

# **Jouer avec les chiffres du climat : une approche par budget carbone**

*J. Treiner*

*Résumé : La conférence internationale sur le climat qui se tiendra à Paris en décembre 2015 doit actualiser les objectifs de réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Le but est souvent exprimé sous la forme : maintenir l'augmentation de la température moyenne de la Terre en dessous de 2°C par rapport à l'ère pré-industrielle. Cette limite sera pourtant nécessairement dépassée, compte tenu à la fois de la trajectoire d'émissions que suit l'humanité, et de l'inertie des systèmes énergétiques. Il apparaît aussi clairement que, si aucune politique de réduction des émissions n'est adoptée, on ne peut compter sur l'épuisement des ressources fossiles pour limiter la dérive climatique.*

Depuis la réunion internationale de Copenhague de décembre 2009, quinzième Conférence of Parties (COP15), un certain nombre de pays se sont engagés sur l'objectif de ne pas dépasser un réchauffement moyen de la surface de la Terre de 2°C. Cette valeur, obtenue à la suite de négociations extrêmement difficiles entre 26 pays seulement (notamment sans l'UE) n'a pas de caractère contraignant, mais c'est le seul objectif chiffré qui sert depuis lors de référence internationale.

Comment apprécier cet objectif, à la veille de la COP21 à Paris en décembre 2015 ?

Les perspectives de réduction mondiale des émissions de gaz à effet de serre (GES) sont souvent exprimés sous la forme : "diviser par deux les émissions mondiales d'ici 2050". Cette façon de faire a l'avantage de la simplicité, mais elle ne dit rien de ce qui compte vraiment du point de vue climatique, à savoir : *quelle quantité totale de carbone dans l'atmosphère ne faut-il pas dépasser pour limiter le réchauffement de la planète à telle ou telle valeur ?* Désignons par le terme de *budget carbone* cette quantité. La question peut donc se reformuler ainsi : quel *budget carbone* faut-il considérer, et quelle trajectoire d'émissions envisageons-nous, qui permette de ne pas dépasser une augmentation de température donnée ?

Dans le dernier rapport du GIEC, publié en 2013, quatre ensemble de trajectoires d'émissions sont envisagées :

Emissions de carbone (GtC/an)

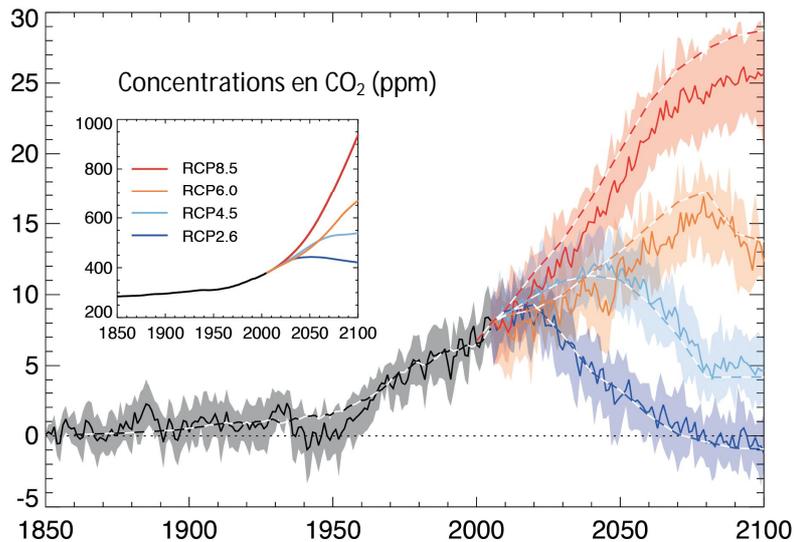


Fig. 1 : Trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre (GES) envisagées dans le dernier rapport du GIEC (AR5). Les indications RCP2.6, ..., RCP8.6 correspondent à divers forçages radiatifs atteints en 2100 : 2.6  $W/m^2$ , ..., 8.6  $W/m^2$ . Un forçage radiatif représente la différence, au niveau du sommet de la troposphère, du rayonnement reçu du soleil et émis par le système Terre, différence générée par l'augmentation de la concentration en GES. Un forçage radiatif positif tend à réchauffer l'atmosphère. L'encadré à gauche donne la correspondance en terme de concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère (d'après le Résumé Technique du Groupe de Travail I (WGI)).

A ces trajectoires sont associées les concentrations, en ppm de CO<sub>2</sub>, jusqu'à l'horizon temporel 2100 (encadré en haut à gauche de la figure). Notons que seules les trajectoires en bleu foncé conduisent à un budget global déterminé, puisque les émissions vers la fin du siècle deviennent légèrement négative (au moyen de techniques de capture et stockage du gaz carbonique). La valeur atteinte est environ 420 ppm. Pour les autres trajectoires, les concentrations limites ne sont pas indiquées : les émissions ne s'annulent pas en 2100. En ce qui concerne les températures moyennes, elles sont données dans la figure suivante, également extraite du rapport du GIEC :

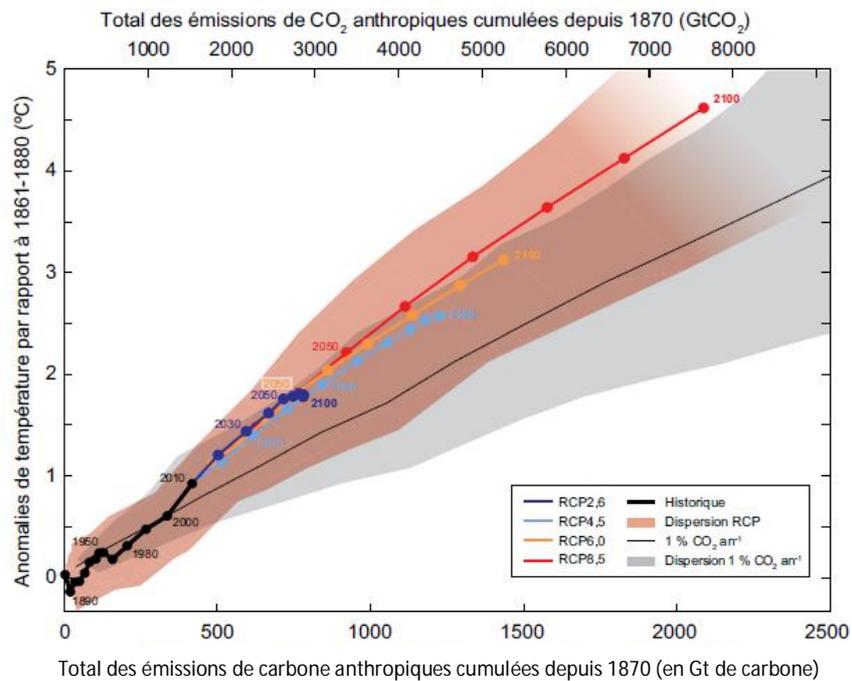


Fig. 2 : Augmentation de température, par rapport à 1870, atteinte en 2100 selon les quatre ensemble de trajectoires d'émission de la Fig. 1

Comme on s'y attend, la courbe en bleu foncé, correspondant à la trajectoire d'émissions la plus optimiste, se termine en 2100 avec une pente nulle, ce qui indique une stabilisation de l'anomalie de température à une valeur proche de 2°C. Il s'agit là du scénario qui correspond à l'accord signé à Copenhague. En revanche, les autres courbes se terminent avec une pente positive : l'anomalie de température continue d'augmenter au delà du 21<sup>ème</sup> siècle.

Dans ce qui suit, je voudrais argumenter les trois conclusions suivantes :

1. Le scénario optimiste n'est plus d'actualité, car il n'est plus réalisable.
2. Les scénarios les plus pessimistes, notamment en rouge dans la Fig. 1, ne sont pas réalistes, car ils supposent des ressources extractibles en combustibles fossiles bien au delà de ce que les géologues indiquent.
3. Mais si nous ne faisons rien, les réserves de fossiles sont suffisantes pour que la concentration en gaz à effet de serre atteigne plus de 800 ppm, ce qui devrait entraîner une augmentation de la température moyenne d'environ 5°C.

Par simplicité, nous allons raisonner dans la suite seulement sur le gaz carbonique, et considérer que l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère est uniquement d'origine anthropique. En procédant ainsi, nous ne tenons pas compte des GES qui risquent d'être émis naturellement du fait du réchauffement climatique. Le permafrost contient en effet des stocks très importants de carbone organique. Le dégel va entraîner une activité de microorganismes qui vont soit le transformer en CO<sub>2</sub>, soit en méthane + CO<sub>2</sub>, selon les organismes impliqués. De plus, nous ne tiendrons pas compte des gaz à effet de serre résultant de l'agriculture et du changement

d'utilisation des sols. Leur contribution *annuelle* est loin d'être négligeable aujourd'hui, mais leur contribution à l'effet de serre *global* demeure réduite (quelques pourcents).

*Notons que, dans les rapports du GIEC, les émissions sont parfois exprimées en Gigatonne de carbone (GtC), parfois en Gt de gaz carbonique (GtCO<sub>2</sub>) - ce qui ne facilite pas toujours la lecture. Nous avons présenté ici les figures originales avec les deux unités, qui se déduisent l'une de l'autre par le facteur 44/12, rapport de la masse molaire du CO<sub>2</sub> à celle du carbone. Les concentrations dans l'atmosphère sont exprimées en partie par million (ppm).*

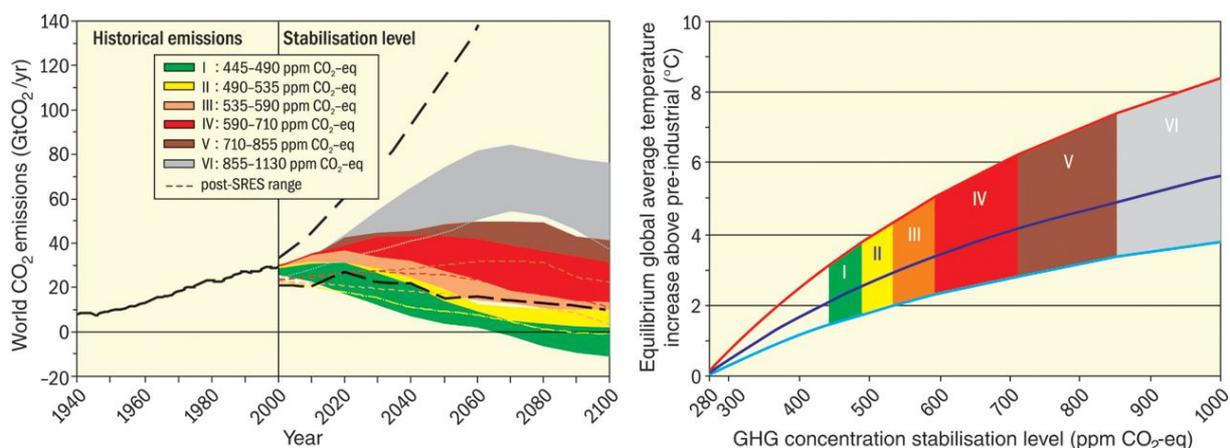
## 1. Pourquoi la perspective d'une augmentation de température de 2°C n'est-elle plus d'actualité ?

La figure 2 indique que la concentration totale de CO<sub>2</sub>, dans le scénario optimiste, est limitée à environ 800 GtC. C'est le budget global dont nous partons. Pour savoir combien nous pouvons encore émettre pour atteindre cette valeur, il faut déterminer combien nous avons émis de carbone jusqu'aujourd'hui.

La concentration historique en CO<sub>2</sub> était de 280 ppm, elle est aujourd'hui de 400 ppm. Nous avons donc rajouté 120 ppm. Quelle masse de carbone cela représente-t-il ?

La masse de l'atmosphère étant de  $5 \times 10^{18}$  kg (pression x surface terrestre), 1 ppm de CO<sub>2</sub> représente 2 GtC (un millionième de la masse de l'atmosphère, pondérée par le rapport des masses molaires moyennes du carbone et de l'air). Les 120 ppm anthropiques représentent donc 240 GtC. Mais comme seulement la moitié du gaz carbonique que nous émettons s'accumule dans l'atmosphère (l'autre moitié étant pour une part dissoute par les océans et pour l'autre part absorbée par un accroissement de la photosynthèse), nous avons émis 480 GtC. Il reste donc, pour atteindre 800 GtC, un peu plus de 300 GtC. Nous allons à présent calculer diverses trajectoires d'émission correspondant à ce budget global.

Il est utile, auparavant, de reproduire une figure du rapport de 2007, qui met en regard les trajectoires d'émission et les températures d'équilibre correspondantes.



Alors que la figure 2 montre les températures à l'horizon temporel de 2100, celles de la figure 3 sont des températures *asymptotiques*, lorsque le système climatique est parvenu à l'équilibre. Par exemple, l'augmentation de température correspondant à une concentration en équivalent CO<sub>2</sub> de 450 ppm est de 2 °C, alors que le réchauffement observé aujourd'hui n'est que de 0,8°C. L'effet d'un forçage radiatif met plusieurs décennies, voire plusieurs siècles, à se stabiliser complètement.

#### Détermination des trajectoires d'émission.

Soit  $P$  le taux annuel d'émission,  $Q$  la quantité de carbone émise jusqu'à une certaine date, et  $Q_{max}$  le budget global ( $P$  est donc la dérivée discrétisée de  $Q$ , avec un pas de temps de 1 an).

Lorsque  $Q$  est petit devant  $Q_{max}$ , on peut raisonnablement supposer que  $P$  est proportionnel à  $Q$  (le développement initial de l'usage des combustibles fossiles est tel que plus on en a extrait, plus on est capable d'en extraire, en raison même du développement technique qu'ils permettent). C'est aussi ce que l'on constate empiriquement :

$$P = tQ$$

Mais lorsque  $Q$  s'approche de  $Q_{max}$ ,  $P$  doit tendre vers 0. L'expression la plus simple qui satisfait ces deux conditions est la suivante (équation logistique) :

$$P = tQ \left( 1 - \frac{Q}{Q_{max}} \right)$$

Pour généraliser un peu les formes possibles, nous allons introduire un paramètre supplémentaire, et écrire finalement :

$$P = tQ \left( 1 - \frac{Q}{Q_{max}} \right)^\alpha$$

On considèrera dans la suite deux valeurs :  $\alpha = 1$  et 0,5.

Le calcul de la trajectoire d'émission se mène de la façon suivante : on détermine  $t$  par ajustement sur la valeur de  $Q$  la plus récente, et on progresse vers le futur selon l'algorithme :

$$Q(n) = Q(n-1) + P(n-1)$$

$$P(n) = tQ(n) \left( 1 - \frac{Q(n)}{Q_{max}} \right)^\alpha$$

Ces équations se programment en trois minutes sur un tableur.

Pour  $\alpha = 1$ , on obtient l'évolution suivante :

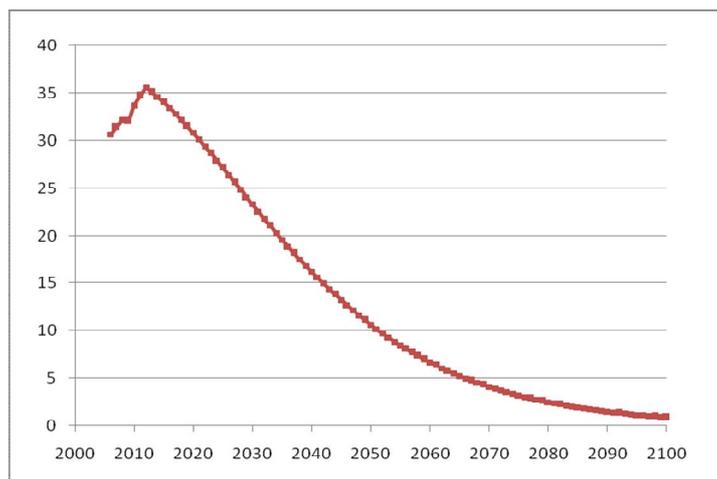


Fig. 4 : Trajectoire d'émissions (en GtCO<sub>2</sub>/an) pour un budget global de 800 GtC

Les premiers points correspondent aux émissions des années 2006 à 2012<sup>1</sup>. En ce qui concerne les émissions futures, la différence avec la figure du GIEC - le brusque changement de pente - tient à ce que nous n'avons pas considéré, ici, la possibilité d'émissions négatives vers la fin du siècle. Nous pouvons le faire en autorisant un budget global plus "généreux", disons 960 GtC (dans ce cas, nous pouvons émettre dans le futur autant que nous avons émis dans le passé). Dans ce cas, la trajectoire d'émissions devient la suivante :

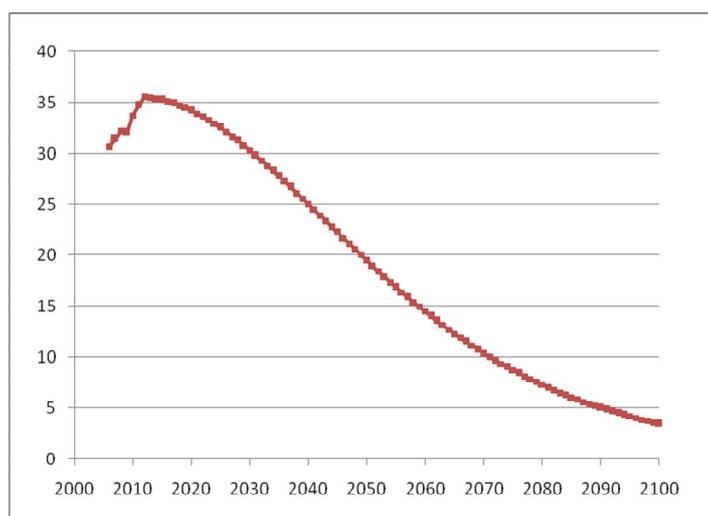


Fig. 5 : Trajectoire d'émissions (en GtCO<sub>2</sub>/an) pour un budget global de 960 GtC

Cette trajectoire ressemble maintenant bien à la trajectoire considérée par le GIEC (courbe bleu foncé de la Fig.1), sauf à la fin du siècle, trajectoire que nous avons qualifié d'optimiste : les émissions cessent d'augmenter dès demain, et elles sont divisées par environ 2 d'ici 2050 (cela "explique" la formulation courante de la contrainte climatique).

<sup>1</sup> Les données se trouvent sur le site : [http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751\\_2010.ems](http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2010.ems)

Les deux trajectoires ci-dessus semblent bien irréalistes : les systèmes énergétiques ont une inertie telle que, même si des décisions significatives devaient être prises à l'échelle mondiale, il est difficile d'envisager de telles discontinuités dans la variation des émissions. Pour simuler une évolution moins brusque, on peut changer la forme fonctionnelle en choisissant d'autres valeurs de la puissance  $\alpha$ . Par exemple, pour  $\alpha=0,5$ , on obtient la trajectoire suivante :

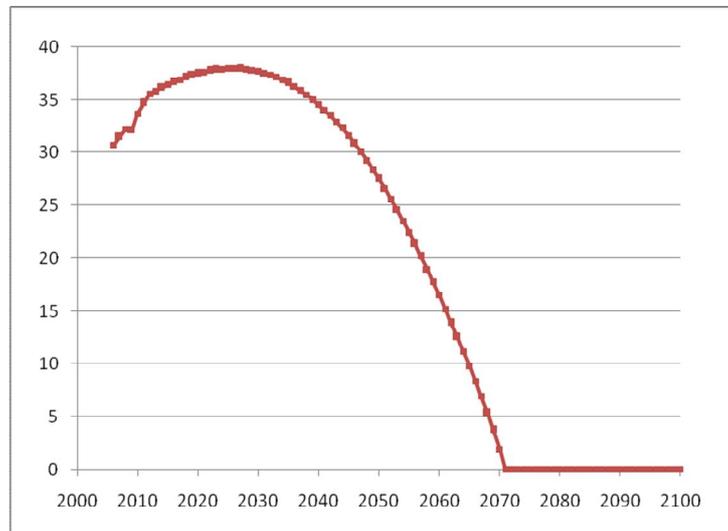


Fig. 6 : Trajectoire d'émissions (en GtCO<sub>2</sub>/an) pour un budget global de 960 GtC, tenant compte d'une certaine inertie des systèmes énergétiques

Evidemment, le prix à payer pour le fait de continuer d'augmenter les émissions jusqu'à 2030 est de les réduire plus drastiquement par la suite : à partir du milieu du siècle, il faut être capable de diminuer mondialement les émissions au rythme d'environ 5% par an. Est-ce possible ? Dans l'histoire récente, de tels taux ont été enregistrés par deux fois. La première, pendant une dizaine d'années, à la suite de la chute de l'URSS et de l'effondrement économique qui en est résulté. La seconde, lors de la construction de la filière nucléaire en France. Il est bien improbable que de telles évolutions puissent avoir lieu à l'échelle mondiale - en tout cas, on ne la voit pas se dessiner, chaque Etat gérant son mix énergétique en fonction de ses objectifs de développement propres.

Remarquons pour finir que si la technologie de capture et stockage du carbone n'est pas mise en place, un budget global de 960 GtC correspond à une concentration en GES de  $280 + 2 \times 120$ , soit 520 ppm. L'augmentation de température résultant serait alors de l'ordre de 3 degrés. Mais si, comme la discussion ci-dessus le suggère, une telle évolution semble très difficile à mettre en place - dans ce qu'elle suppose de coopération internationale - c'est que **l'humanité est résolument engagée vers une augmentation de température de 4 degrés.**

Il nous reste à explorer à présent l'autre limite : puisque les ressources en combustibles fossiles sont limitées (la Terre est un système fini !), que se passe-t-il si nous ne faisons rien pour diminuer nos émissions de GES ?

## 2. Que se passera-t-il si on ne fait rien ?

Il est intéressant de calculer le potentiel d'émission correspondant à la totalité des réserves estimées d'hydrocarbures. Les taux d'émission sont de 4,4 tCO<sub>2</sub>/tep pour le charbon, 3,1 tCO<sub>2</sub>/tep

pour le pétrole et 2,1 tCO<sub>2</sub>/tep pour le gaz. En prenant des valeurs moyennes pour les réserves exploitables, disons 1000 Gtep de charbon, 400 Gtep de pétrole et 300 Gtep de gaz<sup>2</sup>, le potentiel d'émission de gaz carbonique est de

$$1000 \times 4,3 + 400 \times 3,1 + 300 \times 2,1 = 6170 \text{ GtCO}_2$$

qui viennent s'ajouter à ce que nous avons déjà émis, soit  $480 \times 44/12 = 1760 \text{ GtCO}_2$  (le rapport 44/12 est égal au rapport des masses molaires du gaz carbonique et du carbone).

Le potentiel d'émission futur est donc 3,5 fois ce que nous avons déjà émis. La concentration finale en CO<sub>2</sub>, si nous émettions tout ce qui est disponible, se fixerait alors à  $400 + 3,5 \times 120 = 820$  ppm.

D'après la Fig. 3, partie droite, qui tient compte de la contribution des autres gaz à effet de serre, l'augmentation correspondante de la température moyenne serait de plus de 5°C : on ne peut donc pas compter sur l'épuisement des réserves pour régler la dérive climatique !

Il est possible de préciser la trajectoire des émissions, à partir d'un modèle calqué sur celui utilisé ci-dessus pour le budget carbone, mais où cette fois  $P$  représente la consommation annuelle d'une ressource fossile,  $Q$  la quantité déjà extraite et  $Q_{max}$  la réserve exploitable<sup>3</sup>

L'extrapolation pour le pétrole et le gaz ne pose pas de problème. En revanche, les données de production pour le charbon montrent une nette rupture de pente vers l'an 2000, due à la consommation chinoise. Dès lors, l'extrapolation peut se faire de deux façons distinctes :

- soit on considère qu'il s'agit d'une fluctuation passagère, et l'on extrapole en faisant passer une seule courbe par les données,
- soit on considère que la Chine a une logique de développement telle qu'elle exploitera ses réserves de charbon (environ 150 Gtep) à son rythme propre, auquel cas on extrapole les données en superposant deux courbes, l'une pour la Chine, l'autre pour le reste du monde.

On obtient les résultats de la Fig. 7. Dans la suite, nous utiliserons l'extrapolation représentée sur la partie droite de la figure.

---

<sup>2</sup> Les spécialistes distinguent les ressources - ce qu'il y a dans le sol - des réserves - ce qu'il est envisageable d'extraire du sol. Parmi les réserves, ils distinguent les réserves prouvées - probabilité d'extraction de 90% - et les réserves probables - probabilité d'extraction de 50%. Ce qui compte, du point de vue économique, ce sont les réserves, et non les ressources : d'une part, l'énergie récupérable lors de la combustion doit être supérieure à celle mise en jeu dans la récupération, et d'autre part, le réservoir peut bien être immense, c'est la taille du robinet qui importe. Les valeurs utilisées ici se situent dans la moyenne des valeurs données par les géophysiciens. Ce sujet mériterait un article à lui-seul.

<sup>3</sup> Il s'agit du modèle que Marion K. Hubbert avait utilisé en 1956 pour estimer la date du pic de production pétrolier des USA. Sa "prédiction", 1971, fut vérifiée avec une précision étonnante.

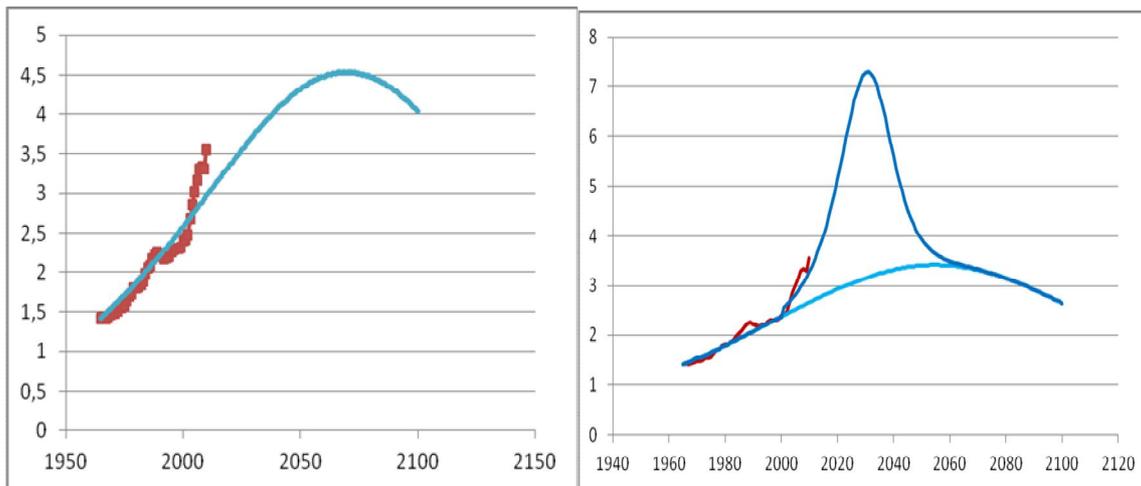


Fig. 7 : Deux façons d'extrapoler la consommation mondiale annuelle de charbon (en Gtep/an) : à gauche, ajustement avec un seul pic; à droite, superposition d'un pic pour la consommation chinoise, et d'un pic pour la consommation du reste du monde.

On entend et on lit souvent que nous aurions assez de charbon pour quelques siècles. Cette estimation est obtenue en divisant les réserves estimées par le taux d'extraction de l'année. Effectivement, avec une réserve de 1000 Gtep et un taux d'extraction annuel de 3,5 Gtep/an (qui est le taux actuel), on obtient environ 300 ans. On mesure ici combien cette estimation est trompeuse : d'une part, le taux d'extraction ne peut être considéré comme constant, et d'autre part, ce qui compte, du point de vue économique, c'est la position du pic de production. Passé ce pic, la demande n'ayant pas de raison de diminuer, des tensions apparaissent sur les marchés de l'énergie, et le système devient instable, en tout cas, plus difficilement prédictible.

La figure 8 ci-dessous montre les trois extrapolations obtenues pour le pétrole, le gaz et le charbon, ainsi que leur somme (en rouge). Pour le charbon, on a pris la courbe de droite de la Fig. 7. L'axe vertical doit se lire en Gtep/an.

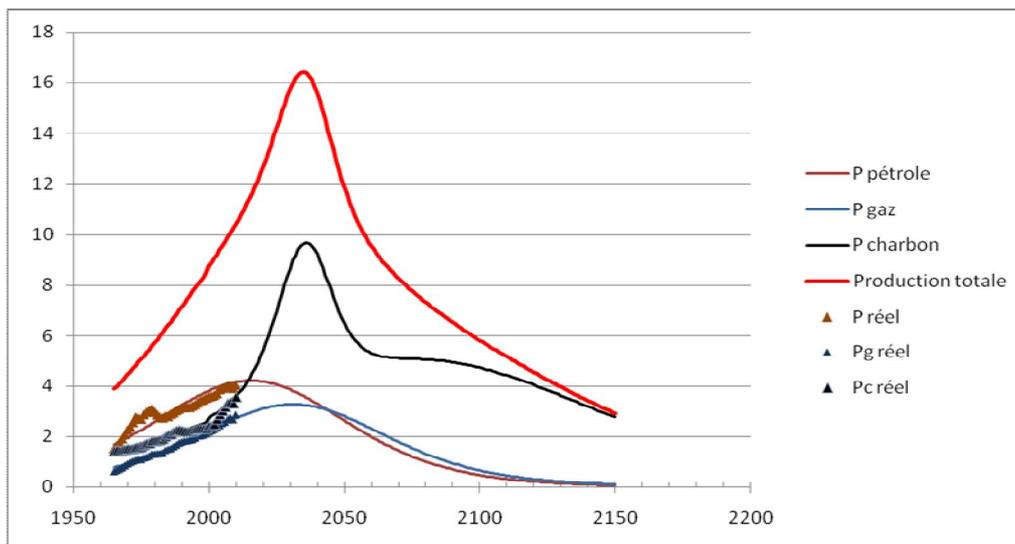


Fig. 8 : *Extrapolation des taux d'extraction des ressources fossiles, en Gtep/an.*  
*La courbe rouge représente la somme des trois autres.*

Les émissions de gaz carbonique qui résultent des consommations de la Fig. 8 sont représentées Fig. 9 :

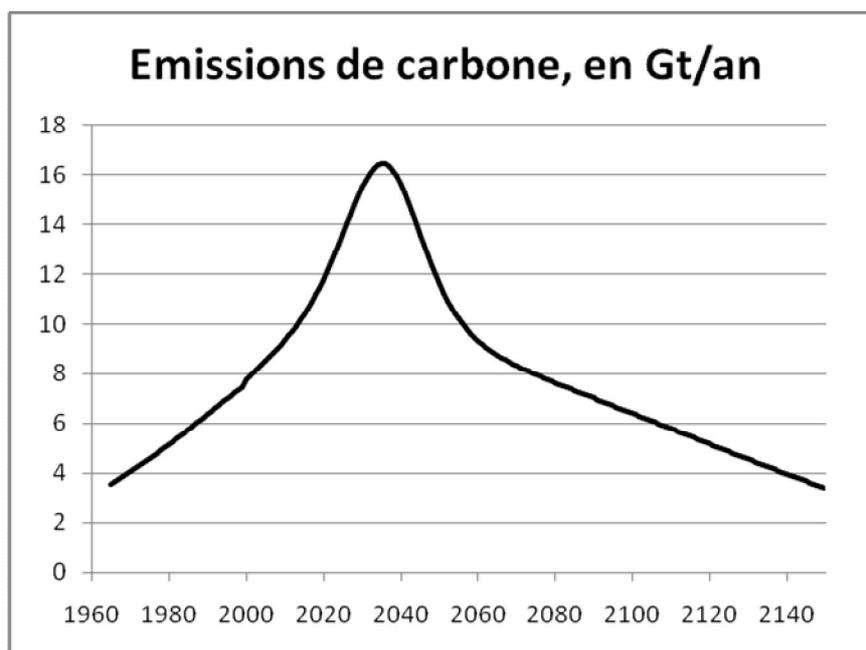


Fig. 9 : *Emissions annuelles de carbone (en Gt/an)*  
*correspondant aux consommations de la Fig. 8*

La Fig. 9 montre que les émissions de carbone culminent à environ 16 GtC/an en 2030<sup>4</sup> puis diminuent pour atteindre environ 6 GtC/an en 2100. Cette courbe est à comparer à la plage en rouge de la Fig. 1 et à la zone en grisé de la Fig. 3 (dans ce dernier cas, il faut multiplier l'échelle des ordonnées par le rapport des masses molaires du carbone et du gaz carbonique, soit  $12/44 = 1/3,67$ ). On constate que les trajectoires les plus émissives considérées par le GIEC, qui culminent à 22 GtC/an par en 2070 et sont encore de 16 GtC/an en 2100 dans le rapport de 2007, et qui culminent à 29 GtC/an en 2100 dans le scénario RCP8.5, sont bien au delà de ce que les géologues anticipent comme possible. Il conviendrait donc de préciser le statut et l'intérêt, pour la réflexion, du scénario RCP8.5 : si les réserves de combustibles fossiles ne semblent pas suffisantes pour l'étayer, peut-être s'agit-il d'anticiper la possibilité d'exploitation de réserves non encore identifiées (clathrates de mer), ou de simuler l'effet de la fonte du permafrost ?

L'évolution de la concentration totale en gaz carbonique dans l'atmosphère, associée à la trajectoire d'émission de la Fig. 9 est montrée Fig. 10

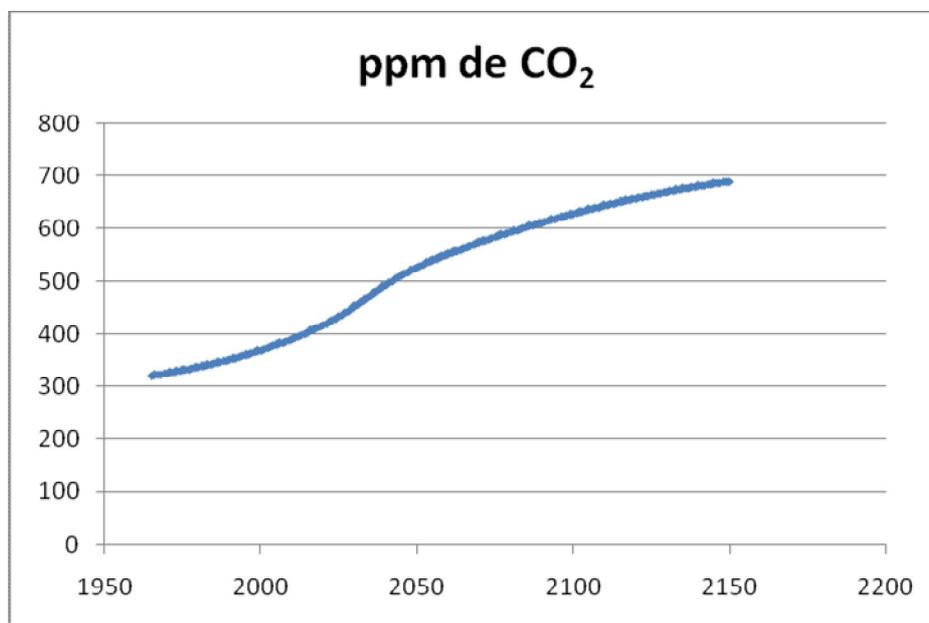


Fig. 10 : Evolution de la concentration de l'atmosphère en gaz carbonique correspondant aux courbes d'émission de la Fig. 9. La valeur asymptotique est de 820 ppm.

<sup>4</sup> Alors que je terminais cet article, un accord entre les USA et la Chine a été rendu public le 12 novembre 2014. La Chine y évoque un pic de ses émissions de ses gaz à effet de serre vers 2030. Cette date correspond au pic de la production de charbon envisagé ici (cf. Fig.7, partie droite). Les négociateurs chinois ont-ils tracé cette courbe ?! Toujours est-il que, dans la mesure où le charbon représente la principale ressource d'énergie primaire fossile en Chine, la proposition ne représente aucun "effort" particulier, puisque, ainsi que nous l'avons vu, elle correspond à l'utilisation de l'ensemble de la ressource charbonnière chinoise sans restriction aucune.

## En guise de conclusion

L'objectif de limiter l'augmentation de température moyenne de l'atmosphère terrestre à 2°C semble bien appartenir au passé : pour s'y tenir, il faudrait que les émissions mondiales de GES se stabilisent dès aujourd'hui puis diminuent régulièrement jusqu'à s'annuler vers la fin du siècle - voire devenir négative. Les pays riches sont bien parvenus à stabiliser leurs émissions, voire à les diminuer légèrement dans certains cas, mais les combustibles fossiles continuent d'être à la base de leur énergie primaire. Quant aux pays émergents, leur développement reste pour l'essentiel fondé sur les combustibles fossiles, qu'ils consomment en quantité croissante. On ne voit pas comment ces tendances pourraient se renverser rapidement. A budget carbone total fixé, tout délai dans la mise en place de politiques de réduction des émissions implique des taux de réduction dans le futur qui semblent contradictoires avec l'inertie intrinsèque et économique des systèmes énergétiques.

Si rien n'est fait, les réserves disponibles en combustibles fossiles sont largement suffisantes pour faire dériver la température moyenne au delà de 5°C, toutefois les scénarios d'émission les plus alarmistes envisagés par le GIEC paraissent irréalistes : en tout cas, les quantités de carbone émises dans ces trajectoires ne semblent pas compatibles avec les estimations des réserves données par les géologues. Les économistes ont généralement tendance à considérer que la question des réserves ne se pose pas : d'une part, l'évolution des prix ajusterait automatiquement offre et demande et, d'autre part, les diverses ressources seraient immédiatement substituables. Les géologues, pour leur part, insistent sur les quantités physiques. Pour le prochain rapport du GIEC, une meilleure collaboration entre économistes et géologues paraît donc souhaitable.

Pour l'heure, il faut sans doute se préparer à un monde 4 degrés plus chaud...

Je remercie Jean Poitou et François-Marie Bréon pour leur lecture attentive de cet article, pour leurs corrections et suggestions.

*Le lecteur intéressé par la présente approche pourra aussi se reporter à l'article de Thomas Stocker, "Closing doors of climate targets", publié dans Science Express, novembre 2012. T. Stocker, de l'Université de Berne, est co-président du Groupe de travail I du GIEC.*

Jacques Treiner,  
ancien professeur à Paris-6,  
professeur à Sciences Po Paris  
novembre 2014