

L'utilisation du potentiel de réchauffement global pour comparer les émissions de méthane et de CO₂

Jean-Louis Dufresne

Laboratoire de Météorologie Dynamique
Institut Pierre Simon Laplace
CNRS, Université Pierre et Marie Curie, École Polytechnique, École Normale Supérieure.

Paru dans « La Météorologie », n°64, février 2009, pp. 54-58.

Résumé: Les gaz à effet de serre modulent le bilan radiatif de la Terre. Toute modification de leurs concentration modifie ce bilan d'énergie, et donc la température globale d'équilibre de la Terre. Ces différents gaz ont des propriétés radiatives et des durées de séjour dans l'atmosphère très différentes, ce qui empêche toute comparaison directe de l'effet de leurs émissions sur le climat global. Le potentiel de réchauffement global (PRG) a été proposé par le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) il y a maintenant presque 20 ans comme indice pour comparer les émissions des différents gaz à effet de serre. Les auteurs d'un article récent affirment que son utilisation conduit à sous-estimer fortement l'effet des émissions pérennes de méthane sur le réchauffement global par rapport à des émissions pérennes de CO₂. Nous montrons ici que ce n'est pas tout à fait le cas, que le PRG est bien adapté pour comparer le réchauffement climatique à la fin d'une période de référence que l'on se fixe à priori, une période de 100 ans étant généralement choisie. Mais cette comparaison n'est pas absolue. Par exemple l'effet du méthane sera sous-estimé au début de cette période alors que l'effet du CO₂ sera sous-estimé après cette période.

Using global warming potential to compare methane and CO₂ emissions

Abstract: Greenhouse gases affect the planetary heat budget. Any change of their concentration affects this budget and therefore the global mean surface temperature of the Earth. These gases have different radiative properties and different lifetimes in the atmosphere, which prohibits any direct comparison of their emissions' consequences on global warming. Almost twenty years ago, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) proposed the global warming potential (GWP) as an index to compare the emissions of the various greenhouse gases. In a recent paper, it has been stated that the use of GWP leads to strongly underestimating the global warming due to methane constant emissions compared to that of CO₂ constant emissions. Here we show that it is not really the case. The GWP enables comparisons of global warming due to constant emissions for any prescribed period, 100 years being often used. But this comparison is not universal. For instance, the impact of methane is underestimated at the beginning of the chosen period while the impact of CO₂ is underestimated after this period.

L'effet des émissions de méthane et de dioxyde de carbone sur le climat.

Depuis la révolution industrielle, la composition chimique de l'atmosphère a été profondément modifiée du fait des activités humaines: combustion du charbon, du pétrole et du gaz, déforestation, développement massif de l'agriculture, utilisation d'engrais, de réfrigérateurs, de climatiseurs... Parmi les gaz émis, certains absorbent le rayonnement infra-rouge et participent à l'effet de serre, tels le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les chloro et hydrofluorocarbures (CFC, HFC), etc. La mise en place de politiques de limitation des émissions de gaz à effet de serre, comme le protocole de Kyoto, nécessite de quantifier l'effet sur le climat des émissions de ces différents gaz.

L'effet d'un changement de la composition de l'atmosphère sur le bilan radiatif de la Terre peut être calculé à partir de modèles radiatifs. On calcule par exemple qu'une augmentation de 1 kg de la masse de CH₄ dans l'atmosphère perturbe le bilan radiatif 96 fois plus qu'une augmentation d'une même masse de CO₂. On dit que l'efficacité radiative du CH₄ est 96 fois plus élevée que celle du CO₂. Ce calcul suppose que l'on connaisse la concentration des gaz, qui dépend des quantités émises mais aussi de leur durée de résidence dans l'atmosphère. Cette durée de vie est très différente selon les gaz (cf. annexe). Lorsque qu'un kg de CH₄ est émis à un instant donné, il en reste environ 8% après 30 ans et moins de 0.02% après 100 ans. Pour une émission d'un kg de CO₂, il en reste respectivement 50% et 36% après les mêmes délais.

On voit ainsi qu'une émission ponctuelle de CH₄ perturbe fortement le bilan radiatif, mais pendant une faible durée alors qu'une émission d'une même quantité de CO₂ perturbe plus faiblement le bilan radiatif, mais pendant une durée beaucoup plus longue. Il existe toute une hiérarchie de modèles qui permettent de calculer avec différents niveaux de précision les perturbations radiatives selon différents scénarios d'émission. Mais il y a également une demande pour disposer d'indicateurs agrégés qui permettent de comparer très simplement l'effet sur le climat de l'émission de différents gaz à effet de serre. A cette fin, le GIEC a proposé depuis les années 1990 un indice, le « Potentiel de réchauffement global » (PRG). Son utilisation pour comparer différentes politiques de réduction d'émission de gaz à effet de serre est remise en cause par Benjamin Dessus, Bernard Laponche et Hervé Le Treut dans leur article intitulé « réchauffement climatique : importance du méthane », paru dans la Recherche du mois de mars 2008 (référéncé simplement DLL08 par la suite). Ces auteurs font une analyse critique du PRG et affirment que si on se base sur sa définition littérale et sur sa justification originale, cet indice sous-estime l'effet d'une réduction pérenne des émissions de CH₄ sur le réchauffement climatique par rapport à l'effet d'une réduction pérenne de CO₂. Nous poursuivons ici cette analyse et montrons que le PRG est finalement pertinent pour comparer les effets du CH₄ et du CO₂ à l'échelle du siècle, mais pour des raisons différentes de celles initialement invoquées par le GIEC.

Le « Potentiel de réchauffement global » (PRG) [IPCC 1990] est défini comme le rapport entre la perturbation du bilan radiatif de la Terre pendant une période déterminée qui suit l'émission ponctuelle d'un kg d'un gaz et la perturbation sur la même période d'une émission ponctuelle d'un kg de CO₂. Cette intégration des effets radiatifs sur une période de temps assez longue est justifié par le temps de réponse du système climatique¹. La période de temps considérée est généralement de 100 ans. Le PRG est basé sur la

¹«Since many of the responses of the earth's climate to changes in radiative forcing are long (e.g the centennial-scale warming of the oceans), it is the cumulative radiative forcing of a greenhouse gas, rather than its instantaneous value, that is of primary importance to crafting a relevant radiative

réponse d'une *émission ponctuelle* de gaz. D'après cette définition du PRG, on pourrait être tenté d'en déduire, comme DLL08, que l'utilisation directe du PRG n'est pas pertinente pour comparer les effets d'une *réduction pérenne des émissions* de CH4 et de CO2 sur le réchauffement climatique, qu'il faut plutôt calculer l'intégrale du PRG sur le temps. La différence entre ces deux approches est importante: dans leur article, DLL08 obtiennent que l'utilisation directe du PRG à 100 ans, comme recommandé dans le protocole de Kyoto, conduit à sous-estimer pendant 200 ans environ l'effet d'une réduction pérenne de CH4. L'approche de ces auteurs peut sembler logique d'après la définition littérale du PRG, mais nous allons montrer que ceci n'est pas le cas, que le PRG est effectivement pertinent pour ce type d'application. Pour cela nous utilisons une approche plus directe, basée sur un modèle physique de climat très simplifié.

Modèle très simplifié d'évolution de la température de la Terre.

Pour faire le lien entre la température moyenne de la Terre et les émissions de gaz à effet de serre (GES), nous utilisons ici un modèle très simple et très classique dans lequel la variation de la température moyenne de la surface de la Terre ΔT s'exprime de la façon suivante:

$$\Delta T = \beta (\Delta Q - \phi_o) \quad (1)$$

dans laquelle ΔQ est le forçage radiatif dû à l'accroissement des GES, c'est à dire la modification du bilan énergétique de la Terre en réponse à cet accroissement des GES si la température de la Terre restait inchangée. Pour le CO2, nous supposons ici que si sa masse dans l'atmosphère est multipliée par une facteur a , le forçage radiatif qui en résulte est² $\Delta Q_{CO2}(a) = \Delta Q_{2x} \cdot (a - 1)$, avec ΔQ_{2x} valeur du forçage radiatif pour un doublement de la masse (et donc de la concentration) de CO2: $\Delta Q_{2x} \approx 3,7 \text{ W.m}^{-2}$ [Meehl et al. 2007, p. 758]. Le paramètre β quantifie l'accroissement de la température globale en réponse à un forçage radiatif. Ce paramètre inclut tous les processus de rétroaction et est diagnostiqué à partir des résultats des simulations réalisées avec des modèles climatiques complets [Bony et Dufresne 2007]. En utilisant les résultats des modèles de climat ayant participé au projet CMIP-3 [Meehl et al., 2005] qui a servit de base au 4^e rapport du GIEC [IPCC, 2007], on obtient qu'en moyenne pour les modèles $\beta \approx 0,77 \text{ K.W}^{-1}.\text{m}^2$ [Randall et al., 2007]. La variable Φ_o représente le flux de chaleur entrant dans l'océan. A l'équilibre l'océan ne stocke plus de chaleur ($\Phi_o=0$) et on obtient un réchauffement de 3,1 K pour un doublement de la concentration de CO2. Cette valeur est proche de la moyenne du réchauffement simulé par un ensemble de modèles climatiques pour lesquels la modélisation de la circulation océanique a été simplifiée afin d'accélérer l'obtention d'un équilibre thermique: $3,3 \pm 0,7 \text{ K}$ (valeur moyenne \pm un écart type) [Meehl et al. 2007]. Hors équilibre thermique, nous utiliserons ici encore le modèle le plus simple possible en réduisant l'océan à une couche parfaitement mélangée. On a alors:

$$\phi_o = C_o \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Pour une couche d'eau de 200m de profondeur ($C_o \approx 200 \cdot 4,18 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) nous avons vérifié que ce petit modèle très simple reproduisait de façon satisfaisante l'évolution de la température moyenne de surface de la Terre simulée par les modèles climatiques complet pour les scénarios classiques d'émission de gaz à effet de serre sur un siècle, même s'il tend à surestimer l'effet de l'inertie thermique de l'océan pendant les premières années. Pour un accroissement de la concentration de CO2 de 1% par an, on obtient un réchauffement de 2K au bout de 70 ans, la concentration de CO2 ayant alors doublé. Pour les 19 modèles dont les résultats sont synthétisés dans le dernier rapport du GIEC, on obtient un réchauffement de $1,8 \pm 0,3 \text{ K}$ pour les mêmes

forcing index . As a consequence , such indices involve an integral over time »

2 une forme logarithmique peut être utilisée si on souhaite des calculs plus précis:

$$\Delta Q(a) = \Delta Q_{2x} \text{ Log}(a) / \text{Log}(2)$$

conditions [Meehl et al. 2007].

L'exemple d'une réduction pérenne des émissions de CH₄ et de CO₂

Une diminution pérenne des émissions de CH₄ entraîne une diminution de la concentration de CH₄ et au bout de quelques décennies, la concentration se stabilise du fait de la faible durée de vie du CH₄ dans l'atmosphère (12 années environ). En utilisant la relation (1) ci-dessus, on peut calculer la diminution de la température moyenne correspondant à cette diminution de la concentration en CH₄. Dans les exemples que nous donnons ici, la réduction pérenne des émissions de CH₄ a été choisie afin qu'elle entraîne une diminution de la température sur le long terme de -0.1°C environ (Fig. 1).

Nous allons maintenant chercher à évaluer si le PRG est pertinent pour comparer les effets d'une réduction pérenne de CH₄ et de CO₂. A partir de cette diminution de CH₄ émis, on calcule une réduction pérenne équivalente des émissions de CO₂ en utilisant le PRG du méthane sur une période de 100 ans, qui est de 25 [Forster et al. 2007, p. 212]. La masse de cette réduction équivalente de CO₂ est donc 25 fois plus élevée que celle de méthane. Comme la durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère est très grande, la concentration du CO₂ décroît régulièrement pendant plusieurs siècles. Comme pour le CH₄, on calcule la variation de température qui en découle. Celle-ci décroît de façon très régulière pendant toute la période de temps considérée ici (Fig. 1). Pour comparaison, nous avons également tracé la variation de température calculée avec la même méthode que celle utilisée par DLL08.

Si cette conversion des émissions pérennes de CH₄ en équivalent CO₂, basée sur le PRG du méthane à 100 ans, était valable quel que soit l'intervalle de temps considéré, les deux diminutions de températures calculées seraient identiques. On voit très clairement sur les figures 1 et 2 que ce n'est pas le cas, que cette conversion en équivalent CO₂ entraîne une sous-estimation de la diminution de température pendant les 100 premières années et une sur-estimation pendant les années suivantes. On voit que du fait de la durée de vie très différente des gaz, il n'est pas possible de définir un équivalent CO₂ qui soit valable tout le temps. Par contre nos résultats montrent qu'en utilisant le PRG à 100 ans on obtient que les refroidissements dus à une réduction pérenne des émissions de CH₄ ou d'équivalent CO₂ sont égaux 100 ans après le début de cette réduction. Comment expliquer ce résultat? En effet la justification originale du PRG repose sur l'importance de l'inertie thermique du système climatique alors que notre calcul repose sur un modèle stationnaire, sans inertie thermique.

Pourquoi le PRG est-il un index pertinent?

La définition mathématique du pouvoir de réchauffement global est [Forster et al. 2007, p. 210]:

$$PRG(CH_4, N) = \frac{\int_0^N A_{CH_4} C_{CH_4}(t) dt}{\int_0^N A_{CO_2} C_{CO_2}(t) dt} \quad (3)$$

avec A_x efficacité radiative du gaz X (CH₄ ou CO₂) et $C_x(t)$ concentration du gaz X à l'instant t en réponse

à une émission d'une unité de masse de ce gaz à l'instant 0. Le terme $\frac{1}{N} \int_0^N C_X(t) dt$ s'interprète comme la valeur moyenne de la concentration du gaz X sur l'intervalle de temps [0,N]. Si on résonne de façon discrète (une seule valeur tous les ans), cette intégrale peut être approchée par $\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N C_X(i)$ (Fig. 3-a). En multipliant la concentration C_X par l'efficacité radiative A_X , on calcule forçage radiatif. Le PRG (Eq. 3) est donc **le rapport de la valeur moyenne sur l'intervalle de temps [0,N] des forçages radiatifs résultants de l'émission ponctuelle d'une même masse de CH4 et de CO2 à l'instant 0**. Avec un modèle simple, stationnaire, comme celui de l'Eq. (1), il y a un lien direct entre le forçage radiatif. Le réchauffement et le PRG représente donc le rapport des réchauffements moyens, sur la période [0, N] résultants de l'émission ponctuelle d'une même masse de CH4 et de CO2 à l'instant 0. Remarquons que c'est le rapport du réchauffement *moyen* sur la période pour une émission ponctuelle de gaz et non le rapport du réchauffement *à la fin* de la période.

Avec un changement de variable ($t'=N-t$), l'équation (3) précédente peut également se mettre sous la forme:

$$PRG(CH4, N) = \frac{\int_0^N A_{CH4} C_{CH4}(N-t') dt'}{\int_0^N A_{CO2} C_{CO2}(N-t') dt'} \quad (4)$$

où $C_X(N-t')$ correspond à la concentration du gaz X à l'instant N pour une émission d'une unité de masse de gaz X à l'instant t' . L'intégrale $\int_0^N C_{CH4}(N-t') dt'$ s'interprète comme la concentration, à l'instant N, de toutes les émissions de gaz pendant l'intervalle de temps [0,N], en supposant ces émissions constantes. Si on résonne de façon discrète (une seule valeur tous les ans), cette intégrale peut être approchée par $\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N C_X(i)$ (Fig. 3-b). En multipliant la concentration C_X par l'efficacité radiative A_X , on calcule forçage radiatif. Donc l'équation (4) ci-dessus s'interprète comme **le rapport, à l'instant N, des forçages radiatifs résultants de l'émission constante sur l'intervalle de temps [0,N] d'une même masse de CH4 et de CO2**. Avec un modèle simple, stationnaire, comme celui de l'équation (1), le PRG représente donc bien le rapport des accroissements de température *à la fin* de la période de temps [0,N] pendant laquelle une même masse de CH4 et de CO2 a été émise de façon *constante* dans le temps.

Ainsi si on utilise un modèle stationnaire, le PRG pour une période [0,N] permet de quantifier aussi bien le réchauffement *moyen* sur cette période en réponse à une émission *ponctuelle* de gaz que le réchauffement *à la fin* de cette période en réponse à une émission *constante* de gaz (Fig. 3). Ce dernier résultat est clairement visible sur les figures 1 et 2: si on utilise le PRG à 100 ans, le réchauffement après une émission constante de CH4 pendant 100 ans et exactement le même que l'on utilise directement les propriétés du CH4 ou que l'on utilise un équivalent CO2. Ce résultat n'est rigoureux que pour un modèle à l'équilibre qui néglige l'inertie thermique de l'océan. Si on prend en compte cette inertie thermique via le modèle présenté précédemment (Eq. 2), on voit que le résultat précédent n'est pas réellement remis en cause (Fig. 2). La validité du PRG ne repose pas sur l'inertie thermique du climat, elle repose sur sa définition même.

Nous pouvons maintenant réinterpréter les résultats obtenus par DLL08. Ces auteurs proposent une intégration temporelle supplémentaire pour définir ce que nous appellerons un potentiel de réchauffement global intégré, PRGI, défini par:

$$PRGI(CH_4, N) = \frac{\int_0^N d\theta \int_0^\theta A_{CH_4} C_{CH_4}(\theta - t') dt'}{\int_0^N d\theta \int_0^\theta A_{CO_2} C_{CO_2}(\theta - t') dt'} \quad (5)$$

Cette équation représente le réchauffement moyen, sur la période [0,N], résultant d'émissions pérennes de gaz.

Ainsi, pour une émission pérenne de gaz sur une période [0,N], le PRG permet de quantifier le réchauffement *à la fin* de cette période tandis que le PRGI permet de quantifier le réchauffement *en moyenne* sur la période.

Conclusion.

L'efficacité radiative permet de comparer de façon rigoureuse l'effet d'un changement de *concentration* de différents gaz à effet de serre sur le bilan radiatif de la Terre, et donc sur le réchauffement à l'équilibre. Cette comparaison simple et non ambiguë n'est plus possible lorsque l'on souhaite comparer l'effet des *émissions* de gaz à effet de serre de durée de vie très différente. Il faut tout d'abord préciser l'horizon de temps considéré. Il faut ensuite définir un indice pertinent, et le GIEC a proposé en 1990 la notion de PRG d'un gaz à effet de serre à l'horizon de temps de N années. Cet indice a été défini comme le rapport des *valeurs moyennes* sur N années du forçage radiatif en réponse à une *émission ponctuelle* de ce gaz à effet de serre et du forçage en réponse à une même émission de CO₂. En se basant sur la définition littérale du PRG et sur la justification originale donnée par le GIEC, DLL08 ont considéré que le PRG n'était pas pertinent pour comparer directement les réductions pérennes d'émission de gaz à effet de serre. Ils ont montré qu'une intégrale supplémentaire sur le temps était nécessaire. En nous basant sur la formulation mathématique du PRG, nous avons montré qu'en réalité le PRG est effectivement pertinent pour comparer les réductions (ou augmentations) pérennes d'émission de gaz à effet de serre, mais pour des raisons différentes de celles initialement invoquées par le GIEC. Dans le dernier rapport du GIEC, la validité du PRG pour quantifier le réchauffement résultant d'émissions pérennes a été reconnue [Forster et al. 2007, p. 216] en se basant notamment sur une étude de Shine et al, [2005] qui utilisent une modélisation et une approche plus approfondie et plus complexe que celle présentée ici.

L'article de DLL08 a permis de rappeler que l'utilisation d'un index intégré comme le PRG pour comparer les émissions de différents gaz à effet de serre a des côtés arbitraires qu'il ne faut pas oublier. Tout d'abord cet indice nécessite de définir un horizon temporel particulier, généralement pris égale à 100 ans, dont il peut fortement dépendre. Par exemple le PRG du méthane a comme valeur 72, 25 ou 7,6 selon que l'on prend comme horizon de référence 20 ans, 100 ans ou 500 ans [Forster et al. 2007, p. 212]. Ensuite le PRG permet de quantifier le réchauffement *à la fin de la période* de référence, pour des émissions pérennes de gaz à effet de serre, mais ne permet pas de quantifier le réchauffement avant ou après la fin de cette période de référence. L'approche de DLL08 consiste à considérer un PRG intégré, que nous notons PRGI, qui quantifie le réchauffement *moyen, sur la période* de référence.

Quelles sont les implications possibles de ces résultats en terme de politique de réduction des émissions de CH₄ ou de CO₂? Réduire de façon pérenne les émissions de CO₂ a un effet sur le réchauffement climatique qui croît avec le temps pendant plusieurs centaines d'années. Ou dit autrement: ne pas réduire de façon pérenne les émissions de CO₂ entraîne un réchauffement qui croît fortement avec le temps. Réduire les émissions de CO₂ est donc une priorité si on considère les évolutions du climat sur le long terme. Réduire de façon pérenne les émissions de CH₄ a un effet très marqué mais qui atteint une limite après quelques dizaines d'années. Ainsi réduire les émissions de CH₄ peut être considérée comme un moyen de limiter temporairement le réchauffement climatique, mais cela ne permet pas de compenser une émission pérenne de CO₂ qui a un effet sur le long terme.

Remerciements: Je remercie Philippe Quirion et les deux critiques pour leurs commentaires et suggestions

Référence:

B. Dessus, B. Laponche et H. Le Treut; Réchauffement climatique : importance du méthane, la Recherche, mars 2008 .

Bony, S. ,J-L Dufresne. Processus régissant la sensibilité climatique. La Météorologie , No. 56, pp. 29-32, mars 2007

Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Bernsten T., Betts R., Fahey D. W., Haywood J., Lean J., Lowe D. C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R., 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: IPCC 2007, chap. 2.

IPCC, 1990: Climate Change: The Intergovernmental Panel on Climate Change Scientific Assessment [Houghton, J.T., G.J. Jenkins, and J.J. Ephraums (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 364 pp.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Meehl, G. A., C. Covey, B. McAvaney, M. Latif, and R. J. Stouffer, 2005: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project. Bull. Am. Meteorol. Soc., 86, pp. 89-93

Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007: Global Climate Projections. In: IPCC 2007, chap. 10

Randall D. A., Wood R. A., Bony S., Colman R., Fichet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R. J., Sumi A., Taylor K. E. 2007: Climate models and their evaluation. In: IPCC 2007, chap. 8.

Shine, K.P., J.S. Fuglestedt, K. Hailemariam, and N. Stuber, 2005: Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases. Clim. Change, 68, 281-302.

Annexe:

Après une émission ponctuelle de CO₂ ou de CH₄, la fraction du gaz émis restant dans l'atmosphère après N années est la suivante [Forster et al. 2007, p. 213]:

Pour le CO₂: $C_{\text{CO}_2}(N) = 0.217 + 0.259 \cdot \exp(-N/172.9) + 0.338 \cdot \exp(-N/18.51) + 0.186 \cdot \exp(-N/1.186)$

Pour le CH₄: $C_{\text{CH}_4}(N) = \exp(-N/12.)$

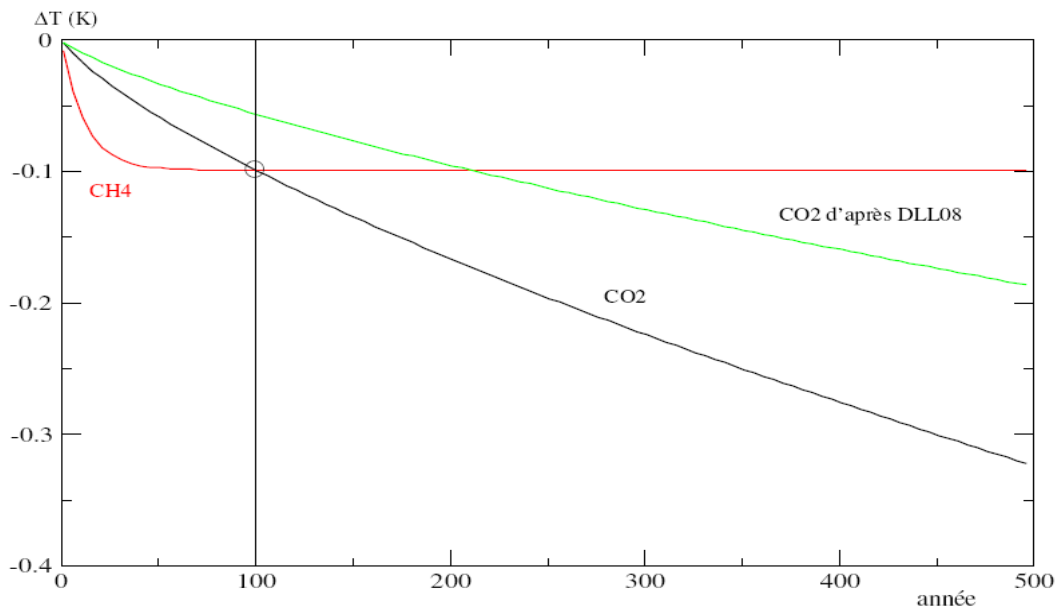


Figure 1: Évolution, en fonction du temps, de la diminution de température à l'équilibre ΔT en réponse à une réduction pérenne des émissions de CH₄ (en rouge) et réduction pérenne « équivalente » de CO₂ (en noir). Cette équivalence est calculée en se basant sur le PRG du CH₄ à 100ans. Nous avons également tracé l'évolution de la température en réponse à une réduction pérenne « équivalente » de CO₂ calculée selon la même méthode que DLL08 (vert).

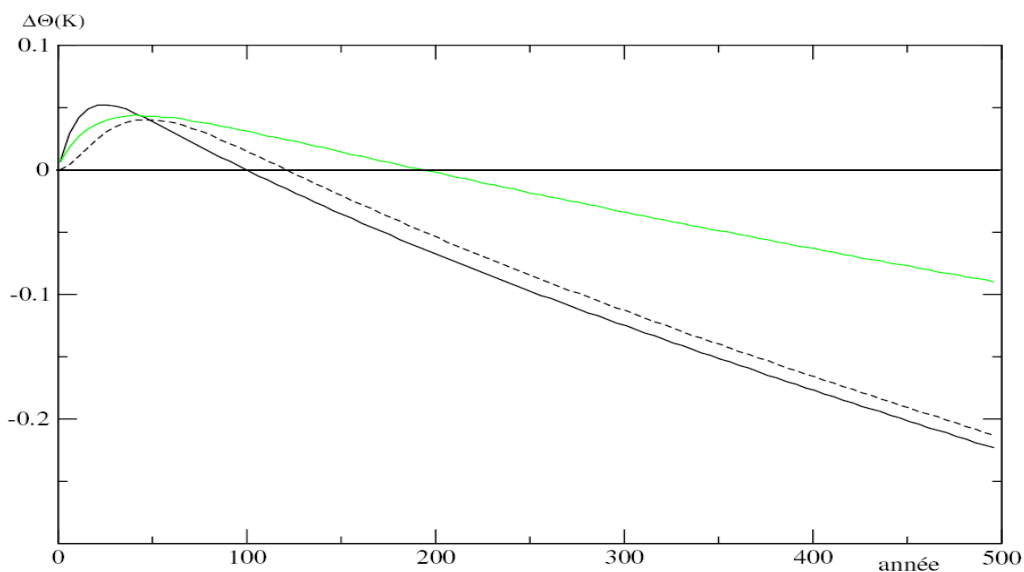


Figure 2: Évolution, en fonction du temps, de la différence $\Delta \Theta$ des deux diminutions de température de la Fig. 1, c'est à dire de la différence entre la diminution de température résultant d'une réduction pérenne de CH₄ et d'une réduction pérenne « équivalente » de CO₂. Les diminutions de température sont calculées soit à l'équilibre (trait noir continu) soit en tenant compte de l'inertie thermique de l'océan (trait noir pointillé). Comme pour la Fig. 1, les émissions sont constantes depuis l'année 0. Nous avons également tracé l'évolution de cette différence telle qu'elle peut être déduite des résultats publiés par DLL08 (vert).

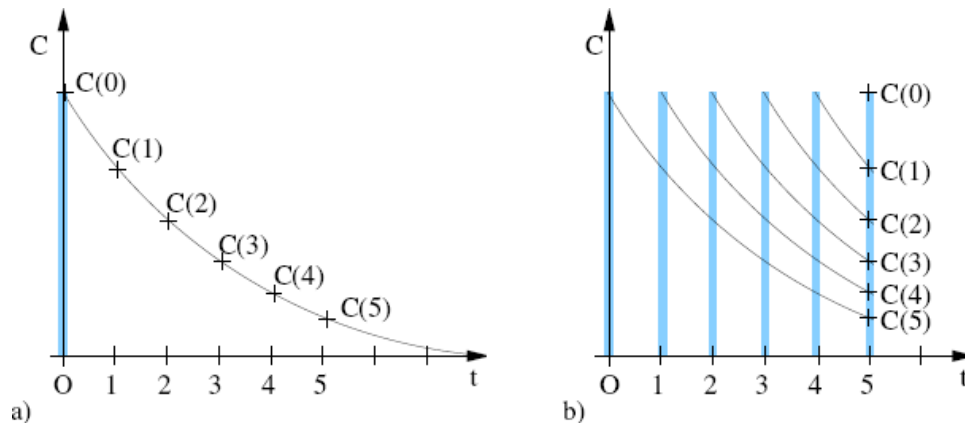


Figure 3: (a) Après une émission ponctuelle de gaz (trait bleu vertical), évolution de la concentration C de ce gaz avec le temps pour les 5 premières années. La somme des 6 concentrations représentées est égale à la *valeur moyenne* de la concentration du gaz sur ces 5 années, à un coefficient près. (b) Pour une même émission de gaz chaque année (traits bleus verticaux), évolution de la concentration du gaz au cours du temps. Si on se place à l'année 5, la fraction de gaz émis l'année 0 et qui reste dans l'atmosphère l'année 5 est $C(5)$, émis l'année 1 et qui reste l'année 5 est $C(4)$, émis l'année 2 et qui reste l'année 5 est $C(3)$, etc. La somme de ces 6 concentrations $C(0)$ à $C(5)$ est égale à la concentration du gaz à *la fin* de ces 5 années pendant lesquelles le gaz a été émis de façon continu.