

L'effet de serre atmosphérique :
plus subtil qu'on ne le croit !

Jean-Louis Dufresne, LMD-IPSL, CNRS-Université Paris 6

Jacques Treiner, Paris 6

Par souci de simplicité, l'effet de serre atmosphérique est souvent expliqué par analogie avec l'effet de serre produit par une vitre. On traite ainsi l'atmosphère comme un corps ayant une température homogène, et dont le pouvoir absorbant du rayonnement infrarouge de la Terre augmenterait avec la concentration de gaz à effet de serre dont le dioxyde de carbone. Or ceci est doublement inexact. Comment rendre compte simplement des mécanismes vraiment à l'œuvre ?

Température d'équilibre d'une surface exposée au Soleil.

Lorsqu'une surface est exposée au rayonnement solaire, sa température d'équilibre résulte de l'égalité entre l'énergie qu'elle absorbe et celle qu'elle perd par émission de rayonnement (dans cet article, nous négligeons les modes de transfert d'énergie autres que le rayonnement). Tout corps émet en effet un rayonnement qui dépend de sa température. L'énergie solaire, c'est du rayonnement émis par une surface à 5760 K ; l'énergie émise par la Terre, c'est du rayonnement émis par une surface à environ 300 K. Dans le premier cas, les longueurs d'onde se situent de part et d'autre du visible, disons de 0,3 à 4 micromètres ; dans le second, c'est du rayonnement infrarouge dont les longueurs d'onde s'étendent de 4 à environ 40 micromètres, cf. Fig. 1.

Il convient en fait de raisonner en intensité, c'est-à-dire en énergie par unité de temps et par unité de surface.

Effet de serre d'une vitre

Lorsqu'on place une vitre au dessus de la surface, on constate que la température d'équilibre de la surface est supérieure à ce qu'elle est en l'absence de la vitre. Pourquoi ?

Une vitre a la propriété d'être transparente au rayonnement solaire et opaque au rayonnement infrarouge émis par la surface. Elle absorbe donc ce rayonnement, se réchauffe, et émet dans toutes les directions un rayonnement lié à la température qu'elle atteint. La surface reçoit donc une puissance plus grande qu'auparavant : à l'énergie solaire s'ajoute maintenant l'énergie émise par la vitre. En conséquence, sa température d'équilibre est supérieure à ce qu'elle était précédemment (cf. Pour en savoir plus).

Insuffisance de l'explication pour l'effet de serre atmosphérique

C'est ce mécanisme qu'on invoque à propos de l'effet de serre atmosphérique, en faisant jouer à l'atmosphère le rôle de la vitre. L'atmosphère est en effet *assez* transparente au rayonnement solaire, et la présence de certains gaz, cf. Fig 2, la rend *assez* opaque au rayonnement infrarouge émis par la Terre. On comprend ainsi que la température moyenne de surface du globe soit supérieure à ce qu'elle serait sans la présence de ces gaz : un calcul schématique donne -18°C si les gaz à effet de serre n'existaient pas, alors que la température moyenne est aujourd'hui de $+15^{\circ}\text{C}$.

Cette représentation suggère que si la concentration en gaz à effet de serre augmente, l'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère va augmenter, induisant une augmentation corrélative de sa température. Et comme la puissance du rayonnement émis par un corps augmente avec sa température, l'atmosphère enverra plus d'énergie vers le sol qu'auparavant, d'où augmentation de la température d'équilibre de la surface.

Il se trouve que cette explication, pour satisfaisante qu'elle soit au premier abord, *est fausse* pour certains gaz, comme le CO₂. Mais pour s'en rendre compte, il est nécessaire de revenir aux propriétés d'absorption des molécules impliquées dans l'effet de serre.

Qu'est-ce qu'un gaz à effet de serre ?

C'est un gaz dont les molécules sont susceptibles d'absorber une partie du rayonnement infrarouge qu'il reçoit de la Terre. Les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, les oxydes nitreux et l'ozone.

La Fig. 3 montre les propriétés d'absorption des gaz à effet de serre pour une atmosphère terrestre « moyenne », sans nuage. Pour chaque longueur d'onde, ces courbes l'absorptivité de l'atmosphère, c'est-à-dire la proportion du rayonnement émis par la surface qui est absorbée par la totalité de l'atmosphère avant de s'échapper vers l'espace. Lorsque l'absorptivité vaut 1, le rayonnement émis par la surface est totalement absorbé, on dit alors que l'~~absorption~~absorptivité est « saturée ».

Concentrons-nous sur la vapeur d'eau (en bleu) et le dioxyde de carbone (en rouge). La vapeur d'eau est le principal gaz à effet de serre, car elle absorbe le mieux le rayonnement terrestre : l'~~absorption~~absorptivité est saturée ($A = 1$) pour une grande plage de longueurs d'onde, notamment entre 5 et 8 micromètres puis au-delà de 16 micromètres. Pour le dioxyde de carbone, l'absorptivité est totale autour de 5 et autour de 15 micromètres. Notons, entre 8 et 16 micromètres, une fenêtre d'~~absorption~~absorptivité faible, qui implique que dans cette gamme de longueurs d'onde, le rayonnement émis par la surface de la Terre traverse l'atmosphère et s'échappe vers l'espace.

Ces courbes dépendent à priori de la quantité de gaz présente dans l'atmosphère. La concentration de dioxyde de carbone est aujourd'hui de 380 ppmv (parties par million en volume), alors qu'elle était de 280 ppmv avant l'ère industrielle. Il est distribué de façon homogène dans l'atmosphère. Ramené à la pression atmosphérique au niveau du sol et à la température ambiante, il formerait une couche de trois mètres d'épaisseur.

La vapeur d'eau provient essentiellement de l'évaporation des océans, mais sa quantité est limitée par sa condensation (formation des nuages et de la pluie) qui dépend de la température: plus la température est faible, plus la quantité d'eau qui peut être sous forme vapeur est faible. Ceci fait que l'essentiel de la vapeur d'eau se trouve dans les basses couches de l'atmosphère, et on caractérise sa présence par la masse totale dans une colonne d'atmosphère, exprimée en kg/m^2 . La valeur moyenne à la surface du globe est de 20 kg/m^2 .

Qu'advient-il si l'on modifie ces concentrations ? Le résultat est inattendu : mieux, il soulève une interrogation cruciale... On constate en effet sur la Fig. 4 que, pour le dioxyde de carbone, l'absorptivité du rayonnement infrarouge par l'atmosphère ne change pratiquement pas ! Même un doublement de la concentration en dioxyde de carbone n'a presque aucun effet. *Mais si l'absorptivité du rayonnement par le dioxyde de carbone ne change pas, l'effet de serre ne devrait pas changer et la température d'équilibre de la Terre non plus !* Pourquoi tant s'inquiéter, alors, d'une augmentation des émissions de ce gaz ?

Avant de répondre à cette question, voyons ce qu'il en est pour la vapeur d'eau. La Fig. 5 montre l'absorptivité pour des teneurs de l'atmosphère en vapeur d'eau allant de 5 kg/m^2 à 40 kg/m^2 , ce qui couvre la gamme des valeurs actuellement observées. On constate que, pour les longueurs d'onde comprises entre 8 et 20 micromètres, *l'absorptivité augmente avec la teneur en vapeur d'eau*. En dehors de ce domaine spectral, l'absorptivité est totale.

La saturation de l'~~absorption~~absorptivité du rayonnement

Une façon de synthétiser ces propriétés consiste à calculer l'absorptivité de l'atmosphère, moyennée sur tout le spectre, pour le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre. Les résultats pour différentes valeurs des concentrations sont présentés Fig. 6a et b.

Pour le dioxyde de carbone, la saturation de la bande d'absorption à 15 micromètres visible Fig. 5 se reflète dans le fait que la courbe Fig. 6a est quasiment plate pour des concentrations supérieures à environ 200 ppm. L'absorptivité moyenne augmente fortement

avec la concentration de CO₂ uniquement pour des concentrations inférieures à quelques dizaines de ppmv, ce qui, ramené à la pression atmosphérique, correspondrait à une couche de gaz de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur. Lorsque l'atmosphère contient de la vapeur d'eau, la courbe est encore plus plate.

Le cas de la vapeur d'eau est très différent (Fig. 6b). Pour des faibles quantités de vapeur d'eau (inférieures à 2 kg/m²), l'absorptivité moyenne augmente rapidement avec la concentration, et elle *continue d'augmenter* pour des valeurs plus élevées. La forte augmentation de l'absorptivité pour les faibles contenus en vapeur d'eau est due aux bandes d'absorption les plus intenses (entre 6 et 8 micromètres, et au dessus de 20 micromètres). Quand celles-ci sont saturées, l'accroissement plus lent de l'absorptivité provient du comblement progressif de la « fenêtre » d'absorption faible entre 8 et 20 micromètres (cf. Fig. 5).

La notion d'altitude d'émission

Lorsque l'absorptivité est totale, quel est l'effet d'une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre ? Une autre façon de poser la question, plus intéressante car elle va nous mener vers la solution, consiste à se demander *comment le rayonnement correspondant à l'absorptivité totale est-il émis vers l'espace ?* Il faut raisonner en considérant les différentes couches atmosphériques.

Hors fenêtre atmosphérique, le rayonnement émis par la surface de la Terre est totalement absorbé par les basses couches de l'atmosphère. Celles-ci émettent leur propre rayonnement dans toutes les directions – vers la surface, et vers l'espace – et ainsi de suite de proche en proche en montant en altitude. Puis *vient un moment où la quantité de gaz absorbant située au dessus de la couche émettrice considérée devient suffisamment faible pour que le rayonnement qu'elle émet puisse s'échapper vers l'espace.* Il ne s'agit pas, bien sûr, d'une altitude précise, car d'une part le phénomène est continu et d'autre part il dépend de la longueur d'onde.

Ainsi, pour chaque longueur d'onde, on peut décomposer de façon schématique l'atmosphère en deux couches (Fig. 7a). Une première, aux basses altitudes, pour laquelle le rayonnement qu'elle émet n'atteint jamais l'espace. Cette couche est dite aveugle, elle ne voit pas l'espace et réciproquement elle n'est pas vue depuis l'espace. La seconde couche est constituée de l'atmosphère au dessus de la précédente. Le rayonnement qu'elle émet vers le haut atteint l'espace. Et réciproquement, c'est cette couche qui est vue depuis l'espace, notamment par les radiomètres à bord des satellites.

On peut définir l'altitude moyenne à laquelle le rayonnement qui atteint l'espace a été émis. Cette altitude est appelée *altitude d'émission* et cette notion nous permet de construire une image mentale simplifiée des échanges radiatifs lorsque l'absorptivité dans l'atmosphère est saturée : *le rayonnement vu depuis l'espace est émis par l'atmosphère en moyenne à une altitude Z_e , et la puissance émise dépend, comme nous l'avons vu, de la température à cette altitude d'émission.*

L'altitude d'émission, dans les domaines spectraux correspondant aux bandes d'absorption de H₂O ou du CO₂, est de l'ordre de quelques kilomètres, disons de 3 à 8 km. En dehors de la fenêtre de transparence de l'atmosphère (entre 8 et 13 micromètres), l'essentiel du rayonnement qui sort du système Terre-atmosphère est donc émis par la région de l'atmosphère comprise entre 3 et 8 km d'altitude.

Que se passe-t-il lorsque la quantité de gaz absorbant augmente ? L'épaisseur de la couche aveugle augmente, comme schématisé Fig. 7b, et par conséquent *l'altitude d'émission augmente* aussi. C'est le point crucial, car la température diminue avec l'altitude.

Prise en compte du gradient de température vertical

L'intensité du rayonnement émis par une couche de l'atmosphère varie beaucoup avec sa température absolue T, car il s'agit de la quatrième puissance de T (cf. Encart rayonnement thermique). Par exemple, le rapport des intensités émises lorsque la température passe de

+15°C à -15°C est $\left(\frac{273-15}{273+15}\right)^4 = 0,64$. Or la température décroît d'environ 60°C entre la surface et une altitude de 10km, à cause des *mouvements de convection atmosphérique*. De quoi s'agit-il ?

L'atmosphère est en permanence soumise à des mouvements ascendants et descendants. Lors du mouvement ascendant d'une masse d'air, les échanges thermiques avec l'air environnant sont négligeables, car l'échelle de temps de la montée est plus rapide que celle de la conduction thermique. Comme la pression de l'air environnant diminue avec l'altitude, la masse d'air en ascension se détend, se dilate, et par conséquent se refroidit. De façon analogue, le mouvement descendant d'une masse d'air s'accompagne d'un réchauffement. Le gradient thermique est de 1°C tous les 100 m si l'air est sec, et en moyenne de 0,6°C tous les 100 m pour de l'air humide. Il varie donc de région en région, suivant l'humidité de l'atmosphère. Pour simplifier, considérons un gradient moyen constant. Le point essentiel est qu'il est *indépendant des échanges radiatifs*.

Accroissement de l'effet de serre pour une atmosphère dont l'absorptivité est saturée.

Nous sommes maintenant en mesure de répondre à notre question initiale : *si l'absorptivité par l'atmosphère du rayonnement émis par la surface terrestre est déjà saturée (donc maximale), par quel mécanisme l'augmentation de la concentration d'un gaz absorbant peut-elle augmenter l'effet de serre, et donc la température de surface de la Terre ?*

La réponse est schématisée Fig. 8.

La Fig. 8a représente la situation d'équilibre : le flux solaire absorbé par la surface est compensé par le flux émis par l'atmosphère à l'altitude Z_e et à la température T_1 .

L'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre introduit un déséquilibre, représenté Fig. 8b : l'altitude d'émission augmentant, la température T_2 d'émission est plus

faible, et le flux d'énergie rayonné à cette altitude ne compense plus le flux solaire absorbé. Conséquence : l'atmosphère tend à se réchauffer à cette altitude.

Retour vers l'équilibre, Fig. 8c : la température à la nouvelle altitude d'émission s'équilibre à T_1 . Mais comme le gradient thermique est imposé par les mouvements de convection, c'est l'ensemble de la colonne atmosphérique qui se réchauffe de proche en proche. Au niveau du sol, la température augmente également.

Indiquons ici une rétroaction positive importante : la température augmentant, la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère augmente aussi, ce qui induit une augmentation corrélative de l'effet de serre.

Résumons : *même si l'atmosphère absorbe tout le rayonnement émis par la surface terrestre, l'effet de serre augmente si la concentration en gaz à effet de serre augmente. La variation de l'altitude d'émission et l'existence d'un gradient vertical de température jouent le rôle clef.*

L'interprétation de l'effet de serre présentée ici comporte encore d'importantes simplifications. Par exemple, le traitement d'un mélange de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone pose le problème du recouvrement des spectres d'absorption de ces deux molécules. Mais comme la vapeur d'eau est principalement située dans la basse atmosphère, le raisonnement que nous avons fait est valable en considérant le CO_2 situé au-dessus de la vapeur d'eau.

Une autre simplification a consisté à ne pas tenir compte du fait que le gradient vertical de température change de signe vers 10-15 km d'altitude : dans la stratosphère en effet, l'absorption du rayonnement UV par l'ozone et le dioxygène induisent une *augmentation* de la température avec l'altitude. Si l'on applique le raisonnement précédent à cette région, on trouve qu'une augmentation de l'altitude d'émission *augmente* la température d'émission et donc *diminue* l'effet de serre. Des calculs plus complets montrent cependant

que la stratosphère a un comportement neutre lorsque le CO₂ varie, car elle se refroidit lorsque le CO₂ augmente.

Conclusion

Pour terminer, il convient de préciser le statut des modèles discutés ici, et de bien les différencier des calculs effectués par les spécialistes. Ceux-ci calculent les bilans radiatifs des différentes couches atmosphériques à partir des données moléculaires, et dans une géométrie tridimensionnelle. L'effet de serre est un *résultat* de ces calculs, et, par exemple, l'émission vers l'espace du rayonnement infrarouge terrestre est traitée dans toute sa complexité, et non en terme d'*une seule* altitude d'émission. Le calcul du bilan radiatif de la Terre en réponse à une modification de la concentration en dioxyde de carbone repose sur des bases physiques solides et ne comporte plus de difficulté fondamentale. Les climatologues se concentrent sur la modélisation de phénomènes plus difficiles : rôle des nuages, des aérosols, changement des pluies et des phénomènes météorologiques, etc...

En calculant les échanges radiatifs pour une atmosphère donnée, et pour la même atmosphère dans laquelle on met alternativement à zéro la concentration de chacun des gaz absorbant (CO₂, H₂O, O₃...), on peut estimer la contribution moyenne de ces différents gaz à l'effet de serre global, dans les conditions actuelles. On peut également quantifier la perturbation de l'effet de serre. Comme résultat classique, citons qu'un doublement de la concentration de CO₂ augmente l'effet de serre de 3,7 W.m⁻².

Bien que ces approches détaillées existent, il est important d'élaborer des modèles simples qui permettent de *comprendre* les mécanismes à l'œuvre. Comprendre, c'est être capable de se faire une représentation mentale qualitative de ces mécanismes. Mais simple ne veut pas dire simpliste : le modèle de l'effet de serre d'une vitre ne permet pas d'interpréter la variation de l'effet de serre dû à l'augmentation de la concentration en CO₂. Cet article apporte une représentation plus fidèle des processus en jeu.

Rayonnement thermique d'une surface et équilibre radiatif

La loi qui régit l'émission thermique de rayonnement d'un corps est connue expérimentalement depuis la seconde moitié du 19^{ème} siècle et bien établie théoriquement depuis le début du 20^{ème} siècle : c'est la loi du *rayonnement du corps noir*. Le qualificatif « noir » signifie ici que ce corps absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit, et il émet un rayonnement lié à sa propre température. La puissance émise P par unité de surface d'un corps à la température (absolue) T est proportionnelle à la 4^{ème} puissance de T :

$$P = \sigma T^4$$

La constante dite de Stefan-Boltzmann σ s'exprime à l'aide de constantes fondamentales de la physique (dont la vitesse de la lumière et la constante de Planck) et prend la valeur $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Le Soleil est un corps noir (idée non dépourvue de poésie) parce que, dans son volume, le rayonnement est sans cesse absorbé et émis par le plasma. La surface du Soleil est la région d'où le rayonnement s'échappe dans l'espace, avec les caractéristiques de l'équilibre matière-rayonnement sous-jacent.

La température d'équilibre d'une surface parfaitement absorbante soumise au rayonnement solaire d'obtient de la façon suivante. Pour chaque élément de surface, il y a égalité entre la puissance S gagnée par absorption et la puissance P émise. On a donc :

$$S = \sigma T_S^4 \tag{1}$$

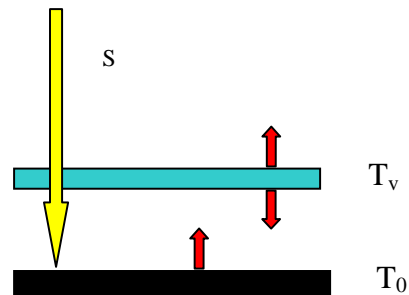
Pour un bon ensoleillement de valeur $S = 1000 \text{ Wm}^{-2}$, on trouve $T_S = 364 \text{ K}$, ou 91°C . Cette valeur peut surprendre, mais elle correspond à ce qui se passe effectivement à la surface de la Lune, où aucune atmosphère ne vient s'interposer. La température maximale que l'on y a

enregistrée est de 117°C. L'ensoleillement maximal est de 1368 Wm⁻², comme sur la Terre, et correspond à une température de 121°C.

Si l'on prend pour S la valeur de l'ensoleillement *moyen* à la surface de la Terre, le quart du précédent soit 342 Wm⁻², et en tenant compte du fait que 30% du rayonnement est réfléchi par les nuages et la surface, on trouve T = 255 K ou -18°C.

Effet de serre d'une vitre

La vitre, idéalisée, est *totale*ment transparente au rayonnement solaire, et *totale*ment absorbante du rayonnement émis par la surface. Déterminons, à l'équilibre, la température T_v de la vitre et celle de la surface T₀. Le schéma est représenté Fig. 2 : la surface absorbe le rayonnement solaire (S) et celui que la vitre émet vers elle σT_v^4 ; elle émet un rayonnement à la température T₀ σT_0^4 .



Représentation schématique de l'effet de serre produit par une vitre totalement transparente au rayonnement solaire, et totalement opaque au rayonnement infrarouge

A l'équilibre, les puissances absorbée et émise sont égales :

$$S + \sigma T_v^4 = \sigma T_0^4 \quad (1)$$

La vitre, pour sa part, absorbe le rayonnement émis par la surface, σT_0^4 , elle émet son propre rayonnement vers la surface σT_v^4 et vers l'espace σT_v^4 . On a donc :

$$\sigma T_o^4 = 2\sigma T_v^4 \quad (2)$$

Cette équation, compte tenu de la précédente, implique :

$$S = \sigma T_v^4, \quad (3)$$

ce qui exprime le bilan énergétique global vu de l'extérieur : le rayonnement sortant provient de la vitre, et il équilibre le rayonnement entrant. La température de la vitre est identique à celle d'une surface parfaitement absorbante soumise au seul rayonnement solaire.

En reportant dans l'Eq.(2), on obtient :

$$2S = \sigma T_o^4 \quad (4)$$

La nouvelle température d'équilibre de la surface est donc $2^{1/4}$ fois plus grande qu'en l'absence de vitre. En reprenant l'exemple d'un rayonnement solaire incident de 342 W.m^{-2} dont 30% est réfléchi, on trouve une température de 303 K ou 30°C.

Figures Effet de serre

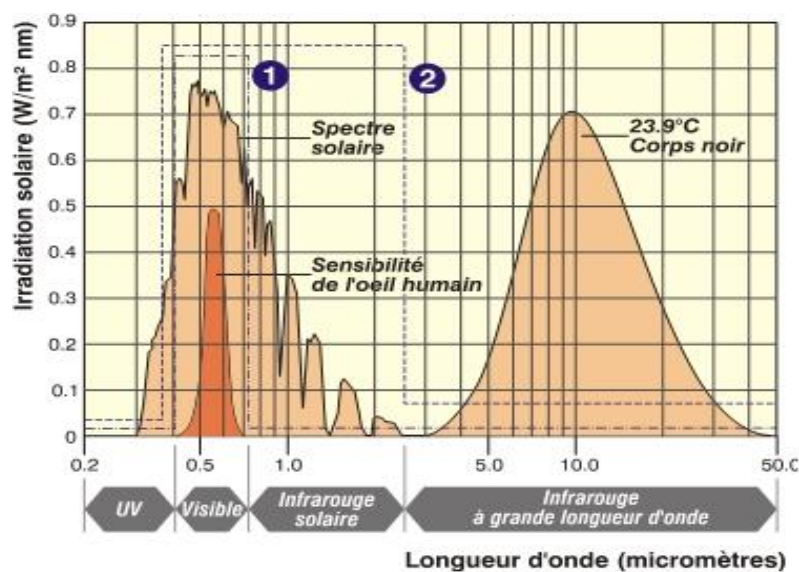


Fig. 1 : à gauche : puissance reçue du Soleil par mètre-carré de surface terrestre, compte tenu de l'absorption atmosphérique ; à droite : puissance émise par mètre-carré de sol

Effet de serre ciel clair

	(W.m ⁻²)	(%)
Vapeur d'eau	75	60%
CO ₂	32	26%
Ozone	10	8%
N ₂ O+CH ₄	8	6%
total ciel clair	125	100%

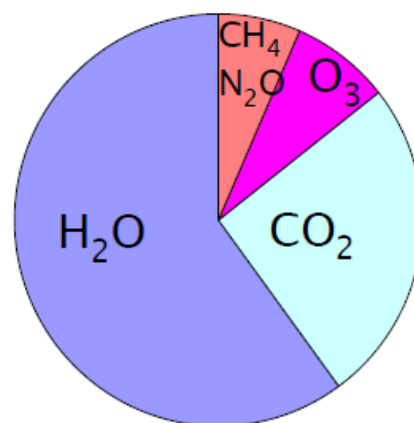


Fig. 1 : Dans les conditions atmosphériques actuelles, contributions des principaux gaz absorbant à l'effet de serre pour une atmosphère sans nuage [Kiehl et Trenberth 1997].

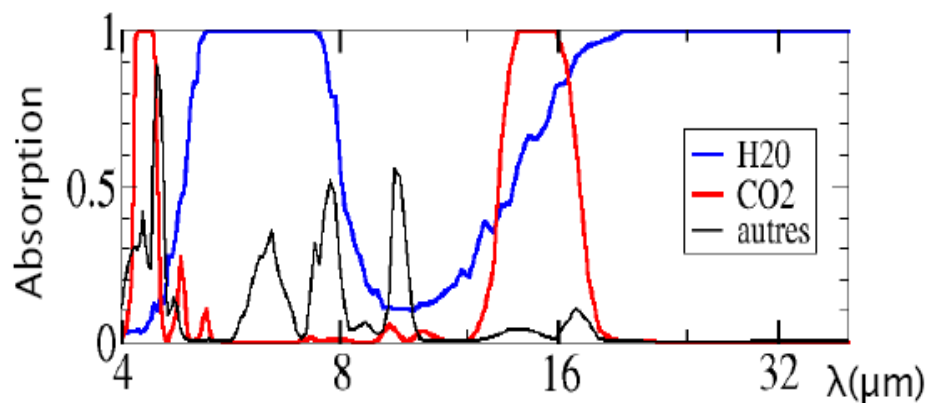


Fig.3 : Dépendance spectrale de l'absorptivité des principaux gaz à effet de serre de l'atmosphère terrestre dans la gamme de longueurs d'onde dans laquelle se situe l'essentiel du rayonnement émis par la surface de la Terre.

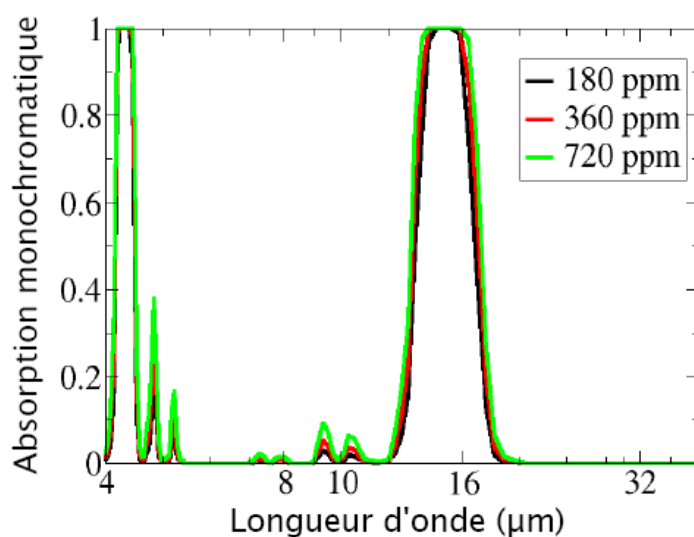


Fig. 4 : Dépendance spectrale de l'absorptivité de l'atmosphère terrestre pour 3 valeurs de la concentration de l'atmosphère en CO₂, si ce gaz était le seul gaz absorbant.

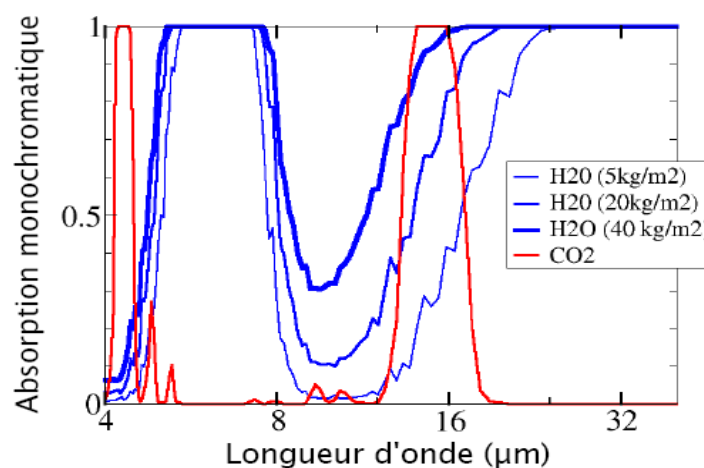


Fig. 5 : Dépendance spectrale de l'absorptivité pour 3 valeurs du contenu de l'atmosphère en vapeur d'eau, ici exprimé en kg/m². La courbe relative au dioxyde de carbone est reproduite pour comparaison.

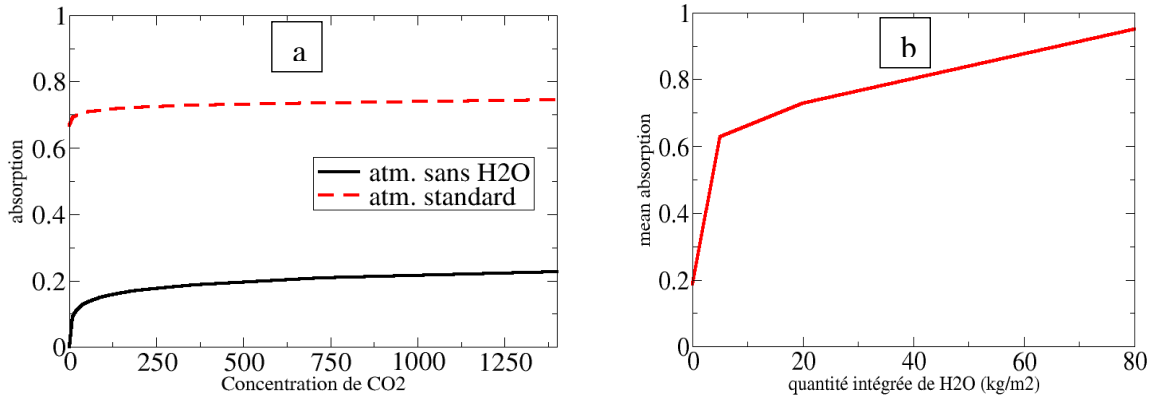


Fig. 6 : Absorptivité de l'atmosphère moyennée sur tout le spectre infrarouge pour le rayonnement émis par la surface de la Terre. A) en fonction de la concentration en dioxyde de carbone, en ppmv, pour une atmosphère sans vapeur d'eau (ligne continue) ou avec une concentration de vapeur d'eau « standard » de 20 kg.m^{-2} (tirets) ; b) en fonction de la masse totale de vapeur d'eau par unité de surface.

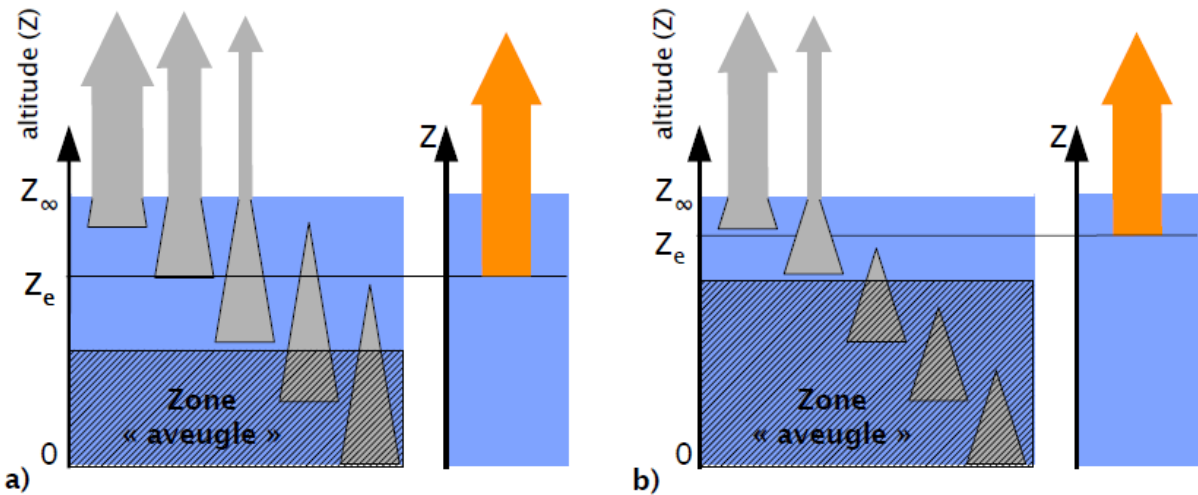


Fig. 7 : A gauche, représentation schématique de l'évolution du rayonnement émis vers le haut par la surface et par l'atmosphère pour 4 altitudes particulières. Les formes en triangle schématisent la diminution progressive de l'intensité du rayonnement avec l'altitude, du fait de l'absorption par l'atmosphère, pour un rayonnement émis à la base du triangle. A droite, représentation de l'altitude d'émission correspondante. En a) le schéma correspond à une atmosphère de référence et en b) une atmosphère pour laquelle la quantité d'absorbant a augmenté.

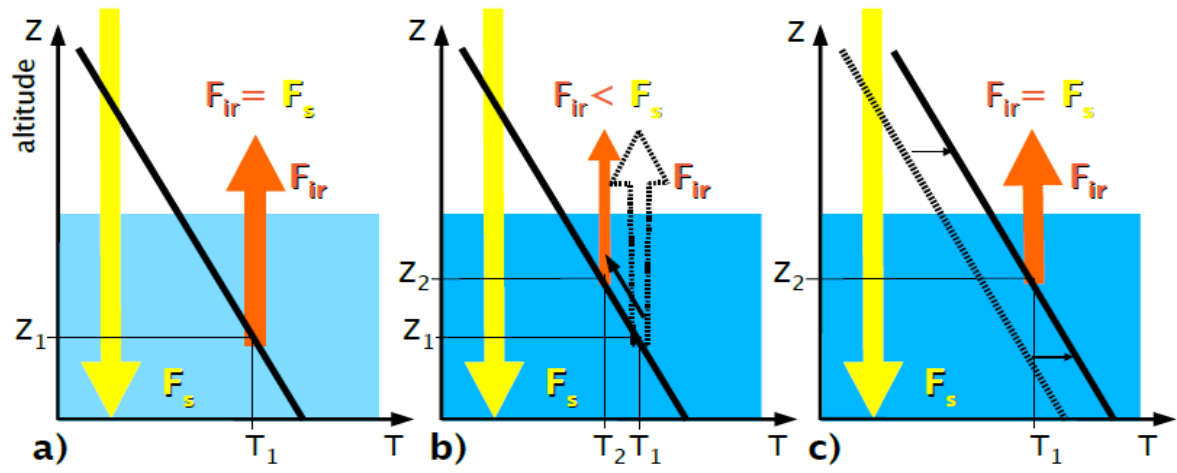


Fig. 8 : Schémas illustrant la variation de l'effet de serre et de la température qui s'ensuit en réponse à une augmentation de l'absorption d'une atmosphère déjà saturée. Ce schéma contient la clef de la compréhension de l'effet de serre pour une atmosphère dont l'absorption est saturée. La droite inclinée figure le gradient thermique.