

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.

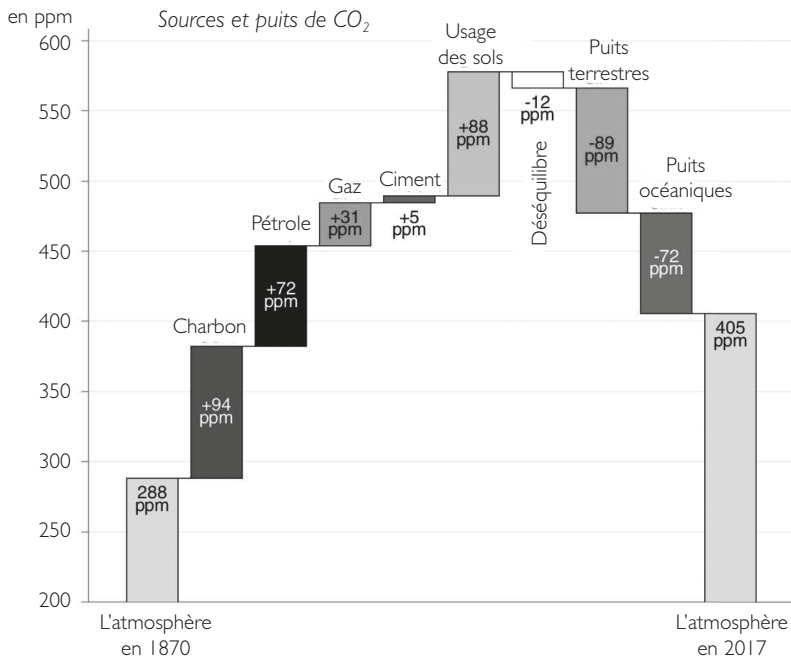


Figure 1 – Évolution de la concentration atmosphérique de carbone (1870-2017).

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.

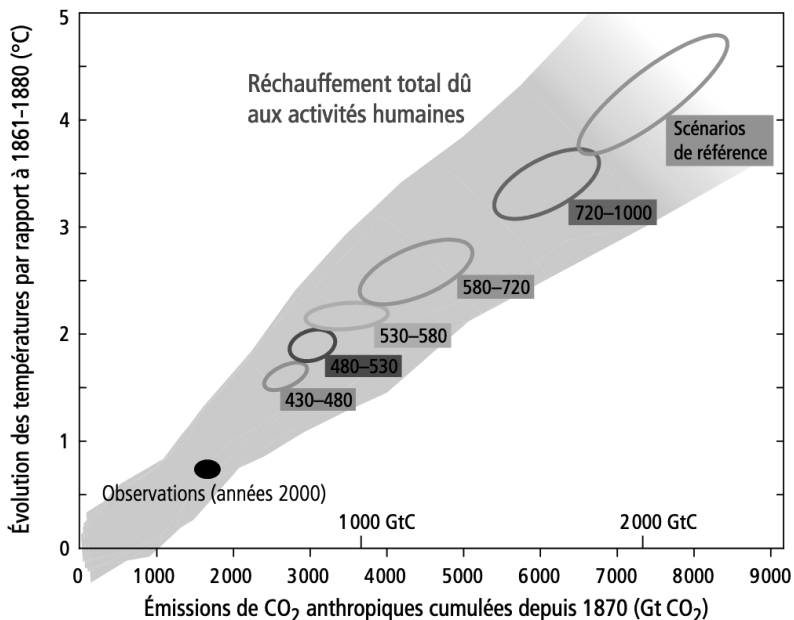


Figure 2 – Des émissions de CO₂ cumulées à l'augmentation de température.

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.

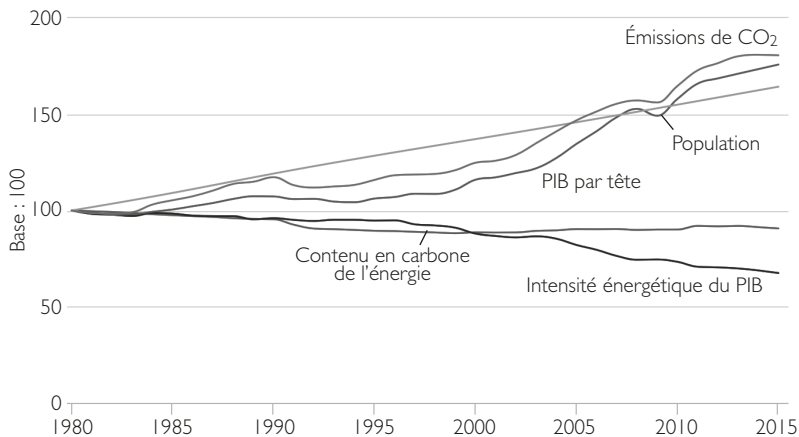


Figure 3 – L'identité de Kaya au niveau mondial (1980-2015).

Source : The Shift Project Database.