

INFORMATION ET DÉBATS

LA TRANSITION ENERGETIQUE FACE AU TEMPO DE L'HORLOGE CLIMATIQUE

Christian de PERTHUIS¹ et Boris SOLIER²

A l'occasion du débat sur la « transition énergétique », la chaire Economie du Climat a publié en 2013 un *Informations & Débats* : « La transition énergétique, les ambiguïtés d'une notion à géométrie variable ». Nous y mettons en garde contre la malléabilité d'un concept qui risquait de brouiller les enjeux climatiques.

Depuis lors, l'usage du terme s'est répandu, faisant même en France l'objet d'une loi votée en 2015, sans que la banalisation du concept en facilite nécessairement la compréhension.

Ce nouvel *Information & Débats* vise à éclairer les enjeux de la transition énergétique en partant d'une approche historique. Il montre que les transformations à opérer pour se mettre en ligne avec les objectifs de l'Accord de Paris sont inédites par rapport aux mécanismes des transitions passées :

- Elles doivent s'opérer suivant le tempo de l'horloge climatique qui est réglée par l'évolution du stock de carbone présent en quantités croissantes dans l'atmosphère (« carbone d'en haut »), alors que les transitions historiques ont consisté à accroître la capacité des sociétés à extraire toujours plus de ressources fossiles (« carbone d'en bas ») pour empiler les sources d'énergie ;
- Au mécanisme historique de l'empilement, il faut substituer un schéma dans lequel les sources décarbonnées ne s'ajoutent plus aux sources existantes, mais prennent la place des énergies fossiles ;
- Les gains d'efficacité énergétique ne doivent plus conduire, via la baisse des prix relatifs, à la hausse des consommations d'énergie par tête qui contribue puissamment à l'escalade des émissions.

En conclusion, nous proposons l'adoption d'une approche holistique de la transition énergétique, permettant de mieux raccorder les stratégies d'atténuation du changement climatique à celles de lutte contre l'appauvrissement de la biodiversité.

MOTS-CLÉS

Transitions énergétiques

Accord de Paris

Biodiversité

¹ Professeur à l'Université Paris-Dauphine, fondateur de la Chaire Economie du Climat

² Maître de Conférences à l'Université de Montpellier, Co-responsable du pôle Transitions Énergétiques de la Chaire Economie du Climat

Les auteurs tiennent à remercier les relecteurs d'une première version de ce travail dont les commentaires éclairés ont permis d'améliorer son contenu : Cédric Clastres (Université Grenoble Alpes), Anna Creti (Université Paris-Dauphine), Patrick Criqui (CNRS, Université Grenoble Alpes), Patrice Geoffron (Université Paris-Dauphine), Laurent Joudon (EDF), Pierre-André Juvet (Université Paris Lumières), Hélène Le Teno (Groupe SOS), Olivier Massol (IFPEN), François Mirabel (Université de Montpellier), Jacques Percebois (Université de Montpellier).

Plan

Introduction : un concept à géométrie variable

1. Les transitions énergétiques du passé : une histoire d'empilements

Qu'est-ce qu'un système énergétique ?

Quatre transitions séculaires

Empilement des sources primaires et croissance de la consommation d'énergie

Transitions énergétiques et prix relatifs

L'empilement des émissions de CO₂

La transition du XXI^e siècle : le retrait des énergies fossiles

2. La transition bas carbone : comment déempiler ?

Objectif 2°C : le temps qu'il reste

Passer d'un schéma additif à un schéma substitutif

La distribution des gains d'efficacité énergétique : l'équité

La distribution des gains d'efficacité : l'effet rebond

De l'économie de la rente pétrole à celle de la rente carbone

L'objectif de neutralité carbone

L'investissement dans les puits : la biodiversité au service de la transition bas carbone

Conclusion : Pour une approche holistique de la transition énergétique

Annexes

Annexe 1 – Consommation d'énergie par source (1800-2015)

Annexe 2 – Emissions de CO₂ par source (1850-2015)

Annexe 3 – Population, consommation d'énergie et émissions de CO₂ par tête (1800-2015)

Annexe 4 – Le phare des Baleines

Introduction : un concept à géométrie variable

Le concept de transitions énergétiques est apparu furtivement au lendemain des chocs pétroliers des années 1970, dans un ouvrage portant sur la diversification du mix énergétiqueⁱⁱ. Son usage a reflué dans les années 1980, à la suite du contrechoc pétrolier. L'expression est revenue en vogue dans les années 2000 avec la remontée des prix des énergies et la prise de conscience de la question climatique.

L'expression se décline au pluriel et peut justifier des stratégies très diverses. Aux Etats-Unis, la transition énergétique vise à réduire la dépendance du pays à l'égard des importations d'hydrocarbures. Le terme justifie le déploiement à grande échelle des pétroles et gaz de schiste qui risquent de prolonger l'usage des énergies fossilesⁱⁱⁱ. Au Proche-Orient, la transition énergétique doit permettre de guérir les économies de leur addiction à la rente pétrolière. Dans les pays émergents, elle vise à assurer un accroissement des sources d'énergie compatible avec la montée en régime des économies.

En Europe, le concept justifie sur le papier des politiques visant simultanément à réduire les émissions de gaz à effet de serre, à promouvoir les énergies renouvelables et à inciter à l'efficacité énergétique. Mais sitôt qu'on creuse un peu, il apparaît que l'emballage enveloppe des stratégies nationales disparates : au nom de la transition énergétique, l'Allemagne quitte le nucléaire, le Royaume-Uni cherche à y revenir, la Pologne à y entrer et la France s'interroge sur les moyens de réduire son poids...

Cette malléabilité du concept est dangereuse, car elle peut orienter vers des futurs indésirables sous l'angle du climat. Cet *Information & Débats* cherche à donner une formulation rigoureuse au concept de transition énergétique et à préciser ses liens avec le changement climatique. Dans une première partie, nous reprenons les analyses historiques montrant comment les transitions du passé ont consisté à empiler les sources primaires d'énergie. Empilement, à l'origine d'un accroissement sans précédent de la consommation mondiale d'énergie et d'un rejet massif de CO₂ dans l'atmosphère. La deuxième partie souligne la spécificité de la transition bas carbone qui devra déempiler ces sources en renonçant aux fossiles. Ce virage à 180° va prendre du temps. Or, le stock de CO₂ déjà accumulé dans l'atmosphère ne nous en laisse que très peu. Réduire cette discordance entre le temps des transitions et le tempo de l'horloge climatique sera la grande affaire de la transition bas carbone.

1. Les transitions énergétiques du passé : une histoire d'empilements

La notion de transition énergétique est souvent définie à partir du poids respectif des sources d'énergie primaires utilisées dans le système, communément appelé « mix énergétique ». Par exemple, le système énergétique mondial est passé de la domination de la biomasse traditionnelle à celle des fossiles au-début du siècle dernier du fait de la contribution croissante du charbon qui représentait 19% de l'énergie primaire utilisée dans le monde en 1870, mais 47 % en 1900 et 55 % en 1910 (Vaclav Smil^{iv}). On peut également appliquer ce filtre d'analyse à un segment isolé du système énergétique : le système électrique français a ainsi transité en une trentaine d'années des fossiles vers le nucléaire à la fin du siècle dernier.

On associe souvent cette définition à un critère de temps requis pour qu'une nouvelle source primaire atteigne un certain poids dans le système, comme l'ont suggéré Marchetti et Nakicenovic (1979)^v dans une approche assez déterministe. Ainsi, Smil (2017) estime qu'il a fallu plus de cent ans pour que le charbon contribue à hauteur de 25 % à l'approvisionnement mondial en énergie, alors que le pétrole a atteint ce chiffre en 80 ans. Des délais assez longs, également soulignés par Peter Lund (2006)^{vi}. Cette

approche repose cependant sur la datation des points de départ et d'arrivée dont le caractère conventionnel mérite d'être discuté, comme le rappelle Benjamin Sovacool (2017)^{vii}.

L'approche à partir du mix énergétique reste cependant une vision simplificatrice, loin de refléter la complexité inhérente aux systèmes énergétiques et à la dynamique de leurs transformations.

Qu'est-ce qu'un système énergétique ?

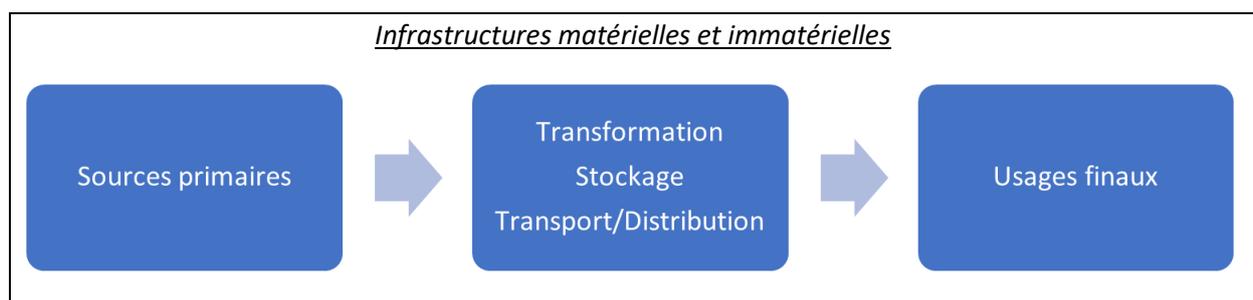
Pour comprendre la dynamique des systèmes énergétiques, et donc les bons leviers pour les faire évoluer, il convient d'en avoir une représentation adéquate. Un système énergétique se caractérise par un jeu d'interrelations complexes qui rattachent les sources primaires aux usages finaux (figure 1).

Les usages finaux de l'énergie correspondent à la consommation d'énergie par les ménages, les entreprises ou les collectivités. Ces usages répondent à de multiples besoins, de déplacement, de chauffage, d'éclairage, de fabrication... nécessaires à l'activité humaine. Il y a donc une corrélation entre les modes de production et de consommation d'une société et la quantité d'énergie finale qu'elle consomme. Les usages finaux peuvent être associés à des technologies qui reposent durablement sur telle ou telle énergie. L'invention du moteur à combustion interne dans les années 1880 a ainsi conditionné l'expansion de l'industrie automobile mondiale et celle induite des produits pétroliers.

A l'amont des usages finaux fonctionne toute une chaîne d'équipements et d'infrastructures permettant de transformer l'énergie, de la stocker, et de la transporter jusqu'au consommateur. Ces maillons centraux jouent un rôle majeur dans le fonctionnement des systèmes énergétiques : sans l'invention de la machine à vapeur par Watt (1769), le charbon n'aurait pas eu l'essor qu'il a connu au XIX^{ème} siècle ; sans celle de la turbine par Fourneyron (1832), l'électricité n'aurait pas joué le rôle qui a été le sien au XX^{ème} siècle.

Les sources primaires composent le mix énergétique du système. Pour le mesurer, il faut ramener la quantité d'énergie utilisée par les consommateurs finaux en une unité énergétique commune. Une telle opération pose des problèmes de conversion ce qui exige des conventions qui peuvent aboutir à des résultats assez différents concernant le positionnement du secteur électrique dans le système (encadré).

Figure 1 : Représentation d'un système énergétique



On peut maintenant caractériser avec plus de rigueur le concept de transition énergétique, défini comme l'ensemble des transformations requises pour significativement modifier les usages finaux, le mix des sources primaires et la chaîne de transformation/stockage/distribution d'un système énergétique. Une telle vision systémique est à la base des travaux d'auteurs comme Smil ou Fouquet. Elle a également été popularisée par l'ouvrage de Jérémy Rifkin sur la « troisième révolution industrielle »^{viii}.

Comme le montre l'analyse historique, ce type de transformation touchant aussi bien le mix des sources primaires que les usages finaux et les maillons intermédiaires de la chaîne, s'étale sur de longues périodes. Son rythme se heurte notamment à l'inertie des infrastructures matérielles et immatérielles sur lesquelles repose le fonctionnement du système.

Encadré – Energie primaire, énergie finale, énergie électrique : comment les mesure-t-on ?

Dans les bilans énergétiques nationaux, on distingue traditionnellement énergie primaire et énergie finale. Le terme d'énergie primaire recouvre la quantité d'énergie disponible à l'état naturel avant toute transformation. La notion d'énergie finale désigne quant à elle l'énergie utilisée pour satisfaire les besoins des consommateurs finaux après transformation de l'énergie primaire en énergies secondaires. Le processus de transformation et de transport générant des pertes, la quantité d'énergie primaire à l'entrée des systèmes énergétiques est donc supérieure à la quantité d'énergie finale utilisée à la sortie.

Afin de pouvoir comparer les différentes sources d'énergies entre elles, on recourt à une unité commune dont la norme au niveau international est le joule (qui représente l'énergie requise pour élever d'un mètre une pomme dans un champ soumis à l'attraction terrestre !). Il est donc nécessaire d'utiliser des coefficients de conversion entre les différentes sources d'énergies, qui sont calculés en fonction de leur contenu calorifique respectif. On considère de la sorte qu'un kWh d'électricité secondaire produit à partir de combustibles fossiles équivaut à 3,6 MJ. Les difficultés apparaissent dès lors qu'il s'agit de convertir les kWh « d'électricité primaire » d'origine nucléaire ou renouvelable en énergie primaire. La représentation de la contribution des différentes filières à l'approvisionnement en énergie dépend dans ce cas de la méthode de comptabilisation retenue. Il en existe plusieurs et le choix d'une méthode dépend dans la pratique de conventions^{ix}.

Une première approche consiste à comptabiliser directement la production d'électricité primaire en énergie primaire sans distinction entre les filières. On attribue dans ce cas le même coefficient de conversion à l'électricité nucléaire et renouvelable qu'à celle d'origine fossile (1kWh=3,6 MJ) quelle que soit l'énergie utilisée et le mode de production de l'électricité. C'est la méthode retenue pour l'établissement des bilans énergétiques de l'ONU et des scénarios du GIEC.

Une approche alternative consiste à comptabiliser la production d'électricité nucléaire et renouvelable en fonction de la quantité d'énergie fossile à laquelle elle permet de se substituer. On retient généralement un rendement de 38% pour le nucléaire, soit 9,3 MJ pour un kWh. Cette approche est celle retenue dans les bilans publiés par le Conseil Mondial de l'énergie, l'agence d'information de l'énergie américaine (EIA) ou encore le groupe BP. Par rapport à la méthode utilisée par l'ONU, cette approche revient à attribuer un poids plus important au nucléaire et aux énergies renouvelables dans les bilans en énergie primaire.

Une troisième approche revient à appliquer un traitement distinct à l'électricité nucléaire et à celle d'origine renouvelable. On retient ici pour le nucléaire une comptabilisation basée sur la substitution (10,9 MJ avec un rendement de 33%, un tiers de la chaleur d'une centrale nucléaire étant transformée en électricité), tandis que le même coefficient est appliqué à l'électricité primaire et secondaire pour la production d'électricité renouvelable (3,6 MJ). Cette dernière approche, la plus couramment utilisée par les organismes internationaux (Agence internationale de l'énergie, Eurostat, bilans nationaux ...) est retenue dans cet article.

La question de la méthode de comptabilisation de l'électricité en énergie primaire n'est donc pas sans conséquence et influence notamment le calcul de l'intensité énergétique. C'est la raison pour laquelle cette dernière est généralement mesurée à la fois en énergie primaire et en énergie finale.

Quatre transitions séculaires

Le concept de transition énergétique peut se décliner par secteur, comme l'a par exemple fait Fouquet (2010)^x, et par zone géographique. En analysant les transitions opérées à des échelles régionales et sectorielles, Sovacool (2017) nuance le constat fait par les historiens de l'énergie d'une très grande inertie des systèmes énergétiques et notamment de la durée qui sépare généralement le moment où apparaissent les innovations techniques de celui où elles produisent leurs transformations structurelles. Pertinentes sur certains sous-segments du système énergétique, ces observations peuvent difficilement être extrapolées à l'échelle globale. Or, c'est cette échelle qui importe pour l'économiste du climat.

En s'inspirant de Smil, on peut repérer quatre transitions énergétiques ayant marqué l'histoire des sociétés. La première est la domestication du feu qui permet à l'espèce humaine de prendre un avantage majeur sur ses concurrentes grâce à l'utilisation de cette énergie pour la cuisson, le chauffage et plus tard la fonte des métaux. La deuxième fut la révolution agricole, amorcée par les Sumériens qui les premiers parvinrent, grâce à l'irrigation, à accroître les rendements des cultures pour nourrir des animaux domestiques et sédentariser les hommes. Au plan énergétique, la révolution consista à ajouter la traction animale à la force musculaire des hommes. Pour le labour d'un champ ou le transport de la récolte, le rendement en est multiplié par un facteur 4 à 6.

La troisième transition énergétique, amorcée au Royaume-Uni à la fin du XVIII^e siècle, a démultiplié la quantité d'énergie utilisée grâce à l'utilisation massive d'une source primaire supplémentaire : le charbon qui supprime le bois et la force musculaire des hommes et des animaux domestiques vers 1900 et s'impose comme la première source d'énergie dans le monde jusqu'au milieu des années soixante. Souvent présentée comme l'énergie du XIX^e siècle, le charbon ne prend pourtant une place significative dans le système énergétique mondial qu'à partir de 1880. Les innovations à l'origine de son usage étaient disponibles dès le milieu du XVIII^e siècle. Environ 150 ans séparent donc l'innovation technique de sa diffusion massive qui va transformer le système économique.

La quatrième transition énergétique repose sur une grappe d'innovations qui apparaissent simultanément durant les deux dernières décennies du XIX^e siècle et permettent la mobilisation de l'électricité (génération, transport, usage dans l'éclairage puis l'industrie) et la mise au point du moteur à combustion interne fonctionnant à l'essence ou au diesel. On reconnaît là deux des trois innovations techniques majeures identifiées par Gordon (2000^{xi}, 2012^{xii}) dans son analyse du processus de croissance. De fait, la diffusion de ces innovations est à la source des vagues de croissance successives durant le XX^e siècle. De multiples biens allaient suivre, de la machine à laver (premiers modèles disponibles en 1907 aux Etats-Unis) à l'ordinateur et à tous les engins qui nous permettent de nous transporter. Leur accumulation a permis de bousculer les modes de vie et de créer les conditions d'une consommation de masse, limitée aux pays industrialisés jusqu'en 1950, s'élargissant progressivement aux pays émergents par la suite. Ici encore, de longues décennies séparent l'apparition des innovations techniques, intervenues pour la plupart avant 1900, et leur impact sur la croissance qui ne se manifeste pleinement qu'à partir de 1950.

Empilement des sources primaires et croissance de la consommation d'énergie

Une caractéristique commune de ces transitions énergétiques est d'avoir reproduit un schéma additif dans lequel de nouvelles sources primaires viennent s'ajouter à celles préexistantes, sans s'y substituer. C'est la raison pour laquelle, le monde n'a jamais consommé autant de charbon, « l'énergie du XIX^e siècle », que depuis l'an 2000 (annexe 1). Ce schéma additif contraste avec la vision traditionnelle des transitions énergétiques décrites par Marchetti et Nakicenovic (1979) dans laquelle le passage d'une énergie dominante à l'autre s'opère suivant une logique substitutive éloignée de

l'observation des faits : les transitions énergétiques opérées depuis le début de la révolution industrielle reposent sur un empilement des sources primaires, dans lequel les terriens mobilisent de nouvelles énergies sans renoncer à celles préexistantes (figure 2).

Figure 2 : les transitions séculaires du système énergétique : l'empilement des sources primaires

Sources primaires	Transformation, Stockage Transport/Distribution	Usages finaux
Biomasse	Energie musculaire, bois de feu	Cuisson + chauffage
	...+ traction animale	...+ transports + travaux agricoles + artisanat
Biomasse + Charbon	Machine à vapeur (Watt)	Manufacture, transports ferroviaires, navigation
...+ Pétrole et Gaz Fossiles : 80 % des sources	Electricité, moteur à combustion interne, Réseaux de transport-distribution	Éclairage, Consommation de masse, Mobilité des hommes et des biens

Source : auteurs, inspiré de Smil (2017)

Une seconde caractéristique associée au mécanisme d'empilement concerne la densité énergétique croissante des sources mobilisées : à volume équivalent, le pétrole fournit plus d'énergie que le charbon qui lui-même en fournit plus que le bois. Les densités énergétiques peuvent également se ramener à l'unité de surface. On constate dès lors que les transitions énergétiques du passé ont permis aux sociétés humaines de produire de plus en plus d'énergie par unité de surface.

La conséquence la plus directe de l'empilement de sources d'énergie de plus en plus denses est d'avoir engendré un accroissement de la quantité d'énergie disponible par habitant, très lent durant les deux premières transitions, puis de plus en plus rapide à partir de l'introduction des nouvelles sources fossiles : charbon, pétrole, gaz. Du fait de la transition démographique simultanément opérée, ceci a conduit à une croissance sans précédent de la consommation d'énergie dans le monde au cours des deux derniers siècles.

Au début du XIX^e siècle, la population mondiale était de l'ordre de 1,2 milliard d'habitant, chacun utilisant en moyenne environ 0,6 tonne d'équivalent pétrole (tep). A l'aube du XX^e siècle on comptait 1,65 milliard de terriens pour une consommation unitaire de 0,7 tep. La croissance démographique couplée à l'amorce de l'exploitation des sources fossiles, conduisit à un doublement de la consommation totale d'énergie au XIX^e siècle (annexe 3).

Le XX^e siècle a été marqué, notamment la seconde moitié, par une formidable accélération de la transition énergétique tirée par l'élargissement des sources primaires et la multiplication des usages liée à la diffusion de l'électricité, de la voiture, des produits chimiques dérivés des hydrocarbures... La consommation unitaire du terrien moyen est passé de 0,7 à 1,7 tep entre le début et la fin du siècle. Le nombre des terriens ayant été multiplié par plus de quatre, la consommation d'énergie au XX^e siècle a été multipliée par neuf.

Les quinze premières années du XXI^e siècle s'inscrivent dans la prolongation de cette tendance, la consommation mondiale d'énergie ayant augmenté de plus d'un tiers entre 2000 et 2015, un peu plus rapidement que la population mondiale. Un infléchissement apparaît cependant à partir de 2009, année de crise financière, qui se prolonge jusqu'en 2017.

Cette quatrième transition énergétique est loin d'avoir fourni un accès satisfaisant à l'énergie pour tous. En 2016, environ un milliard de personnes (13 % de la population mondiale) n'ont pas accès à l'électricité et près de trois milliards (41 % de la population mondiale) ont recours à des procédés de

cuisson peu efficaces et très polluants à partir de la biomasse traditionnelle^{xiii}. Accès inégal qui reflète les écarts de la richesse distribuée dans le monde : en 2016, un terrien consomme en moyenne un peu moins de 2 tep, mais un Nord-Américain 7, un Indien moins de 1 et un Africain au sud du Sahara de l'ordre de 0,5.

Transitions énergétiques et prix relatifs des énergies

Au plan économique, les deux dernières transitions ont été déclenchées par une accumulation de capital matériel et immatériel à l'origine de gains de productivité massifs se diffusant dans le système énergétique. Il en est résulté des mouvements de prix séculaires affectant la production et l'utilisation de l'énergie.

En théorie, l'évolution du prix des sources fossiles devrait suivre à long terme une trajectoire haussière à mesure que se raréfie le stock de réserves en terre, suivant un processus théorisé par Hotelling^{xiv}. Le prix des énergies fossiles, comme celui de la plupart des matières premières s'inscrit pourtant à la baisse en termes réels depuis le début de la révolution industrielle, ce qui a favorisé leur utilisation. Cela ne remet pas en cause la thèse de Hotelling mais rappelle que la temporalité dans laquelle elle s'inscrit doit tenir compte du progrès technique qui permet en particulier d'exploiter une fraction croissante des ressources en terre à des conditions économiques acceptables.

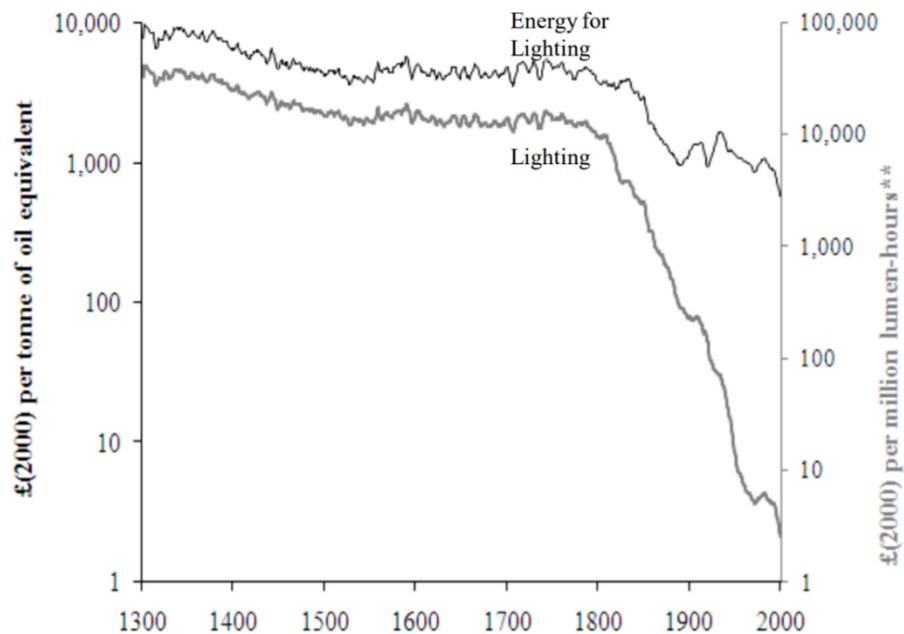
Le prix du pétrole a par exemple baissé relativement au niveau général des prix pendant un siècle : entre les premières phases d'exploration en Pennsylvanie jusqu'à la décennie 1970. Cette baisse a constitué un puissant vecteur de sa pénétration dans le mix énergétique mondial. Les deux chocs de 1973 et 1979-1981 ont marqué la fin du pétrole bon marché et introduit une période de grande instabilité de son prix. Certains y ont vu le signe annonciateur d'un « pic pétrolier » imminent, relayant une longue tradition basée sur la « crainte de manquer » inaugurée par Malthus et Ricardo pour le stock de terre cultivables, suivis par Jevons pour le charbon, le club de Rome pour l'ensemble des matières premières et plus récemment Bihouix^{xv} et Pitron^{xvi} pour les minerais métalliques.

Pour comprendre le rôle des prix relatifs dans les transitions, l'observation du prix des sources primaires ne suffit pas. Il convient de distinguer, à la suite de Fouquet & Pearson (2012), le prix des sources utilisées, par exemple le carburant destiné au véhicule, de celui des services fournis grâce à ces sources : le nombre de kilomètres pouvant être parcourus, dans notre exemple. L'écart entre les deux prix mesure l'efficacité énergétique. Or, « si sur quelques années, les gains d'efficacité et donc la différence entre le prix de l'énergie et celui des services énergétiques est faible, sur plusieurs décennies ou un siècle, la différence cumulée entre les deux tendances peut être considérable »^{xvii}.

L'évolution des techniques d'éclairage en apporte une bonne illustration. Prenons l'exemple du phare des baleines, située à la pointe de l'île de Ré (annexe 4). Le phare brûlait à l'origine de l'huile de poisson ou de baleine. Le rendement était médiocre, la combustion de l'huile tendant à calciner les vitres de la lanterne. En 1736, le charbon fut substitué à l'huile. Ce changement permit d'améliorer la qualité de l'éclairage mais nécessitait d'acheminer des quantités importantes de houille, d'où sa substitution par du pétrole. L'ancienne tour fut remplacée en 1854 par l'actuel phare des Baleines dont la hauteur est deux fois supérieure. Ce phare fut l'un des premiers à bénéficier de la lentille à échelons inventée par Fresnel (1822), toujours en service, lui permettant d'atteindre une portée bien supérieure, de l'ordre de 50 km. Le phare des Baleines a fonctionné au pétrole jusqu'en 1904 où une centrale de production d'électricité à vapeur remplaça les systèmes antérieurs de combustion. Le raccordement du phare des baleines au réseau électrique n'intervint que dans les années 1950. Avec l'électricité, la portée du phare fut à nouveau démultipliée grâce à l'efficacité des ampoules pour transformer l'énergie en lumière.

Le lien entre la diffusion des innovations dans l'éclairage et les prix relatifs a été étudié avec perspicacité par Fouquet et Pearson à partir de l'exemple du Royaume-Uni. Jusqu'au début du XVIII^e siècle, le coût de la lumière ne varie guère, les gains d'efficacité dans la production et l'utilisation de la chandelle ou de la lampe à huile étant très faibles. L'irruption au XIX^e siècle de sources nouvelles, d'origine fossile, couplées à des changements de techniques d'éclairage, modifie doublement la donne (figure 3).

Figure 3 : Evolution du prix de l'énergie pour l'éclairage et du prix de la lumière



Source: Fouquet (2011)

* Five-year averages

D'une-part, l'abandon du suif, des huiles végétales et de l'huile de baleine au profit du gaz de ville, du pétrole lampant puis de l'électricité provoque une diminution du prix des énergies utilisées pour l'éclairage, baisses massives entre 1850 et 1920, plus lente et irrégulière par la suite.

D'autre-part, les technologies du bec à gaz, de la lampe à pétrole et de l'ampoule à incandescence qui s'impose à partir des années 1850 démultiplient les gains d'efficacité en réduisant massivement le prix de l'éclairage pour les consommateurs. Contrairement à ceux observés pour la fourniture d'énergie, ces gains ne fléchissent pas dans le courant du XX^e siècle ou au-début du XXI^e siècle qui verra l'apparition des LED et autres ampoules basse consommation.

Au total, ces sont les gains dans l'efficacité de la transformation de l'énergie en lumière qui ont constitué le principal moteur de la diffusion de l'éclairage via la baisse des prix relatifs. S'ajoutant à ceux obtenus dans la production d'énergie, ils n'ont rien à envier aux baisses de prix de la mémoire de nos ordinateurs. Difficile de départager celui qui baisse le plus rapidement entre le prix du lumen et celui du mégaoctet !

Le levier des gains de productivité dans la transformation des sources primaires d'énergie en usages finaux se retrouve dans de multiples domaines : production de chaleur, procédés industriels, transports... Il a joué un rôle crucial dans les transitions énergétiques passées, contribuant puissamment via la baisse des prix relatifs à diffuser de nouveaux usages énergétiques. Croissance des usages qui a dopé nos émissions de CO₂.

L'empilement des émissions de CO₂

Le mécanisme d'empilement des sources d'énergie constitutif des transitions énergétiques du passé est la cause principale de l'accélération des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Il déclenche vers 1850 un accroissement du volume des rejets de CO₂ dans l'atmosphère qui perdure sur plus d'un siècle et demi (figure 4).

Jusqu'en 1850, la biomasse est le pilier du système énergétique avec des renforts ponctuels de l'éolien et de l'hydraulique (moulins et navigation à voile). Son usage s'inscrit dans un cycle court où la combustion ne fait que rejeter dans l'atmosphère le CO₂ préalablement stocké dans les plantes. Il peut contribuer au défrichement des forêts dont les ressorts principaux sont l'extension de la culture, de l'élevage, et à un moindre degré la recherche du bois d'œuvre. En 1850, ce défrichement provient majoritairement d'Amérique du Nord et d'Europe. Il contribue à plus de 90 % aux rejets anthropiques de CO₂ estimés à 2 tonnes par habitant et par an.

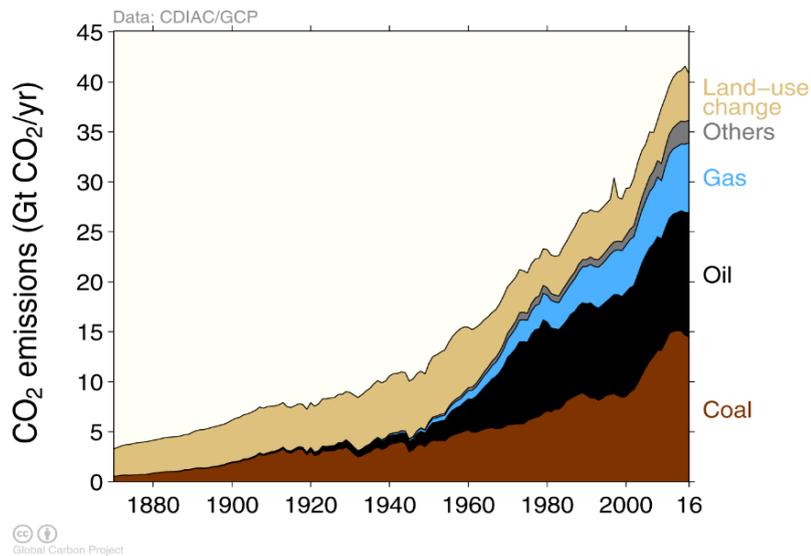
Les émissions liées aux changements d'usage des sols restent majoritaires jusqu'au milieu du XX^e siècle (annexe 2). Elles doublent entre 1850 et 1950, le principal foyer de déforestation se situant alors aux Etats-Unis. La géographie de la déforestation basculera ensuite vers les forêts tropicales. Les émissions liées à l'usage des fossiles augmentent rapidement jusqu'à la première guerre mondiale du fait de la diffusion du charbon. Celles provenant de la combustion du pétrole s'y ajoutent à partir de 1920, mais le dynamisme des émissions est bridé entre 1910 et 1950 par les déboires de l'économie mondiale induits par les deux conflits mondiaux et la crise de 1929. En 1950, un terrien émet en moyenne quelques 2,2 tonnes de CO₂ en brûlant des fossiles ou produisant du ciment, et à-peu-près autant en défrichant la forêt (annexe 3). 80 % de ces rejets proviennent des pays développés.

Le phénomène d'empilement s'accroît à partir de 1950. La croissance démographique s'accélère. Une part croissante de la population accède à la consommation de masse, jusqu'en 1970 au sein des pays développés, ensuite dans les pays émergents. L'empilement incorpore de nouvelles sources fossiles : le gaz naturel auquel s'ajoute le gaz de schiste à partir de 2000. Les émissions liées à l'usage des sols cessent de progresser, mais la dynamique de l'empilement des sources fossiles entraîne toujours plus haut les rejets de CO₂. Quatre sous-périodes doivent être considérées.

La période de l'après-guerre, qualifiée « d'âge d'or » par l'économiste américain Angus Maddison^{xviii} et des « trente glorieuses » par le Français Jean Fourastié^{xix}, connaît un sursaut de croissance. La voiture et le camion s'imposent sur les routes. C'est la grande ère du pétrole bon marché qui supprime le charbon comme première source d'émission de CO₂ à la fin des années 60. Hors déforestation, les émissions de CO₂ atteignent 4,4 tonnes par habitant en 1980, près de deux fois celles de 1950 (2,2 tCO₂/hab.).

Entre 1980 et 2000, la croissance commence à se redistribuer vers les économies émergentes, mais le mouvement est freiné par la crise de la dette en Amérique Latine puis l'implosion du système soviétique. Au sein des pays développés, le renchérissement du pétrole consécutif aux chocs pétroliers profite d'abord au gaz naturel, dont la combustion émet nettement moins de CO₂ que le charbon pour produire la même quantité d'énergie, et dans une moindre mesure au nucléaire. Durant ces deux décennies, l'augmentation des émissions est moins rapide que celle de la population. Au seuil du XXI^e siècle, un terrien émet en moyenne 4 tonnes de CO₂, hors déforestation.

Figure 4 : Empilement des émissions de CO₂ par source



Source : Global Carbon Budget, 2017^{xx}

La première décennie de ce siècle connaît un retour massif vers le charbon, provoqué par une croissance soutenue en Chine et les besoins du secteur électrique dans nombre de pays émergents, grands ou petits. L'empilement des sources joue à plein car la demande de gaz et de pétrole est simultanément tirée par la vigueur du cycle ayant précédé la crise financière de 2008. En dix ans, les émissions de CO₂ d'origines énergétique et industrielle remontent de 4 à 4,8 tonne par habitant. On retrouve des rythmes inconnus depuis « l'âge d'or », dont le moteur principal s'est déplacé vers les pays émergents.

La crise économique et la réorientation de la stratégie chinoise, contrainte de réagir à la montée des pollutions locales, sont les causes majeures du coup de frein observé au-début de la décennie 2010-2020. Fermetures de mines de charbon et d'installations très polluantes, tarification du carbone et investissement massif dans le photovoltaïque, l'éolien et le nucléaire en constituent les trois ingrédients. Simultanément, les émissions de CO₂ reculent aux Etats-Unis du fait de la bascule du charbon vers le gaz de schiste. Globalement, les émissions de CO₂ d'origines énergétique et industrielle semblent se stabiliser aux alentours de 36 milliards de tonnes (4,9 tCO₂/hab.) entre 2014 et 2016, avant d'augmenter à nouveau en 2017.

Au cours des deux derniers siècles, les transitions énergétiques ont déclenché un mécanisme cumulatif d'empilement de nouvelles sources d'émission de CO₂ inédit dans l'histoire humaine. Entre 1850 et 2017, les terriens ont rejeté dans l'atmosphère un peu plus de 2300 milliards de tonnes de CO₂. Sur ces 2300 milliards, 40 % ont été relâchées depuis 1990 et 28 % entre 2000 et 2017. La géographie de ces émissions s'est radicalement modifiée. Initialement concentrées en Europe et en Amérique du Nord, les émissions de CO₂ étaient encore à 80 % le fait des pays industrialisés en 1980. Leur poids était tombé en dessous de 40 % en 2017 !

La transition du XXI^e siècle : le retrait des fossiles

Dans la préface à l'édition française de sa fresque historique sur l'environnement mondial, John McNeil revient sur l'enseignement principal tiré de vingt ans de recherche universitaire : « ...au début des années 90, je pensais que l'événement qui avait le plus fortement marqué l'histoire environnementale mondiale du XX^e siècle avait été l'accroissement de la population. Lorsque j'eus achevé ce travail, mon

opinion avait changé et c'est le système énergétique basé sur les énergies fossiles que je considérais comme la variable essentielle... »^{xxi}.

Si l'empilement des trois sources d'énergie fossile a constitué le trait essentiel du XX^e siècle sous l'angle de l'environnement et du climat, désempiler ces sources en retirant les fossiles sera la grande affaire du XXI^e siècle. C'est l'enjeu principal de la transition bas carbone qui n'en est qu'à ses premières phases.

Le point d'arrivée de cette cinquième transition sera dans tous les cas un système entièrement débarrassé des sources fossiles. Celles-ci s'épuisent en effet à mesure de leur utilisation et il faudrait des millions d'années pour qu'elles puissent se reconstituer naturellement. A très long terme, la raréfaction des énergies fossiles se traduira bien par une hausse rédhibitoire de leur coût les rendant économiquement inutilisables. Le schéma de Hotelling finira par s'imposer. Mais si on gère la transition bas carbone en fonction de la seule raréfaction des stocks de réserve en terre, on rejettera beaucoup trop de CO₂ dans l'atmosphère, relativement à ce qu'elle peut absorber sans risque majeur sur le climat.

La vérité est que l'écorce terrestre contient beaucoup trop de réserves exploitables d'énergie fossile relativement à ce que l'atmosphère peut absorber sans dérégler le système climatique. Le problème majeur du XXI^e siècle n'est pas le risque de manque de charbon, de pétrole ou de gaz. C'est que nos sociétés ont développé depuis deux siècles de formidables capacités pour exploiter ces trois énergies qui sont bien trop abondantes. Les transitions énergétiques du passé ont résulté de l'action des hommes confrontés à la rareté des gisements de carbone fossilisés dans le sous-sol. Elles ont été guidées par le « carbone d'en bas ». Le risque climatique nous oblige à considérer un autre stock : celui du « carbone d'en haut » qui s'accumule dans l'atmosphère en dérégulant le climat. Le problème n'est plus sa rareté, mais son trop plein qu'il faut endiguer pour atténuer le réchauffement. Relativement aux transitions énergétiques du passé, cela conduit à un triple renversement de perspectives :

- Malgré les inerties des systèmes énergétiques, cette mutation doit s'opérer suivant le tempo de l'horloge climatique qui est réglée par l'évolution du stock de « carbone d'en haut ». L'action sur ce stock passe par trois leviers : la réduction des émissions de CO₂ ; celle des autres gaz à effet de serre ; l'augmentation de la capacité de séquestration des puits de carbone.
- Au mécanisme de l'empilement, il faut substituer un schéma dans lequel les sources décarbonées ne s'ajoutent plus aux sources existantes, mais prennent la place des énergies fossiles.
- Les gains d'efficacité énergétique ne doivent plus conduire, via la baisse des prix relatifs, à la hausse des consommations d'énergie par tête qui contribue puissamment à l'escalade des émissions.

C'est à partir de cette triple grille d'analyse qu'il nous faut maintenant analyser les enjeux de la transition bas carbone.

2. La transition bas carbone : comment désempiler ?

Depuis la publication du premier rapport du GIEC en 1990, les décideurs ne peuvent plus se réfugier sous le voile de l'ignorance. La connaissance des liens entre le « carbone d'en haut » et le dérèglement du climat est désormais bien documentée par la communauté scientifique. Cette base de connaissance a servi de socle à la négociation de l'Accord de Paris sur le climat adopté en décembre 2015 (COP21).

Si l'Accord de Paris ne comporte guère de dispositions permettant d'accélérer à court terme la transition bas carbone, il fixe des objectifs de long terme à la communauté internationale : d'une part limiter le réchauffement global « nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux

préindustriels »^{xxii} ; d'autre-part atteindre avant la fin du siècle la neutralité carbone, entendue comme un « équilibre entre les émissions anthropiques de gaz à effet de serre et les absorptions par les puits de gaz à effet de serre »^{xxiii}.

C'est en fonction de ces deux objectifs, en théorie poursuivis par la très grande majorité des pays ayant ratifié l'accord^{xxiv}, qu'il convient d'analyser les caractéristiques propres à une transition énergétique permettant d'atténuer le réchauffement du climat. Par beaucoup d'aspects cette transition bas carbone devra prendre l'exact contrepied des chemins empruntés au cours des deux derniers siècles.

Objectif 2°C : le temps qu'il reste

Accorder les responsables politiques sur un objectif chiffré de température moyenne reste une opération déclarative tant qu'elle n'a pas été traduite en termes de plafonds d'émission de gaz à effet de serre à ne pas dépasser. Ce lien entre objectif de température moyenne et plafonds d'émission est documenté dans le cinquième rapport du GIEC^{xxv} dont les calculs permettent d'évaluer le « budget carbone global » défini comme le plafond des émissions cumulées de CO₂ depuis 1870, donnant deux chances sur trois de limiter le réchauffement climatique à 2°C.

Le calcul repose sur de multiples hypothèses, notamment en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre hors CO₂ et la capacité d'absorption des puits. Les scientifiques du GIEC ont du reste déterminé non pas un chiffre unique, mais une plage de variation dont nous ne retiendrons que la valeur centrale de 2900 milliards de tonnes de CO₂. Au moment de la préparation du cinquième rapport du GIEC, environ 1900 milliards de tonnes avaient été émises depuis 1870, ce qui laissait un budget carbone de 1000 milliards pour viser l'objectif de 2°C avec une probabilité de deux chances sur trois de l'atteindre. Et les rédacteurs du rapport d'ajouter : « Les réserves totales de carbone fossilisé dépassent ce montant d'un facteur 4 à 7, avec des ressources encore bien plus élevées^{xxvi} ». En reprenant cette analyse, McGlade & Ekins (2015)^{xxvii} estiment qu'il conviendrait de renoncer à exploiter d'ici 2050 un tiers des réserves de pétrole, la moitié des réserves de gaz et 80% de celles de charbon pour rester en ligne avec l'objectif de 2° C.

Le plafond de 2 900 milliards est une grandeur susceptible de varier, notamment suivant l'évolution des capacités de stockage du CO₂ atmosphérique par l'océan et la biosphère. Les travaux de recherche réalisés dans le cadre du « Global Carbon Budget » permettent de documenter ces questions entre deux rapports du GIEC^{xxviii}. A partir de ce plafond, dont l'ordre de grandeur est peu susceptible d'évoluer à court terme, on peut calculer des budgets carbone associés à différentes années de référence.

En 1990, au moment du démarrage de la négociation climatique, le cumul des émissions de CO₂ avait atteint un peu plus de 1400 milliards de tonnes, ce qui laissait, au rythme des émissions de l'époque, 52 années pour épuiser le budget carbone global. Une marge de temps qui n'a pas été mise à profit pour infléchir les émissions de CO₂ au cours des vingt-cinq années qui ont suivi.

En 2017, l'horloge climatique a tourné. Son tic-tac est redoutable : chaque année, le flux d'émission accroît le stock de CO₂ déjà présent dans l'atmosphère. Le cumul dans l'atmosphère dépasse désormais 2200 milliards. Si le niveau d'émission annuel atteint en 2017 ne diminue pas, le budget carbone global aura été épuisé d'ici une quinzaine d'années !

Le temps de l'horloge climatique est fixé par les lois de la physique, de la biologie et de la chimie qui s'imposent à nous. C'est donc le tempo de l'horloge climatique qui devra rythmer le temps de la transition bas carbone, cela en dépit des inerties des systèmes énergétiques qui ne vont pas disparaître dans les décennies à venir. A cette première singularité de la transition bas carbone relativement aux

transitions du passé s'en ajoute une seconde : il faudra abandonner le schéma séculaire de l'empilement pour un schéma substitutif impliquant le retrait rapide des sources fossiles.

Passer d'un schéma additif à un schéma substitutif

Lorsque le prix du gaz échangé sur le Henry Hub de Louisiane chute aux Etats-Unis du fait de l'exploitation des gaz de schiste, une partie des centrales thermiques fonctionnant au charbon sont arrêtées au profit de centrales à gaz ce qui entraîne une baisse des émissions de CO₂. On est dans un schéma de substitution, bénéfique pour le climat, si l'on raisonne au plan strictement national. Mais les ressources en charbon non utilisées ne restent pas forcément en terre. Si le prix du charbon à l'exportation baisse à la suite de sa plus grande disponibilité, il peut provoquer à l'étranger un mouvement inverse de substitution depuis les centrales à gaz vers les centrales à charbon qui annule l'effet initial, comme celui observé entre 2011 et 2015 en Europe. On retrouve alors le schéma de l'empilement, dévastateur pour le climat.

C'est donc à l'échelle globale qu'il convient de juger le réel degré de substitution opérée. Pour l'illustrer, construisons trois images du secteur énergétique en 2050, à partir de la quantité d'énergie consommée par un terrien moyen et de la part de cette énergie provenant des sources fossiles (figure 5)^{xxix}. Si des quantités significatives d'énergie d'origine fossile pouvaient être produites sans émettre de CO₂ grâce aux technologies de capture et stockage du carbone, il conviendrait de les classer parmi les sources décarbonées, au côté des renouvelables, de la biomasse et du nucléaire. Chacune de ces images a été associée à une étiquette de couleur traduisant le degré d'éloignement relatif à l'objectif 2°C.

Figure 5 : Trois images du secteur énergétique en 2050

	1973	2015	Scénarios à 2050		
			ROUGE	BLEU	VERT
Consommation d'énergie (tep/hab.)	1,55	1,86	2,0	1,86	1,2
Part des énergies fossiles (%)	86,7	81,4	75	50	25
- Pétrole	46,2	31,7	20	10	2
- Charbon	24,5	28,1	25	10	8
- Gaz naturel	16	21,6	30	30	15
Emissions de CO₂ (Gt)	14,5	32,3	40,6	23,3	7,9

Source : Christian de Perthuis, *The Conversation*, 2017

L'étiquette rouge indique la catastrophe annoncée, celle que nous éviterons si nous nous persuadons qu'elle va se produire suivant la thèse de Jean-Pierre Dupuy^{xxx}. Cette image s'inscrit dans le prolongement des tendances passées. Le terrien moyen continue d'augmenter sa consommation d'énergie qui reste très inégalement distribuée : 1 milliard de personnes sont privées d'électricité en 2050. Le recul des sources carbonées est lent, du fait de la résistance du charbon et surtout de l'envolée des usages du gaz d'origine fossile. La part des sources fossiles continue de reculer lentement sans véritable substitution : les énergies renouvelables qui ont progressé le plus rapidement se sont ajoutées aux fossiles sans s'y substituer ! Dans l'étiquette rouge, les émissions globales augmentent d'un quart entre 2015 et 2050. Le monde épuise son « budget carbone » en moins de quinze ans, ce qui nous conduit vers un réchauffement de l'ordre de 4°C ou plus à la fin du siècle.

L'étiquette bleu décrit le système énergétique auquel conduit l'application de l'Accord de Paris, somme d'engagements volontaires sans réelles contraintes. Le terrien moyen consomme autant d'énergie en 2050 qu'en 2015. La baisse des consommations unitaire dans les pays riches a été compensée par les progrès de l'accès à l'énergie dans les pays moins avancés, grâce aux réseaux décentralisés d'électricité renouvelable. En 2050, les transports terrestres se sont affranchis de leur addiction au pétrole. La part des fossiles est ramenée à 50 % des sources primaires. Mais la substitution n'a été que partielle : le volume résiduel du pétrole et du charbon reste conséquent. La part du gaz d'origine fossile a même augmenté. Dans le monde en bleu, les émissions mondiales de CO₂ d'origine énergétique diminuent de près de 30% entre 2015 et 2050 mais leur cumul provoque un dépassement de l'ordre de 45 % du « budget carbone ». Le réchauffement se situe vers le milieu de la fourchette 2°C à 4°C à la fin du siècle.

A l'opposé du rouge, l'étiquette verte : celle de l'accélération de la transition bas carbone. En 2050, les utilisations énergétiques du pétrole sont devenues un sous-produit de ses usages chimiques. Celles de charbon et à un moindre degré de gaz ont fortement reflué. Leur substitution par des sources non carbonées a été facilitée par le recul de la consommation d'énergie par habitant : le terrien moyen consomme un peu plus d'une tonne d'équivalent pétrole. Le monde a connu une redistribution massive depuis les pays riches où la consommation d'énergie a été divisée par plus de deux, vers les pays moins avancés où la baisse drastique des coûts de stockage et de production d'électricité décarbonée conjuguée à l'extension des réseaux aux populations rurales a permis un accès durable et de qualité à l'électricité. Dans l'étiquette verte, les émissions de CO₂ sont divisées par quatre entre 2015 et 2050, mais le cumul des émissions épuise le « budget carbone ». Pour totalement circonscrire le risque d'un réchauffement supérieur à 2°C, il faudrait passer à un régime d'émissions négatives avant la fin du siècle dans lequel les émissions brutes annuelles sont inférieures à la quantité de CO₂ stockée par les puits de carbone.

Rouge, bleu, vert ? Sur quelle trajectoire sommes-nous engagés ? L'étiquette rouge prolongeant à l'identique le schéma historique de l'empilement ne peut plus être considéré comme le scénario contrefactuel vers lequel on se dirigerait spontanément. Des forces économiques (baisse des coûts des renouvelables et du stockage de l'électricité), sociales (prise de conscience par les opinions publiques des dommages sanitaires liés aux fossiles) et politiques (inflexion des politiques dans le sillage de l'Accord de Paris) devraient nous en écarter durablement. Mais pour aller où ?

Le « politiquement correct » de l'Accord de Paris nous dirige, dans le meilleur des cas, vers l'étiquette bleue, celle d'une progression très rapide de nouvelles sources décarbonées qui ne se substituent que partiellement au charbon et au pétrole et sans réduire la part du gaz d'origine fossile. Ce scénario doit désormais être considéré comme le contrefactuel. Un contrefactuel bien loin de contenir le réchauffement en deçà de 2°C.

Pour y parvenir, il faut viser l'étiquette verte, celle du désempilement dans lequel les pays riches et émergents retirent rapidement les sources fossiles de leur système énergétique quand les pays moins avancés parviennent à accroître leur accès à l'énergie sans reproduire les schémas historiques d'ajout de nouvelles sources fossiles. Ce double mouvement n'est possible que si les gains d'efficacité s'accroissent et se distribuent de façon tout à fait nouvelle.

La distribution des gains d'efficacité énergétique : l'équité

Le premier critère de différenciation des systèmes énergétiques en 2050 est le montant de la consommation d'énergie par habitant. Dans le scénario bleu, cette consommation se stabilise entre 2015 et 2050, un phénomène jamais observé sur plusieurs décennies au XX^e siècle. Dans le scénario vert, le terrien réduit sa consommation moyenne d'un tiers : une rupture historique encore plus forte,

rendant possible le désempiement des sources d'énergie et laissant quelques chances de stabiliser le réchauffement d'ici la fin du siècle.

L'important est d'analyser les mécanismes qui se cachent derrière la baisse de la consommation unitaire d'énergie. Cette dernière peut refléter aussi bien une aggravation de la paupérisation énergétique qu'un mécanisme vertueux de redistribution des gains d'efficacité.

L'étiquette verte pourrait parfaitement s'appliquer à un monde où la distribution inégale des ressources et la polarisation de la richesse sur une minorité s'accroissent entre 2015 et 2050. L'économie d'énergie proviendrait alors d'une part de la diffusion de normes de production et de consommation bas carbone dans les pays riches, avec des procédés inaccessibles au plus grand nombre et d'autre part de l'échec des programmes de développement et d'accès à l'énergie dans les pays moins avancés. Les deux leviers de la baisse de consommation seraient le rationnement des achats et l'absence d'accès aux services énergétiques de base. Nous avons affaire ici à une transition bas carbone réussie sous l'angle du climat, mais portée sans filet de sécurité au plan social et donc aux antipodes des schémas d'inclusion souvent associés à la « croissance verte »^{xxxii}.

Pour échapper à un tel scénario, il faut imaginer au plan macroéconomique une redistribution des bénéfices de la croissance depuis les pays à niveaux de vie élevés et intermédiaires vers les pays moins avancés, suivant un schéma du type de celui préconisé par Tim Jackson^{xxxiii}. Dans ce schéma, les gains de productivité seraient réorientés vers la satisfaction des besoins essentiels des pays et populations démunis, ce qui a pour corollaire le blocage de l'accumulation de biens et services superflus profitant aux riches. Une véritable révolution de société ! Au plan de la transition bas carbone, ceci a deux implications :

- Accorder une priorité effective à l'accès à des services énergétiques de base dans les pays moins avancés. L'objectif figure en toutes lettres sur la feuille de route du développement durable adoptée en 2015 dans le cadre des Nations Unies. Comme dans le cas de la santé étudié par Angus Deaton^{xxxiii}, les inégalités dans l'accès à l'énergie ne s'expliquent que partiellement par les écarts de revenus et les réduire implique d'agir sur de multiples variables socioéconomiques et réglementaires^{xxxiv}. A niveaux de vie comparables, les pays ayant misé sur la diffusion large d'une offre de soins basiques obtiennent les meilleurs résultats. En matière énergétique, la baisse des coûts des renouvelables et la digitalisation donnent les moyens techniques d'accélérer l'accès des services de base pour le plus grand nombre. Mais les progrès sont encore lents, tant pour l'accès à l'électricité que pour l'amélioration des pratiques de cuisson traditionnelles, de loin la première source de mortalité liée à la pollution de l'air dans le monde.
- Traiter de façon pro-active le volet social de la transition bas carbone, sous l'angle de l'emploi et du niveau de vie. Le retrait des fossiles représentera des pertes financières importantes dans les pays dotés d'abondantes ressources et impliquera des reconversions professionnelles dans les pays consommateurs de fossiles. Les instruments économiques mis en place pour accélérer la transition bas carbone sont souvent anti-redistributifs. C'est le cas des taxes carbone qui, en l'absence de mesures d'accompagnement, frappent en proportion d'avantage les ménages à faible pouvoir d'achat^{xxxv}. Mais elles procurent simultanément des moyens financiers permettant de contrecarrer, et au-delà, ces effets régressifs^{xxxvi}. On retrouve les mêmes effets anti-distributifs dans de nombreux systèmes visant à promouvoir l'économie bas carbone. C'est le cas par exemple des tarifs de rachat de l'électricité renouvelable qui ont été fixés à des niveaux supérieurs aux prix de marché, et dont le surcoût financé par une taxe payée par l'ensemble des consommateurs d'électricité a le plus souvent conduit au subventionnement des ménages aisés par les ménages à faible niveau de revenu.

La réduction des inégalités n'est que l'une des conditions permettant aux gains d'efficacité énergétique de faciliter la transition bas carbone. L'autre est de contourner le fameux « effet-rebond ».

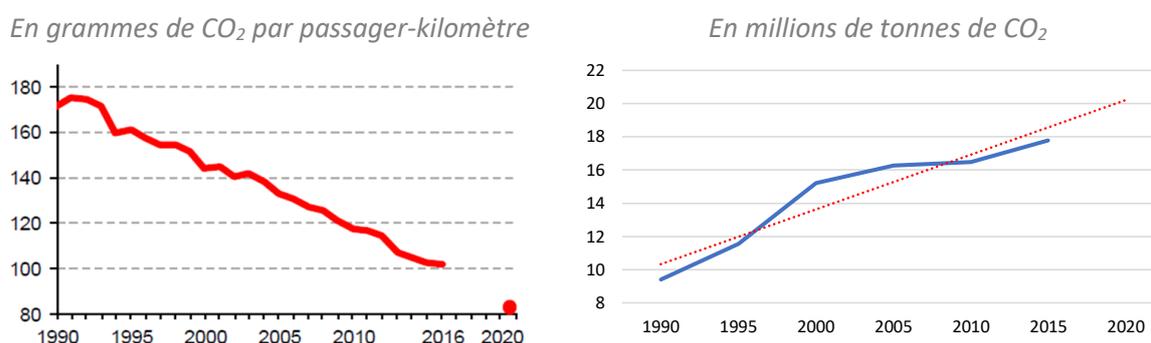
La distribution des gains d'efficacité énergétique : l'effet rebond

L'effet-rebond est décrit de façon prémonitoire par Jevons en 1856 : « c'est une confusion des idées de supposer que l'usage économique des combustibles équivaut à diminuer leur consommation. La vérité est l'exact opposé »^{xxxvii}. Il peut être défini comme la partie des gains d'efficacité utilisée par les agents économiques pour accroître la quantité d'énergie consommée. C'est pourquoi il est la bête noire des politiques visant à maîtriser la demande d'énergie via l'efficacité énergétique.

En France, certains auteurs estiment par exemple que les foyers réalisant des travaux pour améliorer la performance énergétique de leur logement augmentent leur consommation d'énergie jusqu'à 60 %, ce qui souvent permet à des ménages "contraints" d'améliorer leur niveau de confort^{xxxviii}. Mais cela limite singulièrement les effets de la politique de rénovation thermique des logements dont la première motivation est la réduction de la consommation et la baisse des émissions de CO₂.

Dans les secteurs en très forte croissance, comme le transport aérien international, cet effet est encore plus significatif. Entre 1990 et 2016, les émissions de CO₂ par passager transporté ont été pratiquement réduites de moitié grâce aux gains d'efficacité des compagnies aériennes. Dans le même temps, les émissions résultant du transport international ont doublé ce qui en fait le secteur où la croissance des rejets de CO₂ dans l'atmosphère a été la plus forte dans toute l'économie (figure 6).

Figure 6 : Emissions de CO₂ du transport aérien international français de 1990 à 2015



Source : Auteurs, données DGAC, IEA

Dans le cas du transport aérien, comme dans celui du charbon décrit par Jevons ou de la lumière analysé par Fouquet, ce sont les gains d'efficacité qui induisent des hausses spectaculaires de la consommation d'énergie via la baisse des prix. L'effet rebond dépasse alors 100 % et est en réalité un effet d'entraînement de l'activité via l'augmentation de la demande induite. Cette dynamique d'ouverture des marchés via la baisse des prix est au cœur du fonctionnement du système économique. Si on veut faire de l'efficacité énergétique un levier de la transition bas carbone il faut donc prévoir de puissantes incitations économiques de nature à contrecarrer ce mécanisme à la source d'une grande partie de la croissance observée au XX^e siècle.

Pour contrecarrer la spirale de l'effet rebond, Von Weizsäcker (2009) imagine un dispositif fiscal qui taxerait les gains de productivité pour empêcher que la baisse séculaire des prix relatifs de l'énergie et des matières premières encourage leur utilisation : « Nous proposons d'accroître les prix de l'énergie et des autres matières premières d'un pourcentage équivalent aux gains de productivité observés l'année précédente. L'ajustement serait opéré par des taxes entrant en vigueur un mois après la

diffusion des données sur les gains de productivité, ..., ce système devrait s'appliquer de façon obligatoire sur une période de 50 ans ou plus »^{xxxix}.

Outre sa difficulté pratique de mise en œuvre, ce dispositif comporte deux inconvénients. Il risque d'amoinrir les incitations à faire des gains de productivité : il ne faut pas trop compter sur les agents économiques pour accroître leur productivité si tous les gains en résultant sont prélevés par l'autorité publique. Il incite bien aux économies d'énergie mais pas à la substitution énergétique qui est un pilier incontournable de la transition bas carbone. C'est pourquoi il nous semble utile d'explorer une autre voie pour contrer l'effet rebond : celle de la tarification du carbone

De l'économie de la rente pétrole à celle de la rente carbone

Depuis les travaux visionnaires de Pigou (1920), les économistes ont coutume de justifier l'utilisation d'instruments de tarification du carbone par des critères d'efficacité : une taxe verte permet d'internaliser les coûts environnementaux, l'égalisation des coûts marginaux favorisant alors la réduction du coût total de l'action de protection de l'environnement.

L'enjeu de la tarification carbone déborde singulièrement cette question d'efficacité de l'action. Depuis le début des années 2010, la transition bas carbone est facilitée par la baisse des coûts des renouvelables et du stockage de l'énergie. En 2010, on pouvait gagner un appel d'offre pour produire de l'énergie solaire avec un prix de l'ordre de 180 dollars le kWh. En 2018, les appels d'offre se gagnent à des niveaux qui sont tombés jusqu'à 30 dollars^{xl}. Une division par six, qui n'a rien à envier aux baisses du prix du lumen ou du mégaoctet analysées précédemment.

Ces baisses de prix relatifs vont se poursuivre en stimulant les investissements dans la production d'électricité d'origine renouvelable et en incitant l'industrie automobile à accélérer le glissement de son offre vers des modèles électriques. Ces dynamiques nous éloignent bien du scénario rouge en nous mettant sur la trajectoire de l'étiquette bleue. Mais elles s'inscrivent encore dans le schéma de l'empilement où les sources décarbonées ne se substituent que partiellement aux fossiles qui feront longtemps de la résistance. Pour accélérer le rythme de la transition bas carbone et précipiter le retrait des fossiles, il convient de modifier l'échelle des prix relatifs via la tarification du carbone.

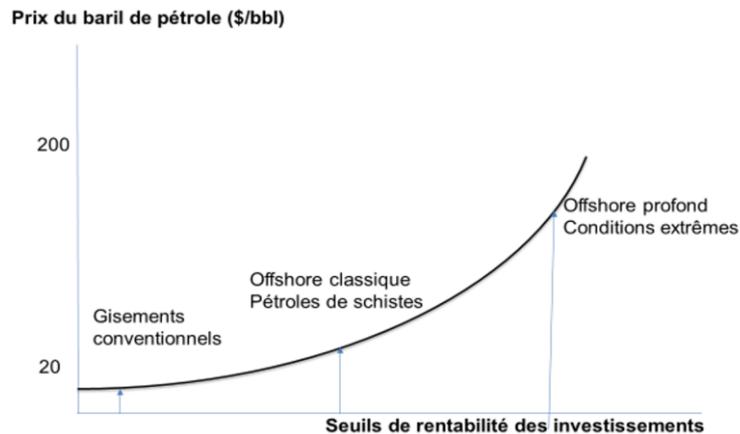
Prenons l'exemple du pétrole. Son économie est basée sur le jeu des rentes qui présente une double face : la rente de rareté et la rente différentielle. Cette double face risque de prolonger longtemps son exploitation.

Lorsque la rareté relative du pétrole augmente, pour des raisons géologiques ou géopolitiques, le prix du baril s'envole. Il peut dépasser 100 dollars le baril comme en 2008 ou en 2013. L'impact est plutôt récessif pour l'économie car sa hausse agit comme celle d'une taxe indirecte sur les consommateurs. Elle est plutôt vue d'un bon œil par les militants écologistes : la hausse du baril décourage les consommateurs en incitant aux économies et à la recherche de substituts. Raisonnablement valable à court terme. Simultanément, le renchérissement du baril élargit la rente de rareté captée par les producteurs ce qui les incite à investir dans de nouvelles capacités et les technologies d'extraction non conventionnelles et donc à accroître le potentiel d'émission de CO₂ à moyen et long terme.

Le surcroît d'offre finit par rattraper une demande par ailleurs ralentie par la hausse du prix et il provoque une nouvelle baisse des cours. C'est le phénomène cyclique des « contrechocs pétroliers ». Cette baisse stimule la demande et favorise la reprise des émissions de CO₂. Une mauvaise nouvelle à court terme pour le climat, d'autant plus que les producteurs révèlent une résilience insoupçonnée à la baisse des cours. C'est ici que joue pleinement la deuxième face de la rente pétrole : la rente différentielle. Dans leur grande majorité, les producteurs empochent en effet un second bonus qui

résulte de la différence entre leurs coûts d'exploitation et ceux des champs les moins bien situés ou qui produisent un brut de moins bonne qualité. Lorsque le baril tombe à 20 dollars, les producteurs les moins bien positionnés souffrent. Mais le champ de Ghawar en Arabie Saoudite est encore très rentable : son coût de production est de l'ordre de 5 à 7 dollars le baril. Son exploitant n'est pas près de sortir du marché...

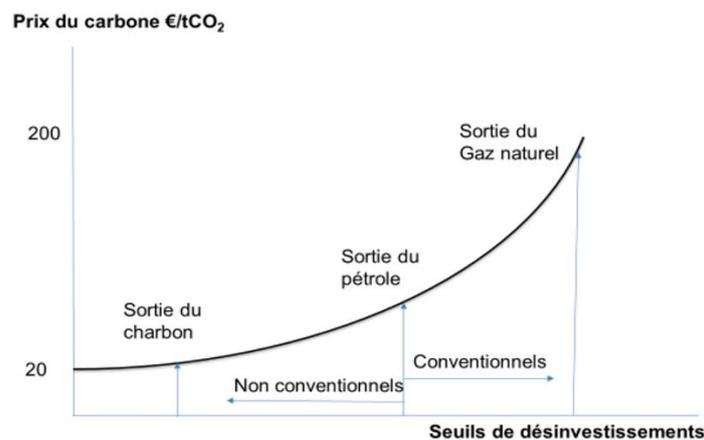
Figure 7 : Economie de la rente pétrole



La double face de la rente pétrole s'applique aux autres énergies fossiles dont l'exploitation est basée sur les mêmes règles économiques formalisées par Hotelling. Cette dynamique de la rente va conduire à prolonger leur exploitation. Pour parvenir à désempiler les sources énergétiques, il faut court-circuiter l'exploitation des sources fossiles en basculant de l'économie de la rente pétrole vers l'économie de la rente carbone.

Le pivot de l'économie de la rente carbone est la valeur donnée à la protection du climat via un prix du CO₂. Ce prix est un coût qui doit s'appliquer à toute émission de CO₂ d'origine anthropique. Peu importe qu'il soit introduit dans l'économie via une taxe, un marché de permis ou de façon plus implicite par un jeu de normes. Sa particularité est d'envoyer les bonnes incitations tant du côté de l'offre que de la demande.

Figure 8 : Economie de la rente carbone



Du côté des consommateurs, l'introduction du prix du CO₂ provoque un renchérissement des différentes sources d'énergie au prorata de leurs contenus respectifs en CO₂. Les incitations introduites sont doubles : d'une part, économiser une énergie dont le coût moyen augmente ; d'autre part, substituer des sources non ou faiblement carbonées aux sources les plus émettrices de CO₂. Ce

mécanisme est directement observable en Suède où une taxe carbone supérieure à 120 €/tCO₂ rend hors de prix l'utilisation du fioul ou du gaz d'origine fossile qui ne sont pratiquement plus utilisés dans les réseaux de chaleur. Résultat : le pays émet deux fois moins de CO₂ par habitant pour le chauffage des bâtiments que l'Espagne où le climat est bien plus chaud.

Dans l'économie de la rente carbone, les incitations vertueuses sur le consommateur ne sont plus contrebalancées par un effet de sens contraire du côté du producteur incité par la hausse du prix à élargir ses capacités de production de fossiles. Sitôt que le prix du carbone devient la balise de la transition énergétique, la rente carbone prend en effet le pas sur la rente pétrole. Il devient de moins en moins rentable d'investir dans les sources fossiles à mesure que s'élève le coût du CO₂ sauf si des technologies de captage et stockage de carbone permettent de dissocier l'usage de l'énergie fossile des émissions de CO₂. Le renchérissement du CO₂ détourne donc à la fois le producteur et le consommateur des sources fossiles émettrices de CO₂.

Si la tarification du carbone est un outil approprié pour accélérer la sortie des énergies fossiles et la marche vers la sobriété énergétique, son usage est beaucoup plus problématique sitôt qu'on s'intéresse à la biomasse et plus généralement au « carbone vivant ». Or, la prise en compte de l'objectif de « neutralité carbone » rappelle le rôle incontournable de l'agriculture et de la forêt dans la transition énergétique.

L'objectif de neutralité carbone

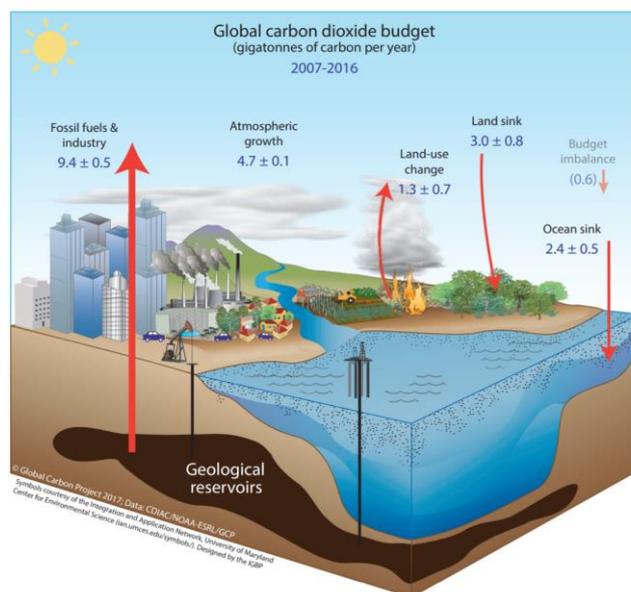
La seconde cible de long terme introduite par l'Accord de Paris est la « neutralité carbone » consistant à plafonner les émissions de gaz à effet de serre au niveau de la capacité d'absorption du CO₂ atmosphérique par les puits naturels ou artificiels. On obtient ainsi un régime d'émissions nettes nulles, permettant de stabiliser la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, autrement dit la bonne variable de contrôle pour agir sur le réchauffement. La cible de neutralité est donc pertinente si l'on parvient à la traduire en objectifs concrets pour les différentes parties à l'accord.

A l'instar d'autres pays européens, la France a repris à son compte cet objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, sans qu'aient toutefois été précisées les implications de cette transposition d'un objectif global à l'échelle d'un pays ou groupe de pays. Souvent, cet objectif est rattaché à la possibilité de créer des puits artificiels stockant le CO₂ par des technologies de type capture et stockage de carbone. L'enjeu majeur lié à la neutralité carbone n'est pas là. Il concerne en premier lieu le rôle de l'agriculture et de la forêt qui peuvent séquestrer ou rejeter du carbone dans l'atmosphère suivant la façon dont elles sont gérées.

Imaginons qu'au niveau mondial, la transition énergétique se traduise effectivement par une sortie définitive des fossiles et qu'en 2050 le système énergétique n'émette plus une seule tonne de CO₂. Supposons également que les émissions liées aux process industriels aient été totalement supprimées, par exemple via des techniques de captage et stockage de CO₂. Aurions-nous pour autant éliminé les rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ?

Il subsisterait celles liées à l'agriculture, la forêt et la gestion des déchets organiques, qui comptent pour plus du quart des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Ces activités ont en commun d'intervenir le long du cycle du « carbone vivant », celui qui est produit par la photosynthèse et est à l'origine des chaînes alimentaires. Pour l'essentiel, leurs émissions ne proviennent pas des rejets de CO₂ provoqués par la combustion d'énergie fossile. Elles sont composées de méthane et de protoxyde d'azote principalement rejetés par l'agriculture et du déstockage de CO₂ provoqué par la déforestation et le retournement ou l'érosion des sols (figure 9).

Figure 9 : Schéma du cycle global du carbone



Source : Global Carbon Budget, 2017

La décarbonation du système énergétique n'affecte donc que marginalement les émissions provenant des secteurs du « carbone vivant ». Elle pourrait même avoir l'effet inverse si elle provoque des changements d'usage des sols altérant la capacité d'absorption des puits naturels de carbone, la plupart des sources renouvelables produisant moins d'énergie à l'hectare que les sources fossiles (ou nucléaires).

Prenons l'exemple de la biomasse énergie. L'exploitation de la biomasse traditionnelle, première source d'énergie dans les pays moins avancés, conduit dans de nombreux cas à des prélèvements excessifs que le milieu naturel ne peut renouveler. Le « bois de feu » est ainsi une source non négligeable de déforestation tropicale. Cette source traditionnelle sera amenée à disparaître si la transition bas carbone s'accompagne de véritables progrès dans l'accès à l'énergie. Mais elle pourrait être remplacée par des prélèvements encore plus destructeurs pour le milieu naturel si des sources fossiles sont remplacées sans précaution par des usages industriels de la biomasse.

C'est, avec les risques de déstabilisation des équilibres alimentaires, la principale limite à l'expansion des biocarburants de première génération. Subventionnés à grande échelle aux Etats-Unis et en Europe, ces programmes ont un bilan carbone très éloigné de celui obtenu au Brésil à partir de sous-produits de la canne à sucre. Bilan qui devient franchement négatif par ses effets induits sur la déforestation lorsqu'on utilise de l'huile de palme ou de coprah comme matière première. On retrouve ce risque de surexploitation de la ressource dans les projets de reconversion des centrales à charbon vers de la biomasse^{xli}. Vu le nombre de centrales à charbon à reconvertir dans le monde, les ressources à mobiliser seraient considérables. C'est pourquoi les effets potentiels des conversions opérées par exemple au Royaume-Uni ou celles discutées pour les centrales de Gardanne et de Cordemais en France doivent être évalués avec attention. Mal contrôlée, une substitution massive du charbon au bois entraînerait une surexploitation du milieu naturel qui ne pourrait fournir les combustibles requis sans des relâchés croissants de CO₂ dans l'atmosphère.

L'agriculture peut en revanche produire d'importantes quantités d'énergie en favorisant la conservation du milieu naturel, via l'agroforesterie ou la méthanisation des déchets agricoles. La

reconstitution et l'entretien des haies recèle un potentiel élevé dans les régions où le développement des grandes cultures s'est opéré au détriment du couvert végétal. La méthanisation permet d'améliorer la gestion des effluents d'élevage et favorise la pratique de cultures intercalaires limitant l'érosion des sols.

L'objectif de neutralité carbone introduit donc une dimension nouvelle dans la transition bas carbone : il faut traiter à la fois le carbone fossilisé du système énergétique et le carbone vivant qui peut soit approvisionner les chaînes alimentaires, soit fournir des débouchés énergétiques. Une dimension de la transition énergétique aux enjeux méconnus, comme si énergie, alimentation et déforestation étaient des ensembles disjoints. Le carbone vivant constitue de plus le principal puits susceptible d'accroître la séquestration du CO₂ atmosphérique dans les prochaines décennies.

L'investissement dans les puits : la biodiversité au service de la transition bas carbone

A l'échelle internationale, le principal changement d'usage des sols affectant le cycle du carbone est la déforestation tropicale à l'origine d'un déstockage de CO₂, variable d'une année à l'autre, fluctuant autour de 10% des émissions mondiales de gaz à effet de serre. La principale cause de ce rejet massif est la destruction de la forêt résultant de l'extension des cultures et de l'élevage. Pour lutter contre la déforestation tropicale, il convient d'agir sur ses causes agricoles comme le montre l'exemple du Brésil qui est parvenu à diviser par plus de deux le rythme de sa déforestation en freinant les cultures de soja et l'élevage bovin en Amazonie^{xlii}.

La capacité de la biosphère à stocker le carbone dépend aussi de la façon dont les agriculteurs et les éleveurs utilisent le sol : la prairie permanente, les haies, les cultures intercalaires contribuent au stockage du carbone dans le sol ; l'érosion de terres nues, le labour, l'excès de produits chimiques le vident de sa matière vivante en rejetant du CO₂.

Là où les sols sont très dégradés et pauvres en matière vivante, il y a un potentiel considérable de stockage de CO₂ si on parvient à inverser la tendance grâce à des pratiques agricoles adaptées. Ce potentiel est particulièrement élevé en Afrique, dans les zones sahéliennes et semi-arides où la restauration des sols agricoles permettrait simultanément de lutter contre l'insécurité alimentaire en augmentant les rendements à l'hectare. L'initiative « 4 pour 1000 » lancée à la conférence climat de Paris de 2015 pourra y contribuer si elle se traduit en réelles actions de terrain^{xliii}.

A l'opposé, là où les sols sont déjà saturés en CO₂, comme par exemple dans les tourbières en forêt indonésienne, le potentiel de stockage supplémentaire est inexistant. La stratégie efficace consiste alors à protéger ces milieux naturels pour y conserver le carbone accumulé.

Cette réorientation des mises en valeur agricole et forestière pourrait être à terme une composante primordiale d'une transition réussie vers la neutralité carbone avec des effets bénéfiques sur la richesse du milieu naturel.

L'investissement dans les puits de carbone captant le CO₂ à partir de la biosphère ne sera pas une mobilisation de capitaux lourds pour créer des usines développant de nouveaux procédés à grande échelle. C'est avant tout un investissement en capital naturel et en capital humain mobilisant des ressources scientifiques importantes pour comprendre le fonctionnement complexe des écosystèmes et passant par une multiplicité d'expérimentations d'acteurs sur les territoires. Pour le monde agricole, c'est également un enjeu de formation : pratiquer le biocontrôle pour protéger ses cultures demande une technicité bien supérieure à celle requise pour procéder aux épandages de produits chimiques dont les doses sont généralement prescrites par les fournisseurs d'intrants. On est très loin des images trompeuses de retour en arrière parfois associées à l'agriculture biologique.

Il est difficile de chiffrer le potentiel de CO₂ pouvant être ainsi retiré de l'atmosphère. Ce qui compte pour le climat est la seule augmentation nette du stock de CO₂ atmosphérique pouvant être absorbée par le milieu naturel. Une grandeur qui, par construction, ne peut croître indéfiniment. L'investissement dans les puits de carbone s'inscrit donc bien dans une optique de transition, le supplément de captage de CO₂ devenant inutile une fois les sources d'émission brutes éliminées du système, suivant un schéma global rappelant les fondamentaux de l'économie circulaire^{xliv}.

En revanche, l'investissement de reconstitution des puits de carbone génère des effets bénéfiques à plus long terme. Il consiste à recréer des dynamiques positives au sein du milieu naturel pour améliorer sa capacité régénératrice à partir de la diversité biologique. En deux mots, c'est aussi un investissement en faveur de lutte contre la perte de la biodiversité, l'un des autres grands systèmes de régulation naturelle gravement perturbé par l'activité humaine. C'est ce qui en fait une composante particulièrement intéressante de la marche vers la neutralité carbone.

Conclusion : pour une vision holistique de la transition bas carbone

La transition énergétique bas carbone qui s'amorce va concerner aussi bien le système énergétique que l'agriculture et la forêt qui en sont une partie intégrante : en fournissant quotidiennement nos organismes en calories, l'agriculture approvisionne ce qu'on peut appeler le système énergétique primaire. Intégrer cette fonction primaire dans le système énergétique procure une vision plus claire des enjeux de la transition bas carbone.

Sources quasi exclusives d'énergie jusqu'au début du XX^e siècle, l'agriculture et la forêt ont d'abord approvisionné l'espèce humaine en énergie alimentaire. La maîtrise du feu constitua la première transition énergétique, permettant de nouveaux usages : cuisson, chauffage, travail des métaux. Le développement de l'élevage consécutif à la sédentarisation des sociétés introduisit une deuxième transition énergétique, ajoutant la traction animale à force musculaire des hommes et faisant de l'alimentation du bétail un vecteur majeur d'approvisionnement en énergie pour le transport et le travail du sol.

Au cours des deux derniers siècles, les sources fossilisées ont démultiplié les usages et la quantité d'énergie consommée. Ce carbone fossilisé était initialement un stock de carbone vivant qui a mis des dizaines de millions d'années à se transformer en gisements exploitables. En deux siècles, les terriens ont ainsi totalement court-circuité le temps géologique, ce qui explique la violence de la perturbation provoquée par ce relâché rapide de CO₂.

Dans les deux cas, la source primaire du système énergétique se situe après que la photosynthèse a transformé l'énergie solaire arrivant sur la planète en carbone vivant, seul le décalage de millions d'années séparant le fossile du vivant. Vouloir rééquilibrer le système à partir de ces seules sources post-photosynthèse conduirait rapidement à des conflits ingérables entre usage énergétique, usage alimentaire et les autres usages sur une planète bientôt peuplée de plus de 9 milliards d'habitants. C'est pourquoi la sortie des fossiles ne pourra s'effectuer qu'à deux conditions : réduire massivement les gaspillages dans l'utilisation de l'énergie et introduire de nouvelles sources non carbonées.

Parmi les substituts aux sources post-photosynthèse, l'éolien, l'hydraulique, les courants marins, mobilisés depuis longtemps de façon subsidiaire via les moulins et la navigation à voile, peuvent augmenter leur contribution sans créer de rupture majeure. Le potentiel de l'atome, par fission et peut-être demain par fusion nucléaire, sera obéré par les multiples problèmes de gestion du risque associé à son usage. Reste le solaire, consistant à capter l'énergie avant la photosynthèse, qui, selon

les termes de Smil (2017) « est la seule forme d'énergie renouvelable dont le flux dépasse non seulement la demande actuelle pour les carburants fossiles, mais aussi la demande qu'on peut raisonnablement anticiper au XXI^e siècle (et au-delà) »^{xlv}.

Cette vision globale intégrant l'agriculture et la forêt introduit la complexité inhérente au vivant qui fait que l'agriculture et la forêt peuvent difficilement entrer dans des schémas de tarification du carbone permettant d'accélérer la sortie des sources fossiles. Mais elle permet de mieux apprécier les avancées de la transition bas carbone qui implique des transformations tout à fait nouvelles pour nos sociétés : guider les choix énergétiques à partir du « carbone d'en haut » qui varie suivant nos émissions brutes mais aussi notre capacité à renforcer les puits de carbone via la protection de la biodiversité ; passer d'une logique d'addition des sources primaires d'énergie à une logique de substitution impliquant un retrait rapide des sources fossiles sans effet de retour négatif sur le milieu naturel via la surexploitation de la biomasse énergie ; viser une réduction des consommations d'énergie par tête s'appliquant tant à l'énergie alimentaire requise par notre organisme qu'à celle utilisée pour nous transporter, nous chauffer, nous éclairer etc.

Ces repères globaux peuvent se décliner suivant les situations nationales. Dans le cas français, ils pourraient utilement nourrir un débat public encore bien trop centré sur la place du nucléaire dans le mixe électrique comme l'a montré la consultation citoyenne opérée à l'occasion de la « Programmation Pluriannuelle de l'Énergie »^{xlvi}. Ils permettraient aussi de clarifier le concept de neutralité carbone, introduit subrepticement dans les objectifs du plan climat national sans la moindre consultation citoyenne ou parlementaire. Ils donneraient enfin une plus grande cohérence à la politique publique qui semble traiter comme deux ensembles disjoints l'action contre le réchauffement climatique d'un côté et la lutte contre la perte de biodiversité de l'autre.

Annexe 1 – Consommation d'énergie par source (Mtep)

	Charbon	Pétrole	Gaz	Autres	Total	Part des fossiles (%)
1800	9			520	529	2%
1850	53			676	729	7%
1900	536	17	6	596	1 133	49%
1910	810	37	13	652	1 462	59%
1920	920	83	22	761	1 681	61%
1930	948	164	56	909	1 857	63%
1940	1 084	248	82	1 024	2 109	67%
1950	1 180	510	196	1 439	2 618	72%
1960	1 445	1 039	419	2 344	3 790	77%
1970	1 622	2 218	933	4 185	5 807	82%
1980	2 075	2 866	1 346	5 507	7 581	83%
1990	2 447	2 947	1 840	6 542	8 989	80%
2000	2 496	3 358	2 239	7 679	10 175	80%
2010	3 900	3 690	2 964	8 901	12 801	82%
2015	4 152	4 020	3 218	9 511	13 663	83%

Source : à partir des données de V. Smil (2017)

Depuis 1800, l'empilement des sources primaires est le moteur des transitions énergétiques. Les nouvelles sources viennent s'ajouter à celle préexistantes, sans s'y substituer. Passer de ce schéma additif à un schéma substitutif sera la grande affaire de la transition bas carbone.

Annexe 2 – Emissions de CO₂ par source (MtCO₂)

	Charbon	Pétrole	Gas	Usage des terres + Ciment	Total	Part des émissions énergétiques (%)
1850	198			2 548	2 746	7%
1900	1 889	59	11	4 215	6 174	32%
1910	2 853	125	26	4 548	7 552	40%
1920	3 091	286	40	4 492	7 910	43%
1930	3 161	557	103	5 105	8 926	43%
1940	3 729	840	154	5 870	10 593	45%
1950	3 924	1 551	356	6 011	11 842	49%
1960	5 170	3 113	832	6 672	15 788	58%
1970	5 706	6 744	1 808	5 443	19 700	72%
1980	7 096	8 881	2 703	4 686	23 366	80%
1990	8 650	9 138	3 762	5 518	27 069	80%
2000	8 533	10 466	4 727	5 791	29 517	80%
2010	13 979	11 393	6 219	6 988	38 579	82%
2015	14 690	12 270	6 843	7 935	41 738	81%

Source : à partir des données du DIAC

La transition énergétique opérée depuis deux siècles a conduit à un accroissement massif des émissions d'origine énergétique qui représentent 81 % des émissions totales de CO₂ en 2015, contre un peu moins de la moitié en 1950 et moins d'un tiers au-début du siècle dernier.

Annexe 3 – Population, consommation d'énergie et émissions de CO₂ par tête

	Population mondiale (Millions d'habitants)	Consommation d'énergie (tep/tête)	Emissions de CO ₂ (tCO ₂ /tête)	dont émissions énergétiques (tCO ₂ /tête)
1800	900	0,59	<i>nd</i>	<i>nd</i>
1850	1 200	0,61	2,3	0,2
1900	1 650	0,69	3,7	1,2
1910	1 700	0,86	4,4	1,8
1920	1 860	0,90	4,3	1,8
1930	2 070	0,90	4,3	1,8
1940	2 300	0,92	4,6	2,1
1950	2 536	1,03	4,7	2,3
1960	3 033	1,25	5,2	3,0
1970	3 701	1,57	5,3	3,9
1980	4 458	1,70	5,2	4,2
1990	5 331	1,69	5,1	4,0
2000	6 145	1,66	4,8	3,9
2010	6 958	1,84	5,5	4,5
2015	7 383	1,85	5,7	4,6

Source : A partir des données de V. Smil (2017), CDIAC & ONU

Croissance démographique et augmentation de la consommation d'énergie fossile par habitant sont les deux moteurs principaux des rejets anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère.

Annexe 4 : Le phare des Baleines



Source : <https://www.iledere.com/>

La tour des baleines, à gauche sur la photo, fut l'un des tous premiers phares mis en service en France. Elle fut commandée par Colbert, alors secrétaire d'Etat à la marine, et achevée en 1682 sous la supervision de Vauban. A l'origine alimentée par des huiles de poisson et de baleine, elle bascula ensuite au charbon puis au pétrole ce qui améliora marginalement son efficacité. L'actuel phare des baleines, à droite sur la photo, a été mise en service en 1854. Son électrification date du début du siècle dernier et son raccordement au réseau électrique des années 1950. Sa portée a été considérablement accrue grâce au système de lentille à échelon puis avec l'utilisation d'ampoules convertissant de façon bien plus efficace l'énergie en lumière.

Références

- ⁱ Christian de Perthuis (2013), La « transition énergétique » : les ambiguïtés d'une notion à géométrie variable, Information et Débats No. 21, Chaire Economie du Climat.
- ⁱⁱ Lewis J. Perelman, August W. Giebelhaus, Mickael .D. Yokel (1981), *Energy Tansitions: Long Term Perspectives*, Boulder : AAAS.
- ⁱⁱⁱ Robert Hefner (2009), *The Great Energy Transition*, Hoboken, HJ Willey.
- ^{iv} Vaclav Smil (2017) *Energy Transitions: Global et National Perspectives*, Second edition, Praeger.
- ^v Cesare Marchetti & Nebojsa Nakicenovic (1979). The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model. IIASA Research Report. IIASA, Laxenburg, Austria: RR-79-013.
- ^{vi} Peter Lund (2006) Market Penetration Rates o Nex Energy, *Energy Policy*, 34 : 317-26.
- ^{vii} Benjamin K. Sovacool (2017), The History and Politics of Energy Transitions, in *The Political Economy of Clean Energy Transitions*, Oxford University Press, (www.oxfordscholarship.com).
- ^{viii} Jeremy Rifkin (2011), *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*, Palgrave Macmillan.
- ^{ix} Pour une présentation détaillée des méthodes de comptabilisation des approvisionnements électriques en énergie primaire, se référer à l'article de Mathieu Ecoiffier, « Une analyse de la baisse des émissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie en France depuis 1990 », INSEE, décembre 2017. Une discussion des implications de ces méthodes sur la construction des bilans énergétiques ainsi que le point de vue de Marcel Boiteux sont donnés dans l'ouvrage de Jean-Pierre Hansen et Jacques Percebois, « Energie : économie et politiques », De Boeck 2015.
- ^x Roger Fouquet (2010), The Slow Search for Solutions: Lessons from Historical Energy Transitions by Sector and Service, *Energy Policy*, 38(11): 6586-96.
- ^{xi} Robert J. Gordon (2000), Does the New Economy Measure up to the Great Inventions of the Past?, *Journal of Economic Perspectives* 14 (Vol. 14, N°4).
- ^{xii} Robert J. Gordon (2012), *Is US Economic Growth over? Faltering Innovation Confronts the six Headwinds*, CEPR, Policy Insight N°63.
- ^{xiii} IEA, IRENA, World Bank and WHO (2018), *The Energy Progress Report*, (<https://trackingsdg7.esmap.org/>).
- ^{xiv} Harold Hotelling, « The economics of exhaustible resources », *The Journal of Political Economy*, 1931, 39, p. 137-175.
- ^{xv} Philippe Bihouix, *L'âge des low tech, vers une civilisation techniquement soutenable*, Seuil, 2014.
- ^{xvi} Guillaue Pitron, *La guerre des métaux rares*, Les liens qui libèrent, 2018.
- ^{xvii} Roger Fouquet & Peter J.G. Pearson (2012), The Long Run Demand for Lighting: Elasticities and Rebound Effects in Different Phases of Economic Development, *Economics of Energy & Environmental Policy*, Volume 1, Issue 1, P.85.
- ^{xviii} Angus Maddison (2001), *The World Economy : A Millennial Perspective*, OCDE.
- ^{xix} Jean Fourastier (1979), *Les trente glorieuses : ou la révolution invisible de 1946 à 1975*, Fayard.
- ^{xx} Le Quéré et al. (2018) : Global Carbon Budget 2017, *Earth System Science Data*, 10, 405-448, (<https://www.earth-syst-sci-data.net/10/405/2018/>)
- ^{xxi} Jonh R. McNeil (2010), *Du nouveau sous le soleil : une histoire de l'environnement mondial au XX^e siècle*, Trad., Seuil, P.6.
- ^{xxii} UNFCCC (2015), Accord de Paris, article 2,1-a, (https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf)
- ^{xxiii} UNFCCC (2015), Accord de Paris, article 4,1, (https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf)
- ^{xxiv} Christian de Perthuis (2017), L'accord de Paris, un passager clandestin nommé Trump, Information et Débats No. 53, Chaire Economie du Climat.
- ^{xxv} L'expression n'est pas utilisée dans le rapport du GIEC lui-même mais est l'un des axes de recherche du Global Carbon Project, une initiative multi-acteurs dénommée Earth Systems Science Partnership. Voir le site du Global Carbon Project dont nous avons largement utilisé la base de données pour cet article.
- ^{xxvi} IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*, P.63
- ^{xxvii} Christophe McGlade & Paul Ekins, The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2° C, *Nature*, 2015 Vol.517 (7533), Janvier 2015.
- ^{xxviii} Le Quéré et al. (2018), Global Carbon Budget 2017, *Earth System Science Data*, 10, 405-448, (<https://www.earth-syst-sci-data.net/10/405/2018/>)

-
- ^{xxxix} Ces images du secteur énergétique à 2050 sont décrits plus en détail dans l'article de Christian de Perthuis « Quel climat préparons-nous pour demain ? », The Conversation, novembre 2017. (<https://theconversation.com/quel-climat-preparons-nous-pour-demain-87454>)
- ^{xxx} Jean-Pierre Dupuy (2004), *Pour un catastrophisme éclairé*, Seuil.
- ^{xxxi} Christian de Perthuis & Pierre André Juvet (2015), *Green Capital A New Perspective on Growth*, Columbia University Press, PP.231-236.
- ^{xxxii} Tim Jackson (2009), *Prosperity without Growth*, Earthcan.
- ^{xxxiii} Angus Deaton (2001), Health, Inequality, and Economic Development, *NBER Working Paper No. 8318*.
- ^{xxxiv} Ignacio J. Pérez-Arriaga (2017) New regulatory and business model approaches to achieving universal electricity access, *Papeles de energía*, 2017, No. 3, pp. 37-77
- ^{xxxv} Audrey Berry (2018), *Essai sur la précarité énergétique : mesures multidimensionnelles et impacts de la fiscalité carbone*, thèse de doctorat, EHESS-ED286
- ^{xxxvi} Julie Anne Cronin, Don Fullerton & Steven E. Sexton (2017), Vertical and Horizontal Redistributions from a Carbon Tax and Rebate, *NBER, Working Paper No. 23250*.
- ^{xxxvii} William Stanley Jevons (1865), *The Coal Question : An Inquiry Concerning the Progress of the Nation and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines*, McMillan, P.140.
- ^{xxxviii} Fateh Belaïd, Salomé Bakaloglou, David Roub (2018), Direct rebound effect of residential gas demand: Empirical evidence from France, *Energy Policy*, Volume 115, Pages 23-31
- ^{xxxix} Ernst von Weizsäcker (2009), A Long-term Ecological Tax Reform, in *Factor Five: Transforming the Global Economy through 80% Improvements in Resource Productivity*, Earthscan, P.327.
- ^{xl} International Energy Agency (2017), Market Report Services: Renewables, <https://www.iea.org/publications/renewables2017/>
- ^{xli} Vincent Bertrand, La co-combustion de bois dans les centrales charbon aux États-Unis : Un moyen détourné de prolonger l'usage du charbon ?, Chaire Economie du Climat, Policy Brief 2018-02
- ^{xlii} Gabriela Simonet, [La gestion des forêts tropicales comme levier d'atténuation du changement climatique : l'expérience des projets REDD+](#), Thèse soutenue à l'université de Montpellier, juin 2016.
- ^{xliiii} Véronique Massolier, « 4 pour 1000 », [une solution pour stocker le carbone ?](#) Science Actualités, mars 2017 ; Minasny et al. [The « 4 per 1000 » initiative : A credibility issue for the soil science community ?](#), *Geoderma* 309, June 2017.
- ^{xliv} Christina Arnsperger & Dominique Bourg (2017), *Ecologie intégrale, pour une société permacirculaire*, PUF, Collection L'écologie en question.
- ^{xlv} Vaclav Smil (2017) *Energy Transitions: Global et National Perspectives*, Second edition, Praeger, page 6
- ^{xlvi} Débat public programmation pluriannuelle de l'énergie, du 19 mars 2018 au 30 juin 2018, (<https://ppe.debatpublic.fr/>)

INFORMATION ET DÉBATS

DERNIERES PARUTIONS

Prix interne du carbone : pourquoi et comment ? Raphaël Olivier	N°55
Impact de la production de bois-énergie sur les pratiques sylvicoles en région Provence-Alpes-Côte d'Azur Pauline CASTAING	N°54
L'accord de Paris : "un passager clandestin" nommé Trump Christian de PERTHUIS	N°53
Contributions nationales et trajectoires de décarbonation profonde : une approche pragmatique Patrick CRIQUI, Sandrine MATHY	N°52
Freins à l'adoption de mesures d'atténuation des gaz à effet de serre dans l'agriculture Marielle BRUNETTE, Caroline ORSET, Camille TEVENART	N°51
Autoconsommation et transfert de richesses entre consommateurs Olivier REBENAQUE	N°50
Effets des taxes à l'achat et à l'usage des véhicules sur les émissions de CO₂ Bénédicte MEURISSE	N°49
Les malfaçons dans la production contemporaine de l'habitat Vincent RENAULD-GIARD	N°48

Directeur des publications Information et Débats : Marc Baudry

Les opinions exprimées dans ces documents par les auteurs nommés sont uniquement la responsabilité de ces auteurs.
Ils assument l'entière responsabilité de toute erreur ou omission.

La Chaire Économie du Climat est une initiative de l'Université Paris Dauphine, de la CDC, de Total et d'EDF, sous l'égide de la Fondation Institut Europlace de Finance.