

"La vapeur d'eau est le gaz à effet de serre  
de loin le plus important.  
Les rejets anthropiques de CO<sub>2</sub> sont donc négligeables."

Jingjing Bu  
Dorothée Robert

19 décembre 2008

L'eau est l'un des constituants majeurs de la Terre, présente dans ses trois états: solide, liquide, vapeur. D'importants échanges ont lieu entre les différents réservoirs d'eau tels que l'atmosphère, les océans, la biosphère, les calottes glaciaires ou les nappes phréatiques, mettant en évidence un cycle hydrologique complexe. Dans l'atmosphère, la vapeur d'eau joue un rôle essentiel dans l'effet de serre, mis en évidence par Tyndall dans les années 1860. Dans la vidéo « L'Arnaque du réchauffement climatique », les arguments avancés pour montrer l'importance du rôle de la vapeur d'eau sont les suivants:

*Le CO<sub>2</sub> forme seulement une très petite part de l'atmosphère. En fait nous modifions le CO<sub>2</sub> à hauteur de dizaines de parts par millions.*

*Si vous prenez le pourcentage de CO<sub>2</sub> par rapport à tous les gaz dans l'atmosphère, l'azote, l'oxygène etc., c'est 0,054 %. C'est une portion incroyablement petite. Et si vous prenez la portion que l'homme est sensé ajouter, ce qui est le point central qui nous concerne, c'est encore plus petit. (Prof Tim Ball, dept. of climatology, university of Winnipeg)*

*Bien que le CO<sub>2</sub> est un gaz à effet de serre, les gaz à effet de serre sont eux-même une petite part de l'atmosphère. De plus le CO<sub>2</sub> est un gaz à effet de serre relativement mineur.*

*L'atmosphère est composé d'une multitude de gaz, il y a une petite portion de ces gaz qu'on appelle les gaz à effet de serre. 95 % de ces gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, qui est le gaz à effet de serre le plus important. (Prof. Tim Ball)*

*La vapeur d'eau est un gaz à effet de serre, de loin le plus important gaz à effet de serre. (Prof. John Christy, dept. of atmospheric science, university of Alabama in Huntsville)*

Le rôle de la vapeur d'eau dans le réchauffement climatique nous semblait donc être un sujet à la fois délicat et intéressant que nous avons essayé de traiter. Nous aborderons dans un premier temps les effets de la vapeur d'eau dans le changement climatique, puis nous comparerons son impact avec celui d'autres gaz à effet de serre, dont le CO<sub>2</sub> qui est le gaz de référence pour le changement climatique anthropique.

## 1 La vapeur d'eau: un acteur du changement climatique

### 1.1 Réchauffement: effet de serre

Commençons par rappeler brièvement ce qu'est l'effet de serre. Certains gaz atmosphériques – appelés gaz à effet de serre (GES) – absorbent dans l'infra-rouge thermique (i.e. rayonnement émis par la Terre), alors qu'ils sont transparents à la lumière visible (i.e. au rayonnement émis par le soleil). Ils absorbent environ 90% du rayonnement terrestre puis le réémettent dans toutes les directions, empêchant ainsi une partie du refroidissement par radiation thermique. La figure suivante illustre ce phénomène.

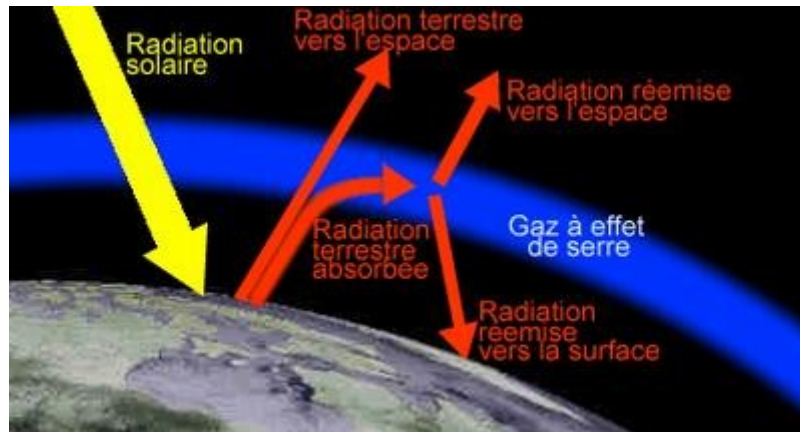


Fig. 1: Schéma de l'effet de serre. En jaune: ondes courtes (visible). En rouge: ondes longues (infrarouge thermique)

L'effet de serre peut être calculer de la façon suivante:

*Effet de serre* = Emission infrarouge de surface – Emission infrarouge en haut de l'atmosphère  
 soit:  $\text{Effet de serre} = 390 - 235 = 155 \text{ W.m}^{-2}$  en utilisant les valeurs de la figure 7.

En utilisant la loi des corps noirs de Stefan-Boltzmann, on peut relier la température de surface à l'émission infrarouge de surface:

$$\text{Emission infrarouge de surface} = \sigma T_s^4$$

Ainsi, la température globale moyenne est d'environ 15°C alors qu'elle serait de l'ordre de -18°C sans l'effet de serre.

Physiquement, à l'échelle moléculaire, l'effet de serre est dû à la capacité des gaz à changer de moment dipolaire en absorbant un photon, suivant un mode de vibration ou de rotation de la molécule.

Les GES absorbent donc dans des plages de fréquences particulières selon leur structure. Si la concentration d'un gaz est suffisante, l'absorption peut être totale dans une plage de fréquences. ceci est notamment le cas pour la vapeur d'eau. La figure 2 montre cet effet:

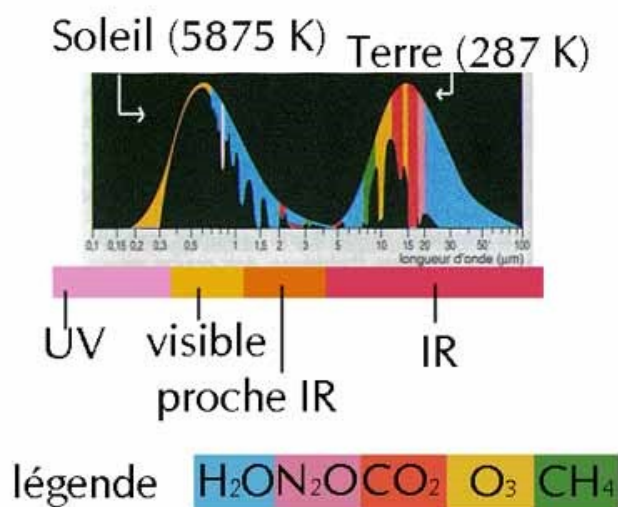


Fig. 2: Absorption des gaz à effet de serre

De plus, les GES ont au moins 3 atomes par molécule, de telle sorte qu'un mode de vibration ou de rotation dans la plage de fréquence qui nous intéresse (l'infrarouge thermique) existe. Parmi les gaz atmosphériques, on peut citer comme gaz à effet de serre: la vapeur d'eau  $H_2O$ , le dioxyde de carbone  $CO_2$ , le méthane  $CH_4$ , le protoxyde d'azote  $N_2O$ , ...

Une augmentation de la concentration en GES dans l'atmosphère contribue donc au réchauffement climatique. Cependant, tous les GES n'ont pas la même contribution.

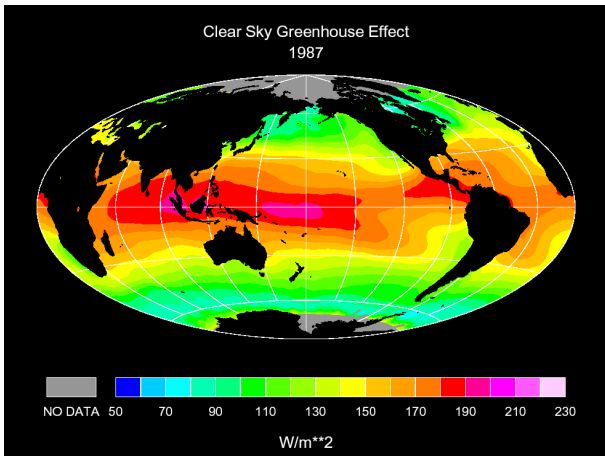


Fig. 3a: Effet de serre (ciel clair)

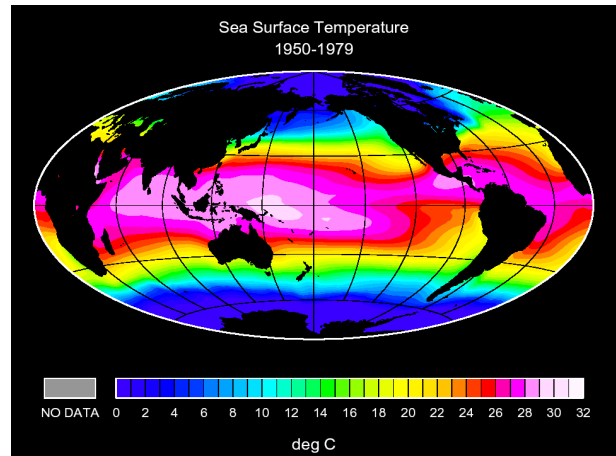


Fig. 3b: Température de surface de la mer

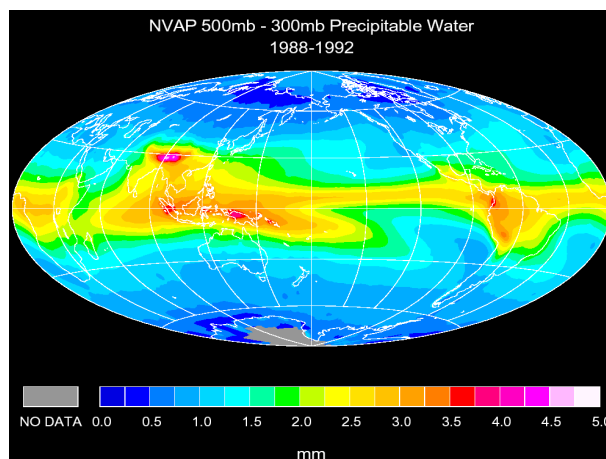


Fig. 3c: Quantité de vapeur d'eau dans la haute troposphère

En première approximation, la température de surface est proportionnelle à l'effet de serre du ciel clair (fig. 3a et 3b). Et l'effet de serre est relié à la quantité de vapeur d'eau (fig. 3a et 3c), qui est le GES le plus abondant dans l'atmosphère et ayant la plus forte variabilité spatiale. La vapeur d'eau est donc un acteur majeur de l'effet de serre.

La vapeur d'eau est un GES naturel puisque l'activité humaine ne modifie pas la concentration au niveau global, mais seulement au niveau local (par exemple près des zones d'irrigation), contrairement aux autres gaz à effet de serre qui peuvent être naturels mais qui ont aussi une origine anthropique.

L'une des particularité de la vapeur d'eau est que sa quantité dépend directement de la température. Cette relation est donnée par la formule de Clapeyron qui relie la pression de vapeur saturante et la température:

$$e_s(T) = e_0 \cdot \exp\left(\frac{L_v M_{\text{eau}}}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

où  $e_s$  est la pression de vapeur saturante,  $T$  la température,  $L_v$  la chaleur latente,  $R$  la constante des gaz parfaits,  $M_{\text{eau}}$  la masse molaire de l'eau,  $e_0$  et  $T_0$  sont respectivement la pression de vapeur saturante et la température au point triple. La figure 4 illustre cette relation.

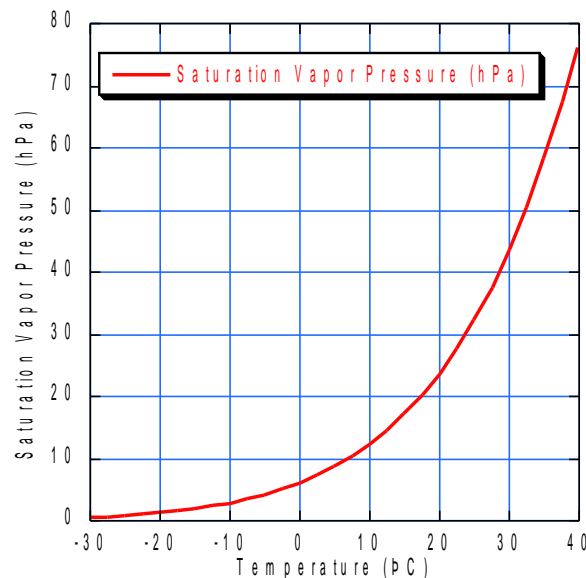


Fig. 4: pression de vapeur saturante vs température

Ainsi, plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur d'eau. Et plus il y a de vapeur d'eau, plus l'effet de serre est important... C'est une rétroaction positive. Cette particularité de la vapeur d'eau fait qu'elle va également avoir un impact important sur la formation des nuages. Nous allons donc nous intéresser à l'effet des nuages sur le climat avant d'étudier d'autres effets secondaires de la vapeur d'eau sur le climat.

## 1.2 Refroidissement: effet parasol

L'eau liquide ou solide présente dans l'atmosphère forme les nuages. Ils agissent de deux façons sur le climat:

- D'une part, ils agissent comme un GES, et participent donc au réchauffement.
- D'autre part, ils réfléchissent une partie des rayons solaires, participant ainsi au refroidissement de l'atmosphère. C'est l'effet parasol. Il est dû à l'albédo élevé des nuages.

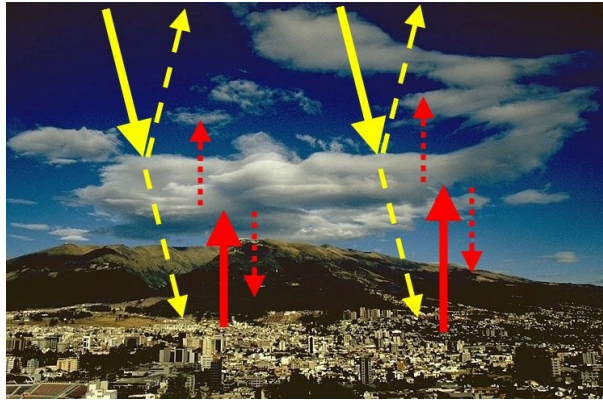


Fig. 5: Effets des nuages. En rouge: effet de serre. En jaune: effet parasol.

Le forçage radiatif des nuages est représenté dans la figure 6. Dans la figure 6a, on voit l'effet des nuages sur les longues longueurs d'onde (infrarouge thermique), le forçage est positif, c'est l'effet de serre, alors que la figure 6b représente l'effet sur les courtes longueurs d'onde (visible), le forçage est négatif, c'est l'effet parasol.

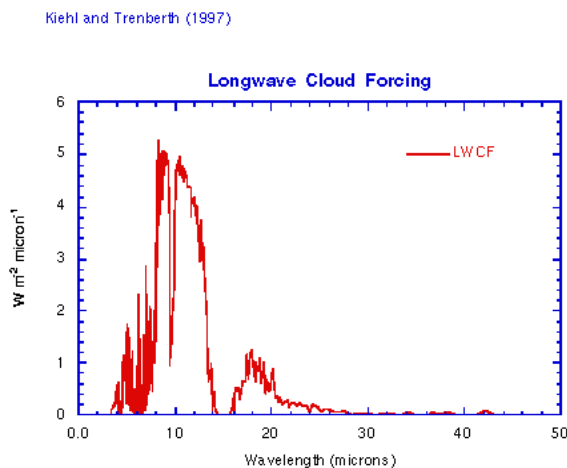


Fig. 6a: Forçage radiatif des nuages dans les grandes longueurs d'onde

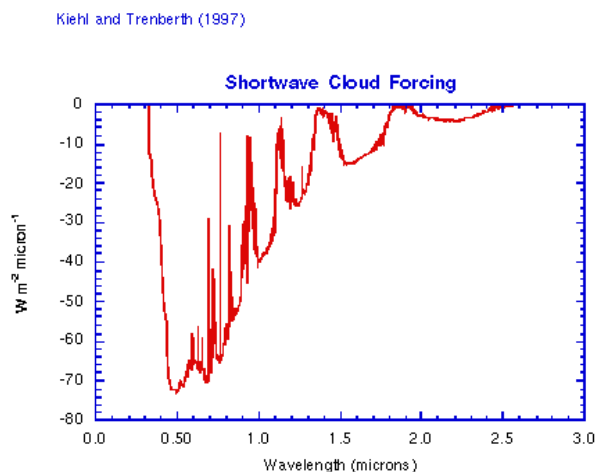


Fig. 6b: Forçage radiatif des nuages dans les courtes longueurs d'onde

Globalement, l'effet parasol des nuages l'emporte sur l'effet de serre: les nuages ont tendance à refroidir l'atmosphère. Ils représentent donc une rétroaction négative de la vapeur d'eau.

La figure 7 montre le bilan d'énergie global moyen annuel de la Terre. On y retrouve notamment l'effet parasol dû aux nuages et l'effet de serre dû à la vapeur d'eau et aux nuages.

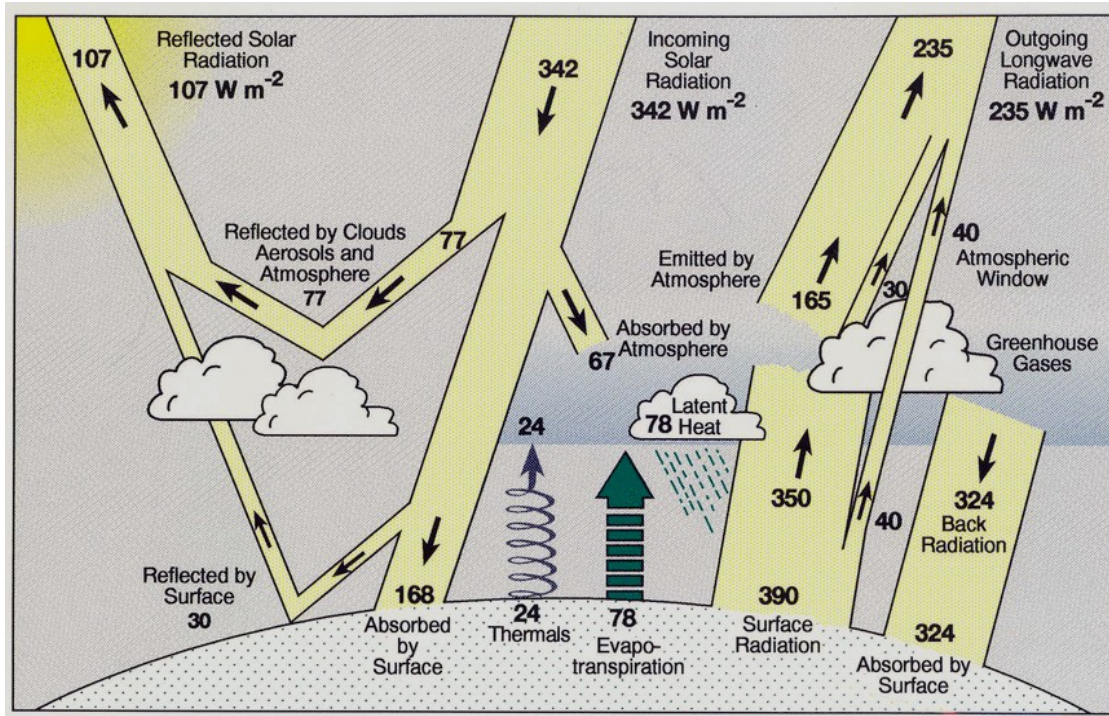


Fig. 7: Bilan d'énergie moyen global annuel de la Terre. Unités:  $W/m^2$ . (à gauche: les ondes dans le visible, à droite: les ondes dans l'infrarouge thermique)

### 1.3 Effets indirects et rétroactions

La quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère n'a pas seulement un effet sur la formation des nuages, il y a également d'autres effets secondaires et rétroactions. Nous allons en expliciter quelques uns.

Pour commencer, nous allons parler de la rétroaction induite par une augmentation de  $CO_2$ . Regardons le fonctionnement de cette rétroaction en commençant arbitrairement par l'étape 1 de la figure 8. Une augmentation de la concentration de  $CO_2$  entraîne une augmentation des émissions infrarouges à la surface de la Terre, et une hausse de la température de surface  $T_M$ . Le gain de chaleur augmente l'évaporation à la surface, et l'humidité absolue de l'atmosphère augmente. Simultanément, le flux de chaleur latente est transféré à l'atmosphère par la vapeur d'eau, entraînant une hausse de la température de la troposphère  $T$  après condensation de la vapeur d'eau. La température de la troposphère augmente aussi avec l'absorption du rayonnement infrarouge du  $CO_2$  et des autres gaz à effet de serre, comme indiqué à l'étape 2 de la figure 8. La hausse de la température de la troposphère augmente l'humidité de l'air. La vapeur d'eau, en tant que gaz à effet de serre, piège le rayonnement infrarouge, et comme la troposphère est plus chaude dans l'ensemble, ça augmente les émissions infrarouge vers la surface, contribuant à son réchauffement. Ce réchauffement de surface contribue à l'évaporation, ce qui ferme la boucle de rétroaction, c'est l'étape 3 de la figure 8.

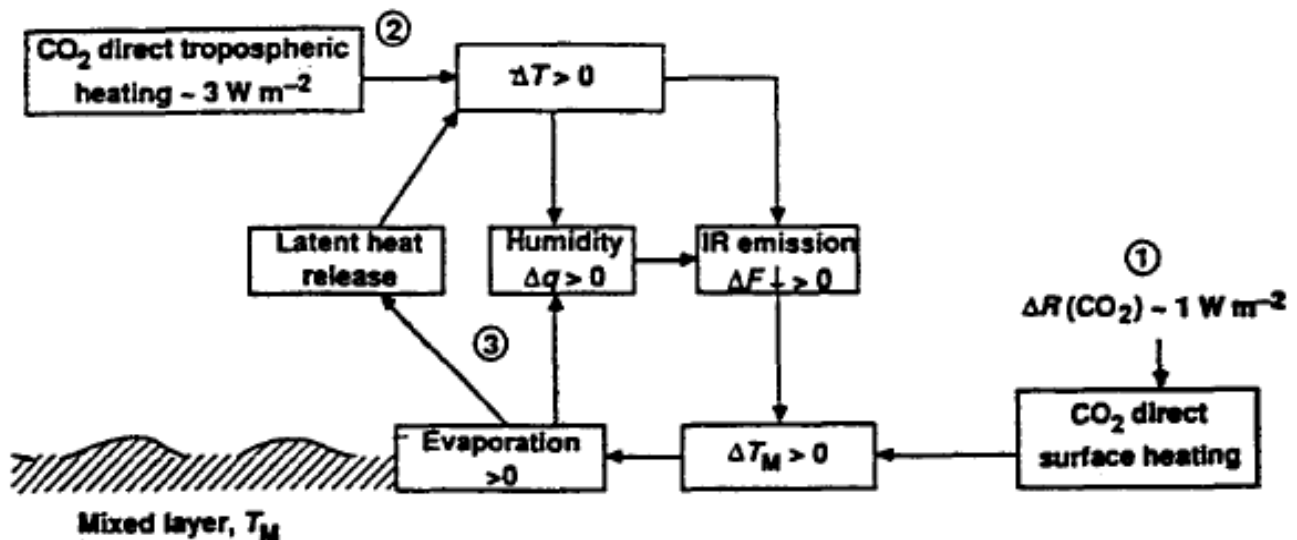
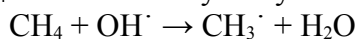
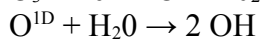
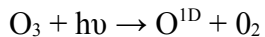


Fig. 8: Une représentation résumée de la rétroaction de la vapeur d'eau (Loaiciga et al).

Dans la stratosphère, la quantité de vapeur d'eau est liée à celle de CH<sub>4</sub>. En effet, le principal puits de CH<sub>4</sub> est le radical hydroxyle OH<sup>·</sup> : il permet d'oxyder CH<sub>4</sub> ou d'autres polluants atmosphériques.



Il est issu de la dissociation photochimique de O<sub>3</sub> et H<sub>2</sub>O.



Une augmentation de vapeur d'eau est donc une augmentation d'un réactif permettant d'obtenir OH<sup>·</sup>, mais une telle augmentation augmente également la formation de nuages qui bloquent le flux de photons nécessaires à la formation de OH<sup>·</sup>.

Prenons également l'exemple des aérosols. Les effets des aérosols sont difficiles à évaluer, mais globalement ils ont un effet de refroidissement du climat et de séchage de l'atmosphère. C'est notamment ce qu'on a pu observer lors de l'éruption volcanique du Pinatubo en 1991. Une étude a été faite après cette éruption pour tester les modèles de prédictions des rétroactions climatiques de la vapeur d'eau. La figure 9 montre que le refroidissement d'environ 0,5K observé après l'éruption correspond à une diminution de la colonne de vapeur d'eau totale d'environ 0,75mm (soit environ 3%). Le taux séchage (environ 6%/K) correspond à la diminution de pression de vapeur saturante avec la température, ce qui implique une humidité relative pratiquement constante.

La figure 10 montre la présence d'une forte rétroaction de la vapeur d'eau, qui amplifie le refroidissement. La partie haute de la figure montre que l'hypothèse d'humidité relative constante est validée alors qu'en supposant qu'il n'y a pas de séchage, on surestime le refroidissement. Dans la partie basse de la figure, on voit que la rétroaction de la vapeur d'eau est nécessaire pour expliquer le refroidissement observé.



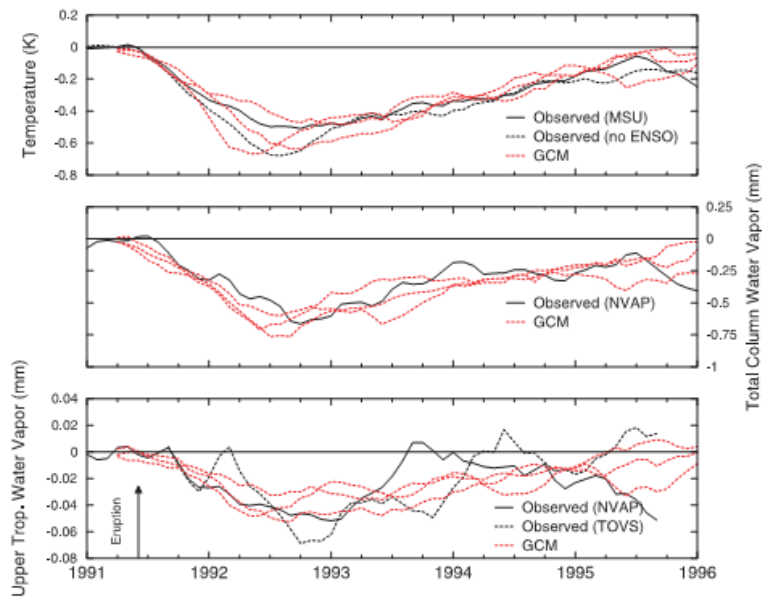


Fig. 9: Comparaison des observations (lignes continues) et des modèles (lignes pointillées) des changements globaux moyens de la température en basse atmosphère (haut), de la colonne totale de vapeur d'eau (milieu) et de la vapeur d'eau dans la haute troposphère (bas). (Soden et al.)

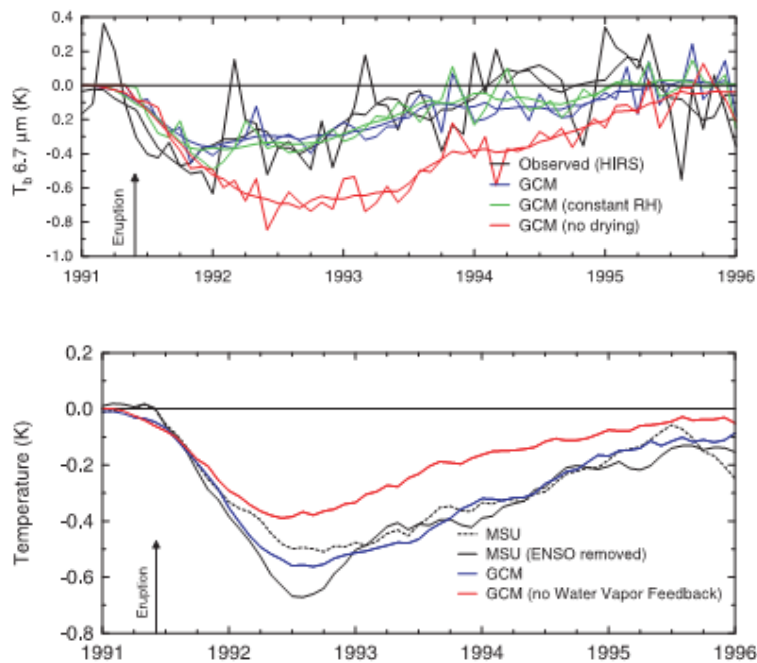


Fig. 10: Comparaison de la température entre les observations (noir) et les résultats d'un modèle de circulation générale (couleurs). En haut: température de brillance à 6,7 μm, sensible à l'humidité relative dans la haute troposphère. En bas: température de la basse atmosphère. (Soden et al.)

Regardons maintenant l'impact des activités humaines. Dans la basse troposphère, l'irrigation semble jouer un rôle sur l'humidité. Ainsi, une augmentation de la concentration en vapeur d'eau d'1% en Asie serait due à l'irrigation. Mais l'effet de l'irrigation sur la température est dominé par le refroidissement lié à l'évaporation plutôt qu'au réchauffement dû à l'augmentation de l'effet de serre. On observe donc une tendance au refroidissement dans les zones d'irrigation. La déforestation est également une activité humaine jouant un rôle sur la teneur en eau dans la basse troposphère: cela engendrerait une diminution de la concentration en vapeur d'eau trois fois plus importante que l'augmentation due à l'irrigation, mais aucune étude n'a encore été faite sur les impacts de cette modification. Ces deux activités humaines affectent plus la température de surface via des procédés non-radiatifs (comme l'évapotranspiration) que par des processus radiatifs (effet de serre); il est alors difficile de parler de forçage radiatif dans ce cas.

Dans cette première partie, nous avons montré qualitativement les effets de la vapeur d'eau sur le climat, qu'ils soient directs: effet de serre, ou indirects: effets des nuages, de certaines activités humaines, des aérosols... Nous allons maintenant essayer de présenter une comparaison plus quantitative entre la vapeur d'eau et les autres gaz à effet de serre.

## 2 Comparaison entre la vapeur d'eau et les autres gaz à effet de serre

### 2.1 Composition atmosphérique & temps de séjour dans l'atmosphère

La première idée qui vient à l'esprit pour comparer les différents gaz à effet de serre entre eux est de comparer leurs concentrations dans l'atmosphère (Table 1). A première vue, bien que la vapeur d'eau ait une grande variabilité spatiale, elle est de loin le gaz à effet de serre le plus important, représentant environ 95% des GES. C'est ce que suggère la vidéo puisqu'ils parlent de l'importance de la vapeur d'eau après avoir comparé sa concentration avec celle du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Néanmoins, la concentration de chaque gaz à effet de serre n'est pas suffisante pour connaître son impact sur le climat. Dans un deuxième temps, on peut s'intéresser à la durée de séjour de ces gaz dans l'atmosphère (Table 1), afin de savoir combien de temps ces gaz vont agir. Cette durée est définie à partir du bilan de masse de l'espèce considérée:

$$\frac{dm}{dt} = E - P = E - k m$$

$$\tau = \frac{P}{dm/dt} = \frac{1}{k}$$

où: m est la masse  
 E représente les émissions, supposées constantes  
 P représente les puits, P est fonction de la masse  
 τ est le temps de séjour dans l'atmosphère.

La durée de séjour d'un gaz dans l'atmosphère dépend donc étroitement des puits qu'il existe pour faire disparaître le gaz considéré. On remarque que le temps de vie de la vapeur d'eau est très petit devant celui des autres GES considérés.

	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Halocarbures (dont CFC)
concentration	- troposphère : variable de 0,1 % à 7 % - stratosphère : 0,0005 % (5 ppm)	0,0365 % (365 ppm)	0,00018 % (1,8 ppm)	0,000032 % (0,32 ppm)	~0,0001 % (~1 ppm)
Temps de séjour dans l'atmosphère	de quelques jours à quelques semaines	100 ans (*)	10 ans	120 ans	50 000 ans (pour CF <sub>4</sub> )

Table 1: Concentrations et temps de séjour pour différents GES

(\*) Il existe plusieurs cycles pour le CO<sub>2</sub> ayant des temps d'ordre de grandeur différent: 1 an, 18 ans, et 172 ans. 100 ans est donc une moyenne pondérée des différents temps de séjour de chacun des cycles.

## 2.2 Impact climatique

Cependant, chacun des gaz à effet de serre n'a pas le même impact sur le climat. Or, cet impact est nécessaire pour pouvoir mesurer l'effet d'émissions de gaz anthropiques. Par exemple, le potentiel de réchauffement global (PRG) est souvent utilisé. Il est défini comme étant le forçage radiatif intégré sur un horizon de temps dû à l'émission d'un kilogramme du gaz considéré, relativement à un kilogramme de CO<sub>2</sub> comme le montre la formule suivante:

$$PRG_i = \frac{\int_0^{TH} RF_i(t) dt}{\int_0^{TH} RF_{CO_2}(t) dt} = \frac{\int_0^{TH} a_i[C_i(t)] dt}{\int_0^{TH} a_{CO_2}[C_{CO_2}(t)] dt}$$

Pour mesurer l'effet dû à l'émission d'un gaz via le PRG, on considère donc que l'impact d'un gaz est son forçage radiatif. Le PRG est un outil couramment utilisé pour comparer les GES anthropiques, prenant en compte leur abondance, leur absorbance dans l'infrarouge thermique et leur temps de séjour dans l'atmosphère. La table 2 donne quelques chiffres de PRG pour différents horizons de temps.

	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CFC-12
TH = 20 ans	?	1	63	279	10340
TH = 100 ans	?	1	23	300	10720
TH = 500 ans	?	1	7	158	5230

Table 2: PRG pour différents GES

Le PRG n'est pas défini pour la vapeur d'eau car ceci ne serait pas pertinent étant donné que ce n'est pas un gaz anthropique, et qu'on ne peut donc pas maîtriser donc pas ses émissions. De plus, son temps de vie dans l'atmosphère est très court comparé à celui des autres gaz à effet de serre, et elle a également des effets non-radiatifs sur le climat (comme l'évapotranspiration citée dans la

section 1.3).

Néanmoins, on peut comparer la contribution de la vapeur d'eau à celui des autres gaz à effet de serre via le forçage radiatif, afin d'évaluer les différents impacts sur le climat. Comme indiqué dans la section 1.1, l'effet de serre naturel correspond à un forçage radiatif de  $+155 \text{ W.m}^{-2}$ . On estime que  $30 \text{ W.m}^{-2}$  sont dû aux nuages, et que les  $125 \text{ W.m}^{-2}$  restants sont dû aux GES, dont  $75 \text{ W.m}^{-2}$  à la vapeur d'eau,  $32,5 \text{ W.m}^{-2}$  au  $\text{CO}_2$ ,  $10 \text{ W.m}^{-2}$  à  $\text{O}_3$  et  $7,5 \text{ W.m}^{-2}$  à  $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$ . Ces valeurs sont représentées dans le diagramme de la figure 11.

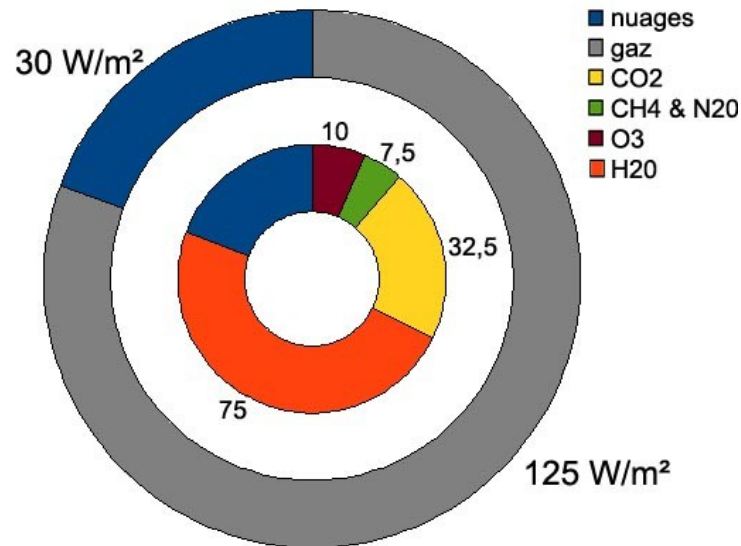


Fig. 11: Forçage radiatif dû à l'effet de serre

Ainsi nous pouvons comparer les effets des différents gaz sur l'effet de serre. Les deux tiers de l'effet de serre sont dus à la vapeur d'eau et aux nuages. Cependant, certains auteurs se contentent de comparer les concentrations des gaz au lieu de leurs impacts. Aussi, suivant les sources, on trouve une contribution de l'eau à l'effet de serre variant entre 50 et 95 %.

Quant au  $\text{CO}_2$ , il a une contribution naturelle et anthropique de l'ordre de 25 %. Sur la figure 12, on voit que la part du  $\text{CO}_2$  anthropique est de 100 ppm, soit un forçage radiatif de  $1,66 \text{ W.m}^{-2}$ , ce qui est faible devant le forçage de la vapeur d'eau qui est de  $75 \text{ W.M}^2$ .

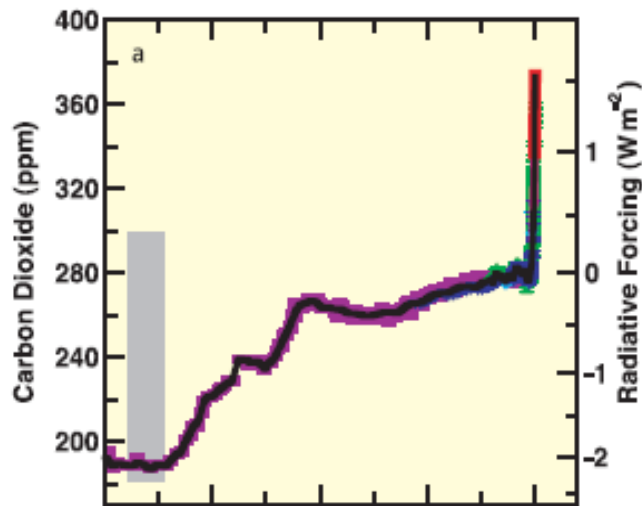


Fig. 12: Concentration et forçage radiatif du CO<sub>2</sub>

Mais même si la vapeur représente à elle seule plus de la moitié de la contribution à l'effet de serre, les rejets anthropiques de CO<sub>2</sub> ne sont pas pour autant négligeables, ceux-ci ayant également un impact sur la vapeur d'eau. En effet, une augmentation de CO<sub>2</sub> entraîne un forçage radiatif, donc une hausse de température. Cette hausse est alors à l'origine d'une augmentation de la concentration en vapeur d'eau dans l'atmosphère, donc d'un forçage radiatif complémentaire... C'est une rétroaction positive.

### 2.3 Incertitudes

Les incertitudes concernant l'effet de l'eau et particulièrement celui de la vapeur d'eau sont très grandes à cause des fortes variabilités de l'humidité dans l'atmosphère (en partie liées au temps de séjour de la vapeur d'eau dans l'atmosphère très court par rapport à ceux des autres gaz à effet de serre), de la méconnaissance du cycle de l'eau (car peu d'études sont faites sur la vapeur d'eau étant donné qu'elle n'a pas une origine anthropique).

### Conclusion

Etudier la vapeur d'eau et son impact climatique est un sujet délicat car le niveau de compréhension scientifique est encore faible, d'une part car très peu d'études sont faites sur la vapeur d'eau car ce n'est pas un gaz anthropique, et d'autre part parce qu'il existe de nombreuses rétroactions positives et négatives. Néanmoins, l'impact climatique de la vapeur d'eau est lié à celui d'autres gaz à effet de serre anthropiques et notamment le dioxyde de carbone. On ne peut donc pas négliger les rejets anthropiques de CO<sub>2</sub> et leur impact climatiques devant celui de la vapeur d'eau puisqu'il existe une dépendance entre ces deux impacts: une hausse de CO<sub>2</sub> entraîne une hausse de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

## Références

- Rapports de l'IPCC 2007 (principalement le chapitre 2)
- Rapports de l'IPCC 2001 (principalement le chapitre 7)
- Kiehl, J. T. and Trenberth, K. E., Earth's Annual Global Mean Energy Budget, 1997, *Bulletin American Meteorology Society*
- Uherek, E., La vapeur d'eau et les nuages, 2004, *Environmental science published for everybody round the Earth*
- Hieb, M., Water Vapor Rules the Greenhouse System, 2003
- Lindzen, R. S., Some Coolness Concerning Global Warming, 1990, *Bulletin American Meteorology Society*
- Lindzen, R. S., Taking Greenhouse Warming Seriously, 2007, *Energy and environnement*
- Global Warming, *National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Center*
- Loaiciga, H. A., Valdes, J. B., Global Warming and Hydrologic Cycle, 1996, *Journal of hydrology*
- Soden, B. J., Wetherald, R. T., Global Cooling After the Eruption of Mount Pinatubo: A Test of Climate Feedback by Water Vapor, 2002, *Science*