

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

Jacques Treiner (jtreiner@orange.fr)

Ancien professeur à l'Université Paris 6, professeur à Sciences Po Paris

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 préindustrielle. 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 dans des limites gérables.

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 coprésident du Groupe de travail I du GIEC.

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

Depuis la réunion internationale de Copenhague de décembre 2009, quinzième Conférence des 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'Union européenne) 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 exprimées 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 ?* À cette quantité correspond une *valeur cumulée des émissions anthropiques*, tenant compte du fait qu'environ la moitié seulement de ces émissions s'accumule dans l'atmosphère. Désignons par le terme de *budget carbone* cette valeur cumulée des émissions. 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 ensembles de trajectoires d'émissions sont envisagés (fig. 1).

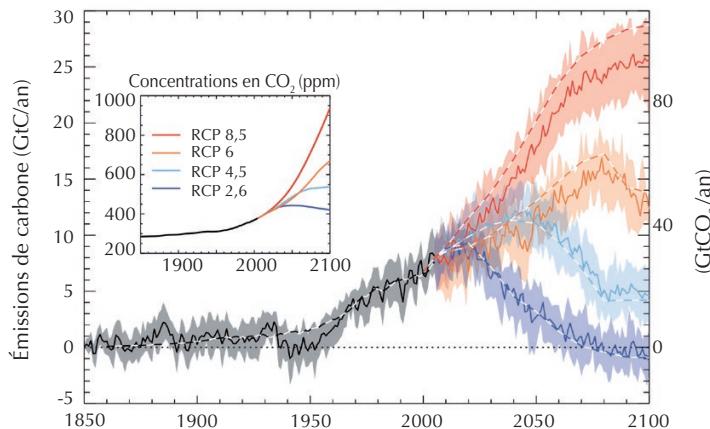
À ces trajectoires sont associées les concentrations, en ppm (parties par million) de CO₂, jusqu'à l'horizon temporel 2100 (encadré à gauche de la figure 1). Notons que seules les trajectoires en bleu foncé conduisent à un budget global déterminé, puisque dans ce cas les émissions vers la fin du siècle deviennent légèrement négatives

(au moyen de techniques de capture et stockage du gaz carbonique) : la valeur alors atteinte est environ 420 ppm de CO₂. 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 2, également extraite du rapport du GIEC.

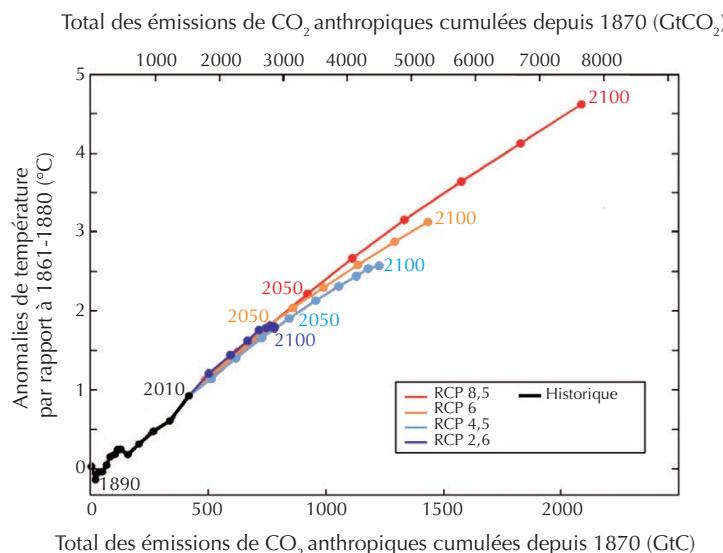
Comme on s'y attend, la courbe en bleu foncé de la figure 2, correspondant à la trajectoire d'émissions la plus optimiste, se termine en 2100 avec une pente nulle, ce qui indique une stabilisation de l'anomalie de température à une valeur proche de +2°C. Il s'agit là du scénario qui correspond à l'accord 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^e siècle.

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

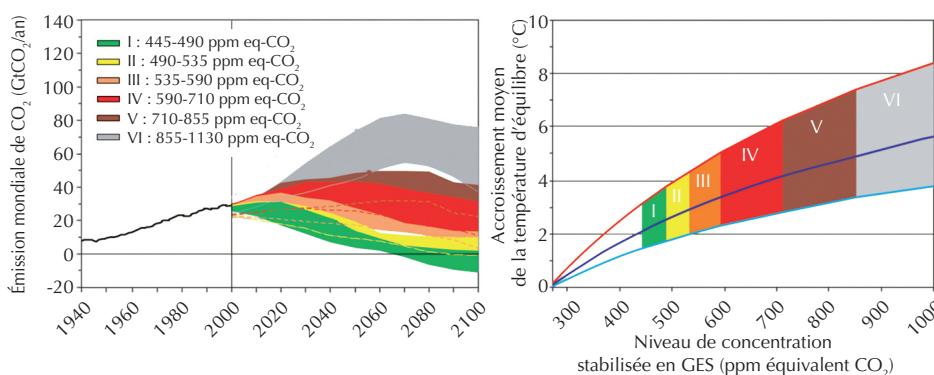
1. Le scénario optimiste n'est plus d'actualité, car il n'est plus réalisable.
2. Les scénarios les plus pessimistes, notamment celui en rouge dans la figure 1, ne sont pas réalistes, car ils supposent des ressources extractibles en combustibles fossiles bien au-delà de ce que les géologues indiquent.
3. Mais si nous ne faisons rien, les réserves de combustibles fossiles sont suffisantes pour qu'à terme 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⁽¹⁾ contient en effet des stocks très importants de carbone organique. Le dégel va entraîner



1. Trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre (GES) envisagées dans le dernier rapport du GIEC (AR5). Les indications RCP 2,6... RCP 8,5 correspondent à divers forçages radiatifs atteints en 2100 : 2,6 W/m²... 8,5 W/m². Un forçage radiatif⁽²⁾ représente la différence, au niveau du sommet de la troposphère, entre le rayonnement reçu du Soleil et celui 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 CO₂ de l'atmosphère (d'après le Résumé Technique du Groupe de Travail I (WGI)).



2. Augmentation de température, par rapport à 1870, atteinte en 2100, selon les quatre ensembles de trajectoires d'émissions de la figure 1.



3. Trajectoires d'émissions mondiales de CO₂ et températures d'équilibre correspondantes, d'après le rapport GIEC 2007. Partie gauche : taux historique d'émission de CO₂ de 1940 à 2000, et taux d'émission envisagé de 2000 à 2100 suivant différentes trajectoires. Partie droite : températures moyennes d'équilibre correspondantes ; en abscisse : concentration en équivalent CO₂ (GES : gaz à effet de serre), pour chacun des six ensembles de trajectoires de la figure de gauche ; cette concentration est aujourd'hui d'environ 450 ppm (dont 400 ppm de CO₂).

une activité de microorganismes qui vont le transformer soit en CO₂, soit en méthane + CO₂, 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 émission 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 gigatonnes de carbone (GtC), parfois en Gt de gaz carbonique (GtCO₂) – 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 CO₂ à celle du carbone. Les concentrations dans l'atmosphère sont exprimées en ppm.

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

La figure 2 indique que le total des émissions de CO₂ depuis 1870, dans le scénario optimiste, est limité 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'à aujourd'hui.

La concentration historique (antérieure à 1870) de l'atmosphère en CO₂ 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 5×10^{18} kg (pression × surface terrestre), 1 ppm de CO₂ 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 à émettre. Nous allons à présent calculer diverses trajectoires d'émission correspondant à ce budget global.

Il est utile, auparavant, de reproduire une figure du rapport GIEC 2007, qui met en regard les trajectoires d'émission et les températures d'équilibre correspondantes (fig. 3).

>>>

>>>

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 d'équilibre correspondant à une concentration en équivalent CO₂ 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⁽²⁾ 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).

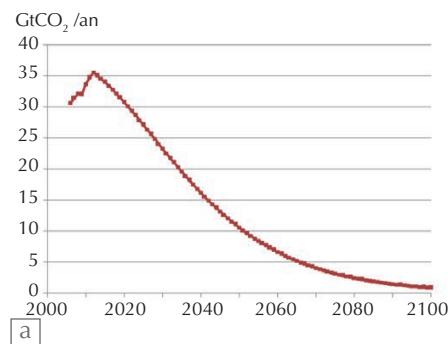
Lorsque Q est petit devant Q_{max} , on peut raisonnablement supposer que P est proportionnel à Q (le développement initial de l'usage des combustibles fossiles est tel que plus on en a extrait, plus on est capable d'en extraire, en raison même du développement technique qu'ils permettent). C'est aussi 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) : $P = tQ [1 - Q/Q_{max}]$.

Pour généraliser un peu les formes possibles, nous allons introduire un paramètre supplémentaire α , et écrire finalement : $P = tQ [1 - Q/Q_{max}]^\alpha$.

On considérera 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 : $Q(n) = Q(n-1) + P(n-1)$, $P(n) = tQ(n) [1 - Q(n)/Q_{max}]^\alpha$.



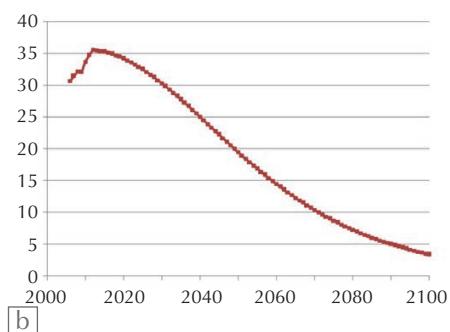
4. Trajectoires d'émissions (en GtCO₂ par an) calculées pour : (a) un budget global de 800 GtC ; (b) un budget global de 960 GtC ; et (c) un budget global de 960 GtC, tenant compte d'une certaine inertie des systèmes énergétiques.

Ces équations se programmant en trois minutes sur un tableur. Pour $\alpha = 1$ et un budget carbone de 800 GtC, on obtient l'évolution montrée sur la figure 4a. Les premiers points correspondent aux émissions des années 2006 à 2012⁽³⁾. En ce qui concerne les émissions futures, la différence avec la trajectoire du GIEC (courbe bleu foncé de la figure 1) – le brusque changement de pente en 2013 – 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 (nous pouvons alors émettre dans le futur autant que nous avons émis dans le passé). Dans ce cas, la trajectoire d'émissions devient celle de la figure 4b.

Cette trajectoire ressemble maintenant bien (sauf à la fin du siècle) à la trajectoire considérée par le GIEC (fig. 1), trajectoire que nous avons qualifiée 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).

En fait, les deux trajectoires décrites ci-dessus sont irréalistes : les systèmes énergétiques ont une inertie telle que, même si des décisions significatives étaient 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 α . Par exemple, pour $\alpha = 0,5$, on obtient la trajectoire de la figure 4c.

Évidemment, le prix à payer pour le fait de continuer d'augmenter les émissions jusqu'à 2030 (fig. 4c) 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 ?



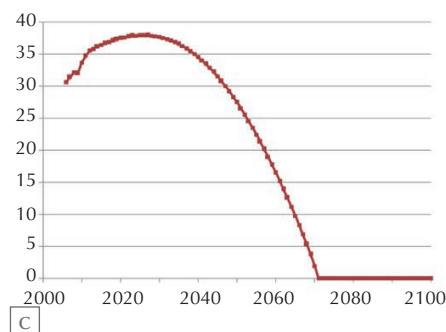
Dans l'histoire récente, de tels taux ont été enregistrés par deux fois. La première, pendant une dizaine d'années, à la suite de la chute de l'URSS et de l'effondrement économique qui en est résulté. La seconde, en France, lors de la construction de la filière nucléaire. Il est bien improbable que de telles évolutions puissent avoir lieu à l'échelle mondiale – en tout cas, on ne les voit pas se dessiner, chaque État gérant son « mix » énergétique en fonction de ses objectifs de développement propres.

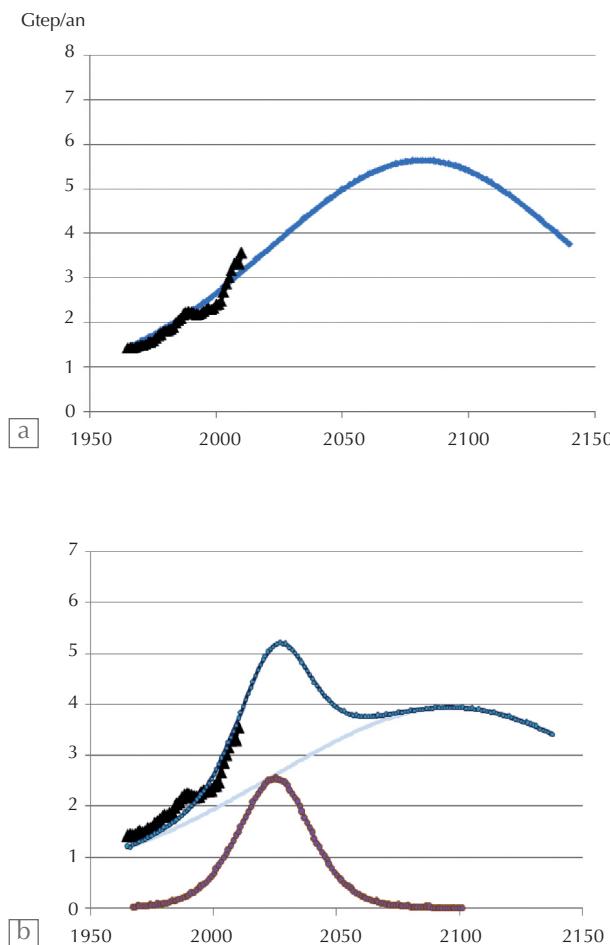
Remarquons pour finir que si la technologie de capture et stockage du carbone n'est pas mise en place, un budget global de 960 GtC correspond à une concentration finale en GES de 280 + 2×120, soit 520 ppm. L'augmentation de température résultant serait alors de l'ordre de 3 degrés. Mais si, comme la 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 ?

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

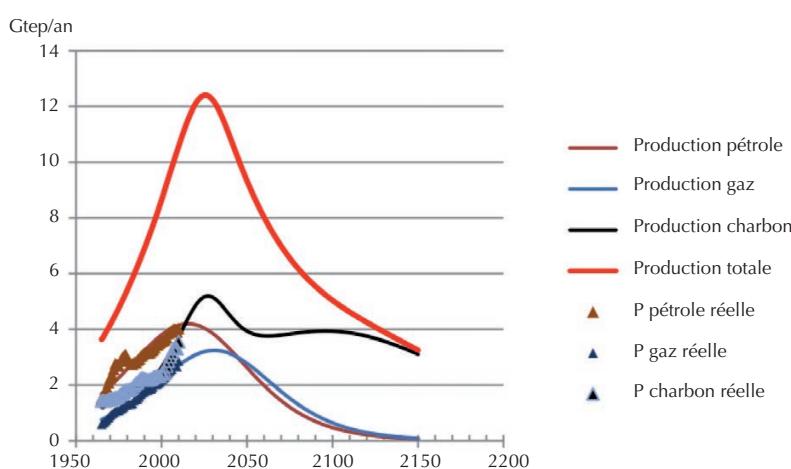
Il est intéressant de calculer le potentiel d'émission correspondant à la totalité des réserves estimées de charbon et d'hydrocarbures. Les taux d'émission sont de 4,3 tCO₂/tep⁽⁴⁾ pour le charbon, 3,1 tCO₂/tep pour le pétrole et 2,1 tCO₂/tep pour le gaz. En prenant des valeurs moyennes pour les réserves exploitables⁽⁵⁾, disons 850 Gtep de charbon, 400 Gtep de pétrole et 300 Gtep de gaz





5. Deux façons d'extrapoler la consommation mondiale annuelle de charbon (en Gtep par an) au-delà de l'année 2010.

- (a) Ajustement avec un seul maximum.
- (b) Superposition d'un pic étroit (courbe marron) pour la consommation chinoise, et d'un pic large (courbe bleu clair) pour la consommation du reste du monde. Le résultat est la courbe bleu foncé. Notons qu'il s'agit là de modélisations schématiques : la Chine est déjà importatrice de charbon.



6. Extrapolation de la production annuelle de ressources fossiles, en Gtep par an. La courbe rouge représente la somme des trois autres. Les points représentent les productions réelles jusqu'en 2010.

(incluant le gaz de schiste), le potentiel d'émission de gaz carbonique est de $850 \times 4,3 + 400 \times 3,1 + 300 \times 2,1 = 5525 \text{ GtCO}_2$, desquels nous avons déjà émis $480 \times 44/12 = 1760 \text{ GtCO}_2$ (le rapport 44/12 est égal au rapport des masses molaires du gaz carbonique et du carbone).

Le potentiel d'émission futur est donc égal à $5525 - 1760 = 3765 \text{ GtCO}_2$, soit 2,14 fois ce que nous avons déjà émis. La concentration finale en CO_2 , si nous émettions tout ce qui est disponible, se fixerait alors à $400 + 2,14 \times 120 = 657 \text{ ppm}$.

D'après la figure 3, partie droite, qui tient compte de la contribution des autres gaz à effet de serre, l'augmentation correspondante de la température moyenne serait d'environ 4°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 exploitables⁽⁶⁾.

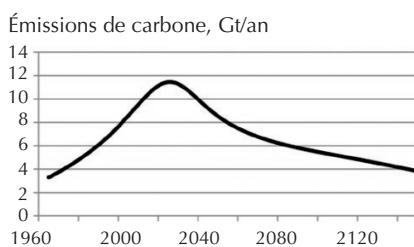
L'extrapolation pour le pétrole et le gaz ne pose pas de problème. En revanche, les données de production pour le charbon montrent une nette rupture de pente vers l'an 2000 (points noirs de la figure 5), due à la consommation chinoise. Dès lors, l'extrapolation peut se faire de deux façons distinctes :

- 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 figure 5. Dans la suite, nous utiliserons l'extrapolation représentée sur la figure 5b.

On entend et on lit souvent que nous aurions assez de charbon pour quelques siècles. Cette estimation est obtenue en divisant les réserves présumées par le taux d'extraction de l'année. Effectivement, avec une réserve de 850 Gtep et un taux d'extraction annuel de 3,5 Gtep/an (qui est le taux actuel), on obtient environ 240 ans. Il faut mesurer 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,





7. Émissions annuelles de carbone (en Gt par an), correspondant aux consommations de la figure 6.

»»

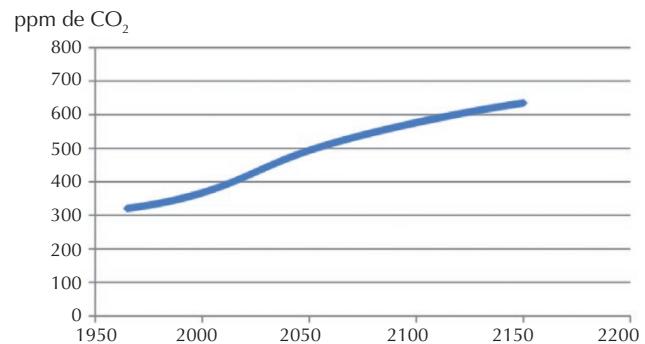
c'est la position du pic de production. Passé ce pic, la demande n'ayant pas de raison de diminuer, des tensions apparaissent sur les marchés de l'énergie, et le système devient instable, en tout cas plus difficilement prédictible.

La figure 6 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 la figure 5b.

Les émissions de gaz carbonique qui résultent des consommations de la figure 6 sont représentées sur la figure 7.

La figure 7 montre que les émissions de carbone culminent à environ 11,5 GtC/an en 2030⁽⁷⁾, puis diminuent pour atteindre environ 5 GtC/an en 2100. Cette courbe est à comparer à la plage en rouge de la figure 1 (scénario RCP8.5) et à la zone en gris de la figure 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 en 2070 et sont encore de 18 GtC/an en 2100 dans le rapport de 2007, et qui culminent à 25 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⁽¹⁾ ?

L'évolution de la concentration totale en gaz carbonique dans l'atmosphère, associée à la trajectoire d'émission de la figure 7, est montrée sur la figure 8.



8. Évolution de la concentration de l'atmosphère en gaz carbonique, correspondant à la courbe d'émission de la figure 7. La valeur asymptotique est de 660 ppm.

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 négatives. 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 s'inverser rapidement. À 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 carbonés 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 quatre degrés plus chaud... ■

(1) Permafrost (ou pergélisol) : sol gelé en permanence, en particulier dans les hautes latitudes. Son dégel pourrait entraîner de forts dégagements de gaz à effet de serre (CH_4 et CO_2).

(2) Pour une discussion sur le forçage radiatif, voir J. Poitou, *Reflets de la physique* 33 (2013) 28–33.

(3) Les données se trouvent sur le site : http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1731_2010.ems

(4) tep : tonne d'équivalent pétrole, unité d'énergie qui correspond au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole « moyenne », soit 41,86 GJ (*Wikipédia*).

(5) 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. Par ailleurs, la prise en compte du pétrole de schiste ne devrait modifier la position du pic de production que de quelques années, sans permettre de compenser la diminution de la production de pétrole conventionnel.

(6) 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 « prédition », 1971, fut vérifiée avec une précision étonnante.

(7) 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 gaz à effet de serre vers 2030. Cette date correspond au pic de la production de charbon envisagé ici (cf. fig. 5b). 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.