

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : OBJECTIF ZEN

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : OBJECTIF ZEN

FANNY HENRIET ET KATHELINE SCHUBERT

RUED'ULM

Nous appliquons dans ce livre la plupart des rectifications orthographiques
de la dernière réforme de l'Académie (JO du 6 décembre 1990).

© Éditions Rue d'Ulm/Presses de l'École normale supérieure, 2021
45, rue d'Ulm – 75230 Paris cedex 05
www.pressens.fr
ISBN 978-2-7288-0723-9
ISSN 1951-7637

Le Cepremap est, depuis le 1^{er} janvier 2005, le CEntre Pour la Recherche EconoMique et ses APplications. Il est placé sous la tutelle du ministère de la Recherche. La mission prévue dans ses statuts est d'assurer *une interface entre le monde académique et les décideurs publics et privés.*

Ses priorités sont définies en collaboration avec ses partenaires institutionnels : la Banque de France, le CNRS, France Stratégie, la direction générale du Trésor et de la Politique économique, l'École normale supérieure, l'INSEE, l'Agence française du développement, le Conseil d'analyse économique, le ministère chargé du Travail (DARES), le ministère chargé de l'Environnement, de l'énergie et de la mer, le ministère chargé de la Santé (DREES) et la direction de la recherche du ministère de la Recherche.

Les activités du Cepremap sont réparties en *cinq programmes scientifiques* coordonnés par sa direction : Politique macroéconomique en économie ouverte ; Travail et emploi ; Économie publique et redistribution ; Marchés, firmes et politique de la concurrence ; Commerce international et développement.

Chaque programme est animé par un comité de pilotage constitué de trois chercheurs reconnus. Participent à ces programmes une centaine de chercheurs, cooptés par les animateurs des programmes de recherche, notamment au sein de l'École d'économie de Paris.

La coordination de l'ensemble des programmes est assurée par *Claudia Senik*. Les priorités des programmes sont définies pour deux ans.

L'affichage sur Internet des documents de travail réalisés par les chercheurs dans le cadre de leur collaboration au sein du Cepremap tout comme cette série d'opuscules visent à rendre accessible à tous une question de politique économique.

Daniel COHEN
Directeur du Cepremap

Sommaire

1. L'horloge climatique	11
<i>Le budget carbone</i>	11
<i>Comment atteindre l'objectif ZEN ?</i>	16
2. La décarbonation de l'énergie	33
<i>Les ressources fossiles</i>	33
<i>Des énergies fossiles aux énergies renouvelables</i>	42
<i>Les puits de carbone et les émissions négatives</i>	53
3. La politique climatique	57
<i>Un mix d'instruments articulés autour d'un prix du carbone</i>	57
<i>Effets distributifs et justice sociale</i>	63
<i>Le secteur financier face à la transition énergétique</i>	72
4. Les conséquences macroéconomiques de la lutte contre le réchauffement climatique	83
<i>Les bénéfices directs</i>	85
<i>Les effets sur la consommation et l'investissement</i>	89
<i>Retour sur les actifs échoués : déclassement prématuré du capital brun et réallocations sectorielles de l'emploi</i>	97
<i>De la croissance à la croissance verte ?</i>	99
Conclusion	101
Liste des figures et des tableaux	103
Bibliographie	105

EN BREF

Les travaux scientifiques, les déclarations et les écrits d'ONG, d'hommes politiques, d'entreprises, de citoyens, qui alertent sur l'urgence climatique et sur l'insuffisance voire l'incohérence des réponses qui y sont pour l'instant apportées, sont maintenant innombrables. Une dimension centrale de la lutte contre le changement climatique réside dans l'abandon des énergies fossiles, carbonées, sources de la grande majorité de la production d'énergie au niveau mondial, et leur remplacement par des sources décarbonées. C'est la transition énergétique vers un monde ZEN, à zéro émissions nettes, à laquelle cet opuscul est consacré. Nous montrons qu'elle est indispensable, qu'elle va être difficile et coûteuse, que ses conséquences macroéconomiques sont incertaines, mais qu'elle est possible.

Fanny Henriet est chercheuse au CNRS et professeure associée à l'École d'économie de Paris. Ses travaux récents portent sur la fiscalité, les ressources fossiles et l'économie du changement climatique.

Katheline Schubert est professeure à l'université Paris I Panthéon-Sorbonne et à l'École d'économie de Paris. Elle étudie notamment l'économie des ressources naturelles et l'économie du changement climatique.

Les auteures remercient chaleureusement Daniel Cohen, Thomas Douenne, Marc Fleurbaey et Mouez Fodha pour leur relecture attentive et leurs suggestions, ainsi que les étudiants des masters APE et PPD de l'École d'économie de Paris.

1. L'horloge climatique

LE BUDGET CARBONE

Le réchauffement climatique est un problème de stock, ce qui lui confère une temporalité très particulière. Les émissions de gaz à effet de serre d'aujourd'hui affecteront le climat de demain et le climat du futur lointain. L'augmentation de température dépend non pas des flux d'émissions de gaz à effet de serre mais de la concentration de ces gaz dans l'atmosphère, somme des émissions de ces gaz mesurées en une unité commune (l'équivalent- CO_2) diminuée de l'absorption par les puits de carbone naturels que constituent les océans, les forêts et les sols. Cette concentration est restée stable pendant des siècles, puis a commencé à augmenter à partir de la révolution industrielle. La concentration atmosphérique du seul CO_2 était de 288 ppm (parties par million) en 1870. Depuis, elle a augmenté régulièrement, jusqu'à atteindre 405 ppm en 2017.

La figure 1 détaille les facteurs expliquant cette augmentation. La principale contribution positive est la combustion des énergies fossiles (au total, + 197 ppm). La seconde provient du changement d'usage des sols (+ 88 ppm). Les contributions négatives sont celles de l'absorption par les puits de carbone que sont les sols, la flore et les océans (au total, 161 ppm). L'absorption par les sols et la flore compense presque exactement l'émission de carbone due à la déforestation.

La concentration atmosphérique de gaz à effet de serre est théoriquement le meilleur prédicteur du réchauffement climatique. C'est pourquoi, dans la lutte contre le changement climatique, la communauté internationale s'est initialement donné des cibles quantitatives en termes de concentration atmosphérique de gaz à effet de serre (mesurées en CO_2 -équivalent) à ne pas dépasser. Par exemple, il était communément admis que pour ne pas dépasser le seuil de 2 degrés Celsius d'augmentation de la température moyenne de la planète par

rapport à la température préindustrielle, il fallait contenir à long terme la concentration de gaz à effet de serre à environ 450 ppm. Mais les travaux précurseurs de M. R. Allen *et al.* et M. Meinshausen *et al.* ont montré que l'augmentation de température terrestre associée à un niveau donné de concentration de gaz à effet de serre est incertaine¹, ce qui complique la fixation des cibles, et que l'augmentation de température est mieux prédite par les émissions de CO₂ cumulées. M. Meinshausen *et al.* montrent en outre que la relation entre les émissions cumulées et l'augmentation de température est insensible au sentier d'émission (c'est-à-dire à leur timing)². Cela signifie que se donner des objectifs en termes d'émissions cumulées est plus robuste, vis-à-vis de l'incertitude scientifique, que se donner des objectifs en termes de concentration. Les recherches les plus récentes en science du climat expliquent ce phénomène. Elles montrent que l'absorption par les puits de carbone, qui diminue la concentration atmosphérique et réduit les hausses futures de température, est compensée, au premier ordre, par un phénomène d'inertie thermique qui les augmente. Ce qui compte réellement pour l'augmentation de température, ce n'est pas la concentration atmosphérique de carbone³ mais les émissions cumulées⁴.

1. M. R. Allen *et al.*, « Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne », 2009 ; M. Meinshausen *et al.*, « Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C », 2009.

2. M. Meinshausen *et al.*, *ibid.*

3. Par abus de langage, nous utilisons indifféremment les termes « carbone » et « CO₂ ».

4. Pour une explication à destination des économistes, voir L. Mattauch *et al.*, « Steering the climate system. Using inertia to lower the cost of policy : Comment », 2020.

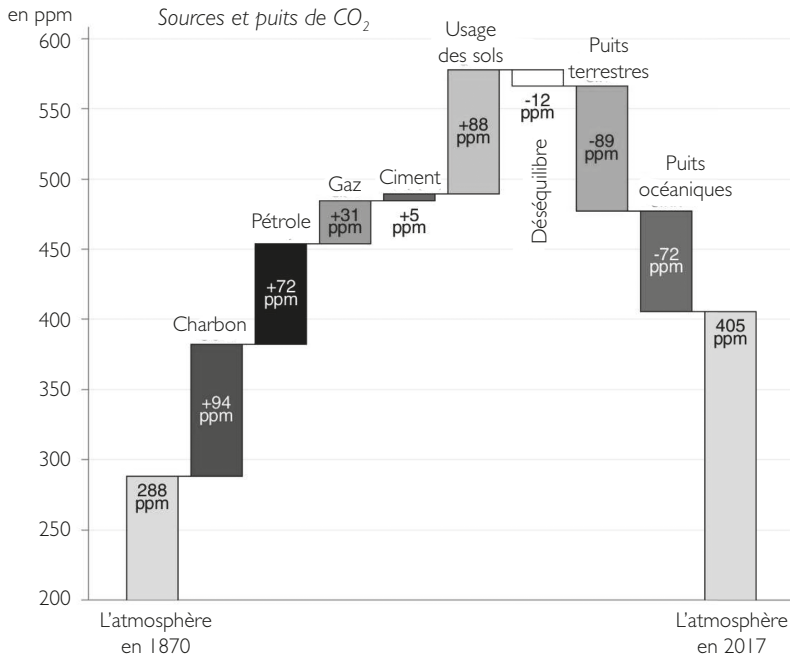


Figure 1 – Évolution de la concentration atmosphérique de carbone (1870-2017).

Source : Global Carbon Project (2018).

La figure 2 représente l'augmentation de température par rapport au niveau préindustriel (axe des ordonnées) correspondant à tout niveau d'émissions de CO₂ cumulées depuis 1870 (axe des abscisses)⁵.

5. La concentration de carbone est mesurée sur la figure 2 en Gt CO₂ plutôt qu'en ppm. La conversion se fait de la façon suivante : 1 ppm de CO₂ est égal à 2,13 Gt C ; 1 g C est égal à 3,664 g CO₂ ; par conséquent la concentration atmosphérique de carbone en 2017 (405 ppm) est égale à 3 160,75 Gt CO₂.

Sur la figure, l'ellipse noire pleine représente les émissions observées jusqu'à 2005 et les températures observées au cours de la décennie 2000-2009 avec les incertitudes correspondantes. Les ellipses en gris représentent le rapport entre le réchauffement total en 2100 et le cumul des émissions de 1870 à 2100, obtenu à l'aide d'un modèle climatique simple pour les six scénarios utilisés par le groupe de travail III du GIEC. Enfin, la zone grisée représente la dispersion des projections obtenues grâce à différents modèles de climat et cycle du carbone.

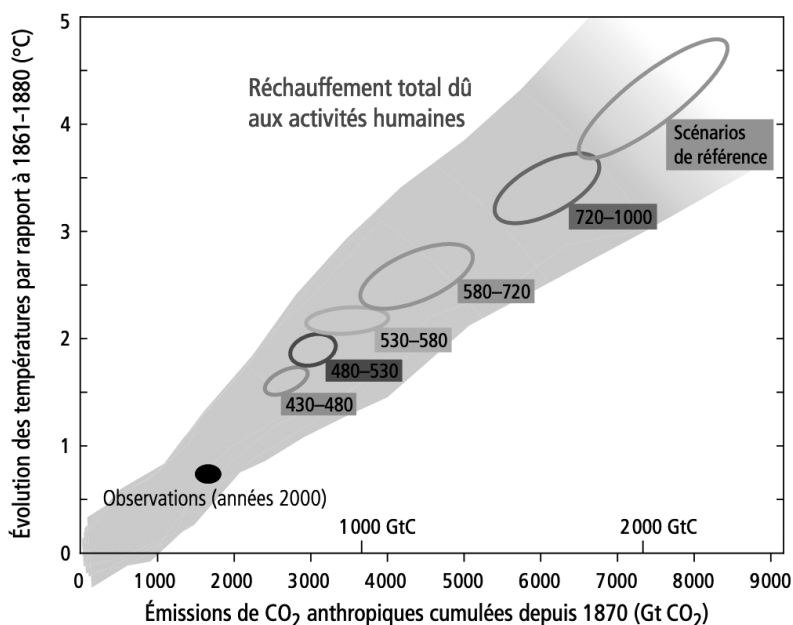


Figure 2 – Des émissions de CO₂ cumulées à l'augmentation de température.

Source : IPCC, 2014.

La relation quasiment linéaire qui existe entre les émissions de CO₂ cumulées et l'accroissement de température permet d'associer à tout objectif de limitation de l'augmentation de température (par exemple pas plus de + 1,5 ou + 2 °C) des émissions cumulées maximales. Elles constituent notre *budget carbone* global. En raison des incertitudes scientifiques sur le cycle du carbone et la réponse du climat à l'augmentation de concentration (la sensibilité climatique, *climate sensitivity*), à tout niveau d'émissions cumulées correspond en fait un intervalle d'augmentation de température et non une valeur unique. On exprime généralement cette incertitude en termes de probabilité de ne pas dépasser telle augmentation de température. Par exemple, selon les données de la figure 2, des émissions cumulées de 3 670 Gt CO₂ (resp. 2 900 Gt CO₂) entraînent une augmentation de température de 2 °C (resp. 1,5 °C) avec une probabilité de 66 %.

Compte tenu des émissions cumulées entre 1870 et 2018, le GIEC⁶ estime le budget carbone restant pour un objectif d'augmentation de la température de 2 °C (resp. 1,5 °C) à 1 170 (resp. 420) Gt CO₂. Les émissions mondiales de CO₂ en 2018 ont été de 42,1 Gt. À ce rythme d'émission, le budget carbone restant sera épuisé dans environ vingt-huit ans (resp. dix ans). Il existe d'autres estimations que celles du GIEC, effectuées avec des méthodes un peu différentes⁷, mais le message global reste le même : le budget carbone restant est faible, et nous disposons de très peu de temps avant qu'il ne soit épuisé, si nous continuons à émettre du CO₂ au rythme actuel. *L'horloge climatique* tourne très vite.

Se fixer une limite d'augmentation de la température, et donc un budget carbone global à ne pas dépasser, est une simplification utile.

6. IPCC, *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change*, 2014.

7. J. Rogelj et al., en font une revue et identifient les sources des différences dans « Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets », 2019.

Mais il serait caricatural de penser qu'en dessous du seuil rien ne se passe et qu'au-dessus le monde disparaît. La réalité est plus continue : les dommages augmentent avec les émissions cumulées, et ce d'autant plus que ces émissions cumulées sont importantes.

COMMENT ATTEINDRE L'OBJECTIF ZEN ?

Quel que soit l'objectif de température, il faudra atteindre dans le futur la *neutralité carbone*, c'est-à-dire que les émissions de CO₂ nettes devront devenir nulles. C'est l'objectif *zéro émissions nettes* (ZEN). Il signifie que les émissions de CO₂ anthropiques qui subsisteront (probablement dans l'agriculture, et dans certains secteurs comme l'aviation dans lesquels il n'est pas actuellement possible de se passer des énergies fossiles) devront être compensées par le retrait par l'homme de CO₂ de l'atmosphère, soit à l'aide d'une augmentation de la capacité d'absorption des océans, des forêts et des sols, soit grâce à des technologies d'émissions négatives. Le GIEC, dans un support spécial de 2018, estime que la neutralité carbone devra être atteinte en 2075 pour limiter l'augmentation de température à 2 °C (resp. 2050 pour 1,5 °C)⁸. Mais comment peut-on y parvenir ?

L'identité de Kaya

Une première réponse est donnée par l'identité de Kaya⁹. Il s'agit d'une identité comptable, décomposant¹⁰ les émissions de CO₂ en quatre facteurs représentant respectivement la démographie, la croissance

8. Les émissions des autres gaz à effet de serre doivent commencer à diminuer en 2030 pour atteindre la moitié de leur niveau de 2030 en 2100.

9. K. Yamaji *et al.*, « An integrated system for CO₂/ Energy/ GNP analysis : Case studies on economic measures for CO₂ reduction in Japan. Workshop on CO₂ reduction and removal : Measures for the next century », 1991.

10. Il s'agit seulement d'une décomposition commode. Les termes ne sont pas indépendants. Il n'y a pas de causalité.

économique, l'intensité énergétique de la production et l'intensité en carbone de l'énergie :

$$\text{émissions de CO}_2 = \underbrace{\text{population}}_{\text{démographie}} \times \underbrace{\frac{\text{PIB}}{\text{population}}}_{\text{croissance économique}} \times \underbrace{\frac{\text{énergie}}{\text{PIB}}}_{\text{intensité énergétique du PIB}} \times \underbrace{\frac{\text{émissions de CO}_2}{\text{énergie}}}_{\text{intensité en carbone de l'énergie}}$$

La figure 3 en donne une illustration. Elle montre la décomposition de Kaya au niveau mondial entre 1980 et 2015. Les différents éléments de la décomposition sont normalisés à 100 en 1980. Sur la période, émissions, PIB par tête et population ont augmenté, tandis que l'intensité énergétique du PIB a diminué et que le contenu en carbone de l'énergie, après avoir diminué jusqu'au milieu des années 1990, est resté sensiblement inchangé.

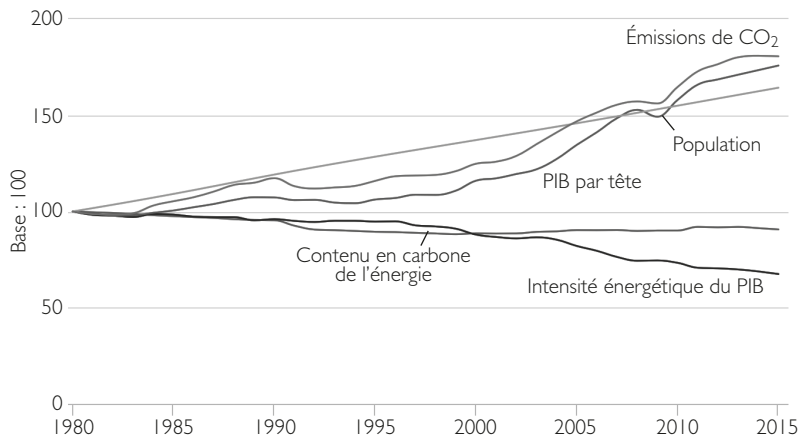


Figure 3 – L'identité de Kaya au niveau mondial (1980-2015).

Source : The Shift Project Database.

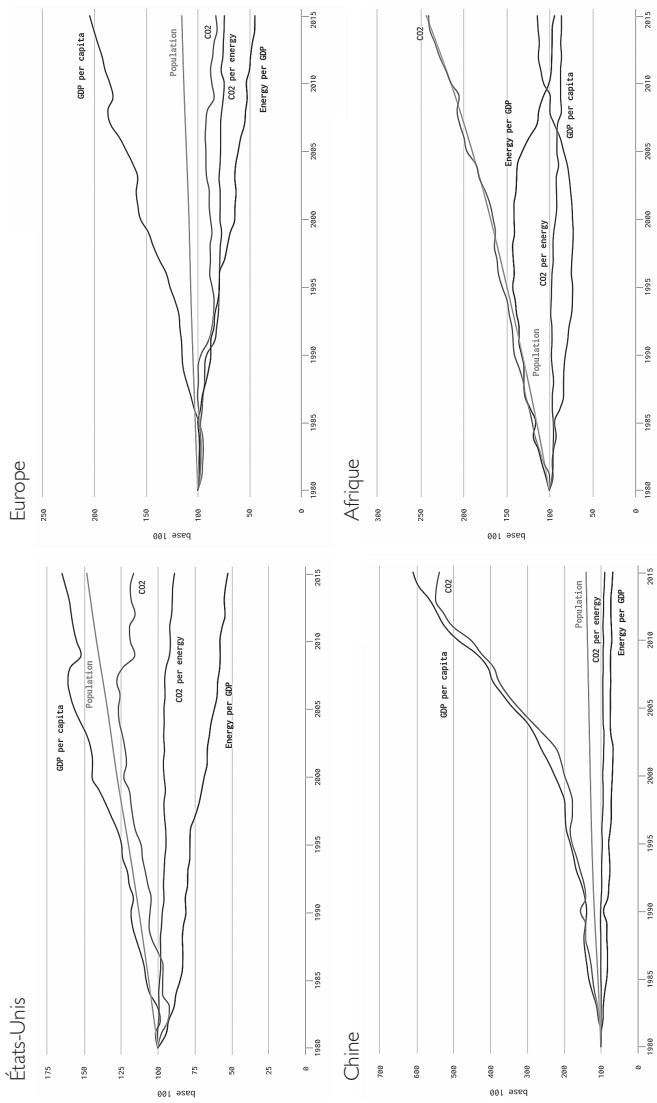


Figure 4 – L'identité de Kaya : États-Unis, Europe, Chine et Afrique (1980-2015).

Source : The Shift Project Database.

Cette décomposition au niveau mondial masque des différences massives entre les diverses régions du monde. La figure 4 l'illustre, en montrant la décomposition de Kaya pour les États-Unis, l'Europe, la Chine et l'Afrique, sur la même période¹¹. Aux États-Unis et en Europe, les émissions de CO₂ ont légèrement baissé ces dernières années, malgré l'augmentation du PIB par tête. L'intensité énergétique du PIB a diminué dans ces deux zones. La croissance de la population a été plus vigoureuse aux États-Unis qu'en Europe, et la baisse du contenu en carbone de l'énergie plus tardive. La situation est très différente en Chine où les émissions ont cru à peu près au même rythme que le PIB par tête, population, intensité énergétique du PIB et contenu en carbone de l'énergie évoluant très peu. En Afrique, au contraire, les émissions évoluent avec la population, alors que les autres termes de la décomposition restent stables.

Évidemment, ces décompositions de Kaya ne disent rien sur les niveaux des variables considérées. Pour donner des ordres de grandeur et mettre en perspective les évolutions, disons qu'en 2016 les émissions de CO₂ de la Chine représentaient 29,2 % des émissions mondiales, celles des États-Unis 14 %, celles de l'Union européenne 28 9,6 % et celles de l'Afrique subsaharienne 1,9 %. Ce n'est donc pas, par exemple, en freinant la croissance de la population africaine que l'on diminuera massivement les émissions mondiales.

Nous nous concentrons dans cet ouvrage sur la transition énergétique dans les pays avancés, les plus émetteurs, et n'abordons pas le cas des pays pauvres, pour lesquels la problématique est très différente, l'accès à l'énergie y étant souvent difficile, l'espace des choix plus restreint, les liens entre climat et pauvreté étroits¹². Cette restriction volontaire nous conduit à ne pas aborder la question fondamentale du partage entre les

11. Les émissions de CO₂ considérées dans ces figures sont celles émises sur le territoire national.

12. Voir, par exemple, S. Hallegatte et al., *Shock Waves : Managing the Impacts of Climate Change on Poverty*, 2016.

pays du budget carbone restant, épineuse à la fois sur le plan éthique et sur le plan pratique : faut-il considérer que chaque individu, quel que soit son pays, a un droit de tirage identique sur le budget restant ? Faut-il allouer le budget carbone restant en suivant les droits du grand-père, c'est-à-dire proportionnellement aux émissions passées ? Ou, au contraire, faut-il considérer que les pays qui émettent beaucoup ont déjà épuisé leur propre budget carbone ? Faut-il considérer les capacités à payer des pays ?, etc.

Revenons aux quatre termes de la décomposition de Kaya.

La démographie

La croissance de la population a un poids très important dans la croissance des émissions totales de CO_2 . L'effet est mécanique : à comportements donnés, plus de population entraîne davantage d'émissions. Selon les projections de l'ONU, la population mondiale devrait augmenter de 25 % entre 2020 et 2050, soit une augmentation d'environ 0,8 % par an. Si l'on veut que les émissions de CO_2 de 2050 soient 1/6 de celles de 2020, c'est-à-dire qu'elles diminuent sur la période à un taux annuel moyen de $-5,7\%$, il faut, avec une hypothèse de croissance économique faible de 1% par an, que l'intensité carbone du PIB (émissions de CO_2 sur PIB) baisse sur la période de $-5,7 - 0,8 - 1 = -7,5\%$ par an, ce qui est considérablement plus élevé (en valeur absolue) que ce qui a été observé dans le passé (environ $-1,5\%$ par an depuis 1970).

Quelques travaux théoriques récents s'intéressent au rôle de la population dans le changement climatique. Parmi eux, H. Bohn et C. Stuart et R. Gerlagh et *al.*¹³ étudient des modèles de croissance avec fertilité endogène et changement climatique dans lesquels les parents, quand ils choisissent leur nombre d'enfants, ne prennent pas en compte le fait que tout nouveau-né supplémentaire fait subir un coût externe négatif à la

13. H. Bohn et C. Stuart, « Calculation of a population externality », 2015 ; R. Gerlagh et *al.*, « Family planning and climate change », 2019.

société en raison des émissions de carbone qu'il va engendrer au cours de sa vie. C'est l'externalité de population. La politique climatique optimale consiste alors à mettre en place une taxe carbone et un mécanisme de contrôle des naissances, permettant d'égaliser les bénéfices pour la société d'une naissance supplémentaire et l'externalité de population. R. Gerlagh *et al.* va plus loin et considère que la politique climatique la plus efficace est le contrôle des naissances. Les auteurs reconnaissant cependant la réticence de la grande majorité des économistes à recommander cette politique et les très grandes difficultés qu'il y aurait à la mettre en place. Et, en effet, on peut constater que le contrôle des naissances n'est quasiment jamais mis en avant dans la panoplie des politiques climatiques.

D'autres travaux sont plus nuancés et montrent que lutter contre le réchauffement climatique ne requiert pas nécessairement de recommander la baisse du taux de croissance de la population. Tout dépend de l'éthique de la population à laquelle adhère la société : vaut-il mieux une population nombreuse mais pauvre, ou plus réduite mais riche ? N. Scovronick *et al.* montrent que si le critère auquel la société se réfère pour évaluer une politique est sa conséquence sur le bien-être moyen des individus, présents et futurs, la baisse du taux de croissance de la population est favorable car elle entraîne une baisse des émissions et donc des dommages climatiques, ce qui augmente le bien-être moyen et n'a pas d'effets négatifs¹⁴. Les choses sont plus complexes si le critère auquel on se réfère est la somme totale des utilités de tous les membres de la société présents et futurs. Alors, la baisse du taux de croissance de la population n'est une bonne politique climatique que si ses avantages en termes de réduction des dommages climatiques, et donc d'augmentation du bien-être moyen, font plus que compenser ses inconvénients en termes de réduction de la taille de la population future.

14. N. Scovronick *et al.*, « Impact of population growth and population ethics on climate change mitigation policy », 2017.

Si l'effet de la population sur les émissions est clair, comprendre l'effet en retour de la croissance des émissions, et donc des dommages climatiques sur la population, est également nécessaire. Au contraire des effets du changement climatique sur la santé, ses effets sur les choix de fécondité sont encore peu explorés. Le climat constitue-t-il la contrainte malthusienne moderne ? Les dommages pourraient limiter la croissance de la population, à travers leurs effets sur la fertilité, la mortalité infantile, la longévité, les normes sociales, ou simplement le désir d'avoir des enfants pour les faire naître dans un monde de plus en plus inhospitalier.

L'intensité énergétique

Un autre facteur isolé par l'identité de Kaya est l'intensité énergétique du PIB. Elle a décliné au niveau mondial d'environ 1,3 % par an entre 1961 et 2015. Cette baisse s'explique à la fois par des changements de comportement et par du progrès technique.

Les changements de comportement concernent d'abord les « petits gestes » du quotidien (faire des économies d'énergie en éteignant la lumière, recycler, avoir un comportement de consommation plus sobre, manger moins de viande, moins prendre l'avion, faire du vélo...). Les magazines sont pleins d'articles plus ou moins fantaisistes sur ces petits gestes qui vont sauver la planète, mais il n'est pas évident d'évaluer leur impact quantitatif réel. Une étude de Carbone 4 documente précisément l'impact que peuvent avoir ces petits gestes sur l'empreinte carbone d'un Français¹⁵. Les auteurs font l'hypothèse que tous les Français adoptent ces gestes. Ils proposent deux versions de leurs estimations : la version « Français moyen » et la version « Français héroïque ». Dans la première, les petits gestes sont relativement marginaux et ne demandent pas de très grands efforts, alors que dans la seconde, comme son nom l'indique, les gestes sont contraignants et les changements de mode de vie associés

15. C. Dugast et A. Soyeux, « Faire sa part ? Pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l'État face à l'urgence climatique », 2019.

sont importants. Le tableau I détaille ce que recouvrent exactement les différents changements de comportement.

Tableau 1 – Définition des petits gestes

Régime végétarien	Supprimer la viande et le poisson du régime alimentaire
Vélo pour les trajets courts	Remplacer les trajets en voiture sur courte distance en milieu urbain
Covoiturage sur tous les trajets	Fixer le taux d'occupation de tous les trajets en voiture, courts et longs, à 2,2 personnes par voiture
Ne plus prendre l'avion	Supprimer 100 % des vols domestiques et internationaux
Moins de vêtements neufs	Acheter trois fois moins de vêtements neufs
Manger local	Consommer l'ensemble de son alimentation en circuit court
Thermostat	Baisser la température de consigne de son logement
Électroménager et high-tech d'occasion	Tout acheter d'occasion
Zéro déchet et gourde	Supprimer les émissions liées aux emballages
LEDs dans son logement	Équiper son logement d'un éclairage LED

Source : C. Dugast et A. Soyeux, 2019.

La figure 5 présente les résultats dans le cas « héroïque ». Elle montre que la baisse des émissions permise par ce comportement est de 2,8 tCO₂eq, à comparer à une empreinte carbone moyenne des Français¹⁶ de 10,8 tCO₂eq. Le comportement héroïque permet donc de réduire l'empreinte carbone de 26 %. Quant au comportement moyen, les auteurs estiment qu'il permet une baisse de l'empreinte de 5 à 10 %, selon la façon dont il est défini – ce qu'on trouve héroïque ou normal varie beaucoup d'une personne à l'autre ! Le changement de comportement qui a l'effet de loin le plus important est le passage à un régime végétarien.

16. L'empreinte carbone est la quantité de CO₂ émise annuellement par la consommation des ménages. Elle est la somme des émissions nationales et des émissions « importées », c'est-à-dire des émissions provoquées à l'étranger par la production des biens que nous importons.

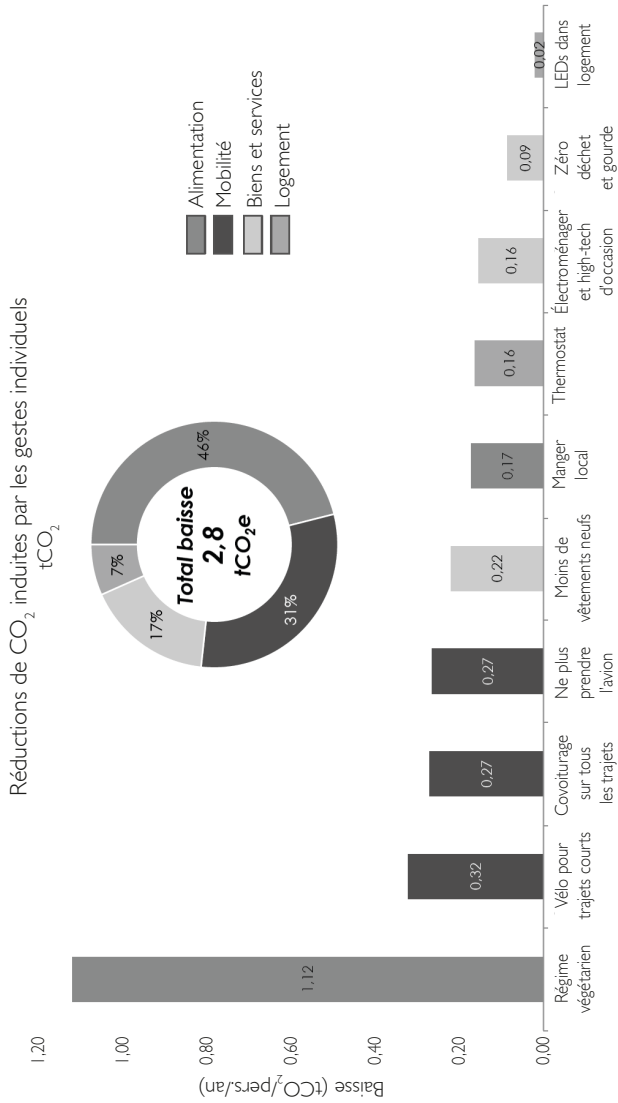


Figure 5 – L'impact des petits gestes d'un Français héroïque.

Le télétravail, qui s'est révélé possible à grande ampleur pour certaines catégories d'emplois pendant la crise du Covid-19, permettrait quant à lui de diminuer les émissions liées aux transports domicile-travail. Mais il pose aussi la question de l'empreinte carbone du numérique. Une étude du groupe de réflexion The Shift Project montre que le numérique serait à l'origine de 3,7 % des émissions totales de gaz à effet de serre dans le monde en 2018, 44 % de cette empreinte étant due à la fabrication des ordinateurs, téléphones, centres informatiques et des réseaux, et 56 % à leur utilisation¹⁷. Faut-il craindre une augmentation effrénée de la consommation d'énergie du numérique dans les années à venir ? Entre 2010 et 2018, la consommation d'énergie mondiale des data centers a augmenté de 6 % tandis que le nombre de calculs a augmenté de 550 %¹⁸. On peut donc espérer une augmentation faible de la consommation d'énergie au regard de l'augmentation de l'usage du numérique. Si celui-ci remplace des activités fortement énergivores, par exemple si la généralisation des réunions « zoom » fait beaucoup diminuer les trajets professionnels en avion, le bilan global pourrait être positif. A. Hook et al. tentent d'évaluer l'impact global, direct et indirect, du télétravail sur la consommation d'énergie, à travers l'examen de trente-neuf papiers empiriques récents¹⁹. Si la grande majorité des travaux obtiennent une baisse des émissions, ce n'est pas le cas de tous, et cette baisse est de toutes façons relativement modeste.

L'étude de Carbone 4 ne dit rien sur la façon dont ces changements de comportements pourraient être déclenchés. Par une prise de conscience de la gravité du problème climatique entraînant un changement de normes sociales, comme le « flygskam » – honte de l'avion – suédois ? Par une meilleure information des consommateurs, grâce à l'action des ONG, ou grâce à l'apparition de labels dédiés ? Par une politique

17. The Shift Project, *Pour une sobriété numérique*, 2018.

18. E. Masanet et al., « Recalibrating global data center energy-use estimates », 2020.

19. A. Hook et al., « A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking », 2020.

économique appropriée ? Par le simple renouvellement des générations ? Les économistes du climat ont longtemps expliqué que l'une des raisons qui empêchaient l'adoption de politiques climatiques vigoureuses était que les coûts en incomberaient à la génération présente tandis que les bénéfices iraient aux générations futures. Cet argument est en train de tomber, car les « générations futures » sont maintenant là. Ces différents leviers sont évidemment liés : des consommateurs mieux informés, une jeune génération concernée, des ONG actives exercent une pression sur les politiques pour durcir la politique climatique.

Arrêtons-nous à ce stade sur la question de l'information des consommateurs. Les labels sont de plus en plus utilisés pour sensibiliser les consommateurs, en particulier sur l'empreinte carbone de leur consommation. Le succès de l'application Yuka en France, qui donne des informations sur la qualité des produits alimentaires, semble montrer que l'accès à une meilleure information peut en effet changer les comportements de consommation. Mais notre alimentation a un impact direct sur notre santé alors que notre empreinte carbone concerne davantage les générations futures. En ce qui concerne les labels d'efficacité énergétique, D. Brounen et N. Kok montrent qu'aux Pays-Bas, les logements ayant reçu une « bonne note » en termes d'efficacité énergétique se vendent 10 % plus cher que les autres²⁰. S. Houde montre quant à lui qu'il existe une grande hétérogénéité dans la réponse des consommateurs aux labels d'efficacité énergétique sur les réfrigérateurs : cette information est utile pour certains consommateurs, alors que pour d'autres elle peut évincer les efforts pour traiter des informations énergétiques plus précises mais complexes²¹. La littérature sur l'évaluation de ce type de politiques reste relativement rare et n'est pas encore réellement conclusive.

20. D. Brounen et N. Kok, « On the economics of energy labels in the housing market », 2010.

21. S. Houde, « How consumers respond to product certification and the value of energy information », 2018.

L'étude de Carbone 4 ne dit pas non plus si accepter de faire des petits gestes peu contraignants est un indicateur de la capacité à accepter des changements plus fondamentaux et des mesures de politique climatique conséquentes. On peut en effet se demander dans quelle mesure nos petits gestes nous dédouanent, dans notre esprit, de faire des efforts plus conséquents. À l'aide d'enquêtes menées au Japon, S. Werfel obtient qu'un comportement vertueux des ménages en matière d'économies d'énergie, quand il est perçu comme efficace, diminue leur soutien à une augmentation de la taxe carbone²². D. Hagmann *et al.* montrent de manière expérimentale qu'une politique fondée sur des *nudges* (en l'occurrence un *nudge* à l'intention des ménages destiné à leur faire souscrire des contrats d'énergie verte) diminue le soutien de la population à des politiques de taxation car elle donne l'espoir que le problème du réchauffement climatique pourra être résolu sans trop de coûts ni d'efforts²³.

Mais la littérature sur ce point est rare, ce qui permet difficilement de trancher. On peut aussi se demander si, à l'inverse, les taxes comme la taxe carbone, qui constituent une motivation extrinsèque à diminuer les émissions de CO₂, évincent ou non la motivation intrinsèque qui nous pousse à effectuer les fameux petits gestes. T. Goeschl et G. Perino obtiennent que c'est en effet le cas. Ils montrent en outre que les normes d'émissions n'ont pas le même effet d'éviction de la motivation intrinsèque. Mais sur ce point aussi les travaux sont rares²⁴.

Les habitudes prises dans notre jeunesse semblent en tous les cas façonner nos comportements à l'âge adulte. C. Severen et A. van Benthem montrent que les individus qui ont appris à conduire pendant la crise pétrolière de 1979 utilisent moins que les autres la voiture et

22. S. Werfel, « Household behaviour crowds out support for climate change policy when sufficient progress is perceived », 2017.

23. D. Hagmann *et al.*, « Nudging out support for a carbon tax », 2019.

24. T. Goeschl et G. Perino, « Instrument choice and motivation : Evidence from a climate change experiment », 2011.

davantage les transports en commun pour leurs trajets domicile-travail dans les années 2000²⁵. Ils semblent ainsi avoir gardé les habitudes prises alors que l'essence était chère, pendant leurs premières années en tant que conducteur.

Revenons à la baisse de l'intensité énergétique du PIB. Outre les changements de comportement des ménages, cette baisse est la conséquence de changements dans les modes de production comme la généralisation du recyclage et l'économie circulaire, et du progrès technique permettant de disposer de technologies moins gourmandes en énergie (ampoules, moteurs thermiques...). Dans les pays développés, elle est aussi la conséquence des changements structurels que ces économies ont connus. Parmi ceux-ci, la désindustrialisation et l'*offshoring* des industries intensives en énergie concourent à la baisse de l'intensité énergétique. Quant au vieillissement de la population, son rôle semble ambigu : quelques études récentes²⁶ montrent que la consommation d'énergie pour le logement augmente significativement avec l'âge dans les pays développés, tandis que d'autres études soulignent que l'âge joue à la baisse pour la consommation de transports.

Le contenu en carbone de l'énergie

Un troisième facteur dans la décomposition de Kaya est le contenu en carbone de l'énergie, dont la baisse constitue l'objet de la transition énergétique. Ce contenu en carbone n'a que très légèrement diminué entre 1971 et 2015, en raison du poids très important tout au long de la période des énergies fossiles et surtout du charbon dans le mix énergétique mondial, et de la pénétration très lente des énergies décarbonées. La décarbonation de l'énergie fait l'objet de la section suivante. Mais on

25. C. Severen et A. van Benthem, « Formative experiences and the price of gasoline », 2019.

26. Pour les États-Unis, voir H. Estiri et E. Zagheni, « Age matters : Ageing and household energy demand in the United States », 2019.

peut d'ores et déjà noter que nous ne sommes qu'au tout début de la transition énergétique.

La croissance

Le dernier moteur de la croissance des émissions est enfin la croissance du PIB par tête. Sur la période 1971-2015, revenus par tête et émissions de carbone ont augmenté parallèlement au niveau mondial (voir figure 3). La question est évidemment de savoir s'il sera possible dans le futur d'obtenir une baisse des émissions tout en continuant à avoir une croissance économique positive.

Selon les estimations de l'Agence internationale de l'énergie datant d'avril 2020, l'épidémie de Covid-19 va entraîner sur l'année 2020 une baisse des émissions de CO₂ mondiales de 8 %. Cette estimation est évidemment fondée sur des hypothèses fortes sur l'étendue et la durée de l'épidémie et des mesures de confinement et de fermeture des frontières. C. Le Quéré *et al.* obtiennent des résultats dans les mêmes ordres de grandeur : les émissions mondiales de CO₂ ont diminué en moyenne de 17 % par jour début avril 2020 par rapport à avril 2019, la moitié de cette baisse environ étant due au ralentissement du transport de surface (c'est-à-dire hors aviation)²⁷. En fonction de la durée du confinement, les auteurs donnent une fourchette de baisse des émissions annuelles de – 4 à – 7%.

Une telle baisse, due fondamentalement à l'arrêt d'un grand nombre d'activités économiques jugées non essentielles, est cinq à six fois plus importante que celle que le monde a connue en 2008 à cause de la crise financière. Elle correspond à peu près à la réduction des émissions qui, si elle était maintenue chaque année au cours de la présente décennie, nous permettrait d'atteindre l'objectif ZEN. On mesure bien ici la difficulté de l'entreprise. Une marge de manœuvre reste claire : il s'agit du résidentiel,

27. C. Le Quéré *et al.*, « Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the Covid-19 forced confinement », 2020.

dont les émissions auront augmenté pendant la crise sanitaire de 5 %²⁸. Malheureusement, le risque d'un rebond des émissions qui excèderait le rebond du PIB au moment de la reprise est important. C'est ce qu'on a observé au niveau mondial après la crise financière de 2008-2009²⁹ : alors que le PIB connaissait une croissance de 5 % en 2010, les émissions croissaient encore plus, de 5,9 %.

Que peut-on en conclure ? D'abord, la chute de l'activité provoque effectivement une chute des émissions. Ensuite, à l'aune de la crise du Covid-19, on mesure clairement l'ampleur de l'effort à faire pour atteindre l'objectif ZEN. Enfin, cette crise, si violente et brutale, ne va pas permettre d'infléchir la croissance des émissions mondiales, en raison des effets rebond et du rattrapage économique. En l'absence de changements structurels, il faudrait une récession permanente et non pas temporaire pour y parvenir.

Ceci nous amène au fait que l'identité de Kaya rend évidentes deux visions du monde souvent rencontrées face au problème du réchauffement climatique : d'un côté la certitude pessimiste que la solution ne pourra venir que de la décroissance, ou pire d'un effondrement de nos économies, et de l'autre la foi optimiste dans un progrès technique salvateur. Si on en croit les partisans de l'option décroissance, il ne faut compter que sur la baisse de notre production et de notre consommation, ainsi qu'éventuellement de la population, pour réduire les émissions.

Dans le second cas, la solution vient de la baisse de l'intensité énergétique du PIB et de la décarbonation de l'énergie, c'est-à-dire principalement du progrès technique, suscitées par la politique climatique. Que peut-on penser de ces deux visions opposées ? Il semble important de faire deux remarques à ce stade.

La première est que l'option décroissance est attractive principalement pour la fraction de la population mondiale aisée qui est prête à vivre

28. *Ibid.*

29. G. Peters et al., « Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008-2009 global financial crisis », 2012.

plus simplement. Elle est inimaginable pour les pays en développement et pour une partie importante de la population des pays développés, et on peut donc douter qu'elle reçoive un réel support social. Il vaut donc mieux explorer d'autres possibilités avant de s'y résoudre.

La seconde est que la transition énergétique ne peut être gratuite. La présenter uniquement comme une opportunité pour la croissance est certainement trompeur. Il y a donc nécessairement un coût en terme de croissance économique mondiale, au moins temporaire. Nous y reviendrons en détail dans la dernière section. La meilleure solution se situe donc vraisemblablement entre ces deux extrêmes. Mécaniquement, si les énergies carbonées sont évincées, les énergies décarbonées les remplaceront. Mais ces énergies décarbonées sont moins performantes et ce basculement se fera au prix d'une perte, au moins temporaire, de croissance au sens traditionnel du terme.

Enfin, on peut s'interroger sur l'instrument de mesure que nous utilisons pour juger du succès d'une économie. Si le PIB, avec le mode de calcul que nous lui connaissons, croît moins vite ou décroît, cela ne signifie pas nécessairement que le bien-être décroît³⁰. C'est alors ce que nous entendons par croissance/décroissance qui doit être reformulé.

Le découplage

On qualifie de découplage une situation dans laquelle les émissions croissent moins vite que le PIB (on parle alors de découplage relatif) ou, mieux, dans laquelle les émissions diminuent tandis que le PIB augmente (découplage absolu). Le découplage absolu est synonyme de croissance verte. Il est clair qu'au niveau d'un pays le découplage absolu est possible, en particulier si le pays externalise les activités polluantes. Les émissions telles qu'elles sont reportées dans les inventaires nationaux, c'est-à-dire les émissions dues à la production domestique, baissent alors. En

30. Voir J. Stiglitz, A. Sen et J.-P. Fitoussi, *Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social*, 2009.

revanche, l'empreinte carbone de la consommation, c'est-à-dire les émissions associées à la production des biens consommés dans le pays quelle que soit leur origine, augmente. Au niveau du monde, il n'y a nulle part où externaliser la production polluante. Alors, le découplage absolu au niveau mondial serait-il un leurre ?

Pour C. Le Quéré *et al.* la réponse est non, ce n'est pas un leurre³¹. Les auteurs observent qu'un découplage absolu est possible non seulement pour les émissions issues de la production domestique (telles que mesurées dans les inventaires nationaux) mais aussi pour les émissions dues à la consommation (l'empreinte carbone). Les pays dans lesquels on observe un fort découplage sur la période 2005-2015 sont les pays scandinaves (Finlande, Danemark, Suède) et le Royaume-Uni. Dans ces pays, les baisses d'émissions atteignent – 3 à – 5 % en termes de production domestique, – 2 à – 3 % en termes d'empreinte carbone de la consommation. En France, le découplage est moins prononcé mais il est tout de même significatif. Les auteurs montrent, à l'aide d'une méthodologie à la Kaya, que les deux causes principales de ce découplage sont la baisse de l'intensité carbone de l'énergie (en moyenne 47 % du total) et la baisse de l'intensité énergétique du PIB (36 %).

Comment interpréter les différences entre les pays ? Il est clair qu'il est plus facile de faire croître le PIB tout en faisant décroître les émissions lorsque l'intensité carbone du PIB part d'un niveau élevé. Ainsi le découplage observé au Royaume-Uni s'explique notamment par la sortie du charbon, qui constitue l'une des options les moins chères pour décarboner. Pour la France, qui n'utilise que très peu de charbon, il est beaucoup plus coûteux de décarboner et donc d'observer en même temps une augmentation du PIB et une baisse importante des émissions. Cela signifie aussi que si un découplage est vraisemblablement possible au niveau mondial tant que l'intensité carbone du PIB est élevée, il sera plus compliqué à poursuivre une fois les options bon marché épuisées.

31. C. Le Quéré *et al.*, « Drivers of declining CO₂ emissions in 18 developed economies », 2019.

2. La décarbonation de l'énergie

LES RESSOURCES FOSSILES

Les énergies fossiles sont-elles rares ?

La rareté physique des énergies fossiles va-t-elle constituer la solution spontanée au problème du réchauffement climatique ? Ou, au contraire, avons-nous plus d'énergies fossiles à brûler que notre budget carbone ne l'autorise ? Pour répondre à cette question nous comparons maintenant le budget carbone restant avec le contenu en carbone des réserves d'énergies fossiles.

La figure 6 représente les estimations du contenu en carbone des réserves mondiales d'énergies fossiles. Rappelons que les réserves sont constituées des stocks connus, prouvés, d'énergies fossiles qui sont de plus récupérables sous les conditions technologiques et économiques actuelles. Les réserves sont endogènes puisqu'elles dépendent de conditions amenées à évoluer : technologies d'extraction de plus en plus performantes, prix des énergies fossiles et des substituts qui varient fortement au cours du temps, coûts d'extraction qui augmentent au fur et à mesure qu'on a exploité les meilleurs sites...

La figure 6 met en regard les réserves d'énergies fossiles exprimées en termes de contenu en carbone et les budgets carbone restants, pour des augmentations de température de 2 °C et 1,5 °C. La comparaison est sans appel : la rareté n'est pas le problème posé par les énergies fossiles ; nous en avons suffisamment pour provoquer des augmentations de températures proprement inimaginables si nous les extrayons et les brûlons toutes. Les réserves sont entre quatre et huit fois plus importantes que notre budget carbone restant. Les réserves de charbon en particulier sont gigantesques.

Pour donner une idée des coûts d'extraction, on peut examiner le seuil de rentabilité des différentes catégories de réserves. La figure 7 représente ces seuils de rentabilité pour le pétrole. On voit que les réserves

actuellement en exploitation ont un seuil de rentabilité moyen de 26 dollars par baril, puis que ce seuil augmente fortement quand on va chercher du pétrole situé dans l'océan profond, ou du pétrole non conventionnel.

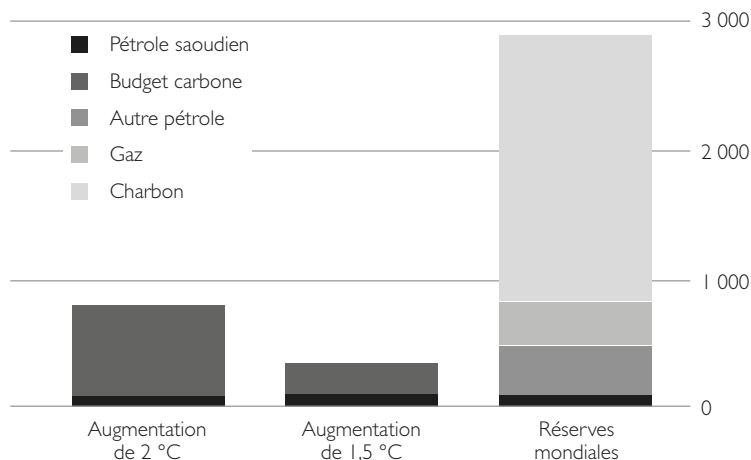
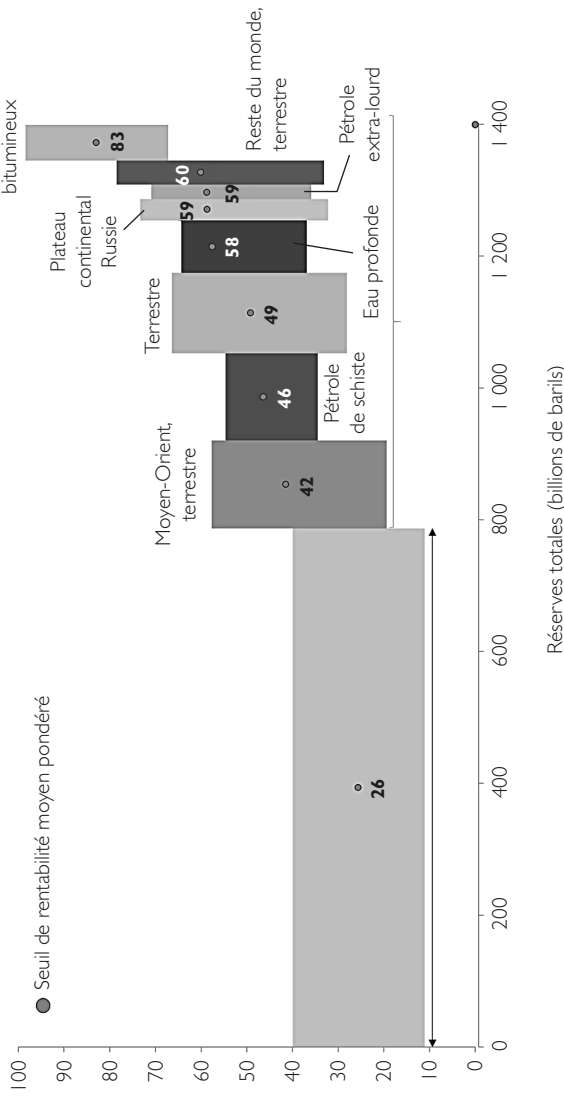


Figure 6 – Estimations des réserves et ressources d'énergies fossiles du contenu en carbone (Gt CO₂e).

Source : *Financial Times*, 2019 (d'après Rystad Energy, GIEC, IEA, World Energy Council).

G. Heal et W. Schlenker montrent que l'offre de pétrole déjà découvert, et qui pourrait être extrait à un coût inférieur à 65 dollars par baril, correspond à une quantité d'un peu moins de 1 billion de barils³². Ce chiffre est cohérent avec les données de la figure 7. Cette offre correspond à environ 400 Gt CO₂ disponibles à moins de 65 dollars par baril, c'est-à-dire autant que le budget carbone global pour atteindre l'objectif de 1,5 °C.

32. G. Heal et W. Schlenker, « Hotelling and Pigou : The incidence of a carbon tax and CO₂ emissions », 2019.



**Figure 7 – Courbe d'offre de pétrole
(seuil de rentabilité du Brent, dollars par baril).**

Note : La largeur des rectangles indique les réserves totales en 2019 pour chaque catégorie de pétrole ; la hauteur indique l'intervalle de confiance à 60 % du seuil de rentabilité de chaque catégorie. Le seuil de rentabilité est défini comme le prix réel du Brent pour lequel la valeur actualisée nette du gisement calculée avec un taux d'actualisation de 7,5 % est nulle.

Source : Rystad Energy.

Le renversement de perspective qui a eu lieu ces dernières années est intéressant à noter. Alors que la littérature économique portant sur les énergies fossiles s'est inquiétée de la rareté pendant très longtemps, et les praticiens également (avec la problématique du *peak oil*³³), ce n'est plus le cas. Nous avons trop de ressources fossiles, et non pas assez.

Les réserves imbrûlables

Puisque les ressources fossiles sont trop abondantes, certaines devront rester sous terre si on veut éviter une catastrophe climatique. On appelle « actifs échoués » (*stranded assets*) les actifs qui perdent leur valeur à cause de changements importants en matière de législation, de contraintes environnementales ou d'innovations technologiques. Les réserves fossiles destinées à rester sous terre, et tout le capital installé qui leur est complémentaire, devraient faire partie de la catégorie des *stranded assets*.

L'identification plus précise des ressources fossiles échouées potentielles et de leur répartition géographique est un sujet émergent dans la littérature. C. McGlade et P. Ekins estiment à l'aide d'un modèle d'évaluation intégré que, globalement, un tiers des réserves de pétrole, la moitié des réserves de gaz et plus de 80 % des réserves de charbon devraient rester inexploitées entre 2010 et 2050 si l'on veut respecter l'objectif d'une augmentation de température n'excédant pas 2 °C³⁴. Ils montrent par exemple que les États-Unis et les pays de l'ex-Union soviétique devraient extraire chacun moins de 10 % de leurs réserves actuelles de charbon, laissant plus de 200 Gt de charbon inexploitées. Quant au pétrole, les réserves qui devraient rester sous terre sont logiquement

33. Ce terme désigne le moment où l'extraction mondiale de pétrole aura atteint son niveau maximal avant de décliner en raison de l'épuisement des ressources. Les calculs successifs de l'Agence internationale de l'énergie la conduisent à le repousser toujours plus loin dans le futur. Ce qui ne veut pas dire, bien sûr, qu'il n'y a pas eu de *peak oil* pour une zone géographique donnée.

34. C. McGlade et P. Ekins, « The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C », 2015.

celles qui sont coûteuses à extraire et qui émettent le plus de gaz à effet de serre sur leur cycle de vie. Par exemple, le processus d'extraction d'un baril de pétrole en Arabie saoudite émet en moyenne trois fois moins de gaz à effet de serre que le processus d'extraction d'un baril moyen du Canada³⁵. Le pétrole saoudien n'est donc peut-être pas le plus menacé par les politiques climatiques, comme le notent R. Coulomb et *al.*³⁶. En tout cas, les investisseurs de la compagnie pétrolière nationale saoudienne Aramco ne semblent pas considérer le pétrole saoudien comme un actif échoué, comme en témoignent les montants records atteints lors de l'introduction de la compagnie en bourse en décembre 2019 puis janvier 2020³⁷, qui correspondent à une valorisation de 1 700 milliards de dollars en janvier 2020.

Si le charbon et une bonne partie du pétrole sont des réserves imbrûlables, que dire du gaz naturel ?

Le cas du gaz naturel

La priorité est d'éliminer le charbon, qui est l'énergie fossile de loin la plus émettrice de CO₂. Le tableau 2 reporte les coefficients d'émissions de CO₂ des énergies fossiles. Il montre que le charbon est environ deux fois plus émetteur que le gaz naturel, et bien plus émetteur que le gazole, le kérosène et le carburant utilisé dans l'aviation³⁸. Comme nous l'avons vu, les réserves mondiales de charbon sont gigantesques. Loin de diminuer, la part du charbon dans le mix énergétique mondial a augmenté depuis 1973 (voir la figure 8, p. 43), de quatre points de pourcentage.

35. M. S. Masnadi *et al.*, « Global carbon intensity of crude oil production », 2018.

36. R. Coulomb *et al.*, « The Grey Paradox : How fossil-fuel owners can benefit from carbon taxation », 2018 ; et « Climate and oil misallocation », 2020.

37. <https://www.reuters.com/article/us-saudi-aramco-stocks/saudi-aramco-raises-ipo-to-record-29-4-bill>

38. Le carburant utilisé dans l'aviation est un kérosène particulier ayant notamment un point de congélation très bas.

Tableau 2 – Coefficients d'émission de CO₂

	Coefficient d'émission (kg de CO ₂ par million de Btu)
Lignite	97,7
Charbon sub-bitumineux	97,2
Charbon bitumineux	93,3
Gazole	73,16
Kérosène	72,3
Carburant pour l'aviation	70,9
Gaz naturel	53,07

Source : Energy Information Administration (http://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.cfm)

Un nombre croissant de grands pays émetteurs de CO₂ dotés d'importants gisements de gaz de schiste envisagent de respecter leurs engagements en matière de réduction des émissions en promouvant cette ressource. Parmi eux, les États-Unis, la Russie, la Chine, le Royaume-Uni et, plus récemment, le Japon. Cependant, plusieurs aspects importants de la montée en puissance du gaz ont soulevé des questions quant à son impact sur le climat.

Le premier concerne la contribution relative nette du gaz au réchauffement de la planète, une fois prises en compte les fuites de méthane au niveau de la production. Il n'existe pas de consensus sur l'ampleur des fuites de méthane, qui semblent varier beaucoup d'un pays et d'une installation à l'autre. On peut cependant retenir qu'elles sont probablement loin d'être négligeables dans le cas du gaz de schiste, ce qui relativise son intérêt vis-à-vis du climat.

Le second aspect de la montée du gaz est celui des fuites internationales de carbone (*carbon leakage*). Ce phénomène se produit si la stratégie de remplacement de charbon par du gaz n'est pas mondiale mais plutôt le résultat d'initiatives unilatérales. Le remplacement du charbon par du gaz sur le sol d'un pays particulier réduit les émissions de CO₂ de ce pays. Mais ces réductions d'émissions peuvent être compensées par des

augmentations d'émissions ailleurs, si le charbon qui n'est plus utilisé sur le territoire national est à la place exporté vers d'autres régions du monde. Ce phénomène de fuite de carbone se produirait aussi si le charbon était remplacé par des énergies renouvelables. Cependant, le bilan environnemental est pire lorsque la substitution du charbon se fait par du gaz, et que ce remplacement conduit aussi à accroître l'extraction de gaz. En effet, le gaz, bien que moins polluant que le charbon, participe aussi au réchauffement climatique. Le bilan dépend donc de la manière dont les offres de charbon, mais aussi de gaz, réagissent à la politique climatique unilatérale³⁹.

Le troisième aspect est celui du risque d'un verrouillage (*lock-in*) technologique. Dans une telle situation, la recherche et la diffusion d'innovations favorables pour la société (ici, dans les énergies renouvelables) sont freinées par le fait que les investissements en recherche pour améliorer la technologie d'extraction et les dépenses d'exploration pour trouver de nouveaux gisements de gaz naturel ont déjà été tellement importants que changer de trajectoire technologique serait très coûteux. D. Acemoglu et al. formalisent cet argument⁴⁰. Ils soulignent que les données montrent un effondrement de la recherche en technologies de production d'électricité propres au moment du boom du gaz de schiste aux États-Unis. Les brevets concernant les énergies renouvelables constituaient 0,4 % de la totalité des brevets aux États-Unis en 2009, et seulement 0,1 % en 2015. Leur modèle à la Aghion et Howitt avec progrès technique dirigé montre qu'à court terme un boom dans le secteur du gaz naturel produit deux

39. À cause de ces phénomènes de fuites de carbone, une politique climatique unilatérale, qui conduit à remplacer du charbon par du gaz, peut même conduire à une augmentation des émissions mondiales (voir J. Daubanes et al., « More gas, less coal, and less CO₂ ? Unilateral CO₂ reduction policy with more than one carbon energy source », 2020 ; C. R. Knittel et al., « Natural gas prices and coal displacement : Evidence from electricity markets », 2020).

40. D. Acemoglu et al., « Climate change, directed innovation, and energy transition : The long-run consequences of the shale gas revolution », 2019.

effets : une baisse directe des émissions de CO₂ car le gaz se substitue au charbon, plus polluant, et une relance de l'activité économique, qui engendre indirectement une hausse des émissions. L'effet global est indéterminé. À plus long terme, le boom gazier incite les firmes à innover dans le secteur du gaz, ce qui évince la recherche en énergies propres.

Notons enfin que la technologie d'extraction du gaz de schiste, la fracturation hydraulique, est l'objet de violentes critiques. Cette technique pourrait en particulier polluer l'eau des nappes phréatiques à proximité. Les industriels du gaz de schiste soutiennent que ce type de phénomène est extrêmement peu probable, à cause des différences de profondeurs entre les nappes phréatiques et les roches contenant le gaz. Des cas de pollution des eaux souterraines ont cependant été mis en évidence, mais la plupart ont été associés à des puits défectueux⁴¹. La possibilité de pollutions de l'eau semble en tous cas bien crédible aux yeux du marché immobilier : L. Muehlenbachs *et al.* montrent que, à proximité des exploitations de gaz de schiste de Pennsylvanie, les prix des maisons dont l'eau provient directement des nappes phréatiques ont baissé de manière significative⁴². Par ailleurs, la nécessité d'utiliser d'énormes quantités d'eau pour la fracturation hydraulique, la dégradation des paysages et celle des écosystèmes et, enfin, l'augmentation possible des tremblements de terre sont autant d'arguments contre l'exploitation de gaz de schiste. Il existe donc un arbitrage entre les dommages locaux associés à l'extraction de gaz de schiste et le bénéfice éventuel global de remplacer du charbon par du gaz⁴³.

41. T. Darrah *et al.*, « Noble gases identify the mechanisms of fugitive gas contamination in drinking-water wells overlying the Marcellus and Barnett Shales », 2014.

42. L. Muehlenbachs *et al.*, « The housing market impacts of shale gas development », 2015. En revanche, les maisons raccordées au réseau d'eau municipal ont plutôt connu une augmentation de leur prix, à cause de l'augmentation de la valeur de leur terrain dont le sous-sol contient du gaz de schiste.

43. F. Henriet et K. Schubert, « Is shale gas a good bridge to renewables ? An application to Europe », 2018.

La capture et séquestration du carbone

La technologie de capture et séquestration du carbone (*carbon capture and sequestration*) consiste à récupérer le CO₂ produit par les usines utilisant des combustibles fossiles (les centrales thermiques, les cimenteries, les aciéries, etc.), pour ensuite l'injecter dans des cavités souterraines. Il existe plusieurs technologies de capture. Le CO₂ est ensuite transporté par pipeline et stocké par injection dans des cavités géologiques, par exemple des gisements d'hydrocarbures épuisés, ou dans l'océan profond. Le risque, en cas de stockage géologique, réside bien évidemment dans la possibilité de fuites à long terme. Quant au stockage dans l'océan profond, il peut entraîner une acidification des océans, non souhaitable.

La CSC permet de réduire considérablement les émissions de CO₂ (entre 80 et 90 %). Son coût est très élevé quand on la met en place sur des installations existantes. En revanche, pour les centrales thermiques ou les usines neuves directement conçues avec CSC, le surcoût est important, mais pas exorbitant. Par exemple, le tableau 3 donne les coûts de production de l'électricité pour une centrale à gaz à cycle combiné avancé neuve, sans ou avec CSC, aux États-Unis. Le surcoût entraîné par la CCS est de 25 dollars/MWh, soit une augmentation du coût d'un peu plus de 50 %.

Le GIEC a souligné depuis 2005 l'importance de la CSC dans toute politique de lutte contre le changement climatique⁴⁴. Quinze ans plus tard peu de progrès ont été accomplis. Plusieurs raisons peuvent l'expliquer. D'abord le coût de cette technologie reste élevé pour le moment. Ensuite, le stockage soulève des réticences, notamment à cause des risques liés aux fuites de CO₂ déjà évoquées. Un autre problème est la faible capacité des sites connus potentiellement appropriés pour réaliser le stockage. Enfin, il existe le risque d'un effet d'éviction :

44. IPCC, *Carbon Dioxide Capture and Storage*, 2005.

les dépenses de recherche et développement pour cette solution se feraient au détriment de budgets que l'on pourrait attribuer aux énergies renouvelables⁴⁵.

DES ÉNERGIES FOSSILES AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES

Le passage à un système énergétique décarboné nécessite d'agir dans deux directions. Il faut tout d'abord décarboner la production d'électricité, c'est-à-dire remplacer les centrales thermiques utilisant des énergies fossiles par des unités de production d'électricité à base de sources renouvelables, des centrales nucléaires, ou des centrales thermiques avec capture et séquestration du carbone. Il faut ensuite remplacer les énergies fossiles utilisées dans l'habitat et les transports par de l'électricité décarbonée.

Cependant, les obstacles à une transition rapide sont massifs. Notre économie est fondée depuis la Révolution industrielle sur la combustion des énergies fossiles. Celles-ci se sont révélées extrêmement efficaces pour produire de l'électricité, pour faire fonctionner des moteurs thermiques, pour nous chauffer. La baisse colossale des coûts de transport depuis la Révolution industrielle, permise par la disponibilité des énergies fossiles, a été l'un des facteurs majeurs de la croissance des gains de productivité, et donc de la croissance mondiale. Notre civilisation même est très profondément marquée par la disponibilité de moyens de transport rapides abordables pour les ménages, qui ont permis la mobilité et reculé les limites du monde. La voiture individuelle en est une composante essentielle. En outre, à l'heure actuelle, aucune énergie de remplacement n'est en même temps abondante, propre, sûre et raisonnablement bon marché.

45. A. Peters, « False hope : Why carbon capture and storage won't save the climate », 2012.

Cheikh Yamani, qui fut ministre saoudien du Pétrole et des Ressources minérales de 1962 à 1986 et l'un des artisans du premier choc pétrolier, aurait dit : « L'âge de pierre ne s'est pas terminé par manque de pierres. L'âge du pétrole ne s'achèvera pas avec le manque de pétrole. » La différence entre la fin de l'âge de pierre et celle de l'âge du pétrole est que nous avons besoin cette fois d'une transition extrêmement rapide, et que nous ne disposons pas d'une alternative technologique uniformément supérieure.

Au cours de ces quarante dernières années, le mix énergétique mondial a principalement évolué en faveur du gaz naturel (+ 5 points), du charbon (+ 4 points) et de l'énergie nucléaire (+ 4 points) au détriment du pétrole, tandis que la part des énergies renouvelables n'a quasiment pas bougé. Au total, le mix énergétique primaire mondial reste à 81,4 % fossile (figure 8).

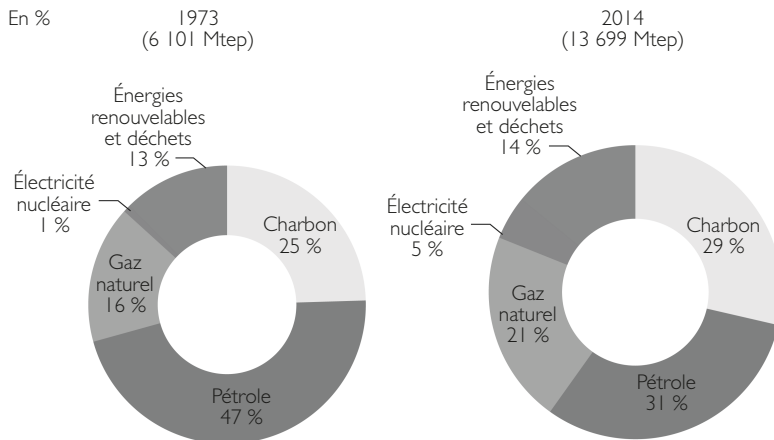


Figure 8 – Mix énergétique primaire dans le monde.

Source : CGDD, 2018 (d'après IEA, 2016).

Le nucléaire

L'énergie nucléaire ne peut pas constituer la solution générale au problème de la sortie du fossile, pour de multiples raisons. La plus importante est évidemment le risque d'un accident catastrophique. Pour limiter ce risque au maximum, il est nécessaire que les institutions en charge de la production d'énergie et la gouvernance du programme nucléaire soient irréfutables, et fondées sur une autorité de sûreté indépendante et crédible. L'autre raison majeure réside dans le problème posé par la gestion des déchets radioactifs à vie longue, qu'aucun pays n'a été capable de résoudre jusqu'à présent. Ensuite, la distance entre les technologies du nucléaire civil et du nucléaire militaire est faible. La différence entre les deux repose essentiellement sur le degré d'enrichissement de l'uranium 235. Ce problème est au cœur des confrontations actuelles à propos du programme nucléaire iranien. Enfin, les technologies du nucléaire actuelles ont besoin d'uranium, qui est un métal non ferreux, c'est-à-dire une ressource non renouvelable, rare, dont l'épuisement est susceptible de menacer la pérennité de ces technologies. Toutefois, l'Agence de l'énergie nucléaire et l'Agence internationale de l'énergie atomique, qui publient régulièrement un « livre rouge » consacré aux ressources, à la production et à la demande d'uranium, considèrent que la rareté de l'uranium ne posera pas de problème avant longtemps⁴⁶.

Sur le plan du coût, l'énergie nucléaire a longtemps été très compétitive par rapport aux énergies fossiles. Mais plusieurs facteurs viennent augmenter les coûts : la prise en compte du coût du démantèlement des centrales en fin de vie, l'augmentation des coûts associée à l'augmentation des exigences de sécurité après l'accident de Fukushima, la prise en compte du coût de gestion des déchets. Au total, le coût de la production

46. Voir Nuclear Energy Agency et International Atomic Energy Agency, *Uranium 2018 : Resources, Production and Demand*, 2018.

d'électricité nucléaire aux États-Unis par les nouvelles installations est plus élevé que le coût de production des centrales à gaz (tableau 3).

Tableau 3 – Coût de la production d'électricité aux États-Unis pour les nouvelles installations qui entreront en service en 2022 (2 017 dollars/MWh)

	Facteur de capacité	Coût moyen du capital	Coût fixe d'exploitation et maintenance	Coût variable d'E&M, y c. fuel	Coûts de transmission	Total
Charbon avec 30 % de CSC	85	84,0	9,5	35,6	1,1	130,1
Charbon avec 90 % de CSC	85	68,5	11,0	38,5	1,1	119,1
Cycle combiné (gaz naturel)	87	12,6	1,5	34,9	1,1	50,1
Cycle combiné avancé	87	14,4	1,3	32,2	1,1	49,0
Cycle combiné avancé avec CSC	87	24,9	4,4	42,5	1,1	74,9
Turbine à combustion	30	37,2	6,7	51,6	3,2	98,7
Turbine à combustion avancée	30	23,6	2,6	55,7	3,2	85,1
Nucléaire avancé	90	69,4	12,9	9,3	1,0	92,6
Géothermie	90	30,1	13,2	0,0	1,3	44,6
Biomasse	83	39,2	15,4	39,6	1,1	95,3
Éolien terrestre	41	43,1	13,4	0,0	2,5	59,1
Éolien en mer	45	115,8	19,9	0,0	2,3	138,0
Solaire photovoltaïque	29	51,2	8,7	0,0	3,3	63,2
Solaire thermique	25	128,4	32,6	0,0	4,1	165,1
Hydroélectricité	64	48,2	9,8	1,8	1,9	61,7

Notes : La Section 111(b) du Clean Air Act indique que les nouvelles centrales à charbon conventionnelles devront intégrer un dispositif de CSC, d'où les deux scénarios présentés (30 et 90 % de CSC). Les données peuvent sembler étonnantes : le coût de 30 % de CSC est plus élevé que celui de 90 % de CSC. La raison un peu elliptique donnée dans EIA (2018) est qu'il est supposé une augmentation du coût du capital des centrales à 30 % de CSC de trois points de pourcentage pour prendre en compte le risque associé à des émissions plus élevées.

Source : EIA, 2018.

Pour la France, la Cour des Comptes (2014) évalue le coût de production du nucléaire à 59,8 €/MWh, incluant le loyer économique (21,1 €/MWh), les dépenses d'exploitation (24,8 €/MWh), les investissements de maintenance (9,4 €/MWh) et les provisions pour démantèlement et gestion des déchets et du combustible (respectivement 1,3 et 3,2 €/MWh). En guise de référence, noter que les centrales à gaz ont un coût de production situé entre 70 et 100 €/MWh. Les chiffres donnés pour les coûts de démantèlement et de gestion des déchets semblent faibles et ont été fortement critiqués. Le démantèlement complet d'une centrale nucléaire n'a jamais été effectué, et le coût proposé est donc simplement une estimation. Quant au stockage géologique profond des déchets à durée de vie longue, il devrait être réalisé en France dans le Centre industriel de stockage géologique (Cigéo), implanté à Bure dans la Meuse. Les déchets y seront stockés à 500 m de profondeur dans une couche argileuse pendant une centaine d'années, au cours desquelles le stockage sera réversible, puis le centre sera fermé pour assurer le confinement des déchets sur de très longues périodes sans intervention humaine. Le coût du projet est fixé par arrêté ministériel à 25 milliards d'euros, chiffre contesté par plusieurs ONG environnementales qui l'estiment trop faible.

Depuis l'accident de Fukushima, la méfiance envers le nucléaire a très clairement augmenté, même au sein de pays comme la France qui se sont engagés dans le nucléaire depuis longtemps. En Angleterre, R. Coulomb et Y. Zylberberg montrent que l'accident de Fukushima a provoqué une baisse de prix, persistante, d'environ 3,5 % pour des propriétés proches de centrales nucléaires, reflétant le changement dans la perception du risque nucléaire⁴⁷.

47. R. Coulomb et Y. Zylberberg, « Environmental risk and the anchoring role of local production », 2019.

Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables ne peuvent pas remplacer les énergies fossiles rapidement à grande échelle dans la production d'électricité⁴⁸. Contrairement à ce qui était la vision dominante il y a encore peu de temps, ce n'est pas tant le coût de ces énergies qui constitue un obstacle sérieux que le fait qu'elles ne soient pas pilotables (*non-dispatchable*), c'est-à-dire pas disponibles à volonté, en permanence : elles sont à la fois variables et intermittentes.

Le coût des énergies renouvelables est avant tout un coût fixe d'investissement. Une fois l'investissement réalisé (les panneaux solaires ou les éoliennes installés), les coûts variables sont très faibles. Le coût d'investissement pour le solaire et l'éolien a été très fortement réduit ces dernières années, en raison du progrès technique et d'effets d'apprentissage dans la production et l'installation. La baisse va se poursuivre. Pour le solaire photovoltaïque les coûts ont été diminués de 20 % pour chaque doublement de la capacité installée⁴⁹.

Les économistes de l'énergie ont l'habitude de comparer les différents moyens de production de l'électricité à l'aide de leur coût complet (*levelized cost of electricity, LCOE*), agrégeant les coûts d'investissement et les coûts variables. Un examen des chiffres de LCOE publiés par l'Agence internationale de l'énergie au cours des dix dernières années montre la forte baisse des LCOE, pour les technologies renouvelables mais aussi pour les énergies fossiles, mais pas pour le nucléaire (en raison surtout du coût de l'augmentation de la sécurité post-Fukushima).

De même, la figure 9 montre qu'en moyenne au niveau mondial, pour les installations neuves, l'éolien terrestre et l'éolien en mer se situent dans des zones de coûts comparables aux énergies fossiles, et que dans les dix dernières années encore, la baisse du LCOE a été

48. Voir, par exemple, E. Baker *et al.*, « The economics of solar electricity », 2013.

49. IEA, *Solar Energy Perspectives*, 2011.

considérable pour le solaire photovoltaïque et le solaire à concentration (tableau 4).

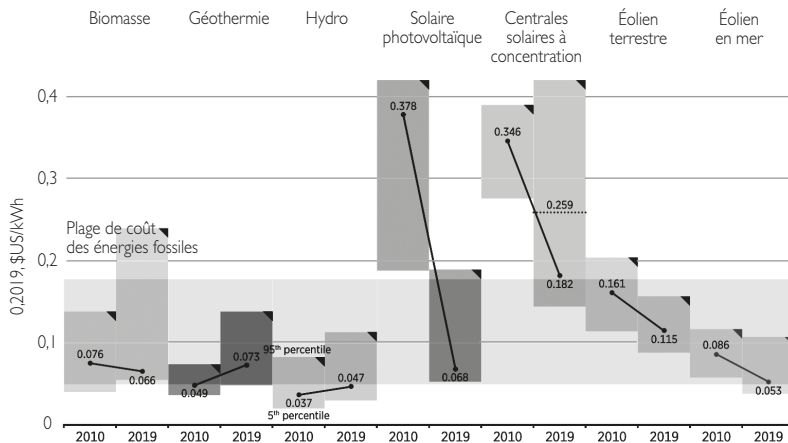


Figure 9 – LCOE des énergies renouvelables (2010 et 2019).

Source : IRENA, 2020.

Tableau 4 – Coût de la production d'électricité renouvelable en France (euros/MWh)

Éolien terrestre standard	61-91
Éolien terrestre de nouvelle génération	57-79
Centrale photovoltaïque au sol	74-135
Éolien en mer posé	145-203
Photovoltaïque commercial/industriel	114-199
Photovoltaïque résidentiel	181-326

Source : Ademe, 2016.

En dépit de son utilisation très large, le LCOE n'est pas une bonne métrique⁵⁰. Il donne une impression trompeuse, car la variabilité et l'intermittence des énergies solaire et éolienne ne sont pas prises en compte. Aux États-Unis, l'Energy Information Administration ajoute d'ailleurs depuis peu, dans ses tableaux de LCOE, le facteur de capacité⁵¹ des différentes technologies (voir la deuxième colonne du tableau 3).

Le problème sérieux posé par les énergies renouvelables est donc le fait qu'elles ne sont pas disponibles en continu et à la demande – elles ne sont pas pilotables. Selon l'Agence internationale de l'énergie⁵², les quatre caractéristiques principales spécifiques aux énergies renouvelables, qui les différencient des technologies pilotables, sont que leur production est (1) variable, c'est-à-dire qu'elle fluctue en fonction de la disponibilité de la ressource, sans lien avec les besoins du système électrique ; (2) incertaine ; (3) contrainte par la localisation géographique (certains sites sont plus adaptés que d'autres ; les sites appropriés sont souvent proches les uns des autres, et loin des centres économiques) ; (4) à coûts variables faibles.

H. W. Sinn, discutant la transition énergétique en Allemagne (*die Energiewende*), souligne qu'en 2014 la puissance éolienne installée en Allemagne était de 35,92 GW et la production moyenne d'électricité de 5,85 GW, c'est-à-dire 16,3 % de la capacité. Les chiffres correspondants pour le solaire étaient respectivement de 37,34 GW pour la capacité et 3,7 GW pour la production, soit 9,9 % de la capacité⁵³. Le besoin de

50. P. Joskow, « Comparing the costs of intermittent and dispatchable generating technologies », 2011.

51. Le facteur de capacité, ou facteur de charge, d'une installation de production d'électricité est le rapport entre l'énergie effectivement produite au cours d'une période donnée et l'énergie qui aurait été produite si l'installation avait fonctionné à sa puissance nominale au cours de la même période.

52. IEA, *World Energy Outlook*, 2014.

53. H. W. Sinn, « Buffering volatility : A study on the limits of Germany's energy revolution », 2017.

solutions pour gérer l'intermittence est clair. En l'absence de solutions, les sources intermittentes ne peuvent pas être considérées comme de bons substituts des énergies fossiles⁵⁴. À l'heure actuelle cependant les solutions ne sont pas mûres.

Parmi les voies explorées, on trouve le « backup » des sources renouvelables par des centrales thermiques à combustible fossile. C'est le choix qu'a fait l'Allemagne avec sa stratégie de double structure⁵⁵, dans laquelle les centrales thermiques sont des centrales à charbon. La méthode est à la fois coûteuse, puisqu'elle nécessite d'installer des surcapacités de production qui resteront inutilisées une partie du temps, et bien sûr polluante. Elle est réputée être seulement transitoire, en attendant qu'une meilleure solution émerge.

Une autre méthode consiste à diversifier les sources de production sur un espace géographique suffisamment vaste pour que les intermittences des diverses sources renouvelables ne soient pas corrélées, c'est-à-dire à une échelle telle qu'il y ait toujours du vent ou du soleil quelque part⁵⁶. Pour utiliser cette solution, il faut accepter de mettre en place un réseau de transmission dense pour transporter l'électricité des lieux de production aux lieux de consommation, des surcapacités probablement conséquentes et, en ce qui concerne l'Europe, des interconnexions entre pays car aucun pays européen seul n'est assez vaste. Un tel réseau de transmission occuperait une surface importante, dégraderait les paysages et poserait des problèmes d'acceptabilité de type NIMBY⁵⁷.

54. P. Joskow, « Comparing the costs of intermittent and dispatchable generating technologies », 2011 ; I. Laskano *et al.*, « From fossil fuels to renewables : The role of electricity storage », 2017.

55. Voir H. W. Sinn, « Buffering volatility : A study on the limits of Germany's energy revolution », 2017.

56. H. Heal, « Notes on the economics of energy storage », 2016.

57. *Not in my backyard*, expression utilisée pour signifier qu'on approuve le projet à condition qu'il ne soit pas réalisé près de chez soi.

Une autre solution est évidemment le stockage⁵⁸. La seule méthode de stockage disponible aujourd'hui à grande échelle est le pompage-turbinage (*hydropumped storage*). Elle consiste à remonter de l'eau d'un cours d'eau par pompage pour la stocker dans le bassin d'un barrage lorsque la production d'électricité est en excès, puis à turbiner cette eau pour produire de l'électricité lorsque la demande est forte. L'installation qui permet de le réaliser est une station de transfert d'énergie par pompage (STEP). La limite de cette méthode est la disponibilité de bassins de stockage⁵⁹. Sans entrer dans trop de détails techniques, notons que les autres méthodes de stockage sont les batteries, le stockage sous forme de chaleur ou de froid, l'hydrogène (piles à combustible) et, de façon marginale pour l'instant, les volants d'inertie et l'air comprimé. Beaucoup d'idées nouvelles émergent, comme l'utilisation pour le stockage des batteries des véhicules électriques connectées entre elles. Améliorer les technologies de stockage ou, mieux, mettre au point des innovations de rupture pour pouvoir effectuer un stockage à grande échelle est l'objet d'intenses recherches. Il faut à la fois résoudre le problème du stockage infrajournalier (entre le jour et la nuit) et celui du stockage entre saisons (été/hiver), probablement beaucoup plus difficile encore. L'Allemagne a lancé en juin 2020 un grand programme sur l'hydrogène dans le cadre du plan de relance post-Covid, avec un investissement de 9 milliards d'euros. L'idée est de produire à moyen terme un hydrogène « vert » par électrolyse de l'eau, l'électricité nécessaire au processus étant elle-même produite de façon propre, en l'occurrence par le solaire marocain. L'hydrogène ainsi produit peut être facilement transporté et stocké, ce qui permettra de résoudre le problème de l'intermittence.

58. A. Pommeret et K. Schubert, « Energy transition with variable and intermittent renewable electricity generation », 2019.

59. H. W. Sinn, « Buffering volatility : A study on the limits of Germany's energy revolution », 2017.

Enfin, il est théoriquement possible de tenter d'influencer la demande des consommateurs d'électricité pour réduire les besoins de stockage, c'est-à-dire d'ajuster la demande à l'offre intermittente (*demand side management*). On peut par exemple programmer les machines à laver pour qu'elles fonctionnent quand l'électricité est abondante, ou utiliser l'inertie thermique des réfrigérateurs pour en couper l'alimentation quelques heures quand l'électricité est rare, ou utiliser l'inertie thermique des matériaux de construction pour ne chauffer ou refroidir les bâtiments que lorsque l'offre est abondante. Pour cela, il faut que les consommateurs reçoivent une information quasiment en continu sur le prix de production de l'électricité, fonction de l'abondance de l'offre, à l'aide de compteurs intelligents (*smart meters*). Cette gestion de la demande ne peut toutefois alléger que le besoin de stockage infrajournalier, mais pas le besoin intersaisons.

Le secteur de l'électricité est au début d'un mouvement de digitalisation massive. Les réseaux intelligents (*smart grids*) vont permettre de commander les sources de production et le stockage, d'effacer du réseau certains consommateurs en fonction des pics de demande pour répondre à l'intermittence, d'augmenter les possibilités d'autoconsommation et d'échanges « peer to peer » entre des producteurs-consommateurs équipés de sources de production renouvelables décentralisées.

Notons toutefois que toutes ces technologies ont en commun d'utiliser beaucoup de métaux. Les panneaux solaires actuels utilisent du silicium et de l'argent. Le secteur de l'éolien est dépendant des terres rares chinoises. Peuvent se poser à terme à la fois des problèmes de disponibilité de ces métaux et des problèmes stratégiques.

Enfin, un dernier problème souvent soulevé est que les technologies éolienne et solaire nécessitent beaucoup plus de surface que les énergies fossiles ou le nucléaire pour produire une puissance électrique donnée. Si elles étaient déployées à grande échelle, elles pourraient venir concurrencer l'agriculture et la forêt dans l'usage des sols. Mais, là encore, des

solutions existent : on peut mettre les panneaux solaires sur les toitures des bâtiments existants, et les éoliennes en mer.

LES Puits DE CARBONE ET LES ÉMISSIONS NÉGATIVES

La grande majorité des scénarios permettant de rester sous 2 degrés de réchauffement climatique par rapport à la période préindustrielle incluent d'importantes émissions négatives ce qui, comme le soulignent K. Anderson et G. Peters, n'est réellement perçu ni par le grand public ni par les décideurs politiques, et ne fait pas l'objet de débats⁶⁰.

Les deux méthodes les plus discutées pour obtenir des émissions négatives sont la reforestation et la bioénergie combinée avec la capture et séquestration du carbone.

En ce qui concerne la première méthode, le rapport spécial 1,5 °C du GIEC⁶¹ suggère qu'une augmentation de 1 milliard d'hectares de forêt sera nécessaire pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 degré d'ici 2050. Le rapport ne donne cependant pas davantage de précisions sur la faisabilité d'une telle augmentation de la surface de forêts. J.-F. Bastin *et al.* estiment que la restauration de 0,9 milliard d'hectares de forêts, c'est-à-dire un espace de la taille des États-Unis, pourrait éliminer les deux tiers des quelque 300 Gt de carbone émises par les humains dans l'atmosphère depuis les années 1800 (précisément, 205 Gt de carbone)⁶². Ce qui ferait de la reforestation l'arme la plus efficace, et de loin, dans la lutte contre le changement climatique. Selon les auteurs, cette reforestation pourrait être faite sans empiéter sur les terres agricoles ni sur les villes. Ces résultats sont cependant controversés : certains auteurs estiment que le potentiel de séquestration du carbone par les forêts est en fait de l'ordre de 40 Gt⁶³.

60. K. Anderson et G. Peters, « The trouble with negative emissions », 2017.

61. IPCC, *Global Warming of 1.5 °C*, 2018.

62. J.-F. Bastin *et al.*, « The global tree restoration potential », 2019.

63. J. W. Veldman *et al.*, « Comment on the global tree restoration potential », 2019.

La seconde méthode consiste à combiner production d'énergie à l'aide de biomasse et capture et séquestration de carbone (*Biomass energy with carbon capture and storage, BECCS*). La biomasse absorbe du carbone au cours de sa croissance. Quand on la brûle pour produire de l'énergie, elle libère ce carbone qui est capté par la technologie de CSC. L'opération globale permet donc bien de retirer du carbone de l'atmosphère. K. Anderson et G. Peters soulignent cependant que l'ampleur de la production de biomasse qui permettrait, à travers cette technologie, d'atteindre les objectifs de l'accord de Paris est gigantesque⁶⁴. Il faudrait utiliser une surface grande comme une ou deux fois l'Inde. Comme pour la reforestation se pose donc la question du conflit d'usage des terres entre production de biomasse pour la bioénergie et production de nourriture⁶⁵.

Devant les difficultés à réduire les émissions de CO₂, la géo-ingénierie pourrait éventuellement devenir une option de dernier recours. L'idée est de modifier directement le bilan radiatif de la Terre. L'une des méthodes possibles, la plus étudiée pour l'instant, consiste à pulvériser des aérosols sulfatés dans la stratosphère. Cette technique de management du rayonnement solaire (*solar radiation management, SRM*) est inspirée par l'éruption du mont Pinatubo, en 1991, aux Philippines. Cette éruption a été accompagnée de la libération de 20 millions de tonnes de dioxyde de soufre et a provoqué une diminution du rayonnement solaire direct d'environ 30 %. La température moyenne sur terre a chuté de 0,5 degré pendant plus d'un an. Les coûts directs de cette technique sont faibles et un refroidissement global important pourrait être obtenu⁶⁶.

64. K. Anderson et G. Peters, « The trouble with negative emissions », 2017.

65. Une autre limite potentielle provient du fait que les forêts plantées pour cette technologie sont des forêts homogènes, pauvres en biodiversité, et qu'il y a un risque que de telles forêts deviennent dominantes.

66. G. Kiepper et W. Rickels, « Climate engineering : Economics prospects and considerations », 2014.

Mais ces techniques affectent également les régimes de précipitations de manières hétérogènes, avec des effets potentiellement catastrophiques dans certaines régions du monde⁶⁷. Et il existe certainement d'autres effets indésirables, qu'on ne connaît pas encore, qui pourraient être associés à ces techniques, comme des modifications de l'acidité de la pluie, des océans, des écosystèmes, des rendements agricoles. Par exemple, les rendements agricoles peuvent être affectés par la diminution de la lumière du soleil consécutive au déploiement du SRM, défavorable à la photosynthèse. J. Proctor *et al.* utilisent les données disponibles sur l'impact des éruptions d'El Chichón (Mexique, 1984) et du Pinatubo et montrent que l'effet global sur les rendements est négatif, pour le maïs, le soja, le riz et le blé⁶⁸. Une application de leur modèle de rendements à un scénario de SRM suggère alors que cette technologie aurait peu d'effets positifs d'atténuation sur les rendements agricoles. F. Prieur *et al.* émettent l'hypothèse que l'existence de ces techniques devrait en fait nous encourager à réduire davantage nos émissions de gaz à effet de serre⁶⁹, devant la menace qu'un pays particulièrement affecté par le réchauffement climatique puisse y avoir recours sans concertation et faire courir au monde un risque encore plus important que le réchauffement climatique lui-même !

67. A. Robock *et al.*, « Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections », 2008.

68. J. Proctor *et al.*, « Estimating global agricultural effects of geoengineering using volcanic eruptions », 2018.

69. F. Prieur *et al.*, « Mitigation strategies under the threat of solar radiation management », 2019.

3. La politique climatique

Comme nous l'avons vu, la transition énergétique ne peut avoir lieu spontanément. Une politique économique est nécessaire et les changements qu'il faut provoquer sont tels que cette politique doit être de grande ampleur. Il n'y a pas de consensus sur ce que doivent être les instruments de cette politique, ni entre les pays ni à l'intérieur de chaque pays. Nous tentons ici de donner quelques éclairages sur cette question complexe.

UN MIX D'INSTRUMENTS ARTICULÉS AUTOUR D'UN PRIX DU CARBONE

En l'absence de politique économique, émettre du carbone n'est pas coûteux. En conséquence, les ménages et les entreprises en émettent en quantité excessive. Au moins trois solutions existent alors pour y remédier : donner un prix au carbone, pour qu'en émettre soit coûteux (c'est ce que font les taxes carbone), interdire aux agents d'en émettre et, enfin, persuader les agents de réduire leurs émissions par divers moyens informationnels ou faisant appel à la responsabilité, à la honte, à la morale...

Les cours d'économie élémentaires enseignent ce que l'on sait depuis l'article fameux de Pigou en 1921 : la taxe carbone est efficace, elle permet de réduire les émissions de carbone à moindre coût. C'est le meilleur instrument de premier rang. Elle incite les agents à changer de comportements de consommation et de production. Elle oriente les investissements vers les secteurs verts, devenus rentables.

Dans la réalité, les choses sont plus complexes. Tout d'abord, l'économie réelle comporte bien d'autres externalités et imperfections que l'externalité climatique – sous-fourniture de technologies vertes, biais comportementaux des ménages, contraintes de crédit, externalités de réseau, etc. – et il peut donc être trompeur de raisonner dans un cadre de premier rang⁷⁰.

70. L. Goulder et I. Parry, « Instrument choice in environmental policy », 2008 ; J. Stiglitz, « Addressing climate change through price and non-price interventions », 2019.

D'autres instruments doivent alors être déployés : soutien public à l'innovation bas carbone, investissements publics verts, dans les infrastructures, les bâtiments, les réseaux, etc.

Prenons l'exemple de la décarbonation du secteur des transports. Ce secteur est responsable de 31 % des émissions de gaz à effet de serre de la France en 2018 (dont 60 % proviennent du transport de voyageurs). Ses émissions ont augmenté de 10 % entre 1990 et 2018, les émissions récentes étant quasi stables. Pour parvenir à un objectif de zéro émissions nettes en 2050 pour le transport de voyageurs, deux changements d'ampleur sont nécessaires : une diminution de la demande des ménages en matière de déplacements en voiture d'une part, et une électrification des véhicules pour satisfaire la demande résiduelle d'autre part. La taxe carbone renchérit le coût du carburant, ce qui permet d'enclencher le premier changement : les ménages voyageront moins ou achèteront des voitures moins lourdes et donc moins consommatrices de carburant, ou encore choisiront le rail, le vélo ou les transports en commun. Encore faut-il que les infrastructures ferroviaires, les lignes de transports en commun et les pistes cyclables existent. Ces équipements sont pour la plupart d'entre eux des biens publics, dont la fourniture incombe à l'État. Le deuxième changement nécessite aussi que le carbone ait un prix, pour qu'utiliser une voiture électrique coûte moins cher qu'utiliser une voiture à essence. De plus, il faut que la production d'électricité soit préalablement décarbonée, mais aussi que le réseau de points de charge des véhicules électriques soit suffisamment dense. Si ce n'est pas le cas, les consommateurs ne verront pas d'intérêt à acheter un véhicule électrique. Il y a donc ici une externalité de réseau qui justifie des subventions pour cet investissement⁷¹. La décarbonation du secteur des transports suppose donc

71. La mise en place d'une station de charge a un impact positif sur les autres stations de charge. S'il n'y a aucun point de charge préexistant, aucun acteur n'a intérêt à investir pour en mettre un en place.

réunies de nombreuses conditions, et que soient déployés plusieurs instruments, articulés autour du prix du carbone.

Un second argument, d'économie politique cette fois, justifie l'utilisation d'autres instruments : force est de constater que la taxe carbone suscite de très fortes oppositions et que très peu de pays en ont effectivement mis une en place. Concrètement, la politique climatique recourt à des normes techniques, notamment pour les véhicules et bâtiments, des subventions aux technologies propres et aux énergies renouvelables, des programmes d'efficacité énergétique, des systèmes de bonus-malus, des investissements publics verts... Il n'est pas toujours aisé d'avoir une idée claire de l'efficacité de ces instruments, et de leur coût réel en termes de tonnes de carbone évitées. L'évaluation des dispositifs, souvent très nombreux, est rarement effectuée, ni *ex ante* ni *ex post*. Mais ils sont en général nettement plus populaires que les taxes carbone, ce qui n'est pas étonnant en ce qui concerne les subventions mais l'est davantage pour les normes. Il est primordial d'en comprendre les raisons. Une littérature scientifique de plus en plus abondante étudie les attitudes à l'égard des politiques climatiques et montre que le bilan financier pour soi-même est important pour l'acceptation d'une taxe carbone, mais moins que ne le sont l'efficacité environnementale et les effets redistributifs⁷². Mais il ne faut pas penser que le seul obstacle à la mise en place d'une taxe carbone est son rejet par les ménages : partout, des lobbys puissants combattent cet instrument, lorsque leur activité est fortement dépendante des énergies fossiles (c'est le cas bien sûr des entreprises charbonnières, gazières et pétrolières, des entreprises grosses consommatrices d'énergie, de l'industrie automobile, de l'aviation et du transport maritime).

72. Voir S. Kallbekken et H. Sælen, « Public acceptance for environmental taxes : Self-interest, environmental and distributional concerns », 2011 ; S. Carattini *et al.*, « How to win public support for a global carbon tax », 2019, ainsi que, pour la France, T. Douenne et A. Fabre, « French attitudes over climate change, carbon taxation and other climate policies », 2020, sur lequel nous revenons plus loin.

Il n'est pas toujours aisé de bien calibrer les instruments alternatifs à la taxe carbone et d'éviter des effets indésirables, et en premier lieu l'effet rebond. Prenons le cas du bonus-malus automobile mis en place en France en 2008. Les voitures les moins polluantes bénéficiaient d'une réduction allant jusqu'à 1 000 euros, alors que les voitures les plus polluantes étaient taxées à hauteur de 2 600 euros. Le dispositif a permis une diminution nette des émissions par voiture : les incitations financières fonctionnent ! Néanmoins, l'impact environnemental à court terme du dispositif a été, en fait, négatif⁷³. Ce résultat décevant s'explique car la politique a contribué à augmenter les ventes totales de voitures neuves d'environ 13 %, malgré le ralentissement de l'économie observé à cette période⁷⁴. Les bonus et malus étaient calibrés de telle manière que le dispositif subventionnait *in fine* le secteur automobile dans son ensemble. On peut retenir de l'échec de ce dispositif, du point de vue de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, une leçon plus générale : les normes, les bonus-malus ou encore les subventions à certains types d'équipement sont difficiles à calibrer pour atteindre le bon objectif.

Le cas de la rénovation énergétique des bâtiments est également intéressant. Le bâtiment est responsable de 45 % de la consommation d'énergie finale et de 19 % des émissions de gaz à effet de serre de la France en 2018, et ses émissions ne baissent pas. La rénovation énergétique est très souvent présentée comme centrale pour la transition énergétique et la politique climatique. Elle est parée de nombreuses vertus, environnementales et économiques : elle permettrait de diminuer les émissions de CO₂, mais aussi de faire réaliser aux ménages des économies d'énergie et

73. Voir X. d'Haultfœuille *et al.*, « The environmental effect of green taxation : The case of the French bonus/malus », 2018.

74. À cela s'ajoute le fait que les préférences des Français pour les différents types de voiture semblent avoir changé avec la mise en place du dispositif, voir X. d'Haultfœuille *et al.*, « Le coût du bonus/malus écologique : Que pouvait-on prédire ? », 2011.

de réduire la précarité énergétique. Cependant, les travaux de rénovation énergétique sont rarement entrepris spontanément par les agents, faute de prix du carbone suffisant, et les gouvernements multiplient les plans pour inciter à la rénovation. C'est le cas en France, où il existe une multiplicité d'instruments : les prêts à taux zéro, les certificats d'économies d'énergie, les crédits d'impôt, etc. Il existe peu de travaux d'évaluation *ex post* de l'efficacité de ces plans en matière de baisse des émissions, mais le fait que celles-ci ne baissent pas n'incite pas à l'optimisme. Sur le plan économique, parmi les rares travaux existants, G. Blaise et M. Glachant évaluent pour la France l'impact des travaux de rénovation énergétique dans le secteur résidentiel sur la dépense énergétique, et obtiennent un effet très modeste⁷⁵ : 1 000 euros supplémentaires dépensés en travaux induisent une diminution moyenne de la facture énergétique annuelle de 8,29 euros. En conséquence, le bénéfice net actualisé de la rénovation d'un logement moyen est très négatif. Outre ce problème de rentabilité, les travaux de Matthieu Glachant pour la France pointent le fait que la qualité des travaux de rénovation est souvent médiocre, et qu'il faut à la fois augmenter la qualité et réaliser des rénovations profondes et non superficielles (comme changer seulement les vitres) pour gagner en efficacité. Enfin, le risque d'un effet rebond est grand : les agents peuvent souhaiter profiter de la baisse de leur facture énergétique pour augmenter leur confort thermique, ce qui annule la baisse en question.

Il serait intéressant de savoir quel est le surcoût d'une politique climatique fondée sur les normes et réglementations par rapport à une politique mettant en place un prix explicite du carbone. Les normes et réglementations étant quasi universellement mieux acceptées que les taxes, ce surcoût peut être considéré comme le prix de l'acceptabilité de la politique climatique. Notons toutefois que cette meilleure acceptabilité

75. G. Blaise et M. Glachant, « Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ? Une évaluation *ex post* sur données de panel », 2019.

est sans doute en partie expliquée par le fait que le coût de ces mesures est caché, ainsi que leur impact distributif (voir plus bas).

Si on raisonne à un niveau moins global, on peut penser que le surcoût des instruments alternatifs dépend fondamentalement du secteur dans lequel ils sont mis en place. Partant de la difficulté à instaurer une taxe carbone universelle, Jeffrey Sachs explique ainsi que les instruments de la politique climatique pourraient varier en fonction du secteur de l'économie⁷⁶. Les réglementations, investissements et normes pourraient être l'option à privilégier lorsque les alternatives technologiques sont bien connues, faciles à contrôler et bon marché. Dans ce cas, en effet, des instruments alternatifs à la taxe carbone peuvent sélectionner aussi bien que la taxe carbone elle-même les meilleures options pour réduire les émissions à moindre coût. Le surcoût associé à ces instruments alternatifs serait alors limité. En revanche, la taxe carbone est préférable lorsque les alternatives sont incertaines, leurs performances difficiles à contrôler et variables selon le contexte. Dans ces cas, une taxe carbone permet aux marchés de rechercher des solutions à faible coût et de promouvoir les innovations. Sachs en déduit que les réglementations, investissements et normes seraient la meilleure solution par exemple pour la production d'électricité, alors qu'une taxe carbone serait préférable par exemple dans le secteur de l'aviation. Notons cependant que, pour qu'une telle politique climatique soit efficace, il faut qu'*in fine* le prix du carbone, explicite ou implicite, ne soit pas trop différent selon les secteurs.

Enfin, la plupart des instruments ont des conséquences en matière distributive : la taxe carbone est régressive⁷⁷, les normes le sont aussi très

76. J. Sachs, « Getting to a carbon-free economy : The urgent is attainable, and at entirely affordable cost », 2020.

77. Plus précisément, la littérature montre que la taxe carbone est régressive dans les pays riches, mais que c'est l'inverse dans les pays pauvres dans lesquels, en revanche, elle accroît la pauvreté. Voir, pour une application aux taxes sur l'essence, T. Sterner, *Fuel Taxes and the Poor. The Distributional Effects of Gasoline Taxation and Their Implications for Climate Policy*, 2011.

fréquemment. Le constat n'est pas nouveau⁷⁸, mais les gouvernements ont parfois tendance à négliger ce point, dans leur désir d'obtenir des recettes fiscales pour financer leurs dépenses. L'expérience de la France de novembre 2018, avec le mouvement des Gilets jaunes, a cependant montré à quel point il est important de corriger ces effets distributifs injustes.

EFFETS DISTRIBUTIFS ET JUSTICE SOCIALE

Des effets distributifs indésirables

Plus les ménages sont pauvres, plus leur consommation de biens polluants (essence, chauffage) représente une part importante de leur budget. Cela signifie que la taxe carbone est régressive : la somme payée en taxes sur le carbone représente une proportion plus importante de leur revenu pour les ménages les plus pauvres.

On peut cependant compenser ces effets régressifs. Un groupe d'économistes, dont vingt-sept prix Nobel, a ainsi soutenu, pour les États-Unis, la politique suivante : une taxe carbone croissante au cours du temps dont les revenus seraient redistribués aux citoyens américains⁷⁹. Plus précisément, les recettes de la taxe carbone seraient redistribuées via un chèque identique pour chacun, qu'ils appellent le « dividende carbone ». Ainsi la majorité des familles américaines, surtout les plus vulnérables, bénéficieraient financièrement en recevant plus de « dividendes carbone » qu'elles ne paient de taxe carbone. En redistribuant de cette manière les recettes, l'incitation à changer de consommation reste identique, puisqu'il vaut toujours mieux, si on a le choix, prendre les transports en commun plutôt que la voiture individuelle, mais l'effet régressif est gommé. De très nombreux économistes européens ont signé un appel de même

78. Voir, par exemple, K. Schubert, *Pour la taxe carbone. La politique économique face à la menace climatique*, 2010.

79. <https://www.econstatement.org/>

nature, sous l'égide de l'Association européenne des économistes de l'environnement⁸⁰.

Peut-il n'y avoir que des gagnants à une telle réforme ? En théorie, oui, si on prend en compte le fait que les citoyens valorisent la diminution des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. En pratique, cependant, il faudrait être capable de cibler les transferts de manière extrêmement précise pour ne faire que des gagnants. J. Salée montre qu'étant données les différences de consommation entre les individus, il est impossible de mettre en place un tel système, qui ciblerait les transferts de manière suffisamment précise pour compenser tous les perdants, sans toucher au caractère incitatif de la taxe carbone⁸¹. On peut en revanche essayer de cibler les transferts de manière à minimiser le nombre de perdants parmi les plus vulnérables, sans toucher au caractère incitatif de la taxe carbone, comme on le montre ci-dessous dans le cas de la France.

Le caractère régressif est-il l'apanage de la taxe carbone ? Il est clair que non. Plusieurs études documentent le fait que les normes et réglementations sont tout aussi régressives que les taxes et que les subventions profitent principalement aux riches : S. Borenstein et L. Davis montrent que les crédits d'impôt pour des investissements verts sont le plus souvent captés par les plus riches⁸², A. Levinson et L. Davis et C. Knittel montrent que les normes sur la consommation de carburant des véhicules neufs⁸³, si elles ont bien permis une réduction des émissions, ont aussi conduit à un renchérissement du coût d'acquisition des véhicules des ménages les plus modestes. Enfin C. Bruegge *et al.* ont montré que

80. <https://www.eaere.org/statement/>

81. K. Salée, « Pigou creates losers : On the implausibility of achieving pareto improvements from efficiency-enhancing policies », 2019.

82. S. Borenstein et L. Davis, « The distributional effects of US clean energy tax credit », 2016.

83. A. Levinson, « Energy efficiency standards are more regressive than energy taxes : Theory and evidence », 2019 ; L. Davis et C. Knittel, « Are fuel economy standards regressive ? », 2019.

les réglementations de performance énergétique dans la construction des bâtiments en Californie ont conduit les ménages les plus pauvres à habiter dans des logements plus petits⁸⁴.

L'exemple de la taxe carbone française

Les émissions provenant de sources diffuses, que ce soit de la part des ménages ou des entreprises, représentent aujourd'hui les trois quarts des émissions françaises et sont stables depuis 1990. Les instruments de la politique économique mis en place – normes, subventions, bonus-malus etc. – n'ont pas permis d'atteindre les objectifs qui avaient été assignés au transport et à la rénovation des bâtiments. En conséquence, après plusieurs tentatives avortées, la France a mis en place en 2014 une taxe carbone appelée Contribution Climat Énergie (CCE). La CCE est une accise appliquée au contenu en CO₂ des énergies. Elle a été introduite à un taux très faible, et un engagement de la part du gouvernement d'augmenter régulièrement ce taux au cours du temps. Elle a atteint fin 2018 un niveau de 44,60 euros/tCO₂, relativement élevé, en comparaison du prix du quota d'émissions sur le marché européen et des taxes carbone existant dans les autres pays, mais cependant encore trop faible pour déclencher des changements de comportements d'ampleur suffisante⁸⁵. Le passage à 55 euros et la poursuite de l'alignement de la taxation du gazole sur celle du super ont été gelés par le gouvernement en novembre 2018 suite aux manifestations des Gilets jaunes. Ces manifestations ont mis en lumière la nécessité de porter une attention particulière aux conséquences distributives de la tarification du carbone.

D. Bureau *et al.* analysent les impacts sur le pouvoir d'achat des différentes catégories de ménages d'une augmentation de la CCE

84. C. Bruegge, « The distributional effects of building energy codes », 2018.

85. Voir le premier rapport du Haut Conseil pour le climat, qui quantifie les écarts entre les émissions sectorielles françaises et les objectifs de la stratégie nationale bas carbone (« Agir en cohérence avec les ambitions », 2019).

de son niveau actuel au niveau qu'il était prévu d'atteindre en 2022 (86,20 euros/tCO₂), accompagnée du rattrapage de la fiscalité sur le diesel de 7,8 c euros/litre correspondant à la somme des augmentations initialement prévues pour janvier 2019, 2020 et 2021⁸⁶. Cette réforme est d'abord considérée sans aucun mécanisme de redistribution des recettes.

La figure 10 illustre le poids de la réforme dans le revenu disponible des ménages (le taux d'effort qui leur est demandé). On observe que plus les ménages sont pauvres, plus leur taux d'effort est important : la réforme est régressive.

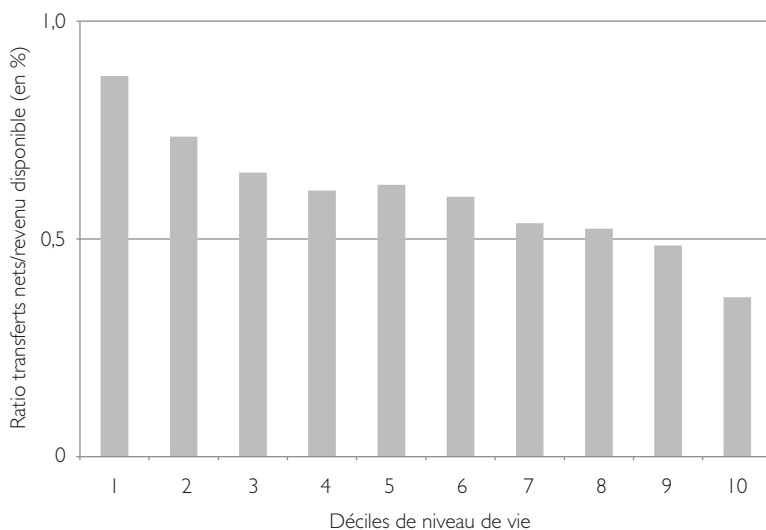


Figure 10 – Taux d'effort des ménages associé à la réforme avant utilisation des recettes (en pourcentage).

86. D. Bureau et al., « Pour le climat : une taxe juste, pas juste une taxe », 2019.

Les simulations montrent aussi qu'à l'intérieur même de chaque décile de revenu, l'hétérogénéité des impacts de la taxe sur le pouvoir d'achat est importante. Par exemple, parmi les ménages du premier décile, 10 % des ménages perdent plus de 220 euros de pouvoir d'achat par an et par unité de consommation⁸⁷ avec la mise en place de la réforme, alors qu'environ 10 % des ménages ne sont pas du tout affectés par la réforme. À quoi est liée cette hétérogénéité des impacts à revenu donné ? Une première réponse est la localisation des ménages. À revenu donné, la perte relative des ménages ruraux par rapport aux ménages de l'agglomération parisienne est significative, de l'ordre de 130 euros par unité de consommation en moyenne, ce qui correspond à environ 200 euros par ménage. Cela provient essentiellement de différences d'équipements entre ménages ruraux et urbains puisque toutes choses égales par ailleurs, un ménage roulant au diesel perd 230 euros par unité de consommation de plus qu'un ménage sans voiture, tandis qu'un ménage se chauffant au fioul domestique perd 157 euros de plus par unité de consommation qu'un ménage se chauffant à l'électricité.

La taxe carbone affecte donc très différemment les ménages en fonction de leurs équipements, qui varient notamment avec leur localisation.

D. Bureau *et al.* étudient alors plusieurs scénarios de redistribution des recettes d'une telle taxe⁸⁸. À titre d'illustration, nous présentons ici l'un de ces scénarios, calibré de sorte que le moins de ménages possible ne perdent à l'introduction de la taxe dans les six premiers déciles. On considère une redistribution de la totalité des revenus de la taxe en fonction du revenu : 310 euros aux trois premiers déciles, 300 au 4^e, 255 au 5^e, 240 au 6^e, 150 au 7^e, 60 au 8^e. De plus, une différenciation géographique

87. Un ménage composé d'une personne seule a une unité de consommation. Pour toute personne supplémentaire de 14 ans ou plus, on ajoute 0,5 uc, et pour toute personne supplémentaire de moins de 14 ans, on ajoute 0,3 uc. Le nombre d'uc moyen pour un ménage français en 2011 est de 1,59.

88. D. Bureau *et al.*, *ibid.*

des transferts dégressive avec le revenu est introduite, les habitants des zones rurales recevant un transfert plus important que les habitants des grandes villes. La distribution du bilan financier pour les ménages d'une telle réforme est illustrée sur la figure 11.

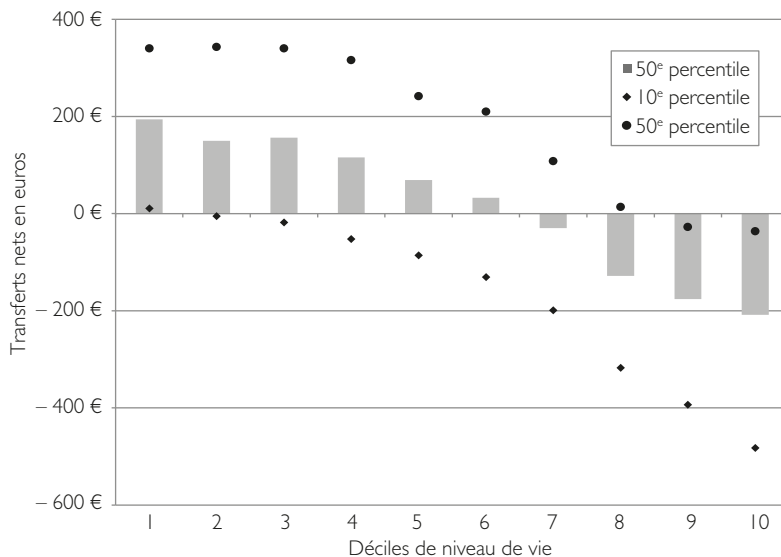


Figure 11 – Distribution des transferts nets par décile de niveau de vie (en euros).

Cet exercice montre que grâce à la redistribution des recettes de la taxe carbone, il est possible de faire en sorte que la mise en place d'une telle taxe ne pèse pas du tout sur le budget de plus de 90 % des ménages des trois premiers déciles (les 30 % des ménages les plus pauvres), et qu'en moyenne elle ne pèse pas sur le budget des ménages des six premiers déciles. En redistribuant les recettes en fonction du revenu des ménages, l'incitation à changer de comportement reste identique puisqu'il vaut

toujours mieux, si on a le choix, prendre les transports en commun plutôt que la voiture individuelle, mais le pouvoir d'achat global des ménages les plus pauvres n'est pas négativement affecté. Il est en revanche très difficile de gommer l'hétérogénéité des impacts à revenu donné. Une différenciation des transferts par critères géographiques est une première approche pour corriger cette hétérogénéité « horizontale ». Elle se révèle cependant très imparfaite : on voit en effet sur la figure 11 qu'il subsiste une importante hétérogénéité des transferts nets à revenu donné. Il n'en reste pas moins que la redistribution des recettes aux ménages, couplée à la fin des exemptions pour les 15 % environ des émissions liées à l'utilisation de l'énergie qui sont exonérés⁸⁹, permettraient à une politique climatique fondée sur la fiscalité du carbone d'être plus juste.

Cependant, T. Douenne et A. Fabre mettent en évidence le rejet de la taxe carbone par les Français, même quand elle est accompagnée d'une politique de redistribution des recettes. À l'aide d'une enquête menée sur un échantillon représentatif de 3 002 personnes juste après le mouvement des Gilets jaunes, ils montrent que les Français sont en général préoccupés par le changement climatique et prêts à faire des efforts pour le combattre⁹⁰. Ils étudient alors dans quelle mesure une politique de taxe et dividende consistant en une augmentation de 50 euros/tCO₂ de la taxe carbone française actuelle accompagnée d'une redistribution forfaitaire uniforme des recettes supplémentaires à tous les adultes serait acceptée. Ils fournissent diverses informations aux répondants pour rendre saillants les coûts associés, par exemple ce que représenterait la mesure en termes de hausse des prix des carburants, et quel serait le montant

89. Les émissions de carbone liées à l'énergie représentent 322 MtCO₂eq en 2016, soit 70 % des émissions de GES de la France, dont 54 % de ses émissions sont soumises à la composante carbone, 31 % au marché européen de quotas et 15 % font l'objet d'exonérations.

90. T. Douenne et A. Fabre, « French attitudes over climate change, carbon taxation and other climate policies », 2020.

annuel du dividende perçu. Ils obtiennent que 70 % des Français rejettent la politique proposée, alors que seulement 10 % l'approuveraient. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce rejet : la proximité temporelle du mouvement des Gilets jaunes⁹¹, une perception erronée de l'effet de la politique sur son propre pouvoir d'achat, le manque d'alternatives perçues, la mise en doute de l'efficacité environnementale de la politique, un manque de confiance dans le gouvernement en général, et le fait que le dividende sera bien versé en particulier. En revanche, les Français sont majoritairement en faveur de normes environnementales plus strictes, d'une taxe sur le kérosène et d'investissements verts.

Les assemblées citoyennes

La France et l'Angleterre ont confié à des assemblées de citoyens tirés au sort la mission de trouver les moyens pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ces assemblées citoyennes, inspirées de l'exemple irlandais, ont pour objectif de construire un consensus démocratique autour de la politique climatique.

En France, le gouvernement a mis en place la Convention citoyenne pour le climat en octobre 2019. C'est une assemblée composée de cent cinquante citoyens tirés au sort. Elle a pour mandat de définir une série de mesures permettant d'atteindre une baisse d'au moins 40 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 (par rapport à 1990), dans un esprit de justice sociale. Pour y parvenir, les citoyens de la Convention se sont réunis, ont écouté des experts et ont débattu à l'occasion de sept sessions de trois jours.

Il est intéressant de regarder à quel type de mesures ont abouti les cent cinquante citoyens. D'abord, la taxe carbone, comme on pouvait s'y attendre, n'a pas été retenue. L'impression est même que les citoyens ont

91. Une enquête de l'Ademe de juillet 2018 montre que 48 % des Français estiment souhaitable d'augmenter la taxe carbone, ce qui correspond aux chiffres obtenus dans d'autres pays.

opté d'emblée pour une position de type tout sauf la taxe carbone. Ils proposent un moratoire pendant cinq ans, « le temps que les ménages soient informés de l'urgence climatique et aient les moyens de changer leurs habitudes ». On trouve cependant des mesures qui s'apparentent à des incitations par les prix, comme le ferait une taxe carbone. Les citoyens recommandent ainsi de réduire les incitations à l'utilisation de la voiture en réformant le système d'indemnité kilométrique de l'impôt sur le revenu, de réduire la TVA sur les billets de train de 10 % à 5,5 %, de sortir progressivement des avantages fiscaux sur le gazole, de favoriser le transport de marchandises sur des circuits courts par une modulation de la TVA, d'augmenter le bonus pour les véhicules peu polluants, de renforcer très fortement le malus sur les véhicules polluants, de moduler les taxes sur les contrats d'assurance en fonction de l'émission de CO₂ pour encourager les véhicules propres ou encore de mettre en place un ajustement carbone aux frontières de l'Union européenne. Certaines propositions reposent, en revanche, sur des interdictions, comme interdire les centres-villes pour les véhicules les plus émetteurs de gaz à effet de serre, interdire, dès 2025, la commercialisation de véhicules neufs très émetteurs, contraindre les propriétaires occupants et bailleurs à rénover de manière globale, obliger le changement des chaudières au fioul et à charbon d'ici à 2030 dans les bâtiments neufs et rénovés ou prendre immédiatement des mesures coercitives pour stopper les aménagements de zones commerciales périurbaines. Les propositions comprennent enfin beaucoup d'investissements verts publics comme développer un plan d'investissement massif pour moderniser les infrastructures, les matériels roulants et les gares ou investir massivement dans la rénovation énergétique en triplant le rythme de rénovation. Pour financer ces dépenses, les membres de la Convention proposent de taxer les entreprises qui distribuent plus de 10 millions d'euros de dividendes annuels, à hauteur de 4 % des dividendes versés, ou encore renforcer l'écocontribution kilométrique pour les avions. D'après le think tank I4CE, il resterait alors

6 milliards d'euros par an à financer, soit seulement 0,24 % du PIB. Il est difficile de savoir si les mesures proposées aboutissent bien à une baisse de 40 % des émissions, mais on peut constater la préférence des citoyens pour les normes, réglementations, interdictions et investissements publics. À cet égard, la Convention reflète assez bien les préférences des Français révélées par différents sondages⁹².

En Angleterre, la Climate Assembly (CAUK), composée de cent huit citoyens tirés au sort, a fait, en septembre 2020, cinquante recommandations sur la façon d'atteindre l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050. Les propositions ressemblent à celles des Français, et il n'est pas fait mention de taxe, sauf sur les passagers qui prennent fréquemment l'avion.

Pourquoi les interdictions sont-elles préférées aux taxes ? On peut trouver plusieurs raisons. L'impression que les interdictions sont plus efficaces est une raison évidente. Le manque de confiance dans la redistribution des recettes des taxes en est une autre. Mais il existe aussi des raisons plus profondes comme l'externalité morale qui serait associée aux taxes : le fait que seuls les plus riches, qui peuvent se permettre de payer la taxe, continuent à détériorer la planète en échange d'argent, quand bien même cette situation serait profitable pour toutes les parties prenantes considérées individuellement via la redistribution des recettes, imposerait une externalité morale à l'ensemble de la société, il s'agirait d'un « marché répugnant » dans la terminologie d'Alvin Roth (2007), prix Nobel d'économie en 2012, qui définit les « transactions répugnantes » comme les transactions auxquelles certaines personnes ne veulent pas que d'autres s'engagent.

LE SECTEUR FINANCIER FACE À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

L'accord de Paris de décembre 2015 a déclaré que les flux de financement devaient être orientés en fonction de l'objectif climatique. En théorie,

92. *Le Figaro* du 25 juin, sondage de l'équipe PSE.

comme nous l'avons déjà dit, les flux de financement nécessaires à la transition énergétique pourraient être orientés par des politiques climatiques classiques donnant un prix au carbone, à condition qu'elles soient suffisamment crédibles à long terme pour être correctement anticipées par les marchés financiers. Cependant, en l'absence de politiques climatiques suffisamment contraignantes et crédibles, qui rendraient plus rentables les investissements verts et moins rentables les investissements carbonés, de nombreuses voix plaident pour un verdissement des marchés financiers. Ne s'agirait-il pas de faire faire à la « finance » le travail que la politique publique n'arrive pas à faire ? Sans doute un peu, mais pas seulement.

De nouveaux risques pour la stabilité financière

Pour Mark Carney, gouverneur de la Banque d'Angleterre entre 2013 et 2020 et ancien président du Conseil de stabilité financière, le verdissement des marchés financiers permet de se prémunir contre les risques liés au réchauffement climatique et à la transition énergétique. Dans un discours déterminant en 2015, il distingue trois catégories de risques pour la stabilité financière liés au changement climatique :

- le risque physique, conséquence des événements climatiques sur la valeur des actifs financiers (inondations et tempêtes par exemple, qui provoquent des dégâts matériels ou perturbent les chaînes d'approvisionnement) ;
- le risque de transition, qui regroupe les risques financiers causés par le processus d'ajustement vers une économie décarbonée. Une transition énergétique rapide et non anticipée conduirait à une forte dévalorisation des entreprises dont l'activité est très dépendante des énergies fossiles, qui pourrait ensuite affecter la stabilité financière ;
- le risque juridique, qui pourrait survenir si les individus ou entreprises qui ont subi des dommages liés au changement climatique demandaient une indemnisation aux responsables des émissions de gaz à effet de

serre. De telles procédures pourraient affecter les gros émetteurs de carbone et leurs assureurs.

Il y aurait donc de nouveaux risques quelle que soit la stratégie de politique climatique adoptée : le risque de ne rien faire (le risque physique et le risque juridique) et le risque de faire (le risque de transition). Que dire de la comparaison entre ces risques ? On sait, au moins depuis le rapport Stern (2006), que ce sont plutôt les risques physiques, impacts directs du changement climatique, qu'il faut redouter. Le coût de l'inaction est bien supérieur au coût de la lutte contre le changement climatique, même mal anticipée. Mais l'horizon de réalisation des risques physiques dépasse le temps habituel des acteurs économiques et financiers. C'est donc davantage le risque de transition (si on conserve la terminologie de Mark Carney), moins lointain, qui semble commencer à agiter le monde financier⁹³. Revenons donc plus précisément sur ce dernier.

Le risque de transition est causé par les actifs polluants échoués, qui seraient surévalués aujourd'hui et qui risqueraient de perdre leur valeur soudainement à cause de la transition énergétique. Une rupture technologique, une régulation soudaine ou un changement brutal des préférences des épargnants pourraient être à l'origine d'un tel phénomène. Plusieurs banques et fonds d'investissement ont par exemple été la cible de campagnes organisées par des défenseurs de l'environnement, à cause de leur rôle dans le financement de la production d'électricité à partir de charbon ou du développement des sables bitumineux. Ces campagnes visent à encourager les clients, les employés et les investisseurs à faire pression sur les institutions financières pour qu'elles arrêtent de financer ou d'investir dans les activités polluantes. Le fonds souverain norvégien et le Rockefeller Brothers Fund ont ainsi choisi de se débarrasser de leurs actifs liés aux combustibles fossiles. Un tel mouvement de

93. P. Krueger *et al.*, « The importance of climate risks for institutional investors », 2020.

désinvestissement s'il était massif, soudain et durable, conduirait à une baisse soudaine de la valeur de ces actifs.

Lorsque les prix des actifs se situent bien au-delà de leur valeur intrinsèque, comme dans le cas de la bulle américaine des subprimes de 2007 par exemple, le risque d'une chute brutale de ces prix est dangereux pour la stabilité financière. Les prix des actifs carbonés sont-ils trop élevés par rapport à leur valeur intrinsèque ? En d'autres termes, existe-t-il une bulle carbone ? Les résultats empiriques sur la prise en compte du risque de dévalorisation des actifs carbonés pas les investisseurs sont contrastés. Le rapport du Network for Greening Financial System (NGFS)⁹⁴, réseau qui réunit des banques centrales et autorités de surveillance, considère « qu'il existe un risque élevé que les risques financiers liés au climat ne soient pas pleinement reflétés dans la valorisation des actifs ». Selon l'International Energy Agency⁹⁵, les investissements privés (et publics) actuels ne sont pas compatibles avec la transition énergétique. Ainsi, les investissements dans l'offre de charbon ont augmenté de 2 % en 2018 et les dépenses actuelles ont largement dépassé les niveaux requis dans les scénarios compatibles avec l'accord de Paris⁹⁶. De même, les entreprises de combustibles fossiles continuent d'engager d'importantes dépenses d'exploration pour trouver de nouveaux gisements. À titre d'exemple, l'ONG Carbon Tracker estime que les principales sociétés pétrolières et gazières cotées au monde, ExxonMobil, Chevron, Shell, BP, Total, Eni et ConocoPhillips, ainsi qu'Equinor, ont chacune dépensé au moins 30 % de leur investissement en 2018 sur des projets qui sont incompatibles avec un réchauffement de 1,5 degré. De tels investissements risquent pourtant

94. NGFS, *Un appel à l'action, Le changement climatique comme source de risque financier*, 2019.

95. IEA, *World Energy Outlook*, 2019.

96. L'accord de Paris a été signé, ou un engagement à signer a été pris, en 2017 par 195 pays sur les 197 que reconnaît l'ONU. Il prévoit de contenir d'ici à 2100 le réchauffement climatique « bien en dessous de 2 degrés par rapport aux niveaux préindustriels ».

de créer des actifs échoués. Toujours d'après Carbon Tracker, Exxon-Mobil présente le plus grand risque d'actifs échoués dans un monde à faibles émissions de carbone, avec plus de 90 % de ses investissements potentiels entre 2019 et 2030 dans des projets incompatibles avec un réchauffement inférieur à 1,5 degré. Viendraient ensuite Shell (70 %), Total (67 %), Chevron (60 %), BP (57 %) et Eni (55 %).

Ceci signifie-t-il que ces entreprises et les investisseurs ne considèrent pas comme suffisamment crédible la perspective d'une politique climatique contraignante ? Les choses sont probablement plus complexes puisque l'on observe que, dans le même temps, les entreprises de combustibles fossiles effectuent des dépenses très importantes dans les énergies renouvelables. Certaines études semblent aussi indiquer que le risque de transition est pris en compte, au moins partiellement et depuis l'accord de Paris, par les investisseurs et les banques. Par exemple, depuis 2015, on observe une augmentation de l'écart de taux d'intérêt entre les prêts accordés aux entreprises de combustibles fossiles et les prêts aux autres entreprises⁹⁷. Cet écart signifie que les prêts consentis aux entreprises de combustibles fossiles sont considérés comme plus risqués par les banques. De même, les résultats d'E. Ilhan *et al.* suggèrent que les investisseurs intègrent déjà des informations sur les risques liés au climat dans leur évaluation des profils de risque des entreprises polluantes présentes dans l'indice S&P 500⁹⁸. En résumé, si un risque de dévalorisation des actifs carbonés semble pris en compte par les marchés, leur valeur est loin de refléter celle qu'ils auraient si la transition énergétique vers un monde à zéro émission était certaine.

Que le risque de transition inquiète les garants de la stabilité financière est a priori une bonne nouvelle puisque cela signifie qu'ils anticipent

97. M. Delis *et al.*, « Being stranded on the carbon bubble ? Climate policy risk and the pricing of Bank Loans », 2018.

98. E. Ilhan *et al.*, « Carbon tail risk », 2019.

une transition plus ambitieuse que ce qu'anticipent les marchés. On peut imaginer au moins deux raisons pour cela : ils pensent détecter des informations que le marché n'a pas encore perçues, ou ils parient sur l'effet autoréalisateur de leur inquiétude. Si la mise en avant du risque de transition par les banquiers centraux conduit les participants de marché à anticiper que les actifs carbonés vont devenir obsolètes, alors ces derniers préféreront plutôt investir dans des actifs verts. À cause des effets d'apprentissage, un investissement massif peut conduire à améliorer les technologies vertes, rendant ainsi effectivement obsolètes les actifs carbonés. La prise en compte du risque de transition par les régulateurs serait alors autoréalisatrice : le risque de transition se réaliserait précisément parce qu'il était perçu par le régulateur.

L'information climatique

Une condition nécessaire au verdissement du système financier est l'accès à une meilleure information climatique.

Les tests de résistance climatique, menés par les autorités de régulation, se multiplient dans cette perspective. Pour estimer l'impact du risque de transition sur la stabilité financière, ces tests reposent en général sur l'analyse de scénarios de transition énergétique incluant la mise en place soudaine de politiques gouvernementales de transition et/ou une rupture technologique. La De Nederlandsche Bank (DNB) a ainsi publié, en 2018, un premier exercice de stress-test climatique dont elle conclut que « les pertes subies par les institutions financières en cas de transition énergétique perturbatrice pourraient être considérables, mais également gérables⁹⁹ ». Plus précisément, les résultats du test indiquent des pertes pouvant aller jusqu'à 11 % des actifs pour les assureurs et jusqu'à 3 % pour les banques. La Banque d'Angleterre, la Banque de

99. https://www.dnb.nl/binaries/OS_Transition\%20risk\%20stress\%20test\%20versie_web_tcm46-379397.pdf

France et les institutions financières européennes¹⁰⁰ se sont également lancées dans des exercices similaires. Que faire de ces scénarios qui reposent sur des hypothèses très particulières ? Ces exercices n'ont pour l'instant que des objectifs de sensibilisation aux risques climatiques et de mesures des vulnérabilités, en plus de leur intérêt méthodologique. Ils n'ont aucune implication contraignante, en terme de régulation, pour les institutions financières. En particulier, ces exercices ne portent pas sur la solvabilité des institutions. Ils participent à un mouvement plus global de transparence de l'information climatique. Différentes institutions, dont la Commission européenne, travaillent à rendre plus transparente l'information climatique.

Parallèlement, on assiste au moins depuis 2015 à un essor de la finance « durable » qui regroupe les obligations vertes mais aussi toutes les pratiques d'investissement prenant en compte des critères extra-financiers tels que l'environnement. Les obligations vertes permettent de prêter de l'argent à des projets dont on attend un bénéfice environnemental, elles sont donc un levier du financement des projets de transition énergétique. L'encours mondial d'obligations vertes fin 2018 était de 464 milliards de dollars, soit 0,4 % de l'encours mondial d'obligations¹⁰¹. Ces obligations représentent donc pour l'instant une niche, mais une niche en forte croissance. Concrètement, quel type d'obligation peut être qualifié d'obligation verte ? Pour qu'une obligation soit qualifiée de verte, l'émetteur de l'obligation peut demander une validation à différents acteurs : une organisation internationale comme la Climate Bonds Initiative (CBI), ou les pouvoirs publics, ou encore des agences de notation. Ces acteurs se réfèrent en général aux grands

100. L'Autorité bancaire européenne, le Comité européen du risque systémique et l'Autorité européenne des assurances et des pensions professionnelles.

101. Bui Quang et al., « En plein essor, le marché des obligations vertes nécessite d'être mieux mesuré », 2019 ; https://publications.banque-france.fr/sites/default/files/medias/documents/bulletin-de-la-banque-de-france_226-6_obligations_vertes_vf.pdf

principes établis en 2014 par l'ICMA (International Capital Market Association) : les Green Bond Principles (GBP). La Climate Bonds Initiative constitue aujourd'hui la référence mondiale de validation des projets verts. Elle distingue les obligations « labellisées » qui financent des projets 100 % verts et les obligations « alignées », pour des projets un peu moins verts.

Le premier problème de ces obligations vertes est que le caractère vert ou aligné des projets peut être discutable et est pour le moment sans fondement juridique. En l'absence de définition juridique précise, on peut facilement suspecter l'émetteur de *greenwashing*. Pour résoudre cette difficulté, les institutions européennes ont entamé des discussions sur un système de classification (une taxonomie) des activités économiques durables. Une méthode alternative consisterait à fixer une valeur au carbone, à utiliser cette valeur pour monétariser les émissions associées aux différents projets, et finalement à ajouter ce coût monétaire du carbone aux autres coûts du projet. Le deuxième problème des obligations vertes est plus fondamental : les projets verts financés grâce aux obligations vertes n'auraient-ils pas été financés de toutes façons ? C'est ce que l'on nomme le problème de l'additionnalité, toujours délicat à évaluer.

Malgré ces problèmes, l'essor des obligations vertes et les efforts engagés pour diffuser et rendre plus transparents les risques financiers associés au changement climatique, sont des premiers signes de la prise de conscience des acteurs financiers. Mais dans le même temps, l'analyse sectorielle des achats d'obligations dans le cadre du programme d'assouplissement quantitatif (*Quantitative Easing*) de la Banque centrale européenne (BCE) suggère un biais vers les secteurs à forte intensité de carbone¹⁰² malgré le principe de neutralité du QE. La raison est la suivante : pour être éligible au programme de rachat d'actifs de la BCE,

102. S. Matikainen et al., « The climate impact of quantitative easing, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment », 2017.

une obligation doit répondre à des critères spécifiques ; elle doit être libellée en euros, éligible comme collatéral aux opérations de crédit de l'Eurosystème, notée dans la catégorie investissement par au moins une agence de notation et avoir une maturité comprise entre six mois et trente ans. L'univers des obligations éligibles ne reflète pas l'ensemble du marché obligataire, qui ne reflète pas l'économie réelle (qui ne reflète évidemment pas l'optimum social).

Comment alors réorienter l'investissement pour le rendre compatible avec un futur à zéro émissions nettes ?

Les politiques monétaire et prudentielle

De nombreuses voix plaident pour intégrer le climat dans les politiques monétaire et macroprudentielle.

L'objectif de la politique prudentielle est de limiter le risque systémique, c'est-à-dire un risque qui pourrait se propager à l'ensemble du système financier avec des conséquences macroéconomiques. Un des outils de la politique macroprudentielle est l'exigence de fonds propres. Les régulateurs exigent des investisseurs financiers une certaine quantité de fonds propres pour qu'ils soient plus aptes à absorber d'éventuelles pertes sur des prêts ou des investissements. Le montant des fonds propres requis dépend du risque lié aux actifs de chaque banque. Les actifs plus sûrs doivent être couverts par moins de fonds propres, et inversement pour les actifs plus risqués. On pourrait ainsi différencier les classes d'actifs sur la base de leur alignement avec les objectifs de réduction d'émissions. On attribuerait des risques plus élevés aux actifs à forte intensité de carbone en prévision de futures évolutions négatives et soudaines des prix. Cela reviendrait à favoriser l'investissement vert par rapport à l'investissement carboné.

Dans le même esprit mais pour la politique monétaire, l'économiste Hubert Kempf propose deux options¹⁰³. La première passerait par une

103. H. Kempf, « Verdir la politique monétaire », 2020.

modulation du taux directeur de la Banque centrale. Le taux directeur est le taux auquel les banques empruntent auprès de la Banque centrale pour se refinancer. Ce taux directeur varierait avec les banques, en fonction du risque climatique associé aux crédits que cette banque accorde à ses clients. La seconde option serait de valoriser davantage les titres bas carbone par rapport à des titres intensifs en carbone, en contrepartie à la liquidité offerte par la Banque centrale. Expliquons ce que cela signifie. Lorsque la Banque centrale prête de l'argent à une banque, celle-ci doit remettre à la Banque centrale des actifs en garantie. L'idée serait alors que des titres bas carbones remis en contrepartie donneraient droit à plus de liquidité que des titres équivalents mais intensifs en carbone.

La politique climatique peut-elle être laissée aux banques centrales, et pourrait-on alors se passer de régulations, normes ou taxes pour les consommateurs ? Citons Christian Gollier : « Les faits sont têtus : les capitaux ont beau être abondants, les projets verts rentables sont rares. Et le coût se répercute *in fine* sur le citoyen¹⁰⁴ ! »

Quels que soient les instruments utilisés, la transition énergétique nécessite un changement radical de fonctionnement de l'économie. Dans la suite de cet opuscule nous nous intéressons aux conséquences macroéconomiques de la lutte contre le réchauffement climatique.

104. C. Gollier, « Le climat après la fin du mois : plaidoyer pour une taxe carbone », 2020.

4. Les conséquences macroéconomiques de la lutte contre le réchauffement climatique

La littérature de macroéconomie du court terme s'intéressant au climat (et plus généralement à l'environnement) est encore clairsemée¹⁰⁵. Les questions environnementales restent largement confinées aux champs de la microéconomie et de l'économie publique d'une part, de la croissance de long terme d'autre part. Dans ce dernier champ, les études sont relativement abondantes. Cette littérature s'est d'abord développée suite au premier choc pétrolier avec une série de travaux fondateurs sur les limites à la croissance provoquées par la rareté des ressources non renouvelables¹⁰⁶ puis, plus récemment et sous l'impulsion de William Nordhaus, avec des travaux sur la croissance et le climat¹⁰⁷.

Avec le *Dynamic Integrated model of Climate and the Economy* (DICE¹⁰⁸), Nordhaus a créé le premier modèle d'évaluation intégrée – *Integrated Assessment Model* (IAM). Les IAM couplent un modèle économique et un modèle physique décrivant de façon simplifiée le système climatique. Ce dernier modélise la façon dont l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère due à l'activité humaine, issue du modèle économique, se traduit en augmentation de la température terrestre. À son tour, l'augmentation de la température terrestre provoque des dommages, qui sont introduits dans le modèle économique. Une fois spécifiés, les IAM à la DICE sont calibrés, et un scénario de référence décrivant la façon dont l'économie et le climat évolueraient si aucune politique climatique nouvelle n'était mise

105. Voir K. Schubert, « Macroéconomie et environnement », 2017.

106. Voir le numéro spécial de 1974 de la *Review of Economic Studies*.

107. Ces travaux ont valu à William Nordhaus le prix Nobel d'économie en 2018.

108. Les premières versions de DICE datent des années 1990. On trouvera une présentation des évolutions du modèle jusqu'à la dernière version dans W. D. Nordhaus, « Evolution of modeling of the economics of global warming : Changes in the DICE model, 1992-2017 », 2018.

en place est construit. Il nécessite d'effectuer un certain nombre d'hypothèses assez héroïques, en particulier sur le progrès technologique et la croissance de la population sur un horizon de plusieurs siècles. Puis les modèles sont utilisés pour calculer le *coût social du carbone* (CSC). Le CSC est la valeur monétaire présente de la réduction des dommages climatiques présents et futurs provoquée par une réduction d'une tonne des émissions de CO_2 . C'est un outil central de la politique climatique puisqu'il indique l'ampleur des efforts d'abattement que la société doit réaliser. Enfin, les modèles permettent de chiffrer les coûts et les bénéfices de différentes options de politique climatique.

Il existe aujourd'hui des dizaines de IAM, allant de petits modèles aux fondements théoriques solides à la DICE à des modèles cherchant à représenter plus finement le monde réel, souvent de très grande taille et très complexes. La plupart d'entre eux restent des modèles adaptés à l'étude de scénarios de long terme, et ont peu à dire sur l'évolution de court/moyen terme de l'économie. Cependant, l'intérêt pour les conséquences macroéconomiques du changement climatique et de la lutte contre celui-ci grandit très rapidement.

En préambule, soulignons que les bénéfices et les coûts de la lutte contre le réchauffement climatique seront très différents selon que la politique climatique est mondiale ou qu'elle est limitée à quelques pays ou régions. La probabilité qu'un prix du carbone mondial soit mis en place à un horizon pas trop lointain est extrêmement faible. L'accord de Paris, qui est ce que la communauté internationale a réussi de mieux en matière de lutte contre le réchauffement, n'en fait pas mention et se fonde au contraire sur les contributions volontaires des États – les *Nationally Determined Contributions* (NDC). Or les économistes ont montré depuis longtemps que les contributions volontaires ne sont jamais suffisantes pour permettre la fourniture optimale d'un bien public. Mais peut-être n'est-il pas possible de faire mieux : mettre en place un prix du carbone universel de premier rang nécessiterait de mettre en place parallèlement,

pour des raisons d'équité, des transferts entre pays¹⁰⁹ si importants qu'ils ont extrêmement peu de chances de voir le jour. Certains pays ou certaines zones, comme l'Europe, ont déjà mis ou vont mettre en place des politiques climatiques ambitieuses, assorties de prix du carbone régionaux obtenus par une taxe ou un marché de permis négociables, tandis que d'autres pays vont être moins ambitieux – peut-être pour de bonnes raisons, comme une responsabilité historique dans l'accumulation de carbone dans l'atmosphère très faible, ou un niveau de développement économique tel que protéger le climat n'apparaît pas comme une priorité. En Europe, la question est souvent posée de l'intérêt de mettre en place une politique climatique ambitieuse dans un monde où les autres pays ne le feraient pas, car le climat étant un bien public global peu importe où sont effectuées les émissions, et le poids de l'Europe dans les émissions mondiales est faible face à celui de la Chine et des États-Unis. Le comportement de passager clandestin est le plus rationnel face à un tel problème : laisser les autres faire les efforts, et profiter du résultat. Mais si tout le monde est passager clandestin, il n'y aura pas de résultat.

Dans un tel contexte, il est particulièrement important d'avoir une idée claire des conséquences macroéconomiques de la lutte contre le réchauffement climatique pour un pays qui aurait une politique ambitieuse. Les coûts sont-ils prohibitifs ou, au contraire, la politique climatique est-elle porteuse de croissance et d'emploi ?

LES BÉNÉFICES DIRECTS

N'oublions pas que les bénéfices directs qu'il y a à éviter une trop forte augmentation de température sont l'objectif premier de la politique climatique. Ils dépendent bien sûr fortement de l'étendue de celle-ci : ils

109. Voir A. Sandmo, « Optimal taxation in the presence of externalities », 1975 ; G. Chichilnisky et G. Heal, « Who should abate carbon emissions ? An international perspective », 1994 ; et A. d'Autume *et al.*, « Should the carbon price be the same in all countries ? », 2016.

seront plus importants s'il s'agit d'une politique mondiale que si elle est limitée à quelques pays ou zones.

Le premier bénéfice est constitué par les dommages évités, par rapport à une situation où aucune action ne serait entreprise. Il s'agit, d'une part, de dommages graduels, qui vont apparaître progressivement avec l'élévation de la température (migration des zones de culture, désertification, nouvelles maladies, difficultés d'approvisionnement en eau...), et, d'autre part, de dommages ponctuels catastrophiques provoqués par des événements climatiques extrêmes pouvant entraîner des pertes physiques et financières considérables (inondations, ouragans, etc.). À leur tour, ces dommages entraîneront très probablement des crises sociales et des mouvements de population, quand certaines zones de la planète deviendront inhabitables¹¹⁰.

Les estimations de ces bénéfices sont très variables et entachées d'une incertitude très grande¹¹¹. Concernant les dommages graduels, la raison en est que nous n'avons jamais expérimenté jusqu'ici de hausses de température comparables à celles qui sont attendues. Ainsi, les travaux empiriques évaluent en fait les conséquences de chocs météorologiques et non de changements du climat.

Pour donner tout de même un ordre de grandeur, disons que le GIEC¹¹² donne une estimation des dommages supplémentaires en 2100 en cas d'un réchauffement de 2 degrés au lieu de 1,5 degré : entre 15 et 38,5 trillions USD (entre 2,3 et 3,5 % du PIB mondial) et conclut que chaque degré compte. La Terre n'a pas connu de température régulièrement supérieure à celle d'aujourd'hui de 4 degrés depuis 10 millions d'années. Et on sait qu'à l'Âge glaciaire, avec – 4 degrés en moyenne par rapport à aujourd'hui, l'humanité a failli disparaître !

110. C. Cattaneo *et al.*, « Human migration in the era of climate change », 2019.

111. Voir M. Aufhammer, « Quantifying economic damages from climate change », 2018 pour une revue de la littérature empirique.

112. IPCC, *Global Warming of 1.5 °C*, 2018, chap. 3, p. 256.

Certaines compagnies d'assurances et de réassurances fournissent des estimations des pertes associées aux catastrophes naturelles. Pour l'année 2018, Munich Re estime ces pertes à 160 milliards de dollars¹¹³. Les catastrophes considérées sont la sécheresse persistante en Europe, les feux de forêt aux États-Unis, les ouragans en Asie du Sud-Est, les inondations en Inde et une série de tremblements de terre en Indonésie. Toutes ne doivent pas être attribuées au changement climatique évidemment, les tremblements de terre en premier lieu. Mais l'augmentation au cours du temps des épisodes de sécheresse, des feux, des inondations et des ouragans indique qu'une bonne partie de ces événements peut l'être.

La taille des dommages n'est pas la seule question pertinente, leur répartition mondiale l'est tout autant. Une abondante littérature documente le fait que les dommages climatiques, graduels et catastrophiques, sont/seront très inégalement répartis. S. Hsiang *et al.* réexaminent l'idée, largement partagée, que les populations pauvres sont systématiquement plus exposées aux effets du changement climatique, à la fois entre les pays et à l'intérieur des pays¹¹⁴. Ils montrent que la réalité est bien plus complexe. En général, il est vrai que les populations pauvres vivent dans des endroits plus chauds et plus secs, mais il y a de nombreuses exceptions : Floride, Californie, Arizona aux États-Unis, ou encore Singapour et les pays producteurs de pétrole du Moyen-Orient. Ce sont les pays riches (États-Unis, Australie) et à revenu moyen (Chine, Argentine) qui sont les plus exposés au risque de tornade. Les projections indiquent que l'augmentation de température moyenne sera plus élevée aux hautes latitudes, où sont situés les pays riches, que dans les tropiques. En revanche, l'exposition à des températures extrêmement élevées sera plus importante dans les pays pauvres. Même si l'exposition physique aux effets du changement climatique est complexe, reste que les dommages marginaux seront très probablement plus importants pour les populations pauvres en

113. Munich Re, *Natural catastrophes in 2018*, 2019.

114. S. Hsiang *et al.*, « The distribution of environmental damages », 2019.

raison d'une plus grande vulnérabilité initiale et de moindres possibilités d'adaptation. Le changement climatique va ainsi aggraver les inégalités.

Outre ces bénéfices directs, lutter efficacement contre le changement climatique permet d'éviter des coûts d'adaptation potentiellement très élevés. Rendre la vie possible dans un monde plus chaud, ou beaucoup plus chaud, nécessiterait en effet de relocaliser de nombreuses activités, agricoles en particulier, de protéger les zones exposées contre la hausse du niveau des mers, de lutter contre de nouvelles maladies, d'installer des systèmes d'air conditionné à grande échelle, pour ne citer que quelques exemples.

Enfin, sur un mode plus positif, lutter efficacement contre le changement climatique aurait des co-bénéfices importants en matière de santé et de bien-être. La fermeture des centrales à charbon et le passage à la voiture électrique entraîneront une baisse considérable de la pollution locale de l'air. La crise sanitaire en fournit une excellente illustration. L'Agence européenne de l'environnement (AEE) faisait ainsi état, le 7 avril 2020, de diminutions des concentrations de NO_2 dans diverses villes d'Europe : la concentration de NO_2 à Milan avait baissé de 21 % pendant la semaine du 16 au 22 mars 2020 par rapport à la même semaine en 2019, alors qu'à Bergame, ville particulièrement touchée par la pandémie en Italie aussi, on observait une baisse de 47 %. En Île-de-France, Airparif estimait les baisses d'émissions à 64 % pour les NO_x malgré une augmentation du chauffage résidentiel, cette baisse reflétant la forte diminution du trafic routier et aérien. Le Centre for Research on Energy and Clean Air REF estime à environ 11 000 le nombre de décès qui auraient été évités en Europe grâce à la diminution de la pollution de l'air liés au confinement¹¹⁵.

115. Notons que, d'après le même centre de recherche, les niveaux de pollution liés à l'activité industrielle en Chine ont connu, après le déconfinement, un très important rebond, atteignant des niveaux supérieurs aux années précédentes.

LES EFFETS SUR LA CONSOMMATION ET L'INVESTISSEMENT

La consommation

Si un prix du carbone à un niveau suffisant est mis en place, le prix des énergies carbonées augmente, ce qui pèse sur le pouvoir d'achat et donc la consommation des ménages, augmente les coûts de production des entreprises et donc pèse sur leur compétitivité, et finalement pèse sur l'activité. En théorie, la hausse du prix des énergies carbonées provoque également de l'inflation. L'effet macroéconomique mécanique est de même nature que celui d'un choc pétrolier. La grande différence est que, contrairement au choc pétrolier, la taxation du carbone procure des recettes fiscales.

Une abondante littérature s'est développée à partir des années 1990 sur le thème du *double dividende*¹¹⁶, cherchant à mettre en évidence les conditions sous lesquelles le remplacement de taxes sur le revenu ou le travail par une taxe carbone à recettes fiscales inchangées permet d'obtenir un gain environnemental mais aussi un gain économique, fondé sur le fait que la taxe carbone serait moins distordante que les taxes sur l'activité économique. Cette littérature ne tire aucune conclusion générale. Il n'en demeure pas moins que l'utilisation des recettes de la taxe carbone pour baisser un autre impôt permet d'alléger l'effet négatif de la taxation du carbone sur l'activité. Par ailleurs, nous avons vu plus haut qu'une utilisation des recettes sous forme de dividende forfaitaire versé aux ménages permet de contrer les effets régressifs de la fiscalité du carbone. Quelle est alors la « bonne » utilisation de ces recettes ? Faut-il en consacrer une partie à baisser un autre impôt et en redistribuer une autre partie ? Il n'y a pas de réponse universelle à cette question, qui dépend des caractéristiques de chaque pays, du contexte dans lequel est introduit la taxe carbone et des préférences de la population.

116. Voir L. H. Goulder, « Environmental taxation and the double dividend : A reader's guide », 1995.

En l'absence de prix du carbone explicite, des effets du même type apparaissent. En effet, les normes et réglementations donnent un prix implicite au carbone, qui peut être très élevé si elles sont très contraignantes. Les producteurs répercutent tout ou partie des coûts additionnels dans le prix de vente des produits. Mais, dans ce cas, il n'y a pas de recettes fiscales dont l'utilisation permettrait de réduire les effets négatifs. De même, les subventions doivent être financées, et peuvent se révéler finalement très coûteuses pour le consommateur. Un exemple classique est celui des soutiens aux énergies renouvelables. En France, le montant des soutiens publics aux producteurs d'éolien et de solaire auquel s'est engagé l'État dans les contrats signés avant 2017 s'élève à 121 milliards d'euros¹¹⁷. Ces subventions sont financées (avec un étalement dans le temps) par les consommateurs à travers la Contribution au service public de l'électricité (CSPE), prélevée directement sur la facture d'électricité et qui en constitue une part non négligeable (16 % de la facture moyenne d'électricité selon la Commission de régulation de l'énergie).

L'investissement

Réaliser la transition va demander des transformations structurelles importantes de l'économie. Les investissements « climat » ou « verts »¹¹⁸ permettant ces transformations sont les investissements dans les énergies renouvelables, les infrastructures de transport propre, la rénovation des logements, les puits de carbone... Ils peuvent être publics ou privés. Le tableau 5 donne un exemple de nomenclature des investissements verts, utilisée par l'ACE dans le cas de la France¹¹⁹.

117. Cour des Comptes, *Le Soutien aux énergies renouvelables*, 2018.

118. On emploie ici de façon équivalente les qualificatifs « climat » et « vert », bien que l'on puisse soutenir qu'il n'y a pas équivalence.

119. On voit immédiatement que cette nomenclature peut être discutée, en particulier en ce qui concerne les investissements dans l'énergie nucléaire, considérés ici comme verts, mais que l'on aurait probablement bien du mal à qualifier comme tels en Allemagne.

Tableau 5 – Une nomenclature des investissements climat

Efficacité énergétique	Construction de bâtiments énergétiquement performants, rénovation énergétique des bâtiments, économies d'énergie dans l'industrie, achats de véhicules électriques, hybrides et GNV
Énergies renouvelables	Parcs éoliens, panneaux photovoltaïques installés au sol et sur toiture, production d'électricité ou de chaleur à partir de biomasse, de biogaz, de la valorisation des déchets
Énergies marines renouvelables	Installation de chaudières biomasse, pompes à chaleur et solaire thermique dans les bâtiments
Infrastructures durables	Développement et entretien du réseau ferroviaire, infrastructures des transports en commun urbains, infrastructures fluviales et maritimes, aménagements cyclables, bornes de recharge pour véhicules électriques, GNV ou hydrogène
Nucléaire	Construction de l'EPR et programme « grand carénage »
Non énergétique	Amont forestier et procédés industriels, construction bois

Source : I4CE, 2019.

Il est difficile d'estimer les investissements nécessaires en raison de la grande incertitude qui existe sur les technologies futures et leurs coûts. Les travaux existants convergent cependant vers l'idée que l'effort à réaliser est important.

Selon l'OCDE, il faudrait investir en moyenne 6 300 milliards USD dans les infrastructures chaque année, entre 2016 et 2030, pour répondre aux besoins de développement à l'échelle mondiale¹²⁰. Un montant supplémentaire de 600 milliards USD par an au cours de la même période rendrait ces investissements compatibles avec l'objectif 2 degrés. Le Pacte vert pour l'Europe, quant à lui, prévoit que soient effectués des investissements annuels supplémentaires de 260 milliards d'euros (1,5 % du PIB européen de 2018).

L'Institut de l'économie pour le climat (I4CE) effectue chaque année le même type d'estimations pour la France, et met en outre en évidence

120. OECD, *Investing in Climate, Investing in Growth*, 2017.

la façon dont ces investissements sont financés¹²¹. La figure 12 donne les montants d'investissement climat (selon la nomenclature du tableau 5) réalisés en France dans les années récentes. La progression entre 2011 et 2018 est notable. En 2018, le montant de ces investissements est de 45,7 milliards d'euros, à comparer avec une FBCF totale de 537,9 milliards d'euros. Ils représentent ainsi 8,5 % du total des investissements.

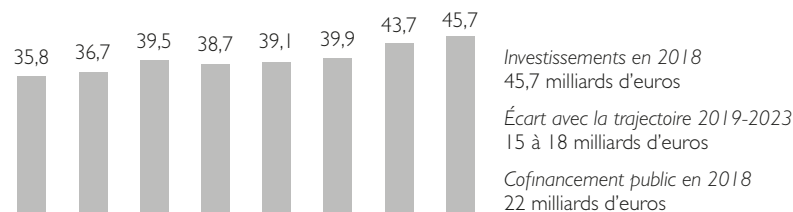


Figure 12 – Estimation des investissements climat en France (en milliards d'euros).

Source : I4CE, 2019.

L'Institut de l'économie pour le climat fournit également en 2018 une estimation des investissements nécessaires pour se conformer à la trajectoire des émissions de gaz à effet de serre définie dans la stratégie nationale bas carbone (SNBC) et la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). Par exemple, pour respecter la trajectoire du deuxième budget carbone (2019-2023), il faudrait investir chaque année 15 à 18 milliards d'euros supplémentaires et, pour respecter celle du troisième budget carbone (2014-2028), 32 à 41 milliards d'euros. La SNBC et la PPE expriment en général les besoins d'investissement en unités physiques ou

121. Pour la mouture la plus récente, voir I4CE, *Panorama des investissements climat*, 2019, et pour la méthodologie, H. Hainaut et I. Cocharn, « The Landscape of domestic climate investment and finance flows : Methodological lessons from five years of application in France », 2018.

en pourcentage d'un stock existant. Il faut recenser ces besoins puis les valoriser. Pour ce faire, les auteurs calculent un coût unitaire pour chaque investissement, à partir des données existantes sur les prix des énergies renouvelables s'il s'agit de ce type d'investissement, ou à l'aide d'estimations du coût des infrastructures de transport, etc. La méthodologie est transparente mais fragile, et la fourchette de résultats très large.

Ce supplément d'investissement constitue un choc de demande positif. Il est difficile d'en estimer l'ampleur, car les investissements climat se substituent en partie à des investissements standards qui auraient été réalisés de toutes façons, et ne sont donc pas forcément des investissements additionnels. C'est certainement le cas en ce qui concerne les investissements pour la production d'électricité ou pour certains investissements industriels. Par exemple, si un constructeur automobile renonce à construire une usine de production de SUV et investit plutôt dans une usine de production de voitures électriques, il n'y a pas d'investissement additionnel bien qu'il y ait un investissement climat. A contrario, on peut penser qu'une grande partie des investissements de rénovation thermique de l'habitat sont effectivement des investissements additionnels.

En présence d'un prix du carbone, une grande partie des investissements verts privés seraient effectués sans incitation supplémentaire. En l'absence d'une telle tarification crédible, divers instruments financiers et régulations peuvent être imaginés pour réorienter l'investissement, comme nous l'avons vu plus haut. Quant aux investissements publics, ils doivent être en priorité des investissements dans la R&D verte, susceptible de produire des effets d'entraînement importants, et des investissements permettant aux agents de changer leurs comportements, car il ne sert à rien de les inciter à adopter des comportements moins émetteurs de carbone s'ils n'ont pas d'alternative : infrastructures bas carbone telles que pistes cyclables, transports en commun, voitures électriques ; des investissements dans les réseaux (bornes de recharge) et dans le stockage de l'énergie.

Au total, la combinaison des chocs sur la consommation et l'investissement que nous venons d'identifier donne un résultat ambigu. Les modèles qui prédisent que l'effet net est positif sont des modèles dans lesquels les mécanismes keynésiens de relance par l'investissement sont puissants, de sorte que les investissements verts additionnels produisent un fort effet multiplicateur. Dans la réalité, l'ampleur de l'effet multiplicateur dépend du contexte économique : lorsque les facteurs de production sont sous-utilisés, les effets sont plus forts que lorsqu'il y a plein emploi. Ainsi, suite à la crise économique engendrée par la pandémie de Covid-19, les plans de relance proposés au niveau européen, ainsi que dans plusieurs des pays membres, dont la France, misent sur un fort effet multiplicateur des investissements verts.

Évaluation des effets macroéconomiques de l'objectif ZEN pour la France

Il est intéressant d'examiner le scénario officiel accompagnant en France la réalisation de l'objectif ZEN en 2050, tel qu'il est détaillé dans la SNBC et la PPE¹²². Sans trop entrer dans les détails, esquissons les hypothèses principales qui sous-tendent ce scénario.

Sur le plan de l'environnement international, il est supposé que les pays respectent l'accord de Paris et, au-delà, mettent en place des politiques climatiques ambitieuses qui permettent d'atteindre l'objectif 2 degrés. Par ailleurs, l'Europe met en place un mécanisme d'ajustement aux frontières, le prix des énergies fossiles augmente régulièrement (le prix du Brent est supérieur à 100 euros le baril après 2025), et le prix du carbone sur le marché ETS augmente également.

En ce qui concerne la politique climatique française, il est supposé que la taxe carbone reste à son niveau actuel de 44,60 euros/tCO₂. Mais « un signal prix sur le carbone en cohérence avec le rapport valeur de l'action

122. DGEC, *Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat*, 2020.

pour le climat de la Commission Quinet a cependant été pris en compte dans les différents modèles pour simuler les mesures nécessaires à l'atteinte des objectifs de long terme ». Cette phrase assez énigmatique doit signifier qu'un prix du carbone implicite est introduit, reflétant la valeur de l'action pour le climat¹²³, sous la forme de normes et de réglementations probablement, pour pallier l'absence de croissance du prix explicite.

Le reste de la politique climatique consiste à rendre possibles les transformations structurelles de l'économie, au moyen d'aides publiques, d'investissements publics et de réglementations. La rénovation thermique des bâtiments résidentiels et tertiaires est accélérée.

L'effort à réaliser est considérable : la majeure partie du parc de bâtiments doit être rénovée d'ici 2050. Pour le chauffage, on sort des énergies fossiles par l'électrification et l'installation de pompes à chaleur dans les maisons individuelles et de réseaux de chaleur pour les zones urbaines denses (plus un peu de biomasse et de gaz renouvelable). Les transports sont quasiment intégralement décarbonés, grâce au passage à des motorisations électriques ou à hydrogène, ou en utilisant des biocarburants et du biogaz. L'économie devient plus circulaire : les déchets sont valorisés, les produits sont conçus pour avoir une vie plus longue, etc. La décarbonation de la production d'énergie est totale. Enfin, l'artificialisation des sols est limitée.

À cela s'ajoutent des hypothèses de changement de comportement des ménages vers plus de sobriété, des modes de mobilité actives, etc., et des hypothèses technologiques d'amélioration de l'efficacité énergétique et des matériaux.

123. La valeur de l'action pour le climat, ou valeur tutélaire du carbone, mesure la valeur, pour la collectivité, des actions permettant d'atteindre l'objectif de neutralité carbone. Pour la France, elle a été évaluée par une commission présidée par Alain Quinet (« La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques », 2019). Elle est utilisée dans le calcul économique public pour valoriser les actions permettant de diminuer les émissions de CO₂.

Le scénario SNBC-PPE a fait l'objet d'une évaluation macroéconomique réalisée par l'Ademe, le CGDD et le Cired. Les résultats montrent que l'objectif ZEN en 2050 peut être atteint sans nuire à la croissance, et procure même un supplément de PIB de l'ordre de 1 à 2 % de PIB en 2030 et de l'ordre de 3 à 4 % de PIB en 2050 par rapport au scénario de référence « business as usual ». En outre, la transition engendrerait la création de 300 000 à 500 000 emplois supplémentaires en 2030 et de 700 000 à 900 000 emplois en 2050 par rapport au scénario de référence. La figure 13 montre l'effet sur le PIB par rapport au scénario de référence et sa décomposition.

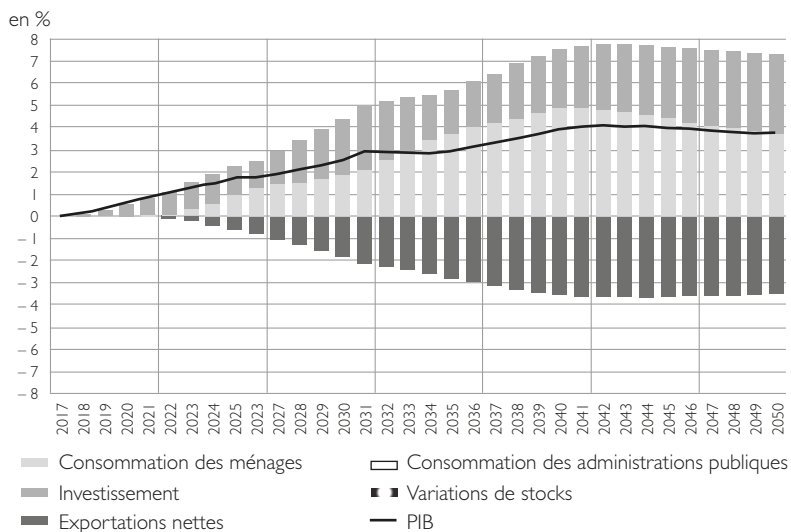


Figure 13 – Effet de la SNBC sur le PIB et ses contributions.

Source : Ademe-CGDD (Threeme-cadrage SNBC).

Ces résultats sont optimistes. Ils sont aussi fragiles car très dépendants des hypothèses des modèles qui ont permis de les obtenir. Et ils ne prennent pas en compte certaines caractéristiques centrales du processus de transition, la dimension distributive, et le fait qu'elle va entraîner l'abandon de ressources fossiles qui ont aujourd'hui une grande valeur, et le déclassement prématuré des actifs qui leur sont associés.

RETOUR SUR LES ACTIFS ÉCHOUÉS : DÉCLASSEMENT PRÉMATURÉ DU CAPITAL BRUN ET RÉALLOCATIONS SECTORIELLES DE L'EMPLOI

L'abandon de l'extraction de ressources fossiles constitue un choc de richesse négatif pour les pays producteurs, les entreprises du secteur de l'énergie et les investisseurs détenant dans leurs portefeuilles des actifs de ces pays et ces entreprises.

De façon similaire, le déclassement prématuré du capital « brun » constitue un choc de richesse négatif pour les agents, entreprises ou ménages, qui détiennent ce capital, et un choc d'offre négatif pour les économies considérées. Ce capital brun est constitué des centrales thermiques, des moyens de production et de distribution des énergies fossiles (pipelines...), des infrastructures et équipements complémentaires de l'utilisation de l'énergie fossile comme, pour les ménages, les voitures à moteur à combustion interne et les chaudières au fuel ou à gaz.

La possibilité que des actifs deviennent échoués fait peser une menace importante sur la politique climatique, car les secteurs considérés font déjà et vont continuer à faire un lobbying intense pour que leur capital n'entre pas dans cette catégorie. L'argument récurrent est celui des pertes d'emplois associées au déclassement prématuré du capital brun. Cet argument est parfaitement valide. Il est donc particulièrement important d'anticiper les réallocations sectorielles provoquées par la transition et d'accompagner la formation et la reconversion des travailleurs des entreprises concernées.

Les évaluations empiriques des actifs échoués restent relativement rares. A. Pfeiffer *et al.* estiment les émissions de carbone dues au fonctionnement des centrales thermiques existantes et de celles dont la construction est en cours ou prévue pour la décennie à venir (*committed emissions*), et les comparent au budget carbone restant¹²⁴. Ils obtiennent que même si tous les projets de construction de nouvelles centrales étaient annulés, il faudrait déclasser prématurément 20 % des centrales existantes, c'est-à-dire que 20 % des centrales existantes sont des actifs échoués.

Estimer précisément la valeur des actifs échoués liés aux ressources fossiles est un exercice compliqué. On trouve ainsi dans la littérature des estimations très différentes ; par exemple, la valeur des actifs échoués est estimée à 1 billion¹²⁵ de dollars par J.-F. Mercure *et al.* et 1,6 billion de dollars par Carbon Tracker, alors qu'elle est évaluée à 18 billions de dollars par l'Irena en 2017¹²⁶. Comme noté par P. Bolton *et al.*, ces estimations varient par l'étendue géographique des actifs inclus, par les hypothèses retenues et par les méthodes de valorisation¹²⁷. Par exemple, certaines estimations de l'Irena en 2017 couvrent la valeur des réserves fossiles alors que d'autres considèrent uniquement la valeur du capital investi dans les projets voués à s'arrêter prématurément¹²⁸.

Les travaux sur l'ampleur et les coûts des réallocations sectorielles de l'emploi provoquées par la transition sont également très rares. Notons

124. A. Pfeiffer *et al.*, « Committed emissions from existing and planned power plants and asset stranded required to meet the Paris Agreement », 2018.

125. Un billion est égal à mille milliards.

126. J.-F. Mercure *et al.*, « Macroeconomic impact of stranded fossil fuel assets », 2018 ; Carbon Tracker, « Breaking the habit : Why none of the large listed oil companies are Paris-aligned », 2018 ; Irena, *Stranded Assets and Renewables : How the Energy Transition Affects the Value of Energy Reserves, Buildings and Capital Stock*, 2017.

127. P. Bolton *et al.*, *The Green Swan : Central Banking and Financial Stability in the Age of Climate Change*, 2020.

128. IEA, *World Energy Outlook*, 2014.

tout de même que des incertitudes considérables entourent la notion d'actif échoué. Un des problèmes réside dans les interactions avec les différentes technologies et politiques climatiques. On peut en citer deux exemples.

La vitesse de décarbonation des différents secteurs de l'économie peut ne pas être la même, et on peut vouloir éliminer le charbon très rapidement mais conserver du pétrole pour les transports, et du gaz pour la production d'électricité pendant encore de nombreuses années. Dans ce cas, les voitures thermiques des ménages ne sont pas des actifs échoués et les centrales à gaz neuves non plus.

Comme nous l'avons vu, la plupart des scénarios climato-économiques introduisent de la CSC et des technologies d'émissions négatives. Dans certains de ces scénarios, ces technologies peuvent augmenter le budget carbone restant pour atteindre un monde à + 2 degrés jusqu'à 290 %¹²⁹. Si tel est le cas, les combustibles fossiles pourraient ne plus être échoués aussi rapidement !

DE LA CROISSANCE À LA CROISSANCE VERTE ?

Au-delà des effets de court/moyen terme de la politique climatique, il est évidemment très important de réfléchir à ses effets à long terme. Là aussi, les diagnostics ne sont pas unanimes.

Le diagnostic le plus optimiste prédit qu'un changement de régime de croissance va se produire, faisant passer l'humanité de la phase de croissance « sale » lancée par la Révolution industrielle à une phase de croissance verte. Il est fondé sur les effets dynamiques déclenchés par la transition : effets d'apprentissage, effets d'échelle, effets de réseau entraînent une baisse des coûts des technologies vertes, une augmentation de la taille des marchés auxquelles elles s'adressent et une redirection

129. Carbon Tracker, « Mind the gap : The \$1.6 trillion energy transition risk », 2018 ; <https://www.carbontracker.org/reports/mind-the-gap/>

de l'innovation¹³⁰. Pour A. Dechezleprêtre *et al.*, les effets d'entraînement des innovations bas carbone sont 40 % plus importants que ceux des technologies conventionnelles dans les secteurs de l'énergie et des transports¹³¹. D'où de nouvelles opportunités de croissance et d'emplois.

Un diagnostic plus nuancé souligne que le progrès technique dans les énergies renouvelables permet de changer de système énergétique, ce qui est bon pour le climat mais n'augmente pas a priori la productivité du travail, ce qui n'est pas bon pour la croissance. De même, les transports décarbonés sont bons pour le climat mais ne permettent pas de se transporter plus vite ou plus loin. En ce sens, le passage à des modes de transport décarbonés ne peut se comparer à la révolution des transports permise par le moteur à explosion et le pétrole au XIX^e siècle. À dépenses totales de recherche données, orienter le progrès technique dans la direction des technologies vertes aurait ainsi un prix en termes de croissance, en évinçant les innovations qui augmentent la productivité du travail. Pourrait-on y voir l'une des explications de la stagnation de la productivité que l'on observe depuis une trentaine d'années dans les économies développées, que les économistes ont beaucoup de mal à expliquer ?

130. D. Acemoglu *et al.*, « The environment and directed technical change », 2012.

131. A. Dechezleprêtre *et al.*, « Knowledge spillovers from clean and dirty technologies », 2017.

Conclusion

Réussir la transition vers un monde à zéro émissions nettes, un monde ZEN, va être difficile et coûteux, mais nous n'avons pas le choix. Si nous voulons que la planète soit vivable pour nos enfants, il faut transformer l'économie, et en particulier basculer la production d'énergie des sources fossiles vers les sources décarbonées. Aucune des sources décarbonées candidates au remplacement des énergies fossiles ne réunit pour l'instant toutes les qualités nécessaires en matière de disponibilité, de sécurité et de coût. Mais la transition ne peut pas attendre : l'horloge climatique tourne très vite. Cet opuscle explique pourquoi il est urgent d'agir, examine les politiques économiques permettant d'enclencher les changements nécessaires puis d'accélérer la transition, et conclut sur les conséquences macroéconomiques de la transition énergétique.

Un message positif émerge : en dépit des difficultés, la décarbonation de l'énergie est possible. Efforts de recherche et développement suscitant les innovations drastiques nécessaires, dans le stockage de l'énergie par exemple, changement de préférences individuelles et de normes sociales impulsé par la prise de conscience de plus en plus grande, dans les jeunes générations surtout, de la nécessité d'agir, politiques fiscale et réglementaire repensées pour plus d'efficacité et de justice dans le partage des efforts, finance verte... – les leviers pour faire baisser les émissions de carbone sont nombreux. Certains sont plus efficaces, d'autres plus faciles à mettre en place, mais aucun, utilisé seul, ne peut être suffisant. Tous doivent être mobilisés, au sein d'un ensemble de mesures structuré autour d'un prix du carbone reflétant la diminution du budget carbone qu'il nous reste à consommer.

Liste des figures et des tableaux

Figures

Figure 1 – Évolution de la concentration atmosphérique de carbone (1870-2017)	13
Figure 2 – Des émissions de CO ₂ cumulées à l'augmentation de température.	14
Figure 3 – L'identité de Kaya au niveau mondial (1980-2015).	17
Figure 4 – L'identité de Kaya : États-Unis, Europe, Chine et Afrique (1980-2015)	18
Figure 5 – L'impact des petits gestes d'un Français héroïque.	24
Figure 6 – Estimations des réserves et ressources d'énergies fossiles et de leur contenu en carbone (Gt CO ₂ e)	34
Figure 7 – Courbe d'offre de pétrole (seuil de rentabilité du Brent, dollars par baril)	35
Figure 8 – Mix énergétique primaire dans le monde	43
Figure 9 – LCOE des énergies renouvelables (2010 et 2019)	48
Figure 10 – Taux d'effort des ménages associé à la réforme avant utilisation des recettes (en pourcentage)	66
Figure 11 – Distribution des transferts nets par décile de niveau de vie (en euros)	68
Figure 12 – Estimation des investissements climat en France (en milliards d'euros)	92
Figure 13 – Effet de la SNBC sur le PIB et ses contributions.	96

Tableaux

Tableau 1 – Définition des petits gestes.	23
Tableau 2 – Coefficients d'émission de CO ₂	38

Tableau 3 – Coût de la production d'électricité aux États-Unis pour les nouvelles installations qui entreront en service en 2022 (2 017 dollars/MWh)	45
Tableau 4 – Coût de la production d'électricité renouvelable en France (euros/MWh)	48
Tableau 5 – Une nomenclature des investissements climat	91

Bibliographie

- ACEMOGLU, D., AGHION, P., BARRAGE, L. et HÉMOUS, D., « Climate change, directed innovation, and energy transition : The long-run consequences of the shale gas revolution », *Working Paper*, Harvard University, 2019.
- ACEMOGLU, D., AGHION, P., BURSZTIN, L. et HÉMOUS, D., « The environment and directed technical change », *American Economic Review*, 102, 2012, p. 131-166.
- ADEME, *Coûts des énergies renouvelables en France*, 2016.
- ALLEN, M. R., FRAME, D. J., HUNTINGFORD, C., JONES, C. D., LOWE, J. A., MEINSHAUSEN, M. et MEINSHAUSEN, N., « Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne », *Nature*, 458, 2009, p. 1163-1166.
- ANDERSON, K. et PETERS, G., « The trouble with negative emissions », *Science*, 354 (6309), 2017, p. 182-183.
- ATANASOVA, C. et SCHWARTZ, E. S., « Stranded fossil fuel reserves and firm value », *NBER, Working Paper 26497*, 2019.
- AUFFHAMMER, M., « Quantifying economic damages from climate change », *Journal of Economic Perspectives*, 32 (4), 2018, p. 33-52.
- D'AUTUME, A., SCHUBERT, K. et WITHAGEN, C., « Should the carbon price be the same in all countries ? », *Journal of Public Economic Theory*, 18 (5), 2016, p. 709-725.
- BAKER, E., FOWLIE, M., LEMOINE, D. et REYNOLDS, S. S., « The economics of solar electricity », *Annual Review of Resource Economics*, 5, 2013, p. 387-426.
- BASTIN, J.-F., FINEGOLD, Y., GARCIA, C., MOLLICONE, D., REZENDE, M., ROUTH, D., ZOHNER, C. M. et CROWTHER, T. W., « The global tree restoration potential », *Science*, 365 (6448), 2019, p. 76-79.
- BLAISE, G. et GLACHANT, M., « Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ? Une évaluation ex post sur données de panel », *La Revue de l'énergie*, 646, 2019, p. 46-60.
- BOHN, H. et STUART, C., « Calculation of a population externality », *American Economic Journal : Economic Policy*, 7 (2), 2015, p. 61-87.

- BOLTON, P., DESPRES, M., PEREIRA DA SILVA, L. A., SAMAMA, F. et SVARTZMAN, R., *The Green Swan : Central Banking and Financial Stability in the Age of Climate Change*, Banque des règlements internationaux, janvier 2020.
- BORENSTEIN, S. et DAVIS, L., « The distributional effects of US clean energy tax credit », *NBER Tax Policy and the Economy*, 30 (1), 2016, p. 191-234.
- BROUNEN, D. et KOK, N., « On the economics of energy labels in the housing market », *Journal of Environmental Economics and Management*, 62 (2), 2010, p. 166-179.
- BRUEGGE C., DERYUGINA, T. et MYERS, E., « The distributional effects of building energy codes », *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 6 (S1), 2018, p. 95-127.
- BUREAU, D., HENRIET, F. et SCHUBERT, K., « Pour le climat : une taxe juste, pas juste une taxe », *Note du Conseil d'analyse économique*, n° 50, mars 2019.
- CARATTINI, S., CARVALHO, M. et FANKHAUSER, S., « Overcoming public resistance to carbon taxes », *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change*, 9, 2018.
- CARATTINI, S., KALLBEKKEN, S. et ORLOV, A., « How to win public support for a global carbon tax », *Nature*, 565, 2019, p. 289-291.
- CARBON TRACKER, « Breaking the habit : Why none of the large listed oil companies are Paris-aligned », 2018.
- CARBON TRACKER, « Mind the gap : The \$1.6 trillion energy transition risk », 2018 ; <https://www.carbontracker.org/reports/mind-the-gap/>
- CARNEY, M., « Breaking the tragedy of the horizon—climate change and financial stability », 2015 <http://www.bankofengland.co.uk/publications/Pages/speeches/2015/844.aspx>,
- CATTANEO, C. BEINE, M., FRÖHLICH, C., KNIVETON, D., MARTINEZ-ZARZOSO, I., MASTRORILLO, M., MILLOCK, K., PIGUET, E. et SCHRAVEN, B., « Human migration in the era of climate change », *Review of Environmental Economics and Policy*, 13 (2), 2019, p. 189-206.
- CHICHILNISKY, G. et HEAL, G., « Who should abate carbon emissions ? An international perspective », *Economic Letters*, 44, 1994, p. 443-449.

- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE (CGDD), *Chiffres clés du climat, France, Europe et Monde*, 2018.
- COULOMB, R. et HENRIET F., « The Grey Paradox : How fossil-fuel owners can benefit from carbon taxation », *Journal of Environmental Economics and Management*, 87, 2018, p. 206-223.
- COULOMB, R. et ZYLBERBERG, Y., « Environmental risk and the anchoring role of local production », *Working Paper*, 2019.
- COULOMB, R., HENRIET, F. et REITZMANN, L., « Climate and oil misallocation », mimeo, 2020.
- COUR DES COMPTES, *Le Soutien aux énergies renouvelables*, 2018.
- CRUTZEN, P.J., « Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections : A contribution to resolve a policy dilemma ? », *Climatic Change*, 77 (3), 2006, p. 211-220.
- DARRAH, T. VENGOSH, A., JACKSON, R. B., WARNER, N. R. et POREDA, R. J., « Noble gases identify the mechanisms of fugitive gas contamination in drinking-water wells overlying the Marcellus and Barnett Shales », *PNAS*, 111 (39), 2014, p. 14076-14081.
- DAUBANES, J., HENRIET, F. et SCHUBERT, K., « More gas, less coal, and less CO₂ ? Unilateral CO₂ reduction policy with more than one carbon energy source », *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2020, à paraître.
- DAVIS, L.W. et KNITTEL, C. R., « Are fuel economy standards regressive ? », *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 6 (S1), 2019, p. 37-63.
- DECHEZLEPRÊTRE, A., MARTIN, R. et MOHNEN, M., « Knowledge spillovers from clean and dirty technologies », *Working Paper 155*, Grantham Institute, 2017.
- DELIS, M., DE GREIFF, K. et ONGENA, S., « Being stranded on the carbon bubble ? Climate policy risk and the pricing of Bank Loans », *CEPR Discussion Papers*, 12928, 2018.
- DÉPOUES, V., BOUCHET, V., CARDONA, M. et NICOL, M., « Pour une autre approche du risque climatique en finance », I4CE, 2019 <https://www.i4ce.org/wp-core/wp-content/uploads/>

- 2019/11/14CE_Incertitudes_Pour-une-autre-approche-du-risque-en-finance_vf.pdf.
- DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ÉNERGIE ET DU CLIMAT (DGEC), *Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat*, janvier 2020.
- DOUENNE, T. et FABRE, A., « French attitudes over climate change, carbon taxation and other climate policies », *Ecological Economics*, 169, 2020.
- DUGAST, C. et SOYEUX, A., « Faire sa part ? Pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l'État face à l'urgence climatique », *Carbone* 4, 2019.
- ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA), *Annual Energy Outlook*, 2018.
- ESTIRI, H. et ZAGHENI, E., « Age matters : Ageing and household energy demand in the United States », *Energy Research and Social Science*, 55, 2019, p. 62-70.
- FAY, M., HALLEGATTE, S., VOGT-SCHILB, A., ROZENBERG, J., NARLOCH, U. et KERR, T., *Decarbonizing Development. Three Steps to a Zero-Carbon Future*, World Bank, 2015.
- FENG, K., DAVIS, S. J., SUN, L. et HUBACEK, K., « Drivers of the US CO₂ emissions 1997-2013 », *Nature Communications*, 6, 7714, 2015.
- GERLAGH, R., LUPI, V. et GALEOTTI, M., « Family planning and climate change », *Cesifo Working Papers* 7421, 2019.
- GLOBAL CARBON PROJECT, www.globalcarbonproject.org, 2016.
- GOESCHL, T. et PERINO, G., « Instrument choice and motivation : Evidence from a climate change experiment », *Environmental and Resource Economics*, 52, 2011, p. 195-212.
- GOLLIER, C., « Le climat après la fin du mois : plaidoyer pour une taxe carbone », Conférence organisée par Sociétal, l'Académie des sciences morales et politiques et Newpolis, Institut de France, 27 février 2020.
- GOULDER, L. H., « Environmental taxation and the double dividend : A reader's guide », *International Tax and Public Finance*, 2 (2), 1995, p. 157-183.
- GOULDER, L. H. et PARRY, I. W. H., « Instrument choice in environmental policy », *Review of Environmental Economics and Policy*, 2 (2), 2008, p. 152-174.

- GOWRISANKARAN, G. et REYNOLDS, S. S., « Intermittency and the value of renewable energy », *Journal of Political Economy*, 124 (4), 2016, p. 1187-1234.
- HAGMANN, D., HO, E. H. et LOWENSTEIN, G., « Nudging out support for a carbon tax », *Nature Climate Change*, 9, 2019, p. 484-489.
- HAINAUT, H. et COCHRAN, I., « The landscape of domestic climate investment and finance flows : Methodological lessons from five years of application in France », *International Economics*, 155, 2018, p. 69-83.
- HALLEGATTE, S., BANGALORE, M., BONZANIGO, L., FAY, M., KANE, T., NARLOCH, U., ROZENBERG, J., TREGUER, D., VOGT-SCHILB, A., *Shock Waves : Managing the Impacts of Climate Change on Poverty*, World Bank, 2016.
- D'HAULTFŒUILLE, X., DURRMEYER, I. et FÉVRIER, P., « Le coût du bonus/malus écologique : Que pouvait-on prédire ? », *Revue économique*, 62 (3), 2011, p. 491-499.
- D'HAULTFŒUILLE X., GIVORD, P. et BOUTIN, X., « The environmental effect of green taxation : The case of the French bonus/malus », *The Economic Journal*, 124 (578), 2018.
- HEAL, G., « Notes on the economics of energy storage », *NBER Working Paper* 22752, 2016.
- HEAL, G. et SCHLENKER, W., « Coase, Hotelling and Pigou : The incidence of a carbon tax and CO₂ emissions », *NBER Working Papers* 26086, 2019.
- HENRIET, F. et SCHUBERT, K., « Is shale gas a good bridge to renewables ? An application to Europe », *Environmental and Resource Economics*, 72 (3), 2018, p. 782-762.
- HOOK, A., COURT, V., SOVACOO, B. K. et SORRELL, S., « A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking », *Environmental Research Letters*, août 2020.
- HOUE, S., « How consumers respond to product certification and the value of energy information », *The Rand Journal of Economics*, 49 (2), 2018, p. 453-477.
- HSIANG, S., OLIVA, P. et WALKER, R., « The distribution of environmental damages », *Review of Environmental Economics and Policy*, 13 (1), 2019, p. 83-103.

HAUT CONSEIL POUR LE CLIMAT (HCC), « Agir en cohérence avec les ambitions », *Rapport annuel neutralité carbone*, juin 2019.

ILHAN E., SAUTNER, Z. et VIKOV, G., « Carbon tail risk », *Working Paper*, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), *Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge, Cambridge University Press, 2005.

—, *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press, 2014.

—, *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), *Solar Energy Perspectives*, Paris, OECD/IEA, 2011.

—, *World Energy Outlook*, Paris, 2014.

—, *World Energy Outlook*, Paris, 2016.

—, *World Energy Outlook*, Paris, 2019.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (Irena), *Stranded Assets and Renewables : How the Energy Transition Affects the Value of Energy Reserves, Buildings and Capital Stock*. Abu Dhabi, 2017.

—, *Renewable Power Generation Costs in 2019*, 2020.

I4CE, *Panorama des investissements climat*, 2019.

JOSKOW, P., « Comparing the costs of intermittent and dispatchable generating technologies », *American Economic Review*, 101 (3), 2011, p. 238-241.

KALLBEKKEN, S. et SÆLEN, H., « Public acceptance for environmental taxes : Self-interest, environmental and distributional concerns », *Energy Policy*, 39 (5), 2011, p. 2966-2973.

KEMPF, H., « Verdir la politique monétaire », *Revue d'économie politique*, à paraître, 2020.

- KING, D., BROWNE, J., LAYARD, R., O'DONNELL, G., REES, M., STERN, N. et TURNER, A., « A global Apollo programme to combat climate change », London School of Economics, 2015.
- KLEPPER, G., RICKELS, W., « Climate engineering : Economics prospects and considerations », *Review of Environmental Economics and Policy*, 8 (2), 2014, p. 270-289.
- KNITTEL, C. R., METAXOGLOU, K. et TRINDADE, A., « Natural gas prices and coal displacement : Evidence from electricity markets », *International Journal of Industrial Organization*, 2020, à paraître.
- KRUEGER, P., SAUTNER, Z. et STARKS, L., « The importance of climate risks for institutional investors », *Review of Financial Studies*, 2020, à paraître.
- LATHAM, J., « Control of global warming ? », *Nature*, 347, 1990, p. 339-340.
- LAZARD, *Levelized Cost of Energy*, 2017.
- LAZKANO, I., NØSTBAKKEN, L. et PELL, M., « From fossil fuels to renewables : The role of electricity storage », *European Economic Review*, 99, 2017, p. 113-129.
- LE QUÉRÉ, C., KORSBAKKEN, J. Y., WILSON, C., TOSUN, J., ANDREW, R., ANDRES, R. J., CANADELL, J. G., JORDAN, A., PETERS, G. P. et VAN VUUREN, D. P., « Drivers of declining CO₂ emissions in 18 developed economies », *Nature Climate Change*, 9, 2019, p. 213-217.
- LE QUÉRÉ, C., JACKSON, R. B., JONES, M. W., SMITH, A. J. P., ABERNETHY, S., ANDREW, R. M., DE-GOL, A. J., WILLIS, D. R., SHAN, Y., CANADELL, J. G., FRIEDLINGSTEIN, P., CREUTZIG, F. et PETERS, G. P., « Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the Covid-19 forced confinement », *Nature Climate Change*, 2020 <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>.
- LEVINSON A., « Energy efficiency standards are more regressive than energy taxes : Theory and evidence », *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 6 (S1), 2019, p. 7-36.
- LIU, Z., DENG, Z., CIAIS, P., LEI, R., DAVIS, S. J., FENG, S., ZHENG, B. et al., « Covid-19 causes record decline in global CO₂ emissions », arXiv preprint econ.GN 2004-13614, 2020.
- MASANET, E., SHEHABI, A., LEI, N., SMITH, S. KOOMEY, J., « Recalibrating global data center energy-use estimates », *Science*, 367 (6481), 2020, p. 984-986.

- MASNADI, M. S., EL-HOUJEIRI, H. M., SCHUNACK, D., LI, Y., ENGLANDER, J. G., BADAHDAAH, A., MONFORT, J.-C. et al., « Global carbon intensity of crude oil production », *Science*, 361 (6405), 2018, p. 851-853.
- MATIKAINEN, S., CAMPIGLIO, E. et ZENGHELIS, D., « The climate impact of quantitative easing, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment », *Policy Paper*, 2017. http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2017/05/ClimateImpactQuantEasing_Matikainen-et-al.pdf
- MATTAUCH, L., MATTHEWS, H.D., MILLAR, R., REZAI, A., SOLOMON, S. et VENMANS, F., « Steering the climate system. Using inertia to lower the cost of policy : Comment », *American Economic Review*, 110 (4), 2020, p. 1231-1237.
- MCGLADE, C. et EKINS, P., « The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C », *Nature*, 517, 2015, p. 187-190.
- MEINSHAUSEN, M., MEINSHAUSEN, N., HARE, W., RAPER, S. C. B., FRIELER, K., KNUTTI, R., FRAME, D. J. et ALLEN, M. R., « Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C », *Nature*, 458, 2009, p. 1158-1162.
- MERCURE, J.-F., POLLITT, H., VIÑUALES, J. E., EDWARDS, N. R., HOLDEN, P. B., CHEWPREECHA, U., SALAS, P., SOGNAESS, I., LAM, A. et KNOBLOCH, F., « Macroeconomic impact of stranded fossil fuel assets », *Nature Climate Change*, 8, 2018, p. 588-593.
- MUEHLENBACHS, L., SPILLER, E. et TIMMINS, C., « The housing market impacts of shale gas development », *The American Economic Review*, 105 (12), 2015, p. 3633-3659.
- MUKANJARI, S. et STERNER, T., « Do markets Trump politics ? Fossil fuel market reactions to the Paris Agreement and the US Election », *Working Paper 8-24, Resources for the Future*, 2018.
- MUNICH RE, *Natural catastrophes in 2018*. Technical Report, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 2019 https://www.munichre.com/site/corporate/get/params_E506046347_Dattachment/1707976/munichre-natural-catastrophes-in-2018.pdf.
- NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA) et INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), *Uranium 2018 : Resources, Production and Demand*, 2018.

- NGFS, *Un appel à l'action. Le changement climatique comme source de risque financier*, avril 2019.
- NORDHAUS, W. D., « Evolution of modeling of the economics of global warming : changes in the DICE model, 1992-2017 », *Climatic Change*, 148 (4), 2018, p. 623-640.
- NORDHAUS, W. D. et MOFFAT, A., « A survey of global impacts of climate change : Replication, survey methods, and a statistical analysis », *National Bureau of Economic Research Working Paper 23646*, 2017.
- OECD, *Investing in Climate, Investing in Growth*, OECD Publishing, 2017.
- PETERS, A., « False hope : Why carbon capture and storage won't save the climate », *Energy and Environment*, 23 (2-3), 2012.
- PETERS, G., MARLAND, G., LE QUÉRE, C. et al., « Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008-2009 global financial crisis », *Nature Climate Change*, 2, 2012, p. 2-4.
- PEIFFER, A., HEPBURN, C., VOGT-SCHILB, A. et CALDECOTT, B., « Committed emissions from existing and planned power plants and asset stranded required to meet the Paris Agreement », *Environmental Research Letters*, 13, 2018.
- POMMERET, A. et SCHUBERT, K., « Energy transition with variable and intermittent renewable electricity generation », mimeo, 2019.
- PRIEUR, F., QUAAS, M. et SCHUMACHER, I., « Mitigation strategies under the threat of solar radiation management », *EconomiX Working Papers 3*, Université Paris Nanterre, EconomiX, 2019.
- PROCTOR, J., HSIANG, S., BURNEY, J. BURKE, M. et SCHLENKER, W., « Estimating global agricultural effects of geoengineering using volcanic eruptions », *Nature*, 560, 2018, p. 480-483.
- QUINET, A., « La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques », France Stratégie, 2019.
- REN21, *Renewable 2018 Global Status Report*, 2018.
- ROBOCK, A., OMAN, L. et STENCHIKOV, G. L., « Regional climate responses to geo-engineering with tropical and Arctic SO₂ injections », *Journal of Geophysical Research*, 113, 2008.

- ROGELJ, J., FORSTER, P.M., KRIEGLER, E. et al., « Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets », *Nature*, 571, 2019, p. 335-342.
- SACHS, J., « Getting to a carbon-free economy : The urgent is attainable, and at entirely affordable cost », *The American Prospect*, 2020.
- SALLEE, J., « Pigou creates losers : On the implausibility of achieving pareto improvements from efficiency-enhancing policies », *NBER Working Papers 25831*, 2019.
- SANDMO, A., « Optimal taxation in the presence of externalities », *Swedish Journal of Economics*, 77, 1975, p. 86-98.
- SCHUBERT, K., *Pour la taxe carbone. La politique économique face à la menace climatique*, Paris, Rue d'Ulm, 2010.
- , « Macroéconomie et environnement », *Revue de l'OFCE*, 153, 2017, p. 133-150.
- SCOVRONICK, N., BUDOLFSON, M., DENNIG, F., FLEURBAEY, M., SIEBERT, A., SOCOLOW, R. H., SPEARS, D. et WAGNER, F., « Impact of population growth and population ethics on climate change mitigation policy », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (46), 2017, p. 12338-12343.
- SEVEREN, C. et VAN BENTHEM, A., « Formative experiences and the price of gasoline », *CESifo Working Paper 7757*, 2019.
- SINN H. W., « Buffering volatility : A study on the limits of Germany's energy revolution », *European Economic Review*, 99, 2017, p. 130-150.
- STERNER, T., *Fuel Taxes and the Poor. The Distributional Effects of Gasoline Taxation and Their Implications for Climate Policy*, Londres, Routledge, 2011.
- STIGLITZ, J., « Addressing climate change through price and non-price interventions », *European Economic Review*, 118, 2019, p. 594-612.
- STIGLITZ, J., SEN, A. et FITOUSSI, J.-P., *Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social*, 2009.
- THE SHITFT PROJECT, *Pour une sobriété numérique*, octobre 2018.
- VELDMAN, J.W. et al., « Comment on the global tree restoration potential », *Science*, 366 (6463), 2019.

- WAGNER, G. et WEITZMAN, M., *Climate Shock : The Economic Consequences of a Hotter Planet*, Princeton, Princeton University Press, 2015.
- WERFEL, S., « Household behaviour crowds out support for climate change policy when sufficient progress is perceived », *Nature Climate Change*, 7, 2017, p. 512-515.
- YAMAJI, K., MATSUHASHI, R., NAGATA, Y. KAYA, Y., « An integrated system for CO₂/Energy/GNP analysis : Case studies on economic measures for CO₂ reduction in Japan. Workshop on CO₂ reduction and removal : Measures for the next century », International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1991.

ORGANIGRAMME DU CEPREMAP

Président : Benoît Cœuré
Directeur : Daniel Cohen
Directrice adjointe : Claudia Senik

OBSERVATOIRE MACROÉCONOMIE

François Langot
Gilles Saint-Paul
Thomas Brand
(directeur exécutif)

BIEN-ÊTRE, EMPLOI ET POLITIQUES PUBLIQUES

Observatoire bien-être

Yann Algan
Andrew Clark
Claudia Senik
Mathieu Perona
(directeur exécutif)

Travail et emploi

Luc Behaghel
Philippe Askenazy
Dominique Meurs

Économie publique et redistribution

Maya Bacache-Beauvallet
Antoine Bozio
Brigitte Dormont

MONDIALISATION, DÉVELOPPEMENT ET ENVIRONNEMENT

Miren Lafourcade
Sylvie Lambert
Katheline Schubert

Groupe Inde-Chine
Guilhem Cassan
Maelys de la Rupelle
Clément Imbert
Oliver Vanden Eynde
Thomas Vendryes

DANS LA MÊME COLLECTION

La Lancinante Réforme de l'assurance maladie, par Pierre-Yves Geoffard, 2006, 48 pages.

La Flexicurité danoise. Quels enseignements pour la France ?, par Robert Boyer, 2007, 3^e tirage, 54 pages.

La Mondialisation est-elle un facteur de paix ?, par Philippe Martin, Thierry Mayer et Mathias Thoenig, 2006, 2^e tirage, 56 pages.

L'Afrique des inégalités : où conduit l'histoire, par Denis Cogneau, 2007, 64 pages.

Électricité : faut-il désespérer du marché ?, par David Spector, 2007, 2^e tirage, 56 pages.

Une jeunesse difficile. Portrait économique et social de la jeunesse française, par Daniel Cohen (éd.), 2007, 238 pages.

Les Soldes de la loi Raffarin. Le contrôle du grand commerce alimentaire, par Philippe Askenazy et Katia Weidenfeld, 2007, 60 pages.

La Réforme du système des retraites : à qui les sacrifices ?, par Jean-Pierre Laffargue, 2007, 52 pages.

Les Pôles de compétitivité. Que peut-on en attendre ?, par Gilles Duranton, Philippe Martin, Thierry Mayer et Florian Mayneris, 2008, 2^e tirage, 84 pages.

Le Travail des enfants. Quelles politiques pour quels résultats ?, par Christelle Dumas et Sylvie Lambert, 2008, 82 pages.

Pour une retraite choisie. L'emploi des seniors, par Jean-Olivier Hairault, François Langot et Theptida Sopraseuth, 2008, 72 pages.

La Loi Galland sur les relations commerciales. Jusqu'où la réformer ?, par Marie-Laure Allain, Claire Chambolle et Thibaud Vergé, 2008, 74 pages.

Pour un nouveau système de retraite. Des comptes individuels de cotisations financés par répartition, par Antoine Bozio et Thomas Piketty, 2008, 2^e tirage, 100 pages.

Les Dépenses de santé. Une augmentation salubre ?, par Brigitte Dormont, 80 pages, 2009.

De l'euphorie à la panique. Penser la crise financière, par André Orléan, 2009, 3^e tirage, 112 pages.

Bas salaires et qualité de l'emploi : l'exception française ?, par Ève Caroli et Jérôme Gautié (éd.), 2009, 510 pages.

Pour la taxe carbone. La politique économique face à la menace climatique, par Katheline Schubert, 2009, 92 pages.

Le Prix unique du livre à l'heure du numérique, par Mathieu Perona et Jérôme Pouyet, 2010, 92 pages.

Pour une politique climatique globale. Blocages et ouvertures, par Roger Guesnerie, 2010, 96 pages.

Comment faut-il payer les patrons ?, par Frédéric Palomino, 2011, 74 pages.

Portrait des musiciens à l'heure du numérique, par Maya Bacache-Beauvallet, Marc Bourreau et François Moreau, 2011, 94 pages.

L'Épargnant dans un monde en crise. Ce qui a changé, par Luc Arrondel et André Masson, 2011, 112 pages.

Handicap et dépendance. Drames humains, enjeux politiques, par Florence Weber, 2011, 76 pages.

Les Banques centrales dans la tempête. Pour un nouveau mandat de stabilité financière, par Xavier Ragot, 2012, 80 pages.

L'Économie politique du néolibéralisme. Le cas de la France et de l'Italie, par Bruno Amable, Elvire Guillaud et Stefano Palombarini, 2012, 164 pages.

Faut-il abolir le cumul des mandats ?, par Laurent Bach, 2012, 126 pages.

Pour l'emploi des seniors. Assurance chômage et licenciements, par Jean-Olivier Hairault, 2012, 78 pages.

L'État-providence en Europe. Performance et dumping social, par Mathieu Lefebvre et Pierre Pestieau, 80 pages, 2012.

Obésité. Santé publique et populisme alimentaire, par Fabrice Étilé, 2013, 124 pages.

La Discrimination à l'embauche sur le marché du travail français, par Nicolas Jacquemet et Anthony Edo, 2013, 78 pages.

Travailler pour être aidé ? L'emploi garanti en Inde, par Clément Imbert, 2013, 74 pages.

Hommes/Femmes. Une impossible égalité professionnelle ?, par Dominique Meurs, 2014, 106 pages.

Le Fédéralisme en Russie ? Les leçons de l'expérience internationale, par Ekaterina Zhuravskaya, 2014, 68 pages.

Bien ou mal payés ? Les travailleurs du public et du privé jugent leurs salaires, par Christian Baudelot, Damien Cartron, Jérôme Gautié, Olivier Godechot, Michel Gollac et Claudia Senik, 2014, 232 pages.

La Caste dans l'Inde en développement. Entre tradition et modernité, par Guilhem Cassan, 2015, 72 pages.

Libéralisation, innovation et croissance. Faut-il les associer ?, par Bruno Amable et Ivan Ledezma, 2015, 122 pages.

Les Allocations logement. Comment les réformer ?, par Antoine Bozio, Gabrielle Fack et Julien Grenet (dir.), 2015, 98 pages.

Avoir un enfant plus tard. Enjeux sociodémographiques du report des naissances, par Hippolyte d'Albis, Angela Greulich et Grégory Ponthière, 2015, 128 pages.

La Société de défrance. Comment le modèle social français s'autodétruit, par Yann Algan et Pierre Cahuc, 2016, 2^e édition, 110 pages.

Leçons de l'expérience japonaise. Vers une autre politique économique ?, par Sébastien Lechevalier et Brieuc Monfort, 2016, 228 pages.

Filles + sciences = une équation insoluble ? Enquêtes sur les classes préparatoires scientifiques, par Marianne Blanchard, Sophie Orange et Arnaud Pierrel, 2016, 152 pages.

Qualité de l'emploi et productivité, par Philippe Askenazy et Christine Erhel, 2017, 104 pages.

En finir avec les ghettos urbains ? Retour sur l'expérience des zones franches urbaines, par Miren Lafourcade et Florian Mayneris, 2017, 136 pages.

Repenser l'immigration en France, par Hillel Rapoport, 2018, 102 pages.

Les Français, le bonheur et l'argent, par Yann Algan, Elizabeth Beasley et Claudia Senik, 2018, 80 pages.

La Transition écologique en Chine. Mirage ou « virage vert » ?, par Stéphanie Monjon et Sandra Poncet, 2018, 176 pages.

Biens publics, charité privée. Comment l'État peut-il réguler le charity business ?, par Gabrielle Fack, Camille Landais et Alix Myczkowski, 2018, 118 pages.

Competition between hospitals. Does it affect quality of care ?, par Brigitte Dormont et Carine Milcent (éd.), 2018, 236 pages.

La Polarisation de l'emploi en France. Ce qui s'est aggravé depuis la crise de 2008, par Ariell Reshef et Farid Toubal, 2019, 96 pages.

Voter autrement, par Jean-François Laslier, 2019, 140 pages.

Mondialisation des échanges et protection des consommateurs. Comment les concilier ?, par Anne-Célia Disdier, 2020, 108 pages.

Comment lutter contre la fraude fiscale ? Les enseignements de l'économie comportementale, par Nicolas Jacquemet, Stéphane Luchini et Antoine Malézieux, 2020, 104 pages.

Remédier aux déserts médicaux, par Magali Dumontet et Guillaume Chevillard, 2020, 126 pages.

Comme les garçons ? L'économie du football féminin, par Luc Arrondel et Richard Duhautois, préface d'Hervé Mathoux, 2020, 184 pages.

La valeur des réseaux. Économie des interactions sociales, par Margherita Comola, 2020, 76 pages.

Mise en pages
TyPAO sarl
75011 Paris

Imprimerie Maury
N° d'impression : *****
Dépôt légal : janvier 2021