

Le climat terrestre

Modèle radiatif à deux couches

Imaginons un espace formé de deux couches, chacune à température T_{TOA} et T_S , avec un vide parfait entre les deux :

- La couche TOA émet un flux électromagnétique $F_{TOA} = \sigma \cdot \epsilon_{TOA} \cdot T_{TOA}^4$, en direction de l'extérieur mais aussi vers la couche S.
- La couche S fait de même : $F_S = \sigma \cdot \epsilon_S \cdot T_S^4$ en direction de la couche TOA, mais elle est parfaitement isolée par un matériau de conductivité nulle vers le bas.

Si ce système était fermé, et quelles que soient les capacités et conductivités thermiques des matériaux qui le constituent, il ne serait en équilibre que si $T_S = T_{TOA}$.

Mais ce système est ouvert vers l'extérieur. Sans aucun apport d'énergie il se trouvera en équilibre à la température du reste de l'espace, soit $T_S = T_{TOA} = 2.7 \text{ K}$.

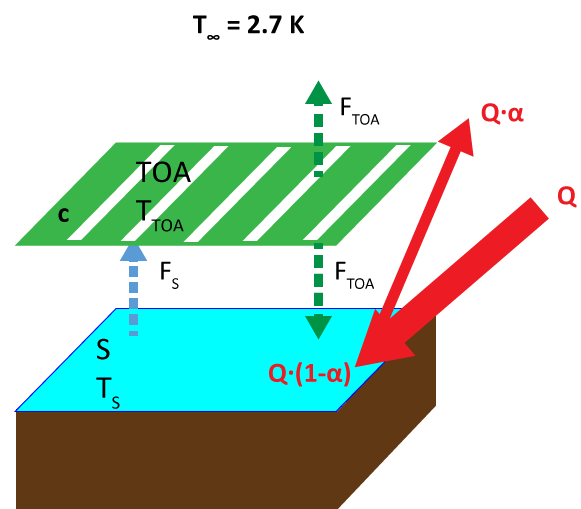
Apportons alors une source quasiment infinie d'énergie, celle d'un soleil qui irradie ce système. Une partie de cette irradiation Q est réfléchi (albédo α) par la surface S, et le reste $Q \cdot (1 - \alpha)$ y est absorbé.

On simplifie le tout en acceptant que TOA n'absorbe rien de l'énergie à haute fréquence venant du soleil (l'irradiation UV-Vis y « passe au travers ») et que son émissivité $\epsilon_{TOA} = 1$.

On le complique un peu en introduisant un facteur de nébulosité c qui fait qu'une partie seulement de l'énergie irradiée à plus basse fréquence (IR) par la surface S est absorbée par TOA, le reste partant directement dans le puit de l'espace profond.

Pour avoir une température, TOA doit être constitué de matière (le vide parfait n'a pas de température), mais à ce stade il n'est pas important de savoir combien ni de quelle capacité, conductivité thermique ou phénomènes de convection. On peut s'imaginer, suspendu en altitude par des anges joufflus, une fine dentelle, une mince grille métallique, ou une couche d'air humide épaisse d'une douzaine de kilomètres et directement adjacente à la couche S.

Une critique est souvent faite que ce modèle ne tient pas compte de la manière avec laquelle les ajustements de température se font à l'intérieur de TOA. Mais le modèle discuté ici en fait intentionnellement abstraction. Pour inclure de tels phénomènes il faut développer des modèles autrement plus compliqués, de circulation générale et globale avec lesquels on ne changera pas le bilan thermique et statique global, mais on développera la dynamique des changements.



Revenons à nos deux couches. Il faudra maintenant s'attendre à ce que leurs températures ne soient plus égales, bien qu'en équilibre dans le **système entier** constitué de

soleil - terre - atmosphère - espace intersidéral.

Deux bilans s'établissent autour de chacune de ces surfaces :

Bilan TOA : Flux reçu de S = 2 fois le flux émis par TOA

$$c \cdot F_S = 2 \cdot c \cdot F_{TOA} \quad \text{le facteur est 2 car la couche TOA émet vers le haut et vers le bas}$$

Bilan S : Flux reçu du soleil + flux reçu de TOA = Flux émis vers l'extérieur

$$Q \cdot (1 - \alpha) + c \cdot F_{TOA} = F_S$$

On résout ces deux équations pour F_S et F_{TOA} :

$$F_{TOA} = \frac{(1-\alpha) \cdot Q}{(2-c)} \quad \text{et} \quad F_S = 2 F_{TOA} = \frac{2 \cdot (1-\alpha) \cdot Q}{(2-c)}$$

D'où l'on tire :

$$T_S = \sqrt[4]{\frac{2 \cdot (1-\alpha) \cdot Q}{\epsilon_S \cdot \sigma \cdot (2-c)}} \quad \text{et} \quad T_{TOA} = \sqrt[4]{\frac{(1-\alpha) \cdot Q}{\sigma \cdot (2-c)}}$$

En choisissant des paramètres plausibles, valeurs moyennes pour le globe terrestre :

$Q = 341.5 \text{ W m}^{-2}$,
soit un quart de la constante solaire de 1366 W m^{-2} (nuit-jour, pôles-équateur)

$\alpha = 0.306$,

$c = 0.66$

$\epsilon_S = 0.92$

on obtient :

	Radiation émise W m^{-2}	Température	
		K	°C
À la surface de la terre, T_S	353.7	287.0	+13.8
Au top de l'atmosphère T_{TOA}	236.3	236.3	-36.8

Ce qui est aussi plausible. Selon le standard ISA à une température de -37 °C correspond une altitude de 5700 m , soit au milieu de la troposphère.

Autour des valeurs pratiques qui nous intéressent la sensibilité des températures à ces paramètres est :

Augmentation de ↗	résulte en une	de T_S [°C]	et de T_{TOA} [°C]
Q, de 1 W m^{-2}	↗ augmentation	+0.21	+0.17
α , de 0.01	↘ diminution	-1.04	-0.86
c, de 0.01	↗ augmentation	+0.54	+0.44
ε_s , de 0.01	↘ diminution	-0.77	-

Respect des lois de la thermodynamique.

Les calculs faits ci-dessus concernent un **état stationnaire, en équilibre**, sans apport ou perte additionnelle de matière ou de chaleur. Ce n'est pas une machine, l'ensemble terre-atmosphère est un système passif, bien que chaotique.

Il n'est pas nécessaire de se préoccuper de mécanismes d'échange de matière ou de chaleur, ni de temps de latence dus aux diverses conductivités, capacités et autres chaleurs latentes. C'est un modèle très simple, seulement radiatif, qui n'a que le mérite de respecter le bilan énergétique global, ce qui n'est déjà pas rien.

1^{ère} loi : il n'y a ni création ni perte d'énergie du système.

La source d'énergie est le soleil dont la réserve décline assez lentement pour ne pas nous préoccuper avant quelques milliards d'années. Elle varie légèrement selon des périodes variées, diurne pour le jour et la nuit, annuelle car l'orbite n'est pas circulaire, d'environ 11 et 108 ans pour les taches solaires, et selon les autres cycles décrits par Milankovitch. On la considère constante pour l'analyse présente.

Le puit du système est l'espace intersidéral à 2.7 K dont on pense qu'il est en expansion.

Lors de changement des conditions (albédo, nuages, émissivité, "constante" solaire, forçages de toutes origines) il y aura une période de ré-équilibre qui peut se faire immédiatement (absorption radiative par les composants de l'atmosphère) ou prendre des siècles (p. ex. changement de l'albédo ou de l'émissivité de la surface de la terre). Ceci est à voir comme un stockage lors d'un réchauffement ou un déstockage d'énergie lors d'un refroidissement. Ce n'est que le sous-système terre-atmosphère qui voit sa température et son enthalpie changer, ce sous-système n'est pas isolé du reste de l'univers. On recalcule les nouvelles conditions d'équilibre, sans que les processus de rééquilibre propre à la couche TOA ne soient à considérer.

2^{ème} loi : l'entropie d'un système isolé ne peut qu'augmenter.

S'il était ouvert alors, comme dirait Johnny, il ne serait pas tout seul.

Une critique est souvent faite qui dénonce l'idée que la couche froide TOA « réchaufferait » la couche plus chaude T, ce qui violerait le second principe.

La seule source nette de chaleur de ce système est le rayonnement solaire. La répartition des niveaux de température T_S et T_{TOA} à l'équilibre, due à la présence de la couche TOA, implique une

augmentation de l'entropie (ou désordre) du système. Si la terre et son atmosphère n'existaient pas, l'entropie du tout serait moindre.

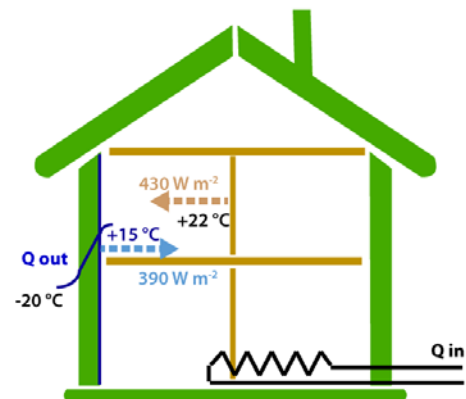
Le modèle, simplificateur à l'extrême, ne reproduit que des échanges radiatifs entre les éléments du système Soleil - S - TOA - Espace.

Si une surface matérielle à la température T_S « voit » une radiation à plus basse énergie (F_{TOA}) elle l'absorbe alors qu'en même temps elle émet un rayonnement $F_S = \sigma \cdot \epsilon_S \cdot T_S^4$ correspondant à sa propre température. La paroi S n'en est donc pas « chauffée » par TOA. C'est S qui est chauffée par le soleil, puis à son tour TOA est chauffée par S.

La réalité est autre : dans la stratosphère et la mésosphère il y a chauffage direct de l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire ; et la troposphère est aussi partiellement chauffée par l'absorption d'une part du rayonnement solaire. Mais les modèles sont pensés pour simplifier, non pour reproduire avec exactitude l'entier d'une réalité complexe.

Le rayonnement en retour de TOA vers la surface plus chaude S n'a d'ailleurs rien d'extraordinaire. Par exemple : la terre réémet les 341.5 W m^{-2} qu'elle reçoit à une température bien inférieure à celle du soleil. Et elle le fait dans toutes les directions de l'espace, dont celle du soleil qui n'en sera pas réchauffé pour autant. Cela s'appelle transfert de chaleur radiatif, proportionnel à la différence de la 4^{ème} puissance des températures des deux corps s'irradiant mutuellement.

Encore un autre exemple *a contrario*, d'ordre plus terre à terre : en hiver, la température de la face interne du mur extérieur d'une maison est inférieure à celle de l'intérieur des chambres. Ainsi on peut avoir, **à l'équilibre** et en simplifiant, -20 °C à l'extérieur, 15 °C à la surface interne du mur de la maison, et le reste de la maison bien mélangé à 22 °C . La paroi à 15 °C (288 K) irradie 390 W m^{-2} en direction de l'intérieur de la maison. Une paroi interne de la maison à 22 °C (295 K) irradie 430 W m^{-2} . Le chauffage, éventuellement solaire lui-aussi, fournit l'énergie Q nécessaire pour maintenir ces gradients et cet équilibre.



Viendrait-il à l'esprit d'un critique de songer un instant que la face interne à 15 °C n'émet rien ? Il lui faudrait réfuter Planck, Stefan et Boltzmann réunis, ce qui requerrait de convaincre pas mal de monde, et avec des arguments eux-mêmes irréfutables. Et pourtant cette paroi froide ne chauffe pas la paroi chaude de l'intérieur de la maison. C'est l'inverse qui se passe, et il n'y a pas de problème thermodynamique.

Si la maison est mieux isolée (forçage), alors la face interne sera peut-être à 20 °C et irradiera 419 W m^{-2} , et alors ? Dans ce cas on sera content de pouvoir réduire le chauffage. Mais si la chaudière n'est pas réglable (comme le soleil, ou les immeubles staliniens de Novossibirsk) il faudra bien que les températures intérieures de la maison et de ses murs montent (réponse au forçage) pour évacuer les calories fournies. Si par ailleurs le chauffage est arrêté alors le tout se mettra à -20 °C après un certain temps.

Répetons-nous : pour qu'un transfert de chaleur radiatif ait lieu, il faut qu'il y ait absorption de rayonnement. Lorsque simultanément à une absorption il y a ré-émission à un niveau plus élevé de température, alors il n'y a pas d'apport net d'enthalpie par la paroi froide, le système ne produit

rien, et aucune loi de la thermodynamique n'est violée. Et souvenons-nous que le système est uniquement alimenté par le réacteur en fusion qu'est le soleil, et rien d'autre n'est créé *sui generis*.

Toutes considérations liées au mouvement brownien, à la mécanique quantique et aux mécanismes de transfert de masse et de chaleur à échelle micro ou macroscopique ne concernent que l'intérieur de la couche TOA ou, dans l'exemple de la maison, ce qui se passe en convection et conduction autour du mur extérieur. Cela ne change pas les niveaux globaux de température T_S et T_{TOA} qui s'établissent selon les données fondamentales du système (Q , α , ϵ_s , c) afin de respecter les termes du bilan.

Forçage radiatif:

Introduisons un forçage consistant à opposer une résistance additionnelle aux flux radiatifs, par exemple en augmentant la concentration d'un gaz absorbant les rayons infrarouges (vapeur d'eau, CO_2 , méthane, N_2O , etc). On obtient un effet similaire à celui d'augmenter la nébulosité.

La quantité d'énergie absorbée ΔF , qu'il faudra aussi évacuer, sera proportionnelle, selon la loi pratique de Lambert-Beer, au logarithme de la différence de concentration de ce gaz.

Dans le bilan thermique de chaque couche on substituera F_S par $(F_S + \Delta F)$ et F_{TOA} par $(F_{TOA} + \Delta F)$

Les températures résultantes sont alors :

$$T_T = \sqrt[4]{\frac{(1-\alpha) \cdot Q}{2 \cdot \epsilon_S \cdot \sigma \cdot (2-c)} + \frac{\Delta F}{\epsilon_S \cdot \sigma}} \quad \text{et} \quad T_{TOA} = \sqrt[4]{\frac{(1-\alpha) \cdot Q}{4 \cdot \sigma \cdot (2-c)} + \frac{\Delta F}{\sigma}}$$

Selon la valeur de ΔF la sensibilité des températures sera donc :

ΔF primaire [W m ⁻²]	ΔT_S [°C]	ΔT_{TOA} [°C]
1	0.20	0.33
1.91	0.39	0.64
2.59	0.52	.86
3.71	0.75	1.23

Il s'agit ici de la réponse primaire du système à un forçage radiatif. Avec le temps, des rétroactions se mettent en place qui changent les équilibres, voir plus loin.

Autres forçages

La seule absorption de rayonnement électromagnétique n'est pas le seul mécanisme de forçage connu. Les suies issues de la mauvaise combustion de carburants et de biomasse sont décrites comme offrant un forçage primaire de 1.1 W m⁻² (entre +0.17 et +2.1 W m⁻²), ce qui est considérable. Ce forçage est dû en partie aux poussières en suspension qui absorbent les rayons solaires entrants, et aussi au noircissement des surfaces enneigées qui reflètent moins les rayons du soleil. On ne sait distinguer la part naturelle de la part humaine d'un tel phénomène.

Les émissions de poussières, d'aérosols et de substance volatiles organiques formant des aérosols ont des effets encore mal définis. Il n'est pas exclus que la dépollution des incinérateurs et des carburants (élimination du soufre, lavage des gaz avant émission) ou les dépoussiérages lors de la

fabrication du ciment aient contribué à éliminer des facteurs de forçage négatif, refroidissant l'atmosphère (« man-made cooling and un-cooling »).

Les éruptions volcaniques avec leurs rejets de poussières et de soufre provoquent un forçage négatif qui peut durer quelques années, comme celle du Mont Tambora en 1815 qui fut suivie par une année de mauvaises récoltes et de famine dans tout le monde. Après 3 à 5 ans les conditions normales sont rétablies, ce qui démontre par ailleurs la stabilité du système atmosphérique.

Rétroaction

Lorsqu'un forçage se manifeste, perturbation plus ou moins courte ou durable, et quelle que soit sa cause, un rééquilibrage doit se faire afin de respecter les conditions de bilan à l'équilibre. La réaction primaire est un changement de la température directement lié à la cause. Ainsi une augmentation de la concentration d'un gaz dit à effet de serre est accompagnée immédiatement d'une plus grande absorption de rayonnement électromagnétique dans la bande infrarouge selon le spectre et les coefficients d'absorption correspondant à ce gaz. Cela entraîne une élévation adiabatique de la température du milieu absorbant. On peut considérer cela comme une perturbation à laquelle le système devra répondre. Cet effet primaire entraîne donc des rétroactions, dont cinq mécanismes sont généralement décrits¹ :

Planck : le fait d'augmenter l'émission de rayonnement entraîne que le matériau constituant la surface émettrice va se refroidir, car perdant de l'énergie. Cela s'oppose au forçage, c'est donc une rétroaction négative et stabilisatrice, estimée à :

$$\lambda_P = -3.21 \pm 0.11 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Vapeur d'eau : si la température monte il y aura plus d'évaporation. L'atmosphère contiendra plus d'humidité, ce qui entraînera un renforcement du forçage, car la vapeur d'eau est un gaz dit à effet de serre avec de fortes bandes d'absorption dans l'infrarouge. Rétroaction positive et amplificatrice de :

$$\lambda_{WV} = 1.63 \pm 0.33 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Gradient thermique : lorsque la température globale monte, la structure de l'atmosphère change car des **forces convectives** font monter de l'air un peu plus chaud. Le gradient sera moins prononcé en latitudes tropicales, ce qui serait une rétroaction négative, et plus prononcé dans les latitudes intermédiaires, rétroaction positive. La résultante est estimée négative, avec une très large marge d'incertitude :

$$\lambda_{LR} = -0.60 \pm 0.46 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Albédo : la réflectivité des rayons du soleil dépend du type et de l'étendue du matériau qui leur est exposé. En particulier la différence est grande entre la réflectivité de la glace et celle de l'eau. Si par de plus hautes températures il résulte une diminution de la surface de la calotte glaciaire et des

¹ Selon le 5^{ème} rapport du groupe de travail I du GIEC (AR 5 WG I, 2013). Table 9.5. Moyenne des diverses études présentées. Ces valeurs ont été établies par modélisation, et non par observation ou solution analytique de processus physiques établis. Invérifiables elles sont donc sujettes à caution, ce qui est reflété dans les marges d'incertitude, ... qui elles-mêmes ne sont pas sûres. Mais faute de mieux...

surfaces enneigées, alors il y aura moins de réflexion et plus d'absorption. Une rétroaction qui prend beaucoup de temps mais qui est amplificatrice, positive :

$$\lambda_A = 0.31 \pm 0.11 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Nébulosité : Deux sortes de rétroactions sont produites par les nuages. À une température plus élevée plus d'eau est évaporée et se retrouve dans l'atmosphère pour former plus de nuages. L'albédo des nuages augmente, ce qui reflète plus l'irradiation entrante vers l'espace, donc moins d'absorption ; c'est une rétroaction stabilisante, négative. Mais à de hautes altitudes la nébulosité contribuera plus au forçage radiatif dans l'infrarouge (par les gouttes d'eau, et non par la vapeur dont le cas a été traité plus haut). Globalement l'estimation est très incertaine, avec une valeur légèrement positive :

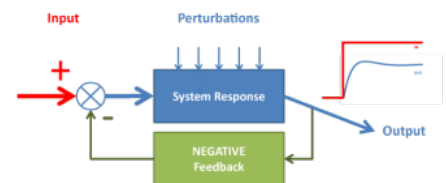
$$\lambda_C = 0.28 \pm 0.84 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Tous ces facteurs s'additionnent, résultant en un facteur total de rétroaction négatif,

$$\lambda = \lambda_P + \lambda_{WV} + \lambda_{LR} + \lambda_A + \lambda_C = -3.21 + 1.63 - 0.60 + 0.31 + 0.28 = -1.59$$

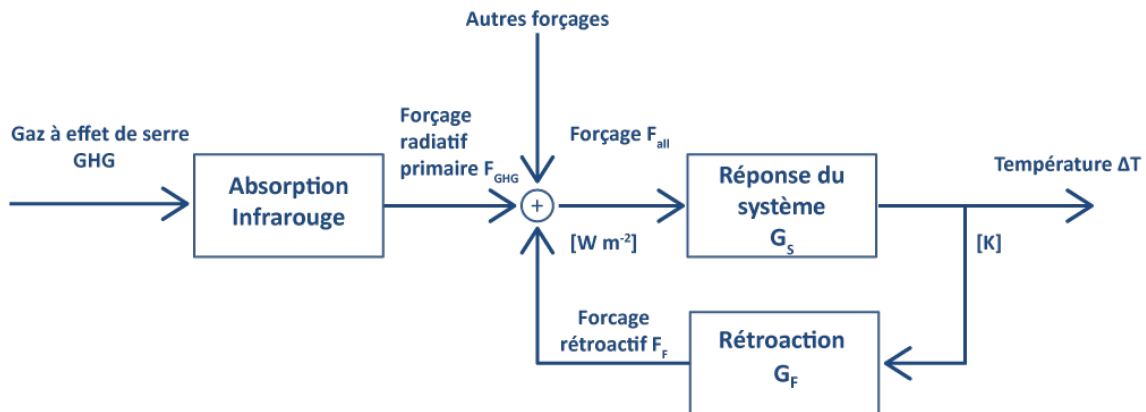
mais pouvant aussi être légèrement positif si l'on considère les marges d'erreurs.

$$\lambda = -1.59 [\pm 1.85] \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$



Forçage incluant les rétroactions.

Le schéma classique du système avec rétroaction est donné ci-dessous :



$$\Delta T = G_S \cdot F_{all}$$

$$F_F = G_F \cdot \Delta T$$

$$F_{all} = F_{GHG} + F_F = F_{GHG} + G_F \cdot \Delta T$$

$$\Delta T / G_S = F_{GHG} + G_F \cdot \Delta T$$

$$\Delta T \cdot (1 - G_F \cdot G_S) = G_S \cdot F_{GHG}$$

La sensibilité de la température au forçage dû par exemple aux gaz dits à effet de serre est :

$$\Delta T = \frac{G_S}{1 - G_S \cdot G_F} \cdot F_{GHG}$$

Où la fonction de transfert G_S est la réponse primaire du système selon Stefan-Boltzmann :

$$G_S = \frac{dT}{dF} = \frac{1}{4 \cdot \epsilon \cdot \sigma} \cdot \left(\frac{F}{\epsilon \cdot \sigma} \right)^{-\left(\frac{3}{4}\right)}$$

Dans un intervalle autour de la température moyenne de la surface du globe (288 K environ), G_S peut être considéré comme constante à $0.200 \text{ K W}^{-1} \text{ m}^2$.

La fonction de transfert G_F est identique au facteur global de rétroaction λ :

$$G_F = \lambda = -1.59 [\pm 1.85] \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Il s'ensuit que $F_{GHG} \cdot 0.2 / (1 + 0.2 \cdot 1.59) = \Delta T = F_{GHG} \cdot \mathbf{0.152}$

F_{GHG} se calcule selon les formules pratiques de Myhre², dont pour le CO_2 : $\mathbf{F_{GHG} = 5.35 \cdot \ln\left(\frac{C_1}{C_0}\right)}$

La sensibilité de la température de la surface de la terre à la concentration en CO_2 sera donc :

Avec G_S stable à $0.200 \text{ K W}^{-1} \text{ m}^2$	F_{GHG}	Rétroaction $G_F = \lambda$		ΔT_s
	$[\text{W m}^{-2}]$	Scénario	$[\text{W m}^{-2}]$	$[\text{K or } ^\circ\text{C}]$
Depuis le début de l'ère industrielle (tous les gaz concernés)	2.59	pas de rétroaction	0	0.48
		rétroaction faible	+0.26	0.51
		λ moyen	-1.59	0.37
		rétroaction forte	-3.44	0.29
Depuis le début de l'ère industrielle CO_2 seulement 400 ppm / 280 ppm	1.91	pas de rétroaction	0	0.36
		rétroaction faible	+0.26	0.38
		λ moyen	-1.59	0.28
		rétroaction forte	-3.44	0.22
Pour chaque doublement de la concentration en CO_2	3.71	pas de rétroaction	0	0.69
		rétroaction faible	+0.26	0.73
		λ moyen	-1.59	0.53
		rétroaction forte	-3.44	0.42

Voir aussi le diagramme à la page suivante.

Ainsi ce qui est appelé par le GIEC **Equilibrium Climate Sensitivity (ECS)**, soit l'augmentation de la température correspondant à un doublement de la concentration en CO_2 , est de $\mathbf{0.53 \pm 0.2} \text{ } ^\circ\text{C}$.

Le GIEC prétend que ECS est de 1.5 à 4.5 $^\circ\text{C}$, ce qui n'est pas compatible avec les calculs de bilan énergétique qui, même simples, ne peuvent pas être malmenés ainsi.

² Myhre et al.

New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases.

Geophysical Research Letters, Vol. 25, No.14, pages 2715-2718, July 15, 1998

http://folk.uio.no/gunnarmy/paper/myhre_grl98.pdf

