

Quel rôle pour les réductions d'émission de méthane dans la lutte contre le changement climatique ?

Résumé

Divers arguments ont été avancés pour justifier d'une action rapide de lutte contre le changement climatique par une réduction des émissions de méthane. S'inscrivant dans une approche multigaz de réduction des émissions, ils nécessitent tous de définir une équivalence entre méthane et dioxyde de carbone. Dans cet article, nous discutons les bases physiques et économiques pour estimer une telle équivalence de manière quantitative. Bien que celle-ci reste dépendante d'un paramètre qui implique un jugement de valeur sur l'échelle de temps la plus pertinente pour le changement climatique, nous montrons qu'il est difficile d'attribuer au méthane un poids qui soit très différent du poids basé sur le pouvoir de réchauffement global à 100 ans qui est utilisé actuellement dans le cadre du protocole de Kyoto.

Abstract

Which role for methane emissions reduction in climate change mitigation policies?

Various arguments have been put forward to justify a rapid action to mitigate climate change through reductions in methane emissions. As part of a multi-gas emission reduction approach this requires defining an equivalence between methane and carbon dioxide. In this article, we discuss the physical and economical basis for a quantitative estimate of such an equivalence. Although this equivalence depends on a parameter which involves a value judgement on the most appropriate timescale for climate change, we show that it is difficult to justify a methane weight that is much different from the 100-year global warming potential that is currently used in the framework of the Kyoto protocol.

Olivier Boucher

Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, Royaume-Uni

Le méthane, de composition chimique CH_4 (figure 1), est l'un des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre. Sa concentration a augmenté de manière continue depuis le début de l'ère industrielle, passant de 715 ppbv en 1750 à 1774 ppbv en 2005 (encadré ci-dessous). L'efficacité radiative du méthane est plus élevée que celle du dioxyde de carbone (CO_2), si bien que le méthane est le deuxième gaz à effet de serre anthropique malgré la faible augmentation de sa concentration atmosphérique (environ 1 ppmv en valeur absolue). Le méthane est en effet responsable d'un forçage radiatif de $0,48 \text{ W.m}^{-2}$ en 2005, soit un peu moins d'un tiers du forçage de $1,66 \text{ W.m}^{-2}$ pour le dioxyde de carbone (Forster et al., 2007).

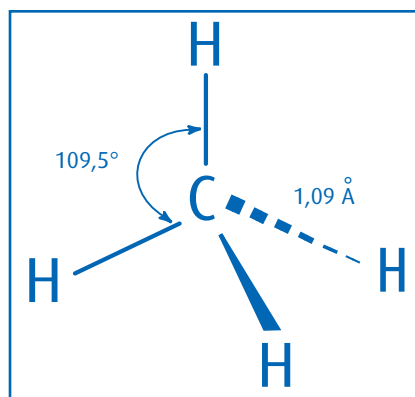


Figure 1 – La molécule de méthane CH_4 .

Les sources de méthane (environ 600 millions de tonnes de CH_4 par an) sont à la fois naturelles et anthropiques. Parmi les sources naturelles, on retrouve les émissions provenant des zones humides (100-250 millions de tonnes par an) et les termites (environ 20 millions de tonnes par an). Les principales sources anthropiques proviennent de l'industrie (environ

100 millions de tonnes par an), des décharges (40-80 millions de tonnes par an) et de l'agriculture (60-100 millions de tonnes par an pour les rizières et 80-120 millions de tonnes par an pour l'élevage du bétail). Le principal puits de méthane est dû à la réaction avec le radical OH dans la troposphère (88 % du puits total). La destruction de méthane dans la stratosphère (7 % du puits total) et la consommation de méthane par les bactéries méthanotrophes dans les sols (5 % du puits total) permettent de fermer le bilan de méthane. La durée de vie de ce gaz dans l'atmosphère est de l'ordre de dix ans.

Le méthane fait partie du panier de six gaz à effet de serre couvert par le protocole de Kyoto. Selon van Vuuren et al. (2006), la réduction des émissions de gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone est très intéressante, car elle permet de réduire la facture des politiques climatiques de 30 à 40 %. Pour ce faire, un poids est attribué aux gaz à effet de serre par comparaison avec le dioxyde de carbone. Cela permet d'établir une équivalence entre les différents gaz à effet de serre en vue de traiter globalement leur réduction.

Dans le protocole de Kyoto, c'est le **pouvoir de réchauffement global (PRG)** à 100 ans, sur lequel nous reviendrons plus loin dans cet article,

ppbv : partie par milliard en volume. Un gaz a une concentration de 1 ppbv s'il est présent dans l'atmosphère à hauteur d'une molécule sur un milliard.
ppmv : partie par million en volume. Un gaz a une concentration de 1 ppmv s'il est présent dans l'atmosphère à hauteur d'une molécule sur un million.

qui donne cette équivalence. Les objectifs de réduction des émissions sont alors fixés en termes de **tonnes équivalent CO₂**, libre ensuite aux pays signataires de répartir leur effort sur les différents gaz comme ils l'entendent. C'est ainsi qu'une tonne de CH₄ équivaut à 21 tonnes équivalent CO₂. Si la tonne de CO₂ vaut 10 euros sur la bourse d'échange de crédits carbone, la tonne de CH₄ vaut 210 euros. Le marché va réaliser les réductions d'émissions là où elles coûtent le moins cher. Avec un poids du méthane de 21, on peut donc se permettre un coût marginal de réduction par tonne de méthane 21 fois plus élevé que pour le CO₂.

Quel poids attribuer au méthane ?

Deux écoles s'affrontent sur l'importance des réductions des émissions de méthane dans la lutte contre le changement climatique.

La première pense qu'il faut réduire les émissions de méthane dès maintenant et dans une large mesure car, compte tenu de la relative courte durée de vie du méthane, cela conduira à une diminution rapide du forçage radiatif par ce gaz et donc à un ralentissement du changement climatique. Le même argument s'applique à d'autres espèces à courte durée de vie comme l'ozone troposphérique, autre gaz à effet de serre, et le carbone-suie, un type d'aérosol qui contribue à réchauffer le climat (Hansen et al., 2000). Bien sûr, ces objectifs plus ambitieux sur le méthane n'excluent pas qu'il faille aussi réduire les émissions de dioxyde de carbone. Cette logique plaide en faveur d'un poids plus élevé pour le méthane.

La seconde école estime au contraire qu'il est plus important de se focaliser sur des réductions d'émissions de dioxyde de carbone car, en raison de sa longue durée de vie – plus d'un siècle –, une grande partie du CO₂ émis aujourd'hui sera encore présent dans l'atmosphère du siècle prochain. Dans la mesure où la lutte contre le changement climatique a un coût et que la société ne

peut consacrer qu'une partie de la richesse commune au problème du changement climatique, il est plus important de réduire au plus vite les émissions de CO₂, voire d'investir dans la recherche et développement afin de pouvoir réduire à moindre coût les émissions de CO₂ un peu plus tard. Il sera toujours temps de réduire les émissions de méthane dans quelques décennies car, du fait de sa courte durée de vie, la concentration atmosphérique de méthane répondra rapidement aux réductions des émissions.

Alors qui de la première ou de la seconde école a raison ? En filigrane, on voit que les deux écoles de pensée portent un jugement de valeur sur l'imminence des impacts du changement climatique.

Pour la première, il est important de ralentir le changement climatique dès maintenant, soit pour réduire les impacts attendus dans les décennies qui viennent, soit pour enclencher une dynamique vertueuse dans la lutte sur le changement climatique. Toutefois, si l'on admet que la lutte contre le changement climatique aura un coût et que la société ne peut dépenser qu'une somme d'argent finie sur ce problème (car il faut traiter les autres problèmes comme la pauvreté, la santé, le chômage...), augmenter le poids du méthane diminuera mécaniquement l'effort qui sera consenti sur le CO₂.

Pour la seconde, le changement climatique est un problème à long terme (il convient par exemple de ne pas excéder un réchauffement de 2 ou 3 °C au cours de ce siècle et des siècles suivants) et l'on cherche le moyen optimal d'arriver à cet objectif. Cela justifie un poids

moindre pour le méthane à ce jour, mais en contrepartie le poids du méthane devra progressivement être ajusté à la hausse au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'objectif maximal de changement climatique à ne pas dépasser. Manne et Richels (2001) disposent d'un modèle intégré économie-climat qui permet de calculer la trajectoire optimale de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour un objectif climatique donné. Ils ont montré que, pour un objectif de stabilisation à 2 °C, le poids du méthane augmente d'une valeur de 5-10 au début du XXI^e siècle à une valeur de 40-50 à la fin du XXI^e siècle. De manière similaire, van Vuuren et al. (2006) ont montré que les modèles économie-climat qui optimisent dans le temps le poids de méthane simulent des réductions de méthane moins fortes dans les cinquante prochaines années, que les modèles où le poids du méthane est fixé à la valeur de son PRG à 100 ans (figure 2). Cependant, si l'on adopte aussi un objectif de limitation de la vitesse du réchauffement climatique à 0,2 °C par décennie, Manne et Richels (2001) montrent que le poids du méthane prend une valeur autour de 20-30 pendant tout le XXI^e siècle.

Le pouvoir de réchauffement global

Mais revenons maintenant à ce fameux pouvoir de réchauffement global. Par définition, le **PRG absolu** d'un gaz est égal au forçage radiatif cumulé généré par une émission ponctuelle d'un kilogramme de ce gaz. Le cumul s'effectue

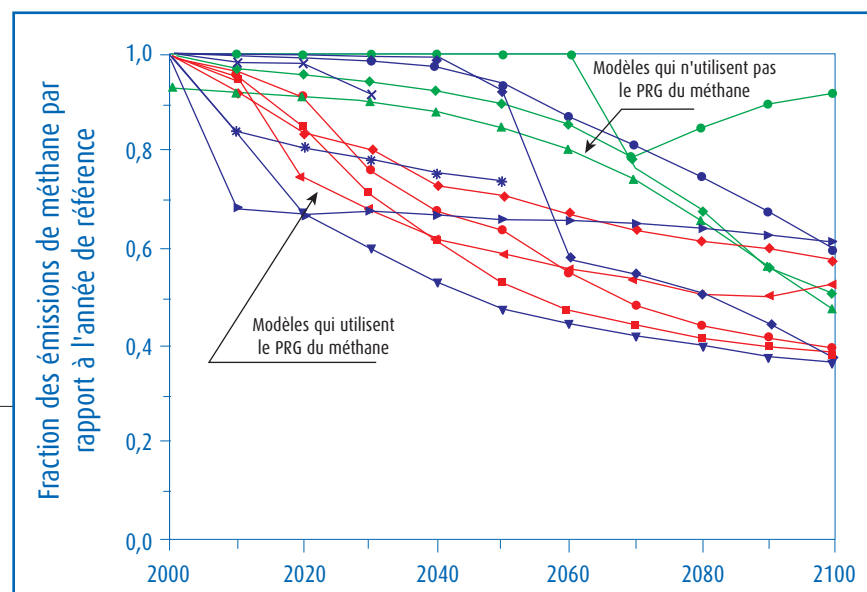


Figure 2 - Courbes de réduction des émissions de méthane simulées par divers modèles intégrés économie-climat pour stabiliser le forçage radiatif anthropique à 4,5 W.m². Les modèles qui utilisent le PRG pour calculer les taux d'équivalence entre les gaz simulent des réductions de méthane plus rapides que ceux qui calculent ces taux par optimisation de la trajectoire. D'après van Vuuren et al. (2006). © Elsevier

jusqu'à un horizon temporel (T) qui est généralement pris égal à 100 ans. Une définition mathématiquement équivalente est que le PRG absolu correspond au forçage radiatif au bout d'une période T pendant laquelle ce gaz est émis de façon constante (Dufresne, 2009). Le PRG absolu d'un gaz a donc pour unité le $W.m^{-2}.kg^{-1}.an$. Le **PRG d'un gaz** est égal à son PRG absolu normalisé par celui du CO_2 . Il est donc fonction de son efficacité radiative, de sa durée de vie dans l'atmosphère et de l'horizon temporel choisi pour l'intégration temporelle. Les PRG du méthane pour des horizons temporels de 20, 100 et 500 ans sont respectivement de 72, 25⁽¹⁾ et 7 (Forster et al., 2007). De manière générale, les gaz qui ont une durée de vie plus courte que le CO_2 ont des PRG qui décroissent avec l'horizon temporel et, inversement, les gaz qui ont une durée de vie plus longue que celle du CO_2 voient leurs PRG augmenter avec l'horizon temporel. Un horizon temporel de 100 ans s'est vite imposé comme étant la norme (en particulier dans le cadre du protocole de Kyoto) car il représente la durée typique sur laquelle le problème du changement climatique se pose, mais il est clair que ce choix est arbitraire. On peut remarquer que la totalité des gaz à effet de serre d'intérêt climatique ont des PRG à 100 ans plus grands que l'unité en raison de la très faible efficacité radiative du CO_2 par unité de masse. En résumé, le PRG est une mesure du forçage radiatif intégré généré par une émission ponctuelle d'un gaz à effet de serre, mesure égale au forçage radiatif à la fin d'une période donnée pendant laquelle le gaz à effet de serre a été émis de façon constante.

La notion de PRG soulève néanmoins de nombreux problèmes :

- il dépend de l'horizon temporel qui résulte d'un choix arbitraire ;
- il ne prend pas en compte des variations futures de la composition chimique de l'atmosphère dans l'intégration temporelle du forçage radiatif ;
- il n'y a pas de lien clair entre le concept abstrait de forçage radiatif et un objectif concret de lutte contre le changement climatique (IPCC, 2009).

(1) Le pouvoir de réchauffement global à 100 ans pour le méthane a été estimé à 21 dans le deuxième rapport d'évaluation du Giec (valeur utilisée par le protocole de Kyoto), puis réévalué à 23 dans le troisième rapport d'évaluation et à 25 dans le quatrième rapport d'évaluation (Forster et al., 2007).

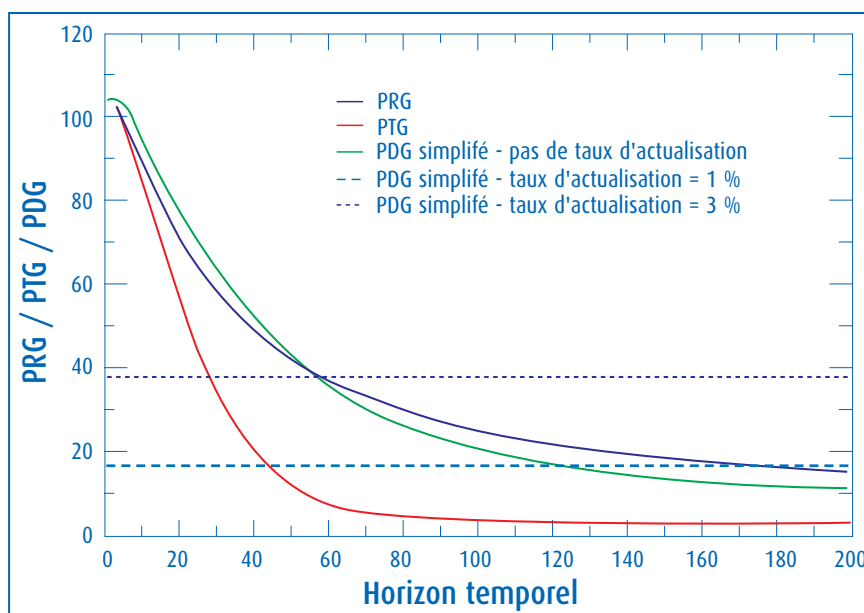


Figure 3 - Évolution, en fonction de l'horizon temporel, des métriques pour calculer le poids du méthane : PRG, PTG, PDG sans taux d'actualisation, PDG avec taux d'actualisation de 1 % et 3 % (sans taux d'actualisation, les intégrations dans l'équation 3 sont limitées à l'horizon temporel et PRG, PTG et PDG sans taux d'actualisation en dépendent ; cette dépendance disparaît pour des taux d'actualisation non nuls). Les PDG ont été calculés avec un modèle simplifié.

C'est pourquoi Shine et al. (2005, 2007) ont défini une nouvelle métrique, qu'ils ont appelée **pouvoir de changement de température global (PTG)**.

Le pouvoir de changement de température global

Le **PTG absolu** d'un gaz mesure le changement de température en moyenne globale à une échéance temporelle donnée induit par une émission ponctuelle de ce gaz (unité $K.kg^{-1}$). Le **PTG d'un gaz** est égal à son PTG absolu normalisé par celui du CO_2 . Shine et al. ont montré que, pour des espèces à courte durée de vie comme le méthane, le PTG prend des valeurs plus élevées que le PRG pour les horizons temporels courts, mais inversement des valeurs moins élevées que le PRG pour les horizons temporels longs. Cela est dû au fait que le système climatique perd la mémoire d'une perturbation radiative initiale, si bien que, pour un gaz à courte durée de vie comme le méthane, l'impact climatique dû à une émission ponctuelle est concentré sur les premières décennies suivant cette émission. Cela est illustré sur la figure 3. Pour le méthane, les PTG à 20, 50 et 100 ans valent respectivement 57, 12 et 4 (Fuglestad et al., 2009). Pour une espèce à très courte

durée de vie comme l'ozone troposphérique ou les aérosols de carbone-suie, la dépendance du PTG avec l'horizon temporel est encore plus importante (Boucher et Reddy, 2008). Il faut souligner cependant que les valeurs du PTG dépendent aussi des hypothèses faites sur la vitesse à laquelle l'océan profond absorbe et restitue l'énergie qui provient du déséquilibre radiatif initial. En ce sens, le PTG est une métrique dont le calcul est soumis à plus d'incertitudes que celui du PRG.

Une théorie unificatrice

La multiplication des métriques pour mesurer l'équivalence des gaz à effet de serre s'avère être un frein à la négociation et à un accord politique sur une politique de réduction des émissions. Tol et al. (2008) ont présenté un cadre unificateur des différentes métriques du changement climatique. D'un point de vue économique, on peut procéder, soit à une **analyse coût-bénéfice** qui cherche à minimiser le coût total du changement climatique en incluant à la fois les coûts d'atténuation (réduction des émissions), d'adaptation et les dommages résiduels liés au changement climatique (après atténuation et adaptation), soit à une **analyse coût-efficacité** qui cherche à minimiser uniquement les coûts d'atténuation pour atteindre un objectif de changement climatique à ne pas dépasser. Tol et al. ont montré que l'analyse

coût-efficacité est un cas particulier de l'analyse coût-bénéfice où les coûts des impacts du changement climatique sont nuls sous l'objectif climatique et infinis au-delà, si bien que l'on peut, dans le cadre de cet article, se concentrer sur l'analyse coût-bénéfice. Celle-ci se traduit par la recherche de la stratégie de réduction d'émission qui minimise le coût total du changement climatique, soit mathématiquement par la recherche de la quantité

$$\min_{R_1, R_2, \dots, R_j} \sum_{t=0}^{\infty} \frac{L(R_1(t), R_2(t), \dots, R_j(t), D(t))}{(1+\rho)^t} \quad (1)$$

où L est la fonction coût total au temps t (exprimé en année) qui dépend des réductions d'émissions $R_i(t)$ sur les différents gaz $i = 1$ à j et des impacts du changement climatique $D(t)$. La constante ρ est un **taux d'actualisation** sur lequel nous reviendrons.

On peut, chaque année, obtenir le poids relatif entre deux gaz en calculant le rapport des coûts respectifs de la réduction de chacun des gaz pour la stratégie d'émission optimale obtenue. En prenant le CO_2 comme référence, ce poids relatif est appelé **pouvoir de dommage global (PDG ; Global Damage Potential en anglais)** du gaz. Le poids relatif évolue en fonction du temps. Tol et al. montrent que le PRG est un cas particulier du PDG sous les hypothèses d'un horizon temporel fini, d'un taux d'actualisation nul, de concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre n'évoluant pas dans le temps et de coûts des impacts du changement climatique proportionnels au forçage radiatif.

De fait, cette analyse permet de mieux comprendre les limites du PRG. Elle fait en particulier apparaître l'hypothèse implicite que les impacts du changement climatique sont proportionnels au forçage radiatif. Cette hypothèse n'est pas vérifiée. D'une part, il y a un décalage dans le temps entre forçage radiatif et changement de température – un problème qui a déjà été identifié par Dufresne (2009) – et, d'autre part, les impacts du changement climatique ne sont pas forcément une fonction linéaire du changement de température global. Le seul cumul du forçage radiatif pour approcher les dommages du changement climatique est donc quelque peu curieux. Par ailleurs, l'absence de scénario sous-jacent et l'hypothèse de concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre constantes dans le temps posent également problème.

À quoi sert le taux d'actualisation ?

Mais qu'en est-il de ce taux d'actualisation que l'on a ignoré jusque-là ? Le taux d'actualisation permet d'exprimer le fait que l'on accorde plus d'importance au futur proche qu'au futur lointain. Plus il est grand et plus il « écrase » le poids du long terme, ce qui est parfois interprété comme allant à l'encontre des principes de précaution et de solidarité intergénérationnelle. Plus précisément, le taux d'actualisation permet d'exprimer une préférence pour le présent, qui fait partie de la nature humaine, mais aussi le fait que la croissance économique et les progrès technologiques feront de l'atténuation et l'adaptation au changement climatique un problème moindre dans le futur lointain. Lecocq et Hourcade (2004) ont montré que la technique d'actualisation reste un passage obligé dans le processus de décision socio-économique. Mathématiquement, le taux d'actualisation autorise une sommation infinie dans l'équation 1, ce qui permet de s'affranchir en principe du choix arbitraire d'un horizon temporel nécessaire pour le calcul du PRG. Cependant, le choix du taux d'actualisation, même s'il est lié au modèle économique, n'en reste pas moins controversé et dans une certaine mesure arbitraire. On ne tranchera pas ici le débat du choix du taux d'actualisation qui mêle arguments éthiques et économiques (Lecocq et Hourcade, 2004 ; Stern, 2007 ; Weitzman, 2007), mais on peut illustrer simplement ce que l'actualisation implique quand on calcule le poids du méthane.

Pour simplifier, nous considérons un scénario dans lequel l'augmentation de température, $\Delta T(t)$, passe de 1 °C en 2000 à 3 °C en 2100, puis est stabilisée au-delà. La manière dont les dommages du changement climatique doivent être mesurés fait l'objet de nombreuses recherches et il n'y a pas encore de consensus à ce sujet (Warren et al., 2006). Il est cependant habituel de modéliser les dommages comme une fonction quadratique du changement de température :

$$D(t) = \alpha_1 \Delta T(t) + \alpha_2 \Delta T(t)^2 \quad (2)$$

où α_1 et α_2 sont des paramètres qui dépendent de la région et du secteur d'activité. Pour certaines régions, le paramètre α_1 est négatif, ce qui exprime le fait qu'une petite quantité de réchauffement peut être bénéfique. Dans un souci de simplicité, nous prenons α_1 égal à zéro si bien que les dommages du

changement climatique sont proportionnels au carré du changement de température. Ils sont ensuite pondérés par un taux d'actualisation et cumulés sur le temps. On peut alors calculer le poids du méthane selon l'équation

$$\text{PDG} = \frac{\sum_{t=0}^{\infty} [(\Delta T(t) + \delta_{\text{CH}_4}(t))^2 - \Delta T(t)^2] / (1+\rho)^t}{\sum_{t=0}^{\infty} [(\Delta T(t) + \delta_{\text{CH}_4}(t))^2 - \Delta T(t)^2] / (1+\rho)^t} \quad (3)$$

où δ_{CH_4} et δ_{CO_2} sont les changements de température dus à des émissions ponctuelles de 1 kg de CH_4 et de CO_2 (calculés avec un modèle simplifié de climat prenant en compte l'océan profond), ρ est le taux d'actualisation, et t est un indice courant sur les années. L'équation 3 résulte en un PDG pour le méthane de 16 et 38 pour des taux d'actualisation valant respectivement 1 % et 3 % (voir figure 3). Ces valeurs sont à comparer à un PDG à 100 ans sans taux d'actualisation qui vaudrait 21 pour le scénario considéré (une valeur très proche du PRG à 100 ans). On remarque donc à partir de ces calculs, qui n'ont qu'une valeur illustrative, que la prise en compte d'un taux d'actualisation élevé conduit à augmenter le poids du méthane en attachant moins d'importance sur le long terme et donc sur les impacts du CO_2 .

Mais l'actualisation n'est pas un argument miracle pour les tenants d'une action rapide visant à réduire les émissions de méthane. Il y a en effet un revers de la médaille à un taux d'actualisation élevé car cela conduit aussi à déplacer l'équilibre entre atténuation et adaptation au changement climatique vers moins d'atténuation, plus d'adaptation et sans doute plus de dommages résiduels. En effet, le coût de l'atténuation porte sur le court terme pour des bénéfices qui se font sentir sur le long terme, tandis que le coût de l'adaptation, au contraire, se paiera à plus long terme compte tenu de l'inertie du cycle du carbone et du système climatique. L'argument qui consiste à attribuer un poids moins élevé pour le méthane ne signifie pas qu'il ne faille pas agir maintenant pour réduire ce gaz, mais qu'il faut avant tout garder un certain équilibre entre réductions des émissions de CO_2 et de méthane.

Réduction ponctuelle et réduction pérenne

La question se pose aussi de savoir comment quantifier les réductions d'émissions pérennes par rapport aux

réductions ponctuelles. Dessus et al. (2008) relèvent, à juste titre, que le PRG est valable pour une émission ponctuelle à un instant donné et qu'une réduction pérenne des émissions de méthane conduit à une plus grande réduction du forçage radiatif cumulé en rapport au CO₂ à une échéance donnée que ne l'indique le PRG. Dufresne (2009) a montré avec un modèle climatique simplifié que la réduction de température due à une réduction pérenne d'une source de méthane est équivalente à celle obtenue par une réduction pérenne d'une source équivalente de CO₂ au sens du PRG. Cela est dû au fait que le PRG mesure aussi bien le réchauffement moyen sur une période en réponse à une émission ponctuelle de gaz que le réchauffement à la fin de la période en réponse à une émission constante de gaz (Dufresne, 2009).

Par ailleurs, dans le cadre d'un système de régulation des émissions de type « **plafonnement et échange** » (cap and trade en anglais) tel qu'on le connaît en Europe, le marché n'échange que des émissions ponctuelles (annuelles) de gaz à effet de serre, et une réduction des émissions, si elle est pérenne, permet d'engranger des bénéfices année après année, jusqu'à ce que le plafond d'émissions, révisé à la baisse, n'exige d'autres réductions. Le marché prend donc déjà en compte le caractère pérenne de la réduction bien que les équivalences entre gaz soient établies sur le PRG.

Le problème de comment comptabiliser la pérennité d'une réduction des émissions ne se pose donc véritablement que pour des projets échappant au système « **plafonnement et échange** ». C'est le cas, par exemple, des projets qui rentrent dans le cadre du **mécanisme de développement propre** où il faut trouver une équivalence entre un projet de

réduction pérenne d'émissions dans les pays en voie de développement et les **crédits carbone** des pays industrialisés. Dans ce cas, il convient de comptabiliser les réductions pérennes d'émissions d'une manière qui prenne en compte l'aspect pluriannuel, mais non infini dans le temps, de l'investissement et de la réduction d'émissions.

Finalement, il faut souligner que des résultats récents suggèrent que le PRG du méthane doit être réévalué en raison d'effets indirects qui n'avaient pas été considérés jusque-là. Boucher et al. (2009) démontrent que l'oxydation du méthane en dioxyde de carbone doit être pris en compte dans le calcul des effets du méthane d'origine fossile, ce qui augmente son PRG à 100 ans de 25 à 27. Shindell et al. (2009) estiment par ailleurs que les émissions de méthane contribuent à diminuer les concentrations du radical OH et limitent donc l'oxydation du dioxyde de soufre en aérosols soufrés. Cet effet conduit à diminuer l'impact refroidissant de ce type d'aérosols et donc à réchauffer le climat. Cela augmenterait le PRG du méthane à 100 ans d'environ 10 à 30 %. La molécule de méthane nous donne donc toujours du fil à retordre.

Conclusion

Différentes stratégies, parfois antagonistes, ont été proposées en ce qui concerne la réduction des émissions de méthane dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Nous avons montré ici que le poids relatif à attribuer aux réductions de méthane (relativement au dioxyde de carbone) dépend de la métrique utilisée pour mesurer les impacts radiatifs ou climatiques, de l'objectif politique de lutte contre le changement climatique et, dans une certaine mesure, d'un jugement de

valeur sur l'urgence du problème du changement climatique.

Il existe à la fois des arguments qui justifient un poids du méthane plus élevé que celui donné par son PRG à 100 ans (raccourcissement de l'horizon temporel, prise en compte d'un taux d'actualisation, volonté de limiter la vitesse du réchauffement climatique dans les prochaines décennies) et d'autres qui plaident pour un poids du méthane moins élevé (utilisation du changement de température plutôt que du forçage radiatif comme indicateur pertinent des impacts futurs du changement climatique, coût du changement climatique augmentant de manière quadratique avec le changement de température).

Quelle que soit la métrique utilisée, le poids du méthane reste tributaire d'un paramètre qui implique un jugement de valeur sur l'échelle de temps associée au problème du changement climatique (horizon temporel pour le PRG, taux d'actualisation pour le PDG). On a montré cependant qu'il est difficile de construire un poids pour le méthane qui aille au-delà d'une valeur située autour de 40. On a aussi montré que le poids du méthane doit augmenter au fur et à mesure que l'humanité se rapproche des impacts dangereux du changement climatique ou de l'objectif climatique qu'elle s'est fixée.

Remerciements

Ce travail bénéficie du soutien financier des ministères DECC et Defra (GA01101) du Royaume-Uni au travers de l'« **Integrated Climate Programme** ». L'auteur remercie Jean-Louis Dufresne, Philippe Quirion, Anne Guillaume et deux rapporteurs anonymes pour leurs commentaires qui ont aidé à améliorer ce manuscrit.

Bibliographie

- Boucher O. et M. S. Reddy, 2008 : Climate trade-off between black carbon and carbon dioxide emissions. *Energy Policy*, 36, 193-200, DOI: 10.1016/j.enpol.2007.08.039.
- Boucher O., P. Friedlingstein, B. Collins et K. P. Shine, 2009 : Indirect GWP and GTP due to methane oxidation, *Environ. Res. Lett.*, 4 (044007), DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/044007.
- Dessus B., B. Laponche et H. Le Treut, 2008 : Réchauffement climatique : importance du méthane. *La Recherche*, 417, 46-49.
- Dufresne J.-L., 2009 : L'utilisation du potentiel de réchauffement global pour comparer les émissions de méthane et de dioxyde de carbone. *La Météorologie*, 8^e série, 64, 54-58.
- Forster P. M. de F., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. A. Betts, D. W. Fahey, J. A. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz et R. Van Dorland, 2007 : *Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing*, in Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 129-234.
- Fuglestad J. S., K. P. Shine, T. Berntsen, J. Cook, D. S. Lee, A. Stenke, R. B. Skeie, G. J. M. Velders et I. A. Waitz, 2009 : Transport impacts on atmosphere and climate: metrics. *Atmos. Environ.*, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.044, sous presse.

- **Hansen J., M. Sato, R. Ruedy, A. Lacis et V. Oinas**, 2000 : Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 97, 9875-9880.
 - **IPCC**, 2009 : *Meeting report of the Expert Meeting on the Science of alternative metrics*. [Plattner G.-K., T. F. Stocker, P. Midgley et M. Tignor (eds.)]. IPCC Working Group I. Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, 75 p.
 - **Lecocq F. et J.-C. Hourcade**, 2004 : Le taux d'actualisation contre le principe de précaution ? Leçons à partir du cas des politiques climatiques. *L'Actualité économique*, 80, n°1, 41-65.
 - **Manne A. S. et R. G. Richels**, 2001 : An alternative approach to establishing trade-offs among greenhouse gases. *Nature*, 410, 675-677.
 - **Shindell D. T., G. Faluvegi, D. M. Koch, G. A. Schmidt, N. Unger et S. E. Bauer**, 2009 : Improved attribution of climate forcing to emissions. *Science*, 326, 716-718.
 - **Shine K. P., J. S. Fuglestedt, K. Hailemariam et N. Stuber**, 2005 : Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases. *Climatic Change*, 68, 281-302.
 - **Shine K. P., T. K. Berntsen, J. S. Fuglestedt, R. B. Skeie et N. Stuber**, 2007 : Comparing the climate effect of emissions of short and long lived climate agents. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 1903-1914, DOI: 10.1098/rsta.2007.2050.
 - **Stern N.**, 2007 : *Stern Review on The Economics of Climate Change*. Executive Summary. HM Treasury, London: http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm.
 - **Tol R. S. J., T. K. Berntsen, B. C. O'Neill, J. S. Fuglestedt, K. P. Shine, Y. Balkanski et L. Makra**, 2008 : A unifying framework for metrics for aggregating the climate effect of different emissions. ESRI Working Paper 257, Economic and Social Research Institute, Dublin, Irlande, <http://www.esri.ie/UserFiles/publications/20080924144712/WP257.pdf>.
 - **van Vuuren D. P., J. Weyant et F. de la Chesnaye**, 2006 : Multi-gas scenarios to stabilize radiative forcing. *Energy Economics*, 28, 102-120.
 - **Warren R., C. Hope, M. Mastrandrea, R. Tol, N. Adger et I. Lorenzoni**, 2006 : Spotlighting the impacts functions in integrated assessment. Research report prepared for the Stern Review on the Economics of Climate Change. *Tyndall Centre for Climate Change Research*, Working Paper 91. Résumé disponible sur <http://www.tyndall.ac.uk/content/spotlighting-impacts-functions-integrated-assessments-research-report-prepared-stern-review->
 - **Weitzman M. L.**, 2007 : A Review of The Stern Review on the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Literature*, Vol. XLV, 703-724.
-