l'empreinte carbone de l'humanité par trois. Les pays industrialisés doivent la réduire encore plus fortement. En France, cela passe notamment par des changements dans les domaines des transports et de l'alimentation ainsi que la rénovation énergétique des bâtiments.

Nous avons déjà émis 2200 milliards de CO₂ depuis le début de l'ère industrielle. Pour limiter à 2° la hausse des températures d'ici la fin du siècle, il faut que le total du CO₂ émis reste inférieur à 3000 milliards de tonnes. Il nous faut donc diviser pratiquement par trois nos émissions, qui sont actuellement de l'ordre de 40 milliards de tonnes par an.

Selon l'équation de Kaya, diviser par trois nos émissions à population et PIB constants, c'est multiplier par trois l'efficacité énergétique de la production, ou diviser par trois les émissions de CO₂ de l'énergie utilisée. Bien entendu, si on persiste à viser une hausse du PIB de 2% par an, c'est à dire un doublement du PIB tous les 32 ans, il faudra multiplier d'autant cet effort.

Nous devons réduire notre empreinte carbone en moyenne, à 2 tonnes par an et par personne. Pour un pays donné, l'empreinte carbone est constituée des émissions liées à ce qui est consommé dans ce pays, c'est à dire les émissions produites dans le pays

13 PIB moyen annuel par personne

plus celles dues aux importations et moins celles liées aux produits exportés.

Ainsi, si les émissions moyennes d'un Français sont de 6 tonnes de CO₂ par an¹⁴, son empreinte carbone moyenne est d'environ 11 tonnes par an.

La moitié de cette empreinte vient à parts équivalentes de l'alimentation et des biens de consommation¹⁵; l'autre moitié se répartit approximativement en trois tiers:

transport de personnes, confort des logements et services publics.

Les émissions de la France ont nettement baissé après le choc pétrolier de 1974, puis avec le programme nucléaire et de nouveau lors de la crise de 2008. Elles sont maintenant inférieures à celles de 1990, conformément à la convention de Kyoto.

Mais elles sont encore bien trop élevées au regard des engagements de l'accord de Paris¹⁶, et ne baissent plus que faiblement. Cela est notamment dû aux transports dont les émissions continuent d'augmenter, obérant les efforts faits sur l'industrie, la production d'énergie, et dans une moindre mesure le chauffage.

L'empreinte carbone moyenne des Français, ne baisse plus guère non plus.

Des efforts doivent donc être faits sur le transport de personne en France. Comme l'électricité y est nucléaire donc décarbonée, l'usage du train y est six fois moins émetteur que celui de la voiture ou de l'avion. Il est donc à favoriser partout où le taux de remplissage peut être suffisant – ce qui est plus aisé en fond de vallée, bien entendu. Et interdire les vols intérieurs sur des trajets faisables en train en 2h30 est judicieux.

L'alimentation représentant le quart de notre empreinte, nous devons également la modifier, et réduire notre consommation de viande et surtout de viande rouge, quinze à vingt fois plus émettrice que les végétaux¹⁷. C'est d'autant plus nécessaire que 80% de la surface agricole française est dévolue à la nourriture des animaux.

On ne peut tripler l'efficacité énergétique, mais on peut encore l'améliorer, à condition de mettre en place des réglementations et des taxes qui évite que tout gain d'efficacité ne soit absorbé par un plus grand usage.

Si l'efficacité de la chaîne énergétique a été améliorée globalement de 30% en 50 ans, les gains ne sont plus que de 0,5% par an désormais. A ce rythme, le gain d'efficacité d'ici 2030 ne serait que de 5%. Tripler l'efficacité énergétique d'ici 2050 est donc illusoire, mais il est encore possible de l'améliorer à condition d'éviter les effets rebonds. En effet, la diminution des coûts résultant des gains d'efficacité entraîne une augmentation des usages qui obère in fine une grande partie des gains, si des mesures ne sont pas prises pour contrer cet effet.

14 Si on prend en compte tous les gaz, et pas seulement le CO₂, les émissions moyennes d'un Français sont de 8 tonnes par an

15 Y compris leur transport

16 NDLR: les engagements des pays européens pour contribuer à l'accord de Paris étaient de baisser avant 2030 leurs émissions de 40% par rapport à 1990; le nouvel engagement pris en 2020 est que cette baisse soit d'au moins 55%.

17 Émissions en kg d'équivalent CO₂ d'un kg de nourriture:

- 1 pour les végétaux
- 2 à 5 pour les poissons et les viandes blanches
- 15 à 20 pour les viandes rouges (et le double pour le veau)

Par exemple, un bâtiment de 2008 consomme 3 fois moins qu'un bâtiment de 1950, mais la surface moyenne par habitant est passé en France de 23 à 40 m² et les équipements se sont multipliés. De même les progrès considérables faits sur l'efficacité énergétique des voitures ou des frigidaires ont servi à avoir des voitures plus puissantes et plus lourdes, et des frigidaires trois fois plus grands avec compartiment congélateur.

Concernant les ordinateurs, c'est l'explosion de l'équipement qui a conduit à multiplier la consommation d'électricité dans les bâtiments résidentiels ou tertiaires par quatre entre 1970 et 2010, malgré des gains d'efficacité considérables. Au global la consommation d'électricité par personne dans le monde a doublé depuis les années 80.

Pour éviter ces effets rebonds, le prix et la réglementation sont des leviers incontournables. Par exemple, pour diviser par 4 la consommation des voitures, on peut soit augmenter très fortement le coût du carburant, soit interdire les véhicules consommant plus de 2 litres aux 100 km. Comme le signal prix est long à agir et que son résultat est incertain, réglementer sera de toute façon nécessaire. Et, dans tous les cas, il sera indispensable de planifier et donner le cadre à l'avance, afin de laisser le temps aux industriels de s'ajuster.

Concernant le signal prix, l'outil le plus souvent évoqué est la taxe carbone. Elle inquiète bien sûr en raison de son effet sur le coût de la vie. Il faut pourtant se préparer à une hausse du prix du pétrole qui aura le même effet. Mieux vaut se préparer à l'avance à une énergie chère avec une taxe carbone qui permettra d'investir pour limiter les consommations, que d'attendre et payer un surcoût inévitable aux producteurs d'énergie sans plus avoir les moyens d'investir.

Il n'y a que trois manière de décarboner l'énergie: poursuivre le report du charbon sur le gaz, le développement du nucléaire, et celui des énergies renouvelables.

Comme l'énergie quantifie la transformation, il n'y pas d'énergie « verte ». Choisir une énergie, c'est choisir un type de transformation et c'est choisir des avantages et des contreparties. Toute énergie est sale si on l'amène à un niveau suffisant d'utilisation. Si l'on couvre la totalité de la planète de panneaux photovoltaïques, ça cesse d'être une énergie propre. Une «énergie propre» est une énergie utilisée en quantité suffisamment faible pour que ses inconvénients le soient également, et choisir une énergie implique d'arbitrer entre des inconvénients.

Au regard des émissions carbone, les énergies les plus "sales"¹⁸ sont le gaz de schiste ainsi que les agrocarburants cultivés après déforestation; il faut souligner que ces derniers sont bien pires que le pétrole.

18 Émissions des différentes énergies en g de CO₂ par Kwh:

- gaz de schiste et biocarburants avec changement d'affectation du sol: 700 à 800
- énergies fossiles autres que le gaz de schiste: 250 à 400
- biocarburants sans changement d'affectation des sols: 100 à 150
- autres énergies renouvelables et nucléaire: moins de 50 g

Une des façons de diminuer l'intensité carbone de l'énergie est de remplacer le charbon par le gaz, puisque cela divise par trois les émissions de gaz à effet de serre. Les électriciens y sont incités par le prix du carbone dès lors qu'il est supérieur à 30€ la tonne. Cependant, les réserves de charbon étant supérieures aux réserves de gaz, cette stratégie a ses limites.

On peut également capturer le CO₂ là où il est émis, dans les centrales électriques notamment, et le stocker sous terre, par exemple dans des réservoirs de pétrole épuisés. Cette captation consomme 20 à 30 % de l'énergie de départ, diminuant d'autant le rendement pour les producteurs d'électricité. Cela ne se fera donc que sous contrainte réglementaire.

Une autre façon est de recourir davantage au nucléaire, qui produit aujourd'hui 15% environ de l'électricité mondiale¹⁹. Le nucléaire est une énergie très peu carbonée, et très efficace car d'une grande densité: la fission d'un gramme d'Uranium 235 produit autant d'énergie que combustion d'une tonne de pétrole.

Son développement est conditionné par plusieurs facteurs: la capacité d'investissement, la ressource en uranium, et l'acceptabilité sociale.

Accroître le parc nucléaire mondial de 7% par an, pendant 35 ans revient à porter d'ici à 2050 de 300 à 3000 Gigawatt la puissance installée. Construire 2500 Gigawatt coûterait environ 10 000G\$ soit 15% du PIB mondial. C'est une énergie dont le coût est principalement lié à la construction de la centrale. Le coût de fonctionnement, fourniture en uranium incluse, est faible. Elle attire peu les investisseurs privés, qui n'apprécient pas de devoir attendre une dizaine d'année avant le moindre retour, et le coût de l'emprunt impacte fortement le prix de l'énergie produite. Par conséquent, le développement par le secteur public est plus facile et moins coûteux.

La ressource en uranium est importante: quelques dizaines de millions de tonnes, peut-être un peu moins. Toutefois elle ne suffira pas si la production d'électricité nucléaire augmente de 5 ou 10% par an. Il faudrait développer les réacteurs de 4ème génération, en cours d'étude, et qui exploiteraient l'essentiel de l'uranium fourni et utiliseraient du thorium 14, plus abondant²⁰.

Mais le nucléaire est aussi une énergie très controversée car perçue comme dangereuse, et également en raison des déchets produits. Pourtant elle a à ce jour causé moins de décès, par unité d'énergie produite, que le charbon, le pétrole ou la lignite, et ni le Japon ni l'Ukraine n'y ont renoncé malgré les accidents qu'ils ont connus. Quant aux déchets nucléaires, ils représentent moins de 1 kg par Français et par an, dont 100 g de déchets à vie longue (quelques siècles) et dont 10 g de déchets à haute activité, ce qui est un volume assez faible comparés aux 2500 kg de déchets industriels, dont 100 kg sont toxiques. Il n'en reste pas moins que l'acceptabilité sociale et donc la politique vis à vis du nucléaire sont très différentes suivant les pays.

19 72% en France

20 Pour en savoir plus sur les réacteurs de 4ème génération : https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9rations_de_r%C3%A9acteurs_nucl%C3%A9aires; la France a stoppé ses recherches en 2019

La troisième manière de décarboner l'énergie est de développer la mobilisation des sources renouvelables: la biomasse dans la limite de ce qui a poussé dans l'année, l'hydroélectricité, le rayonnement solaire, et le vent. Il faut noter que le dispositif de capture d'une énergie renouvelable peut, lui, ne pas être renouvelable, et aussi que plus une énergie est abondante, plus elle est diffuse et donc plus elle est difficile à capter.

La biomasse a les mêmes usages que le charbon - chaleur, biogaz, électricité - mais avec un rendement moindre et même très mauvais pour l'électricité (20%). Son potentiel d'évolution est limité car en concurrence avec l'alimentation.

L'hydroélectricité présente un bon rendement. Il reste du potentiel en Asie, contrairement à l'Europe où tout a à peu près été installé. Cette énergie présente toutefois des conflits d'usage possibles, les barrages servant aussi à l'irrigation ou au soutien d'étiage. Et les barrages peuvent être dangereux.

Le rayonnement solaire est mobilisé via le chauffage solaire de l'eau, et l'électricité photovoltaïque. En France cette dernière est davantage organisée comme une activité économique pour injecter de l'électricité dans le réseau que pour la consommation personnelle. De ce fait les projets sont surtout des centrales photovoltaïques au sol, donc très consommateurs d'espace²¹. De plus le dispositif de capture n'est pas renouvelable, sa durée de vie étant de 25 à 30 ans, et sa fabrication est plus émettrice de CO₂ que l'éolien²². Compte tenu de l'entretien, le rendement global est médiocre, de l'ordre de celui du gaz de schiste.

L'éolien fournit actuellement environ 10% de l'électricité en Europe. C'est une énergie intermittente, donc la production est très variable: elle est (toujours en Europe) de 10 à 90 Gigawatt pour 170 GW Gigawatt installés. Par conséquent il faut conserver à côté une énergie pilotable, ce qui signifie garder la puissance nucléaire installée, en baissant la production donc les revenus, avec le risque de dégrader l'entretien. Une alternative est de stocker une part de l'énergie produite. Dans tous les cas, cela coûte 10 à 20 fois plus cher que le nucléaire²³.

A l'inverse de l'éolien, les hydroliennes ont une production prévisible, mais présentent d'autres inconvénients: elles nécessitent beaucoup de matériaux, beaucoup d'entretien en raison de l'eau salée, et peuvent être en conflit d'usage avec la pêche.

Pour limiter le dérèglement climatique comme pour se préparer à la moindre disponibilité d'énergies fossiles, il est indispensable de planifier, investir et réglementer afin de changer massivement de sources d'énergie et optimiser les usages. Malgré cela le niveau de production économique actuel ne pourra être maintenu, et plutôt que de subir la décroissance à venir, nous devons l'anticiper et choisir la sobriété.

L'avenir va donc vraisemblablement s'écrire avec un mélange de nucléaire et d'énergies renouvelables, ainsi que d'économies d'énergie et de contraction

21 Consommation d'espace d'une centrale photovoltaïque: environ 1ha par MW – 400 fois plus que le nucléaire

22 Cette fabrication utilise de l'électricité pour fondre le silicium, donc son niveau d'émission dépend du pays où elle a lieu

23 Ndlr : des études récentes contredisent ce point

économique, dans des proportions qui dépendront des contextes géographiques, politiques, sociaux et culturels locaux.

La contraction économique interviendra de toute façon, mais elle peut être de deux natures. Soit nous utilisons moins de services et nous consommons moins de façon délibérée, dans une logique de sobriété et d'anticipation. Soit nous le faisons de façon subie dans un contexte de pénurie, et c'est la pauvreté. Certes, il est difficile de proposer un programme politique basé sur la sobriété, car cela signifie baisse du PIB et donc de la base fiscale. Mais si on n'organise pas collectivement la sobriété, alors nécessairement, il y aura une augmentation de la pauvreté.