

L'effet de serre: sa découverte, sa compréhension et les effets de ses variations sur la température de la Terre

Jean-Louis Dufresne

Laboratoire de Météorologie Dynamique
Institut Pierre Simon Laplace

CNRS, ENS, Ecole Polytechnique, UPMC

Colloque de l'Orme des Merisiers, 1er avril 2010

Plan

1. Histoire de la découverte de l'effet de serre
2. Physique de l'effet de serre, effet de « saturation » des bandes
3. Analyse de l'accroissement de l'effet de serre dû au CO_2 et à H_2O
4. Amplitude du réchauffement en réponse à une perturbation radiative
5. Conclusion

Naissance de la physique du climat

Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaire, J. Fourier, 1824

« La question des températures terrestres, l'une des plus importantes et des plus difficiles de toute la Philosophie naturelle, se compose d'éléments assez divers qui doivent être considérés sous un point de vue général.[...] J'ai désiré surtout présenter aux physiciens, dans un tableau peu étendu, l'ensemble des phénomènes et les rapports mathématiques qu'ils ont entre eux. »



Joseph Fourier

(1768-1830)

- La température en un lieu donné est régie par des phénomènes locaux mais aussi par des **phénomènes globaux**, valables en tous points du globe, **dont il est possible de chercher les lois.**
- Les principaux modes de transferts d'énergie sont
 1. Rayonnement solaire
 2. Rayonnement infra-rouge
 3. Conduction avec le centre de la Terre
- Les échanges de chaleur entre la surface et l'intérieur de la Terre sont négligeables en moyenne annuelle. Signe du gradient vertical de température opposé dans le sol et dans les océans.

L'hypothèse de l'effet de serre

➤ Analogie entre l'atmosphère et la « boîte chaude » utilisé par Horace Bénédict de Saussure. Rôle du rayonnement infra-rouge et hypothèse de « l'effet de serre »

➤ Le transport de chaleur par l'atmosphère et l'océan a un effet négligeable sur la température de surface ➔ En hiver, la température des pôles est égale à la température de « l'espace planétaire »

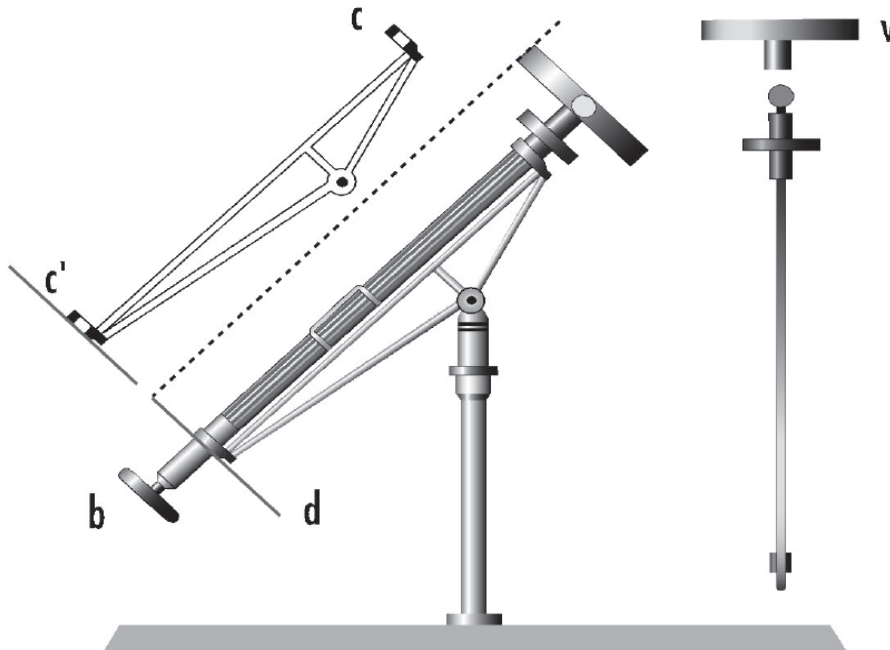
« Dans cette hypothèse du froid absolu de l'espace, s'il est possible de la concevoir, tous les effets de la chaleur, tels que nous les observons à la surface du globe, seraient dus à la présence du Soleil. Les moindres variations de la distance de cet astre à la Terre occasionneraient des changements très considérables dans les températures, l'excentricité de l'orbite terrestre donnerait naissance à diverses saisons. »

➤ Toutes variations de l'ensoleillement ou des propriétés de surface modifieront la température de surface

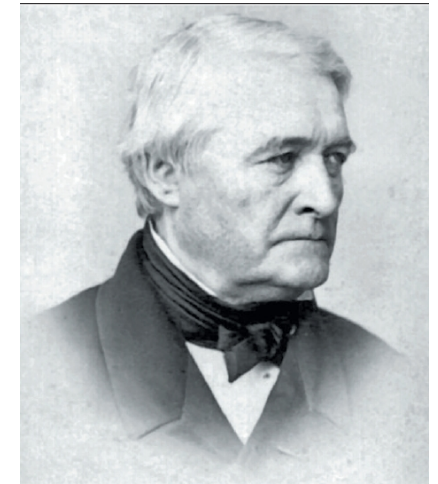
« L'établissement et le progrès des sociétés humaines, l'action des forces naturelles peuvent changer notablement, et dans de vastes contrées, l'état de la surface du sol, la distribution des eaux et les grands mouvements de l'air. De tels effets sont propres à faire varier, dans le cours de plusieurs siècles, le degré de la chaleur moyenne »

La détermination de la constante solaire

Mémoire sur la chaleur solaire, sur les pouvoirs rayonnants et absorbants de l'air atmosphérique, et sur la température de l'espace, Pouillet, 1838



Pyrhéliomètre de C. Pouillet

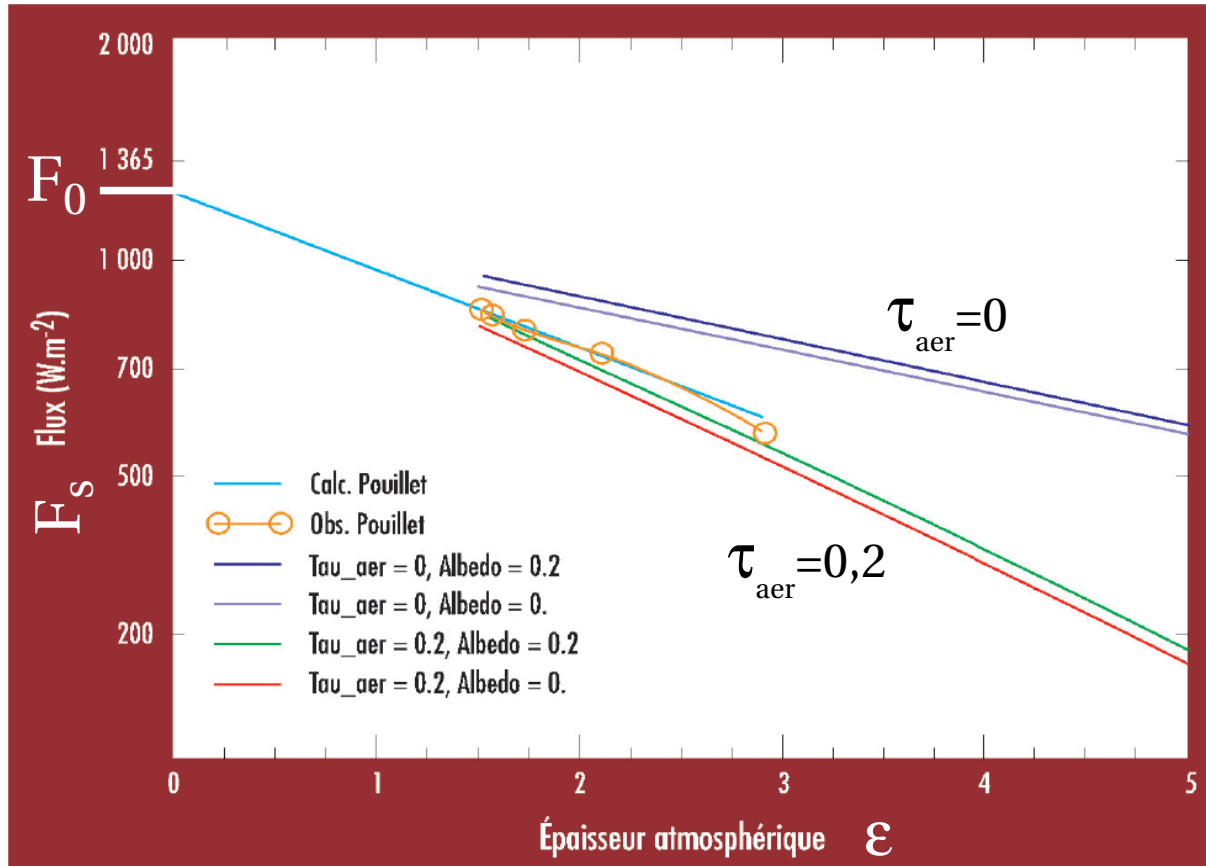


Claude Pouillet
(1790-1868)

Le pyrhéliomètre et le protocole expérimental permettent:

- de minimiser l'effet des échanges thermiques avec l'environnement
- d'estimer précisément le flux radiatif incident
- de réduire la contribution du rayonnement infra-rouge

La détermination de la constante solaire



Variation du flux solaire incident F_s en fonction de l'épaisseur atmosphérique ϵ , **mesuré** par C. Pouillet et **calculé** avec un modèle radiatif sans et avec aérosol

$$F_s = F_0 \Gamma^\epsilon$$

F_s : flux solaire incident
 F_0 : constante solaire
 ϵ : épaisseur atmosphérique
 Γ : transmissivité pour $\epsilon = 1$

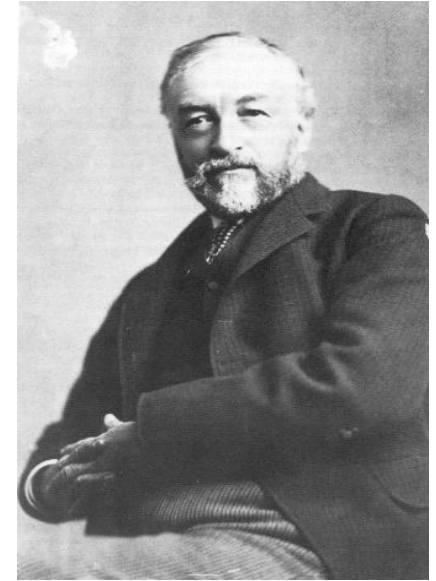
C. Pouillet obtient
 $F_0 = 1228 \text{ W.m}^{-2}$

Estimation actuelle:
 $F_0 = 1361 \text{ W.m}^{-2}$

Estime également l'absorption par l'atmosphère.

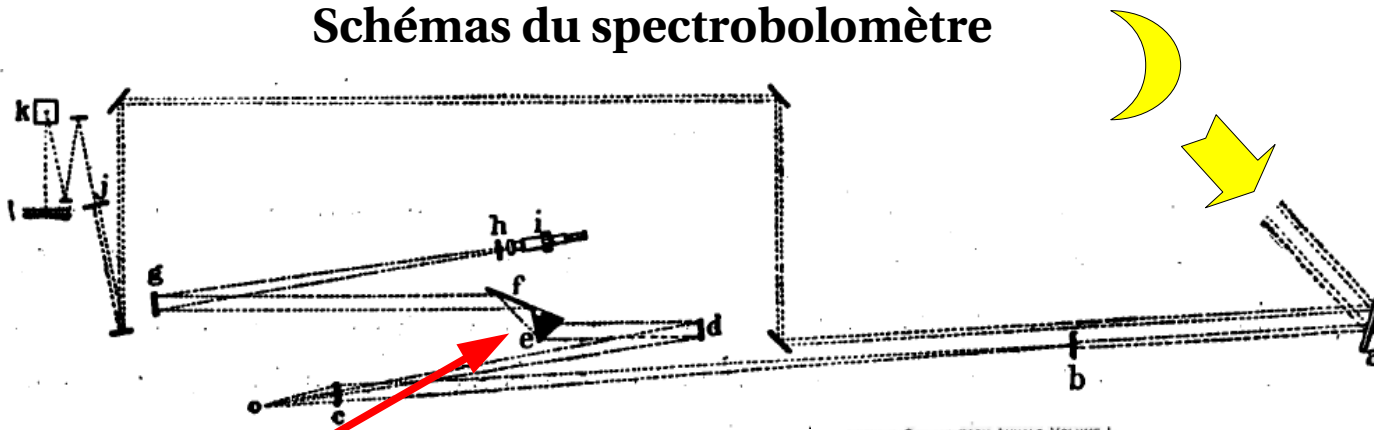
Mesure du spectre infra-rouge

- Développement du spectrobolomètre
- Mesure du spectre solaire
- Mesure du rayonnement IR émis par la Lune



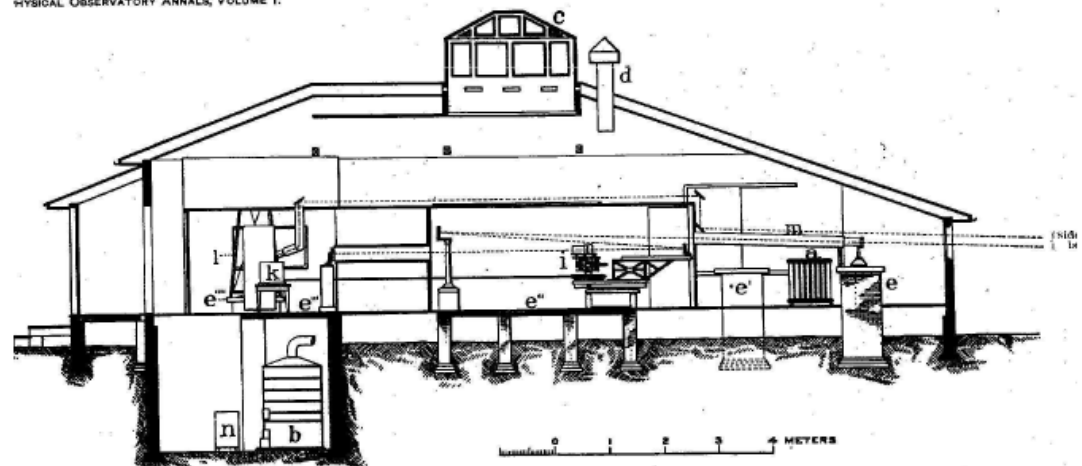
Samuel Langley
(1834-1906)

Schémas du spectrobolomètre



Prisme en sel gemme (NaCl)

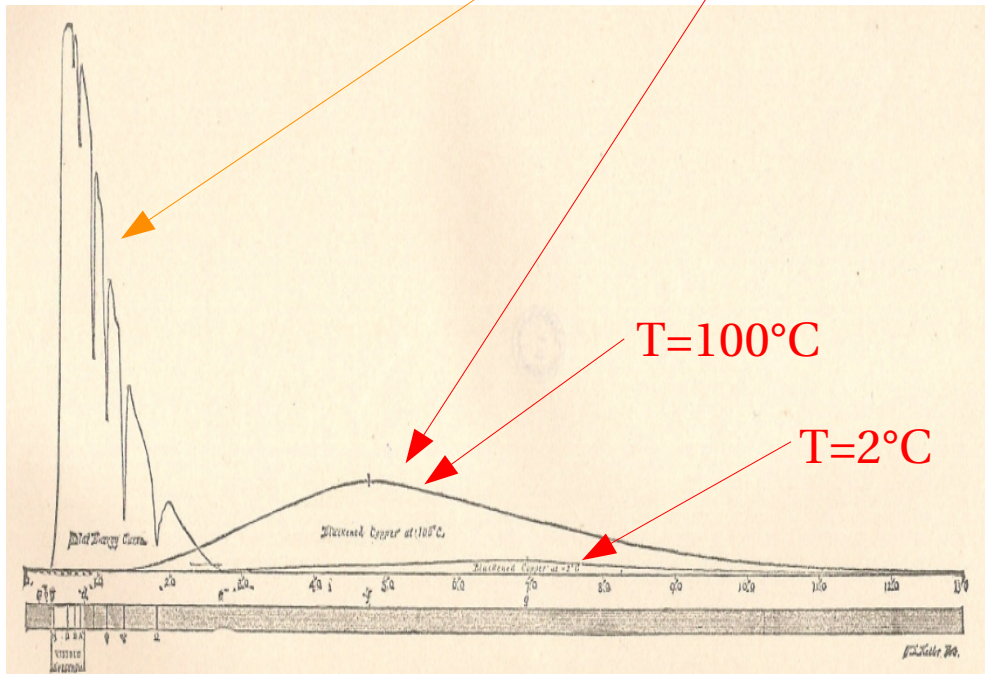
Lien entre angle de déviation
et longueur d'onde
=> loi de variation de l'indice
de réfraction



SECTION THROUGH MAIN OBSERVATORY BUILDING, 1897. LOOKING WEST.

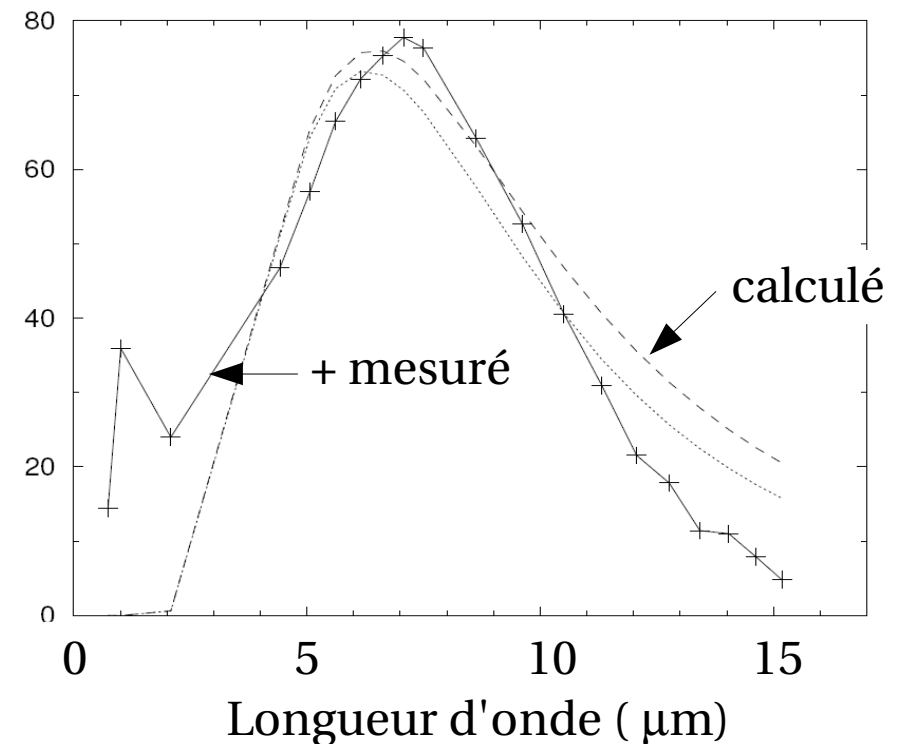
Mesure du spectre infra-rouge

Mesure du spectre solaire et infra-rouge



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
Longueur d'onde (μ m)

Spectre infra-rouge, T=178°C



- Observe pour la première fois la “séparation spectrale” entre le rayonnement solaire et le rayonnement infra-rouge tellurique
- Difficulté de mesure lorsque la température du corps est « faible »
- N'obtient pas de mesure satisfaisante du rayonnement IR émis par la Lune

Calcul de l'effet de serre

On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, S. Arrhenius, 1896.

- Calcul de l'effet de serre
- Cycle du carbone et variation du CO₂ atmosphérique
- Le CO₂ peut expliquer les variations climatiques passées et pourrait influencer le climat futur



Svante Arrhenius

(1859-1927)

Doublement de CO₂ => $\Delta T \approx 4$ à 5°C

Svante Arrhenius:

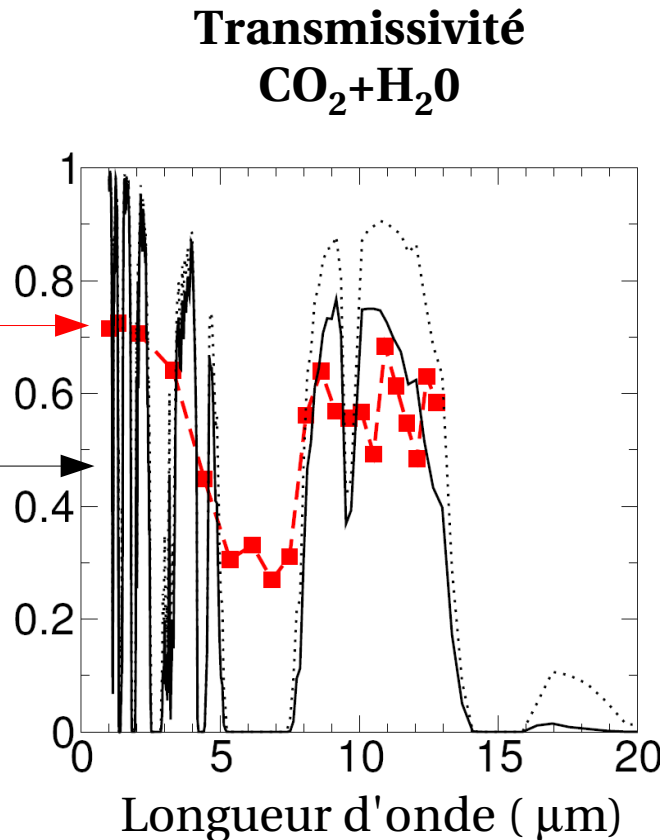
- Aborde le problème dans sa globalité
- Se base sur les travaux de Fourier, Pouillet, Tyndall et Langley
- **Utilise les observations de Langley pour estimer l'absorption du rayonnement IR par l'atmosphère**
- Propose et utilise un modèle de l'effet de serre

Transmissivité de l'atmosphère

Transmissivité pour une atmosphère "standard", calculée d'après

les données d'Arrhenius

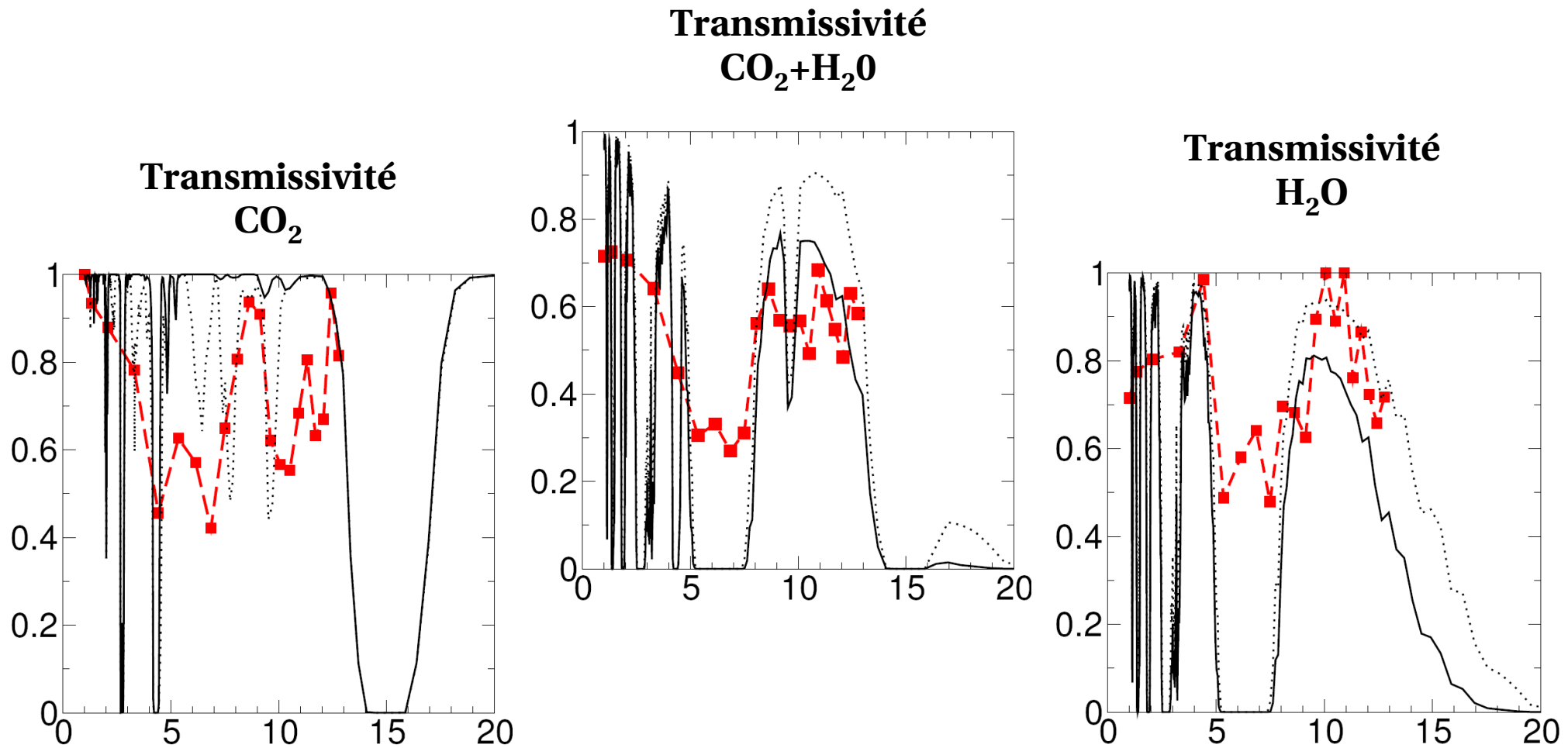
un modèle radiatif actuel, pour 2 quantités intégrées de H₂O (15 et 30 kg.m⁻²)



Cherche à identifier les rôles individuels de CO₂ et de H₂O :

- Corrélation entre la transmissivité mesurée et l'humidité en surface
- Correction ad-hoc sur les transmissivités mesurées

Transmissivité de l'atmosphère

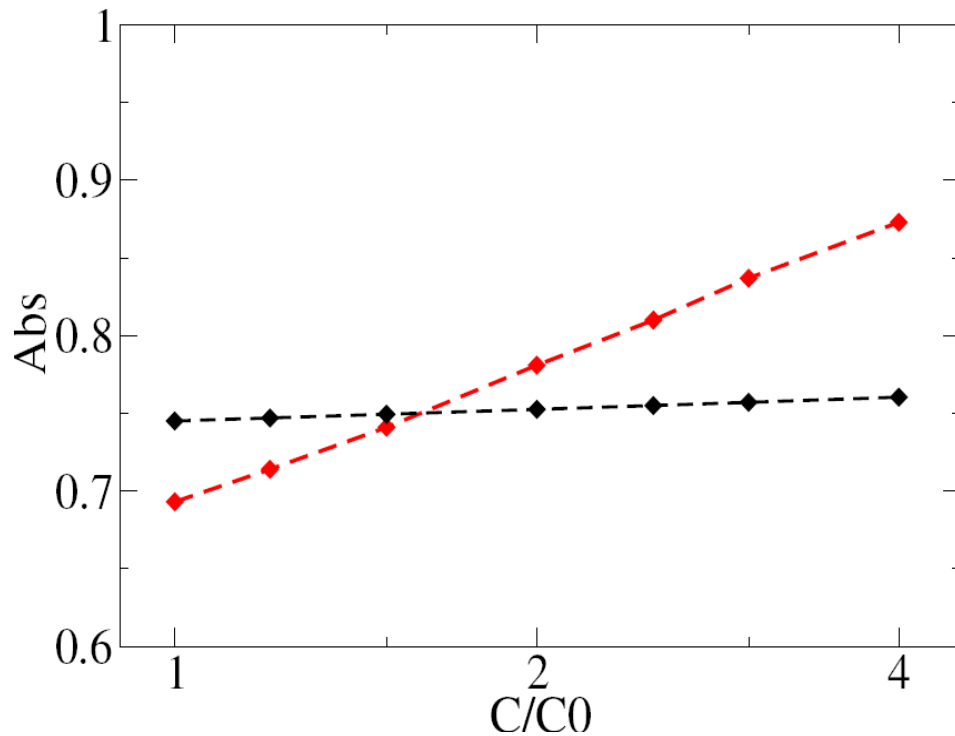


Les observations ne *couvrent pas la bande d'absorption à 15 μm du CO₂*

L'absorption par le CO₂ est très surévaluée, et contient une partie de l'absorption par H₂O.

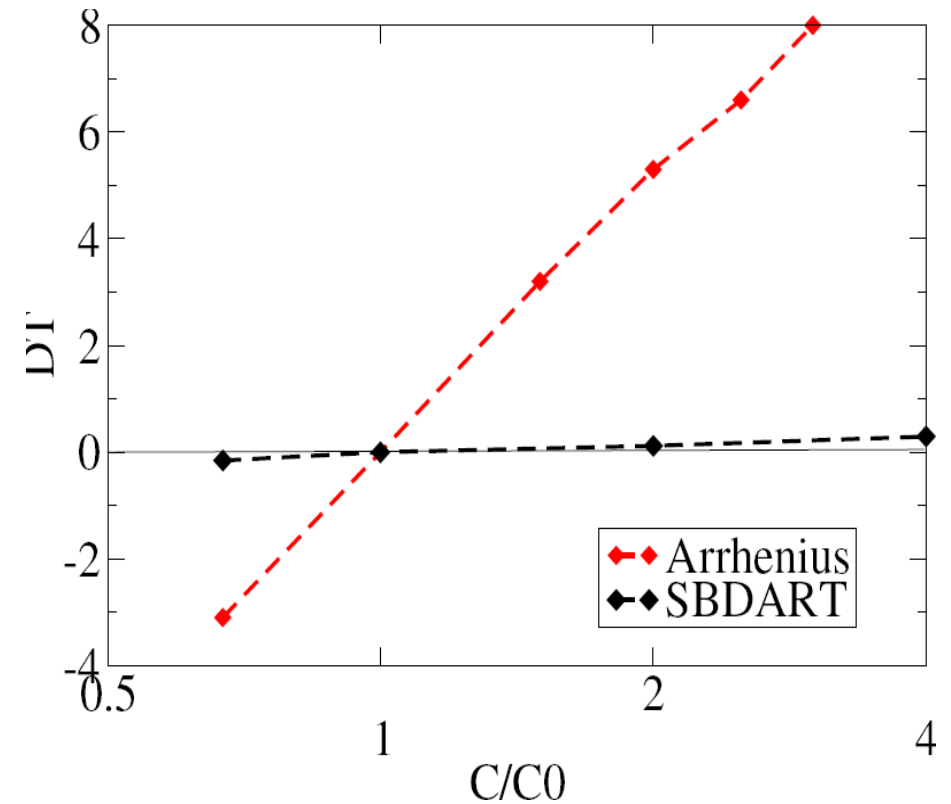
Variation de la concentration de CO₂

Intégration sur tout le domaine infra-rouge, avec pondération par le spectre d'émission



Absorptivité directionnelle de l'atmosphère en fonction de la concentration relative C/C₀ de CO₂

Modèle de serre à 1 vitre, purement radiatif



Variation de la température de surface en fonction de la concentration relative C/C₀ de CO₂

Physique du climat

Début 20e siècle:

J. Fourier:

- A donné un cadre pour l'analyse des phénomènes physiques régissant la température moyenne de surface des planètes
- A identifié le rôle fondamental du Soleil et de l'effet de serre

S. Arrhenius:

- Premier calcul de la température moyenne de la Terre
- Hypothèse de variations passées et éventuellement future de la concentration atmosphérique de CO₂
 - Critique: la Terre « régule » la concentration de CO₂
- Calcul de la variation de température due à une variation de CO₂
 - Critique: la variation de CO₂ ne change pas l'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère

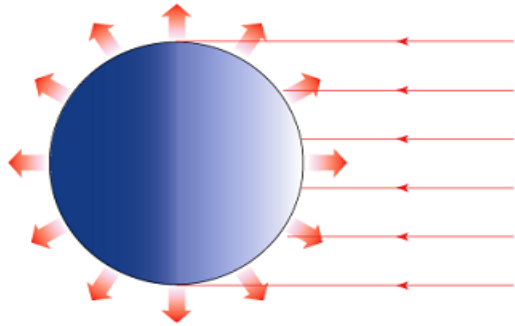
A partir des années 1960:

- Rayonnement infra-rouge mieux connu
- On observe un accroissement de la concentration de CO₂
- Premier calcul « moderne » de l'accroissement de température en réponse à un accroissement de CO₂
- Développement des modèles de climat
- Observations des variations des paléoclimats

Plan

1. Histoire de la découverte de l'effet de serre
2. Physique de l'effet de serre, effet de « saturation » des bandes
3. Analyse de l'accroissement de l'effet de serre dû au CO_2 et à H_2O
4. Amplitude du réchauffement en réponse à une perturbation radiative
5. Conclusion

Température d'équilibre d'une planète



Émission de rayonnement infrarouge

$$4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T_e^4$$

Surface de la Terre

Émission du corps noir



Absorption du rayonnement solaire

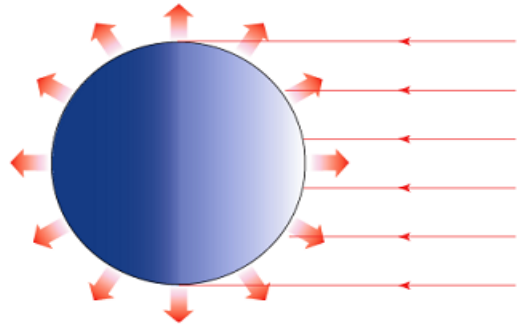
$$(1-A) \cdot \pi \cdot R^2 \cdot F_0$$

Flux solaire à l'extérieur de l'atmosphère

Section de la Terre

Coefficient d'absorption

Température d'équilibre d'une planète



Émission de rayonnement infrarouge

$$4 \cdot \pi R^2 \sigma T_e^4$$



Absorption du rayonnement solaire

$$(1-A) \pi R^2 F_0$$



équilibre énergétique

$$\sigma T_e^4 = \frac{1}{4} (1-A) F_0 \quad \text{avec}$$

T_e : Température d'équilibre radiatif

A : albédo planétaire

F_0 : Flux solaire à l'ext. de l'atmosphère

σ : constante de Stefan-Boltzmann

➔ Pertinence de la notion de **température surfacique moyenne** d'une planète

Pour la Terre:

$$T_e = 255\text{K}$$



$$T_s = 288\text{K}$$

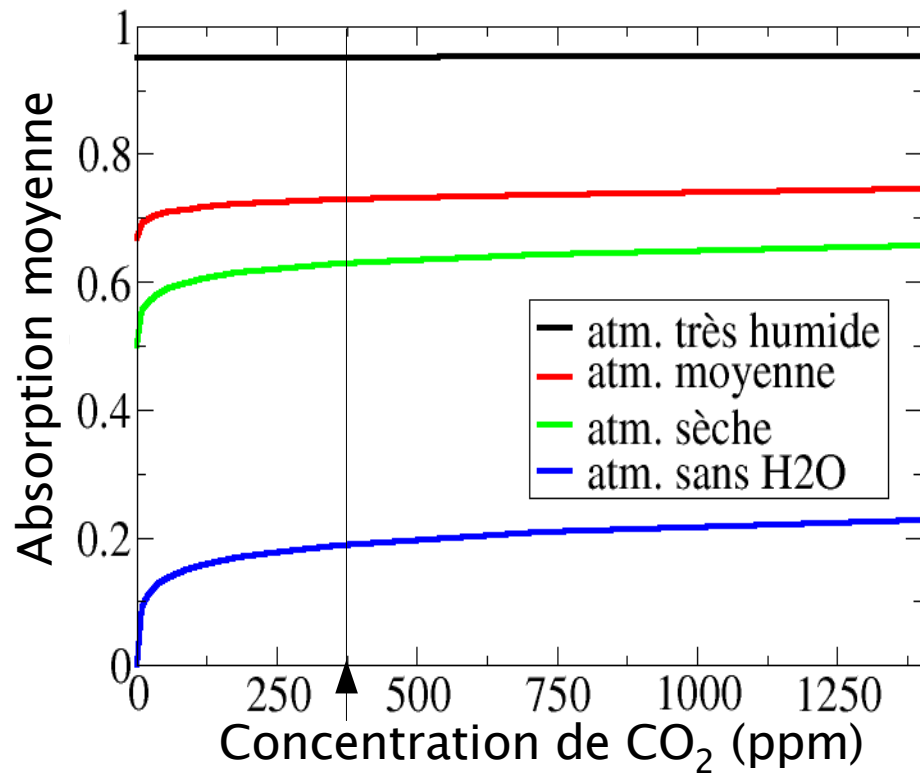
Effet de serre

T_s : temp. moyenne de surface

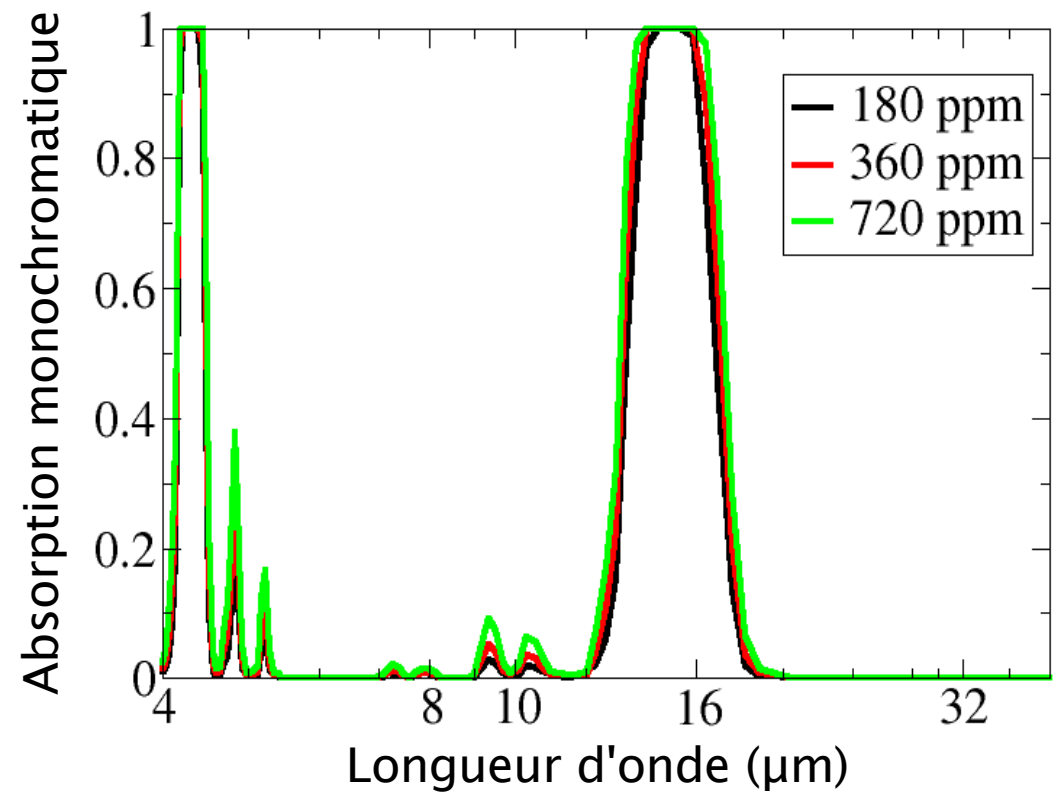
Flux solaire absorbé $\approx 0.175 F_0 \approx 1/6$ Flux solaire incident

Effet de saturation

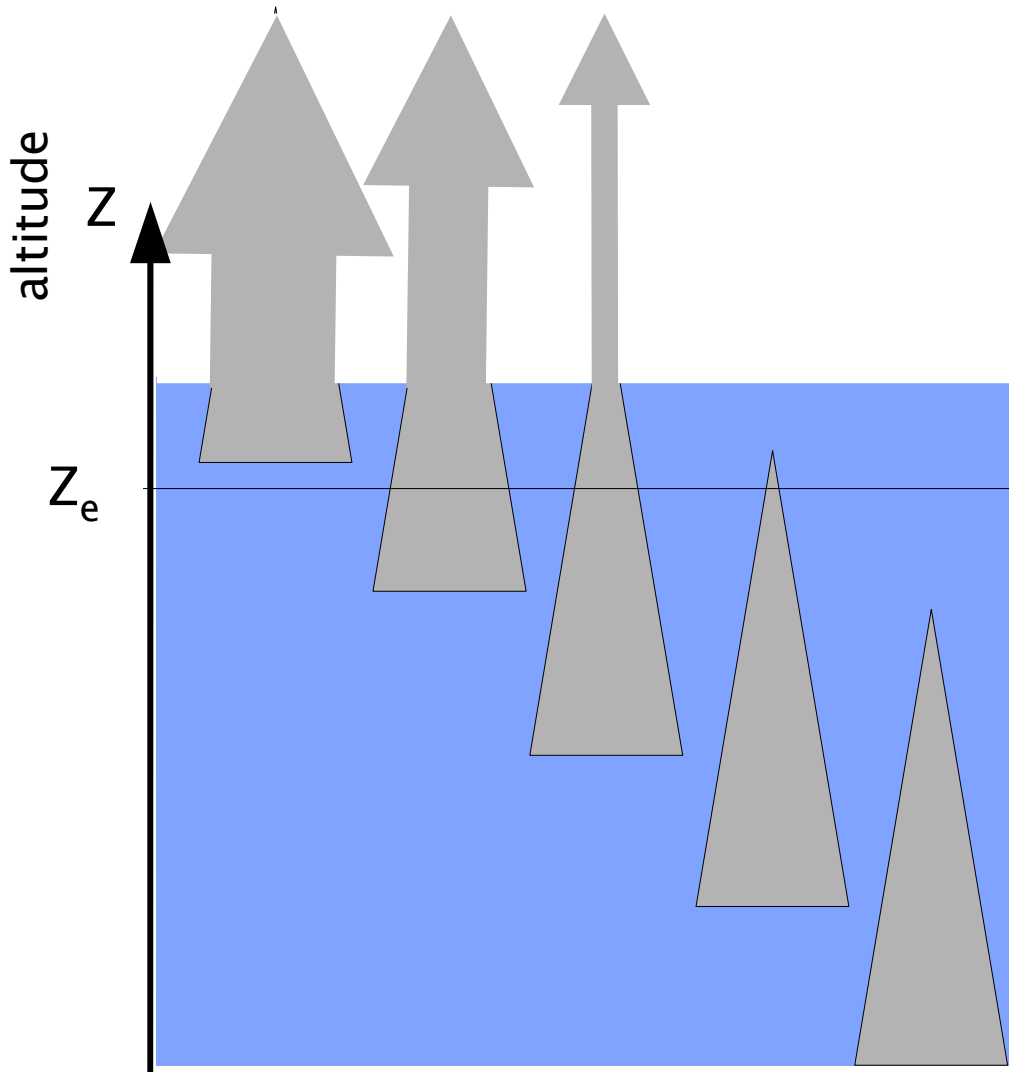
Absorption de l'atmosphère **moyennée** sur le domaine infra-rouge en fonction du CO_2 , pour différentes valeurs de H_2O



Absorption monochromatique de l'atmosphère due au seul CO_2 , en fonction de la longueur d'onde, pour différentes concentrations de CO_2



Altitude d'émission



Densité du flux radiatif échangé entre un volume de gaz à l'altitude z et l'espace:

$$\frac{\partial \Psi_{\nu}(z)}{\partial m} = \underbrace{\kappa_{\nu} B_{\nu}(T)}_{\text{flux émis}} \underbrace{\exp(-\kappa_{\nu} \cdot M(z))}_{\text{transmissivité}}$$

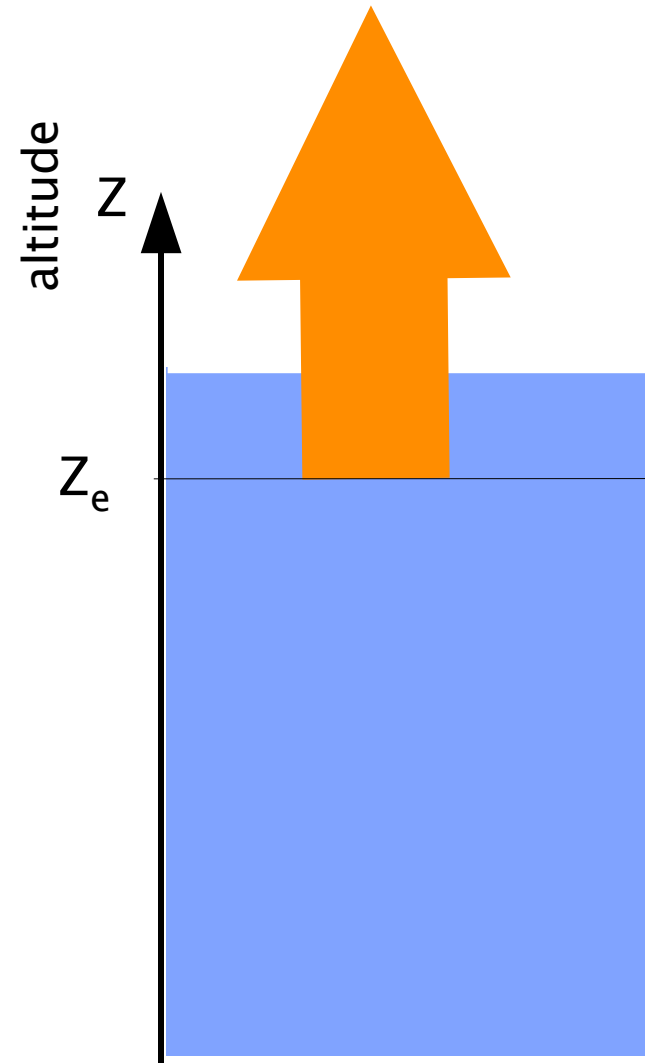
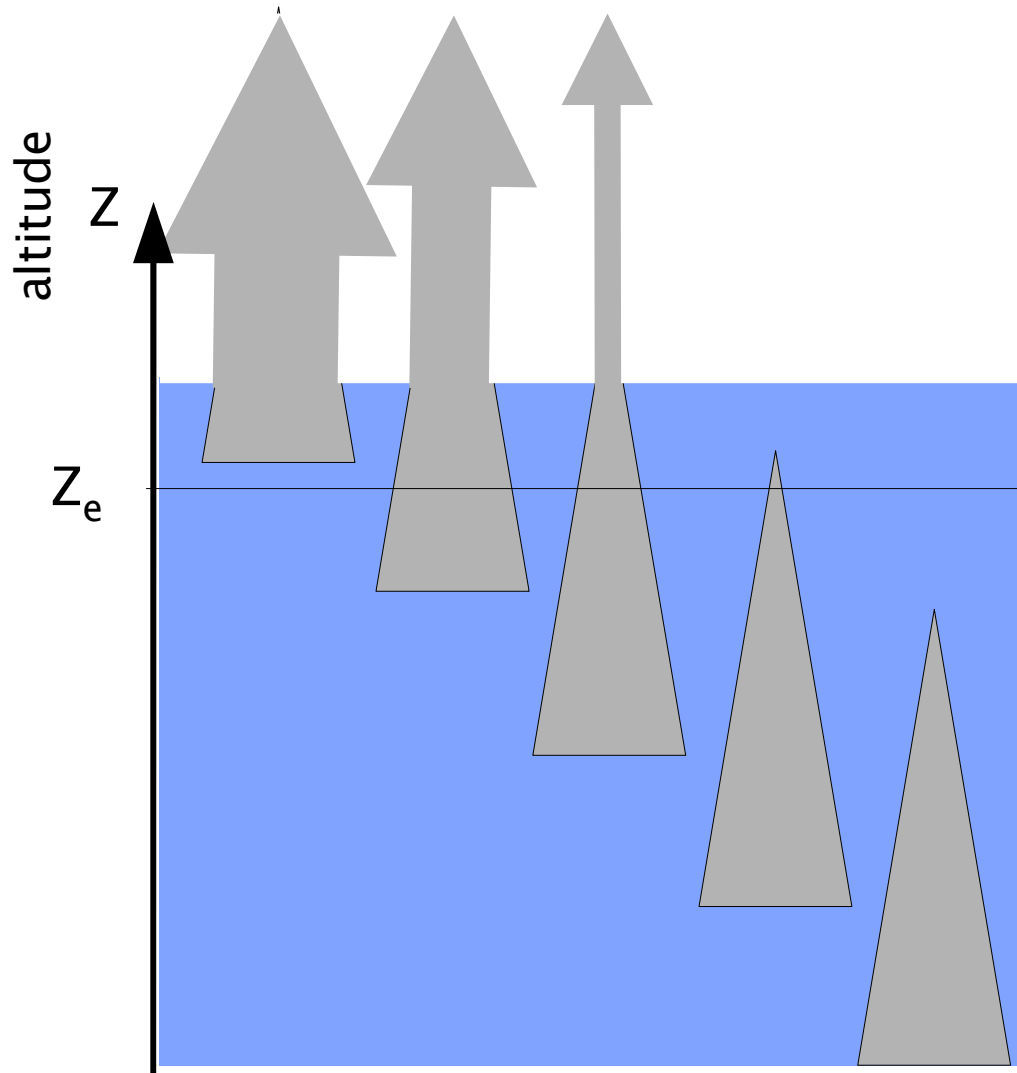
avec:

$M(z)$: masse d'atmosphère entre z et l'espace

κ_{ν} : coefficient d'absorption par unité de masse

$B_{\nu}(T)$: fonction de Planck

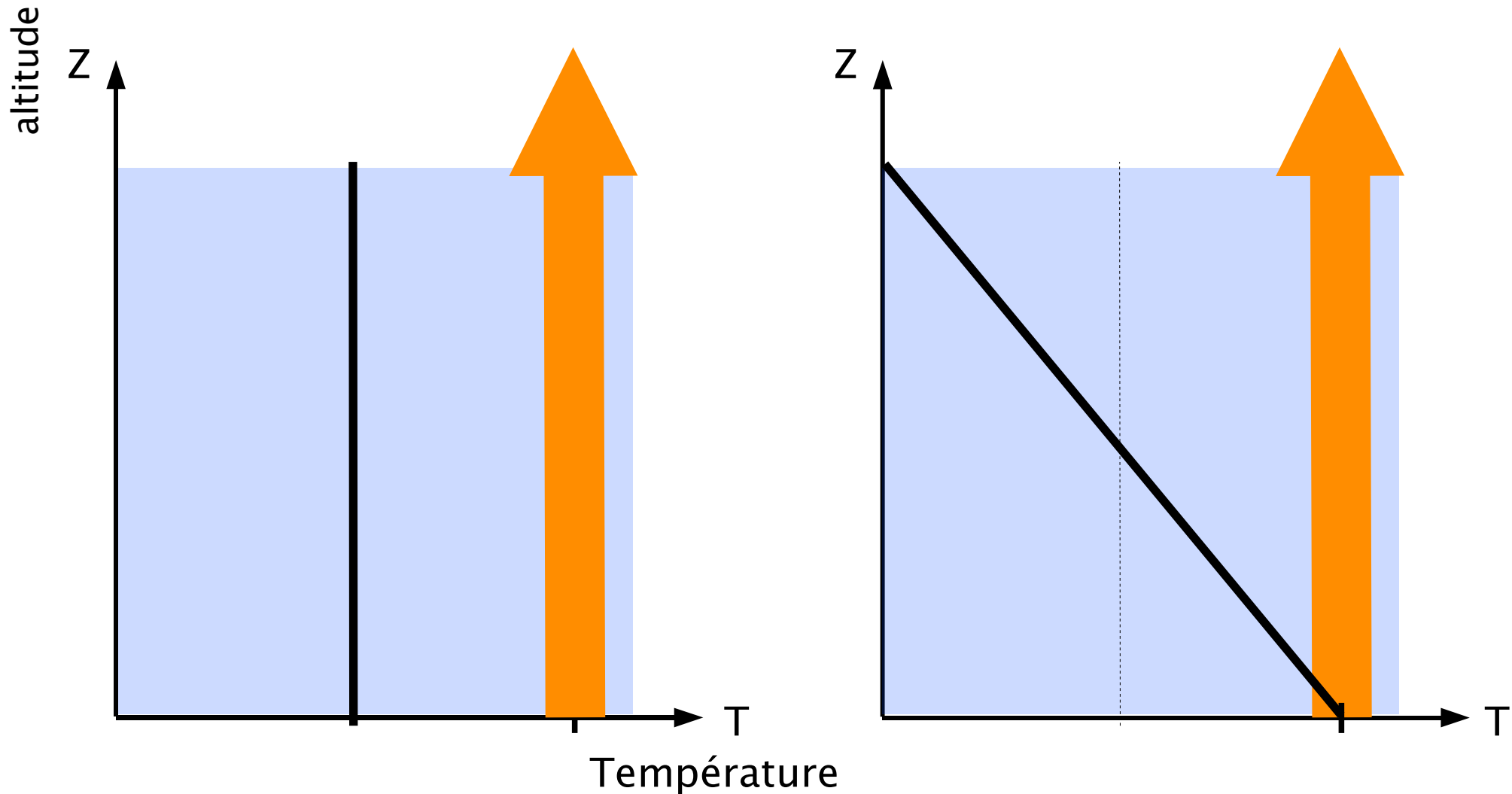
Altitude d'émission



Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : $\epsilon \cdot \sigma \cdot T(z_e)^4$

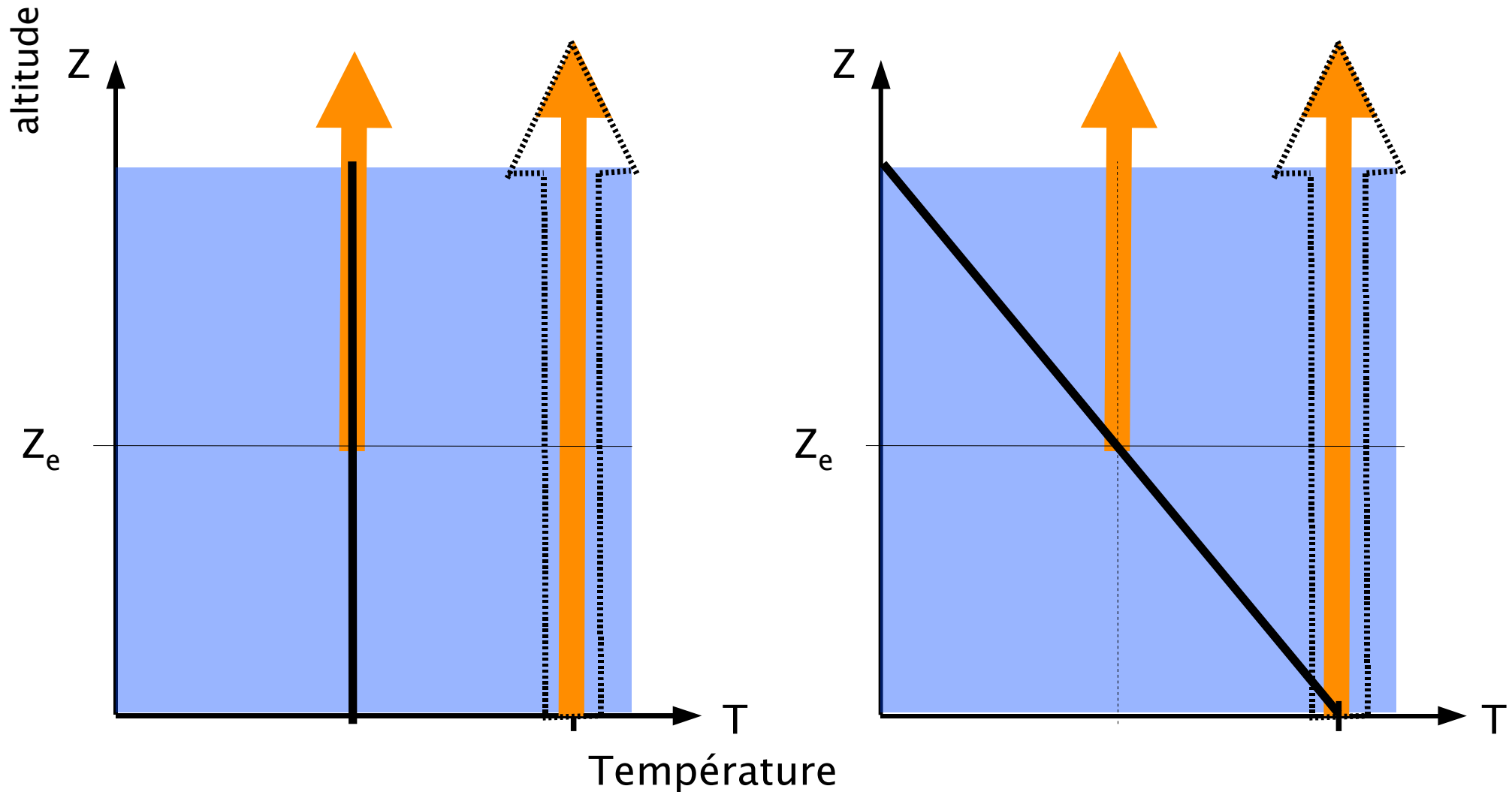
Z_e : altitude d'émission vers l'espace



Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : $\epsilon \cdot \sigma \cdot T(z_e)^4$

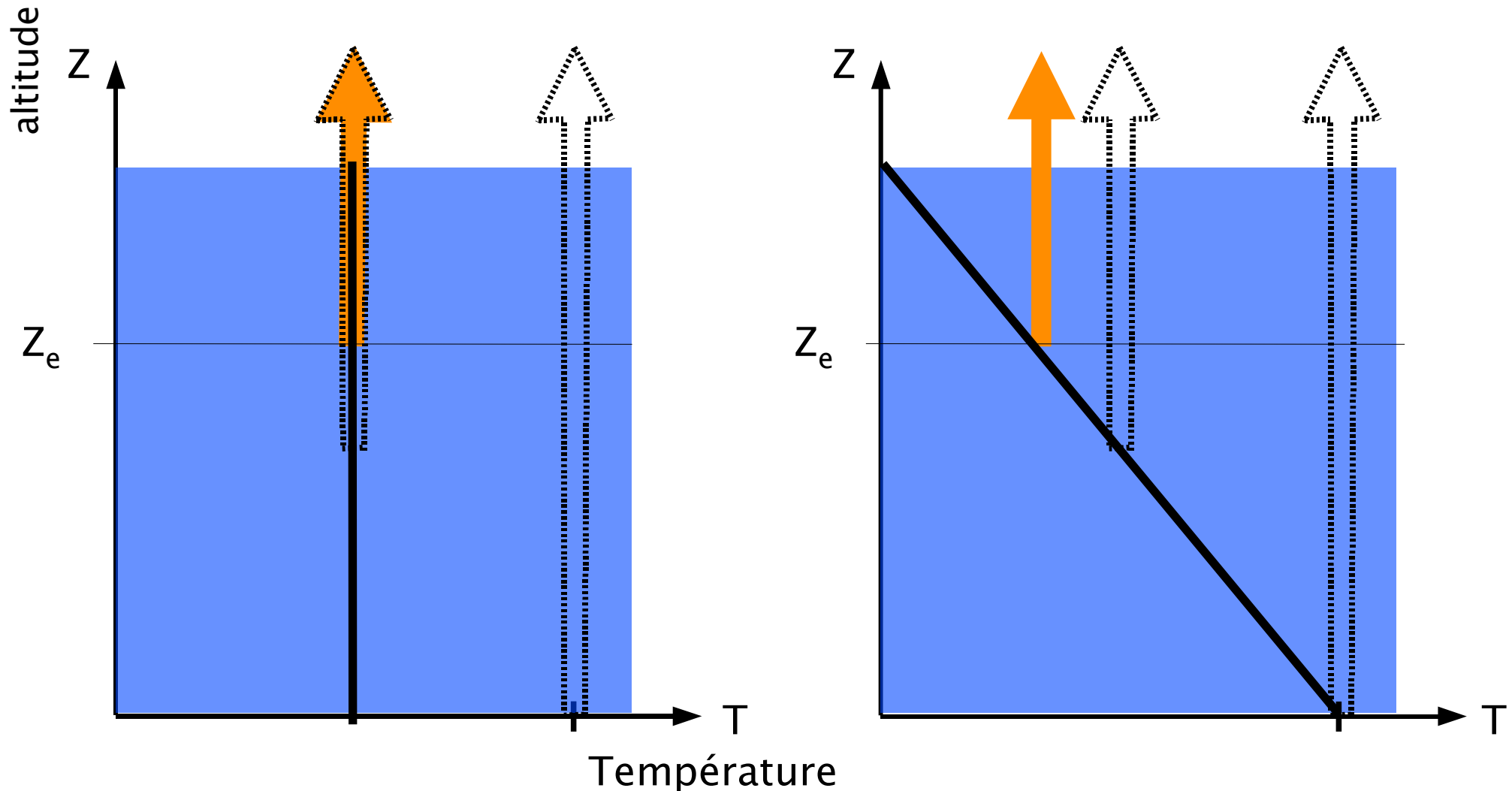
Z_e : altitude d'émission vers l'espace



Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : $\epsilon \cdot \sigma \cdot T(z_e)^4$

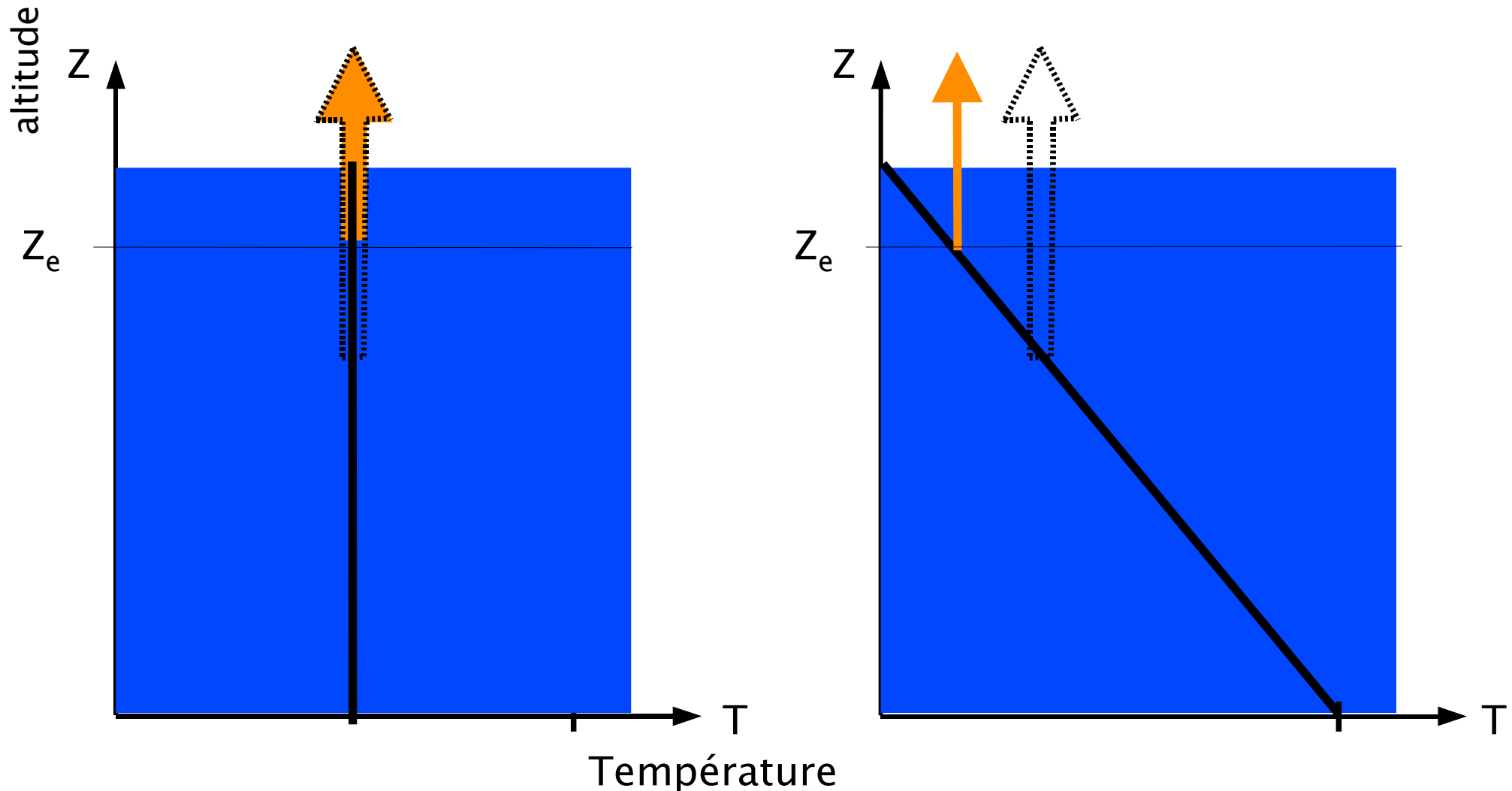
Z_e : altitude d'émission vers l'espace



Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : $\epsilon \cdot \sigma \cdot T(z_e)^4$

Z_e : altitude d'émission vers l'espace

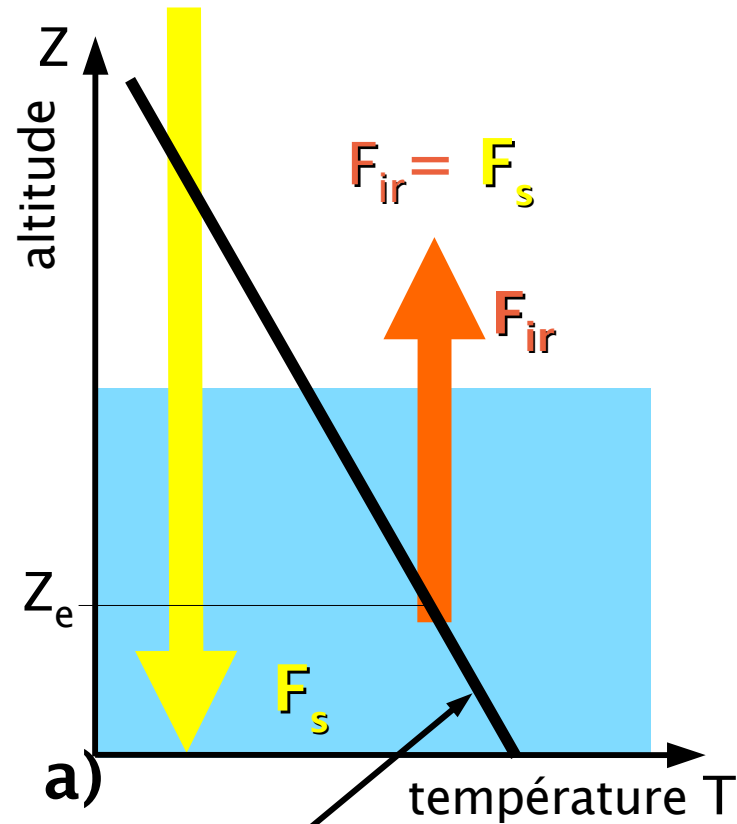


Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

Rayonnement solaire net F_s

Rayonnement IR sortant

F_{ir}



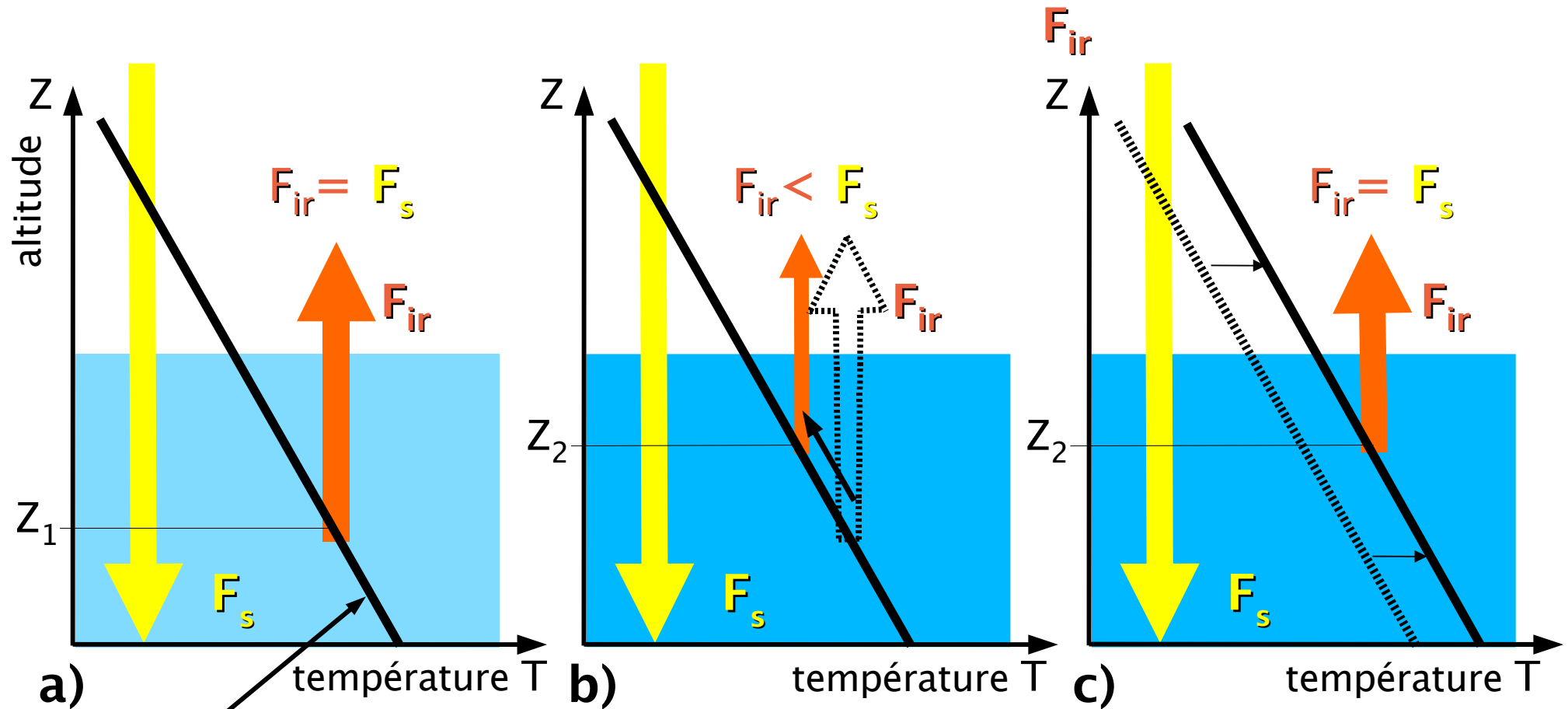
Z_e : altitude d'émission vers l'espace

dT/dz fixé
par convection

Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

Rayonnement solaire net F_s

Rayonnement IR sortant



dT/dz fixé
par convection

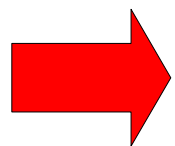
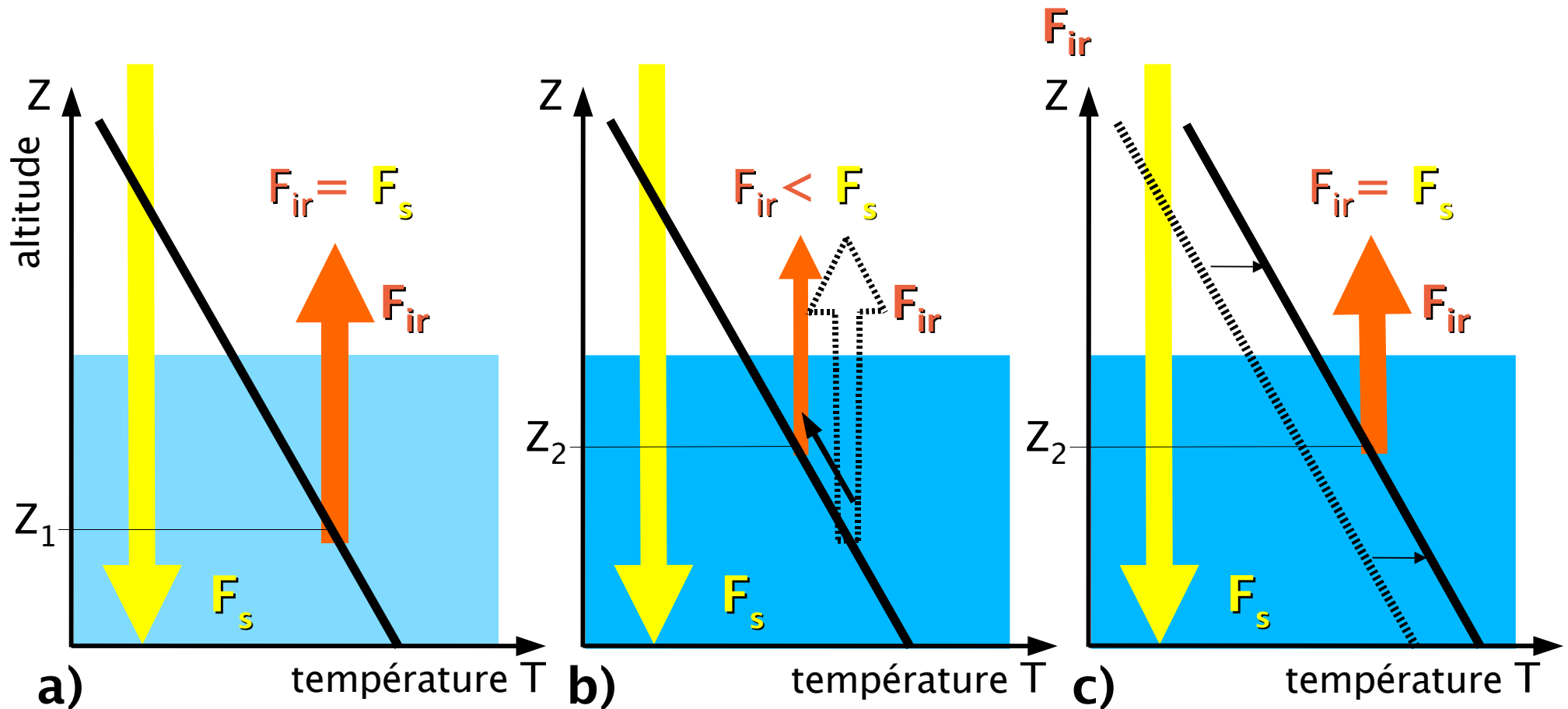
GES (CO_2) augmente, Z_e
augmente, T_e diminue:
Rayonnement sortant
plus faible.

$T(z)$ augmente:
Retour à l'équilibre

Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

Rayonnement solaire net F_s

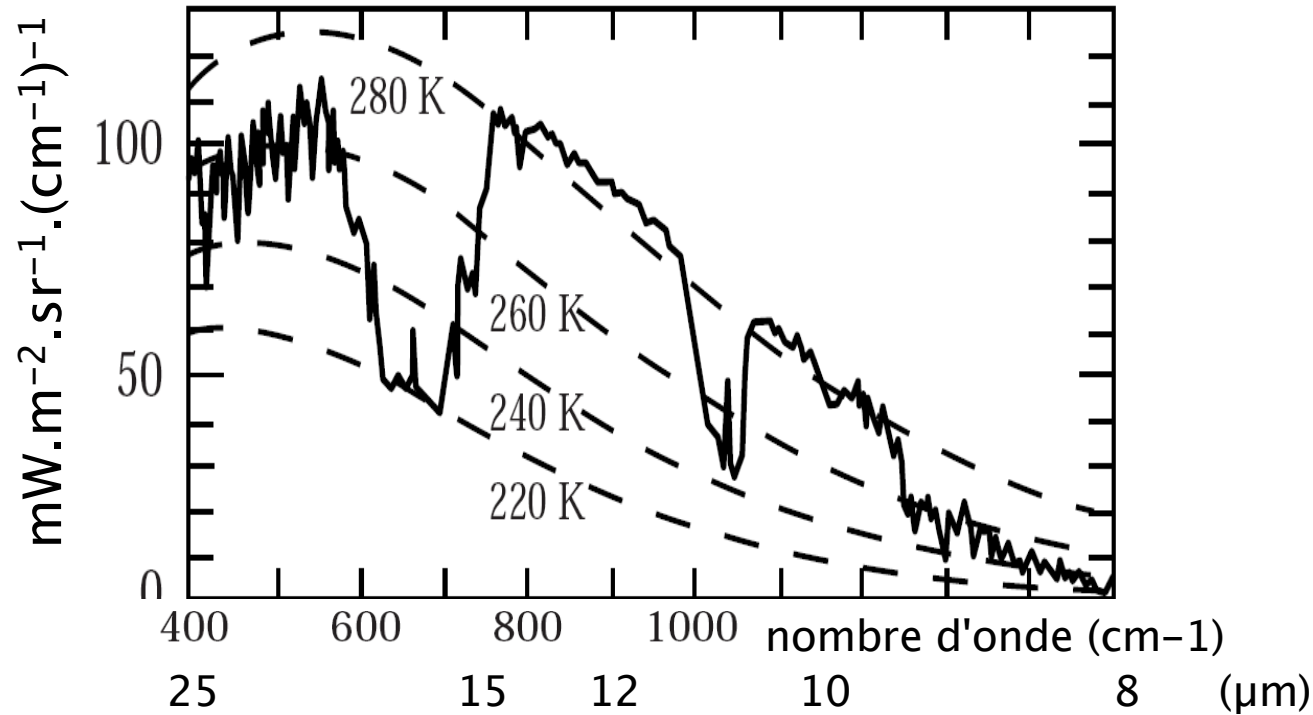
Rayonnement IR sortant



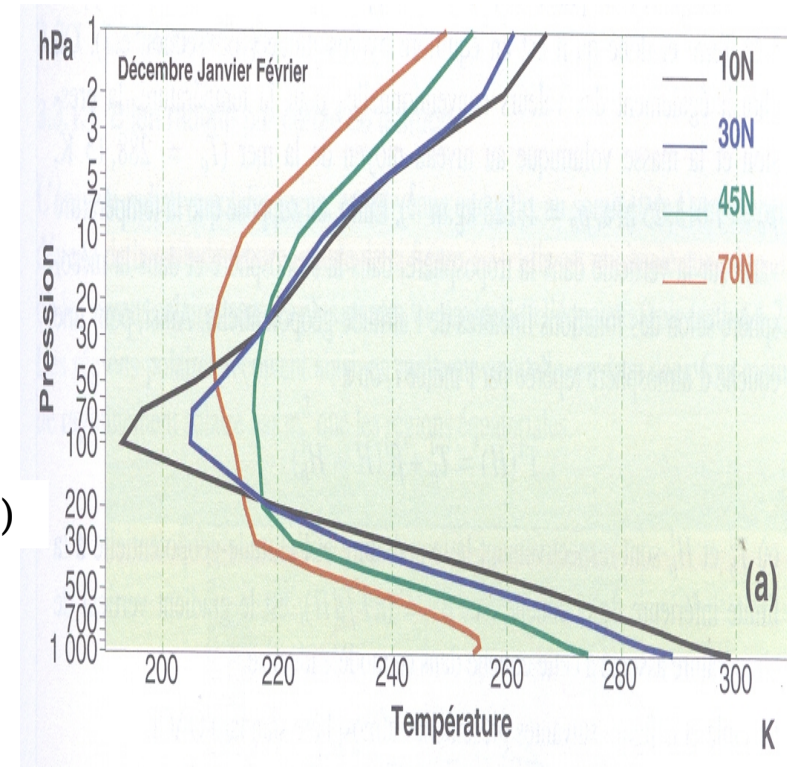
Pour une atmosphère stratifiée, il faut considérer les **flux au sommet de l'atmosphère**, et non les flux en surface (premiers calculs fin des années 1960)

Rayonnement émis par la Terre et l'atmosphère

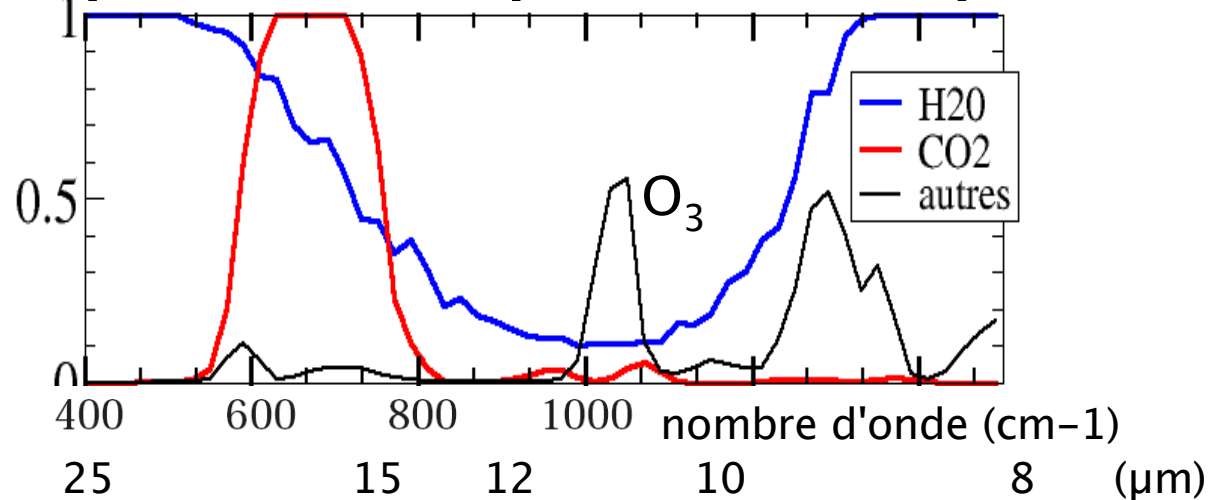
Spectre infra-rouge observé par satellite



Profils verticaux de température



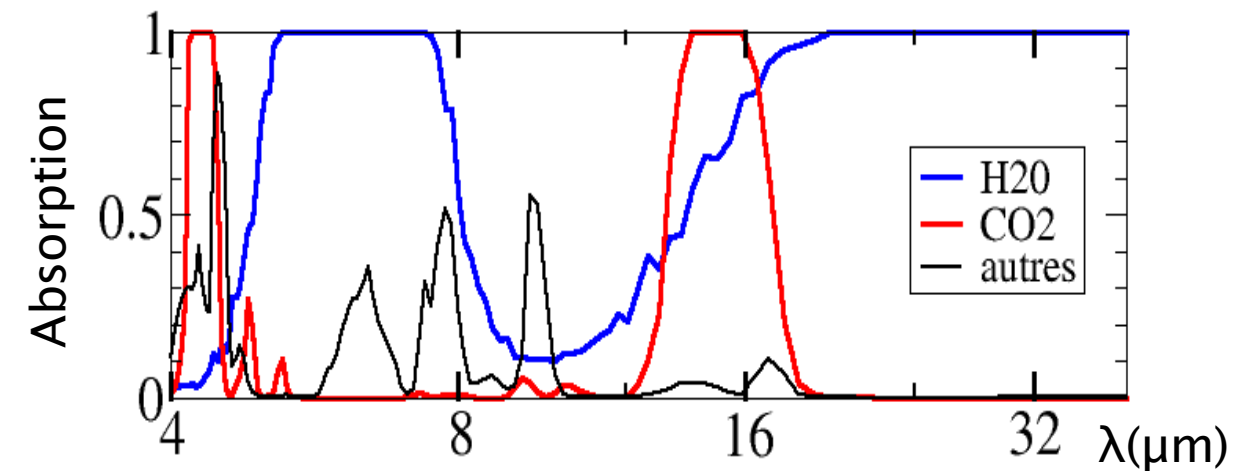
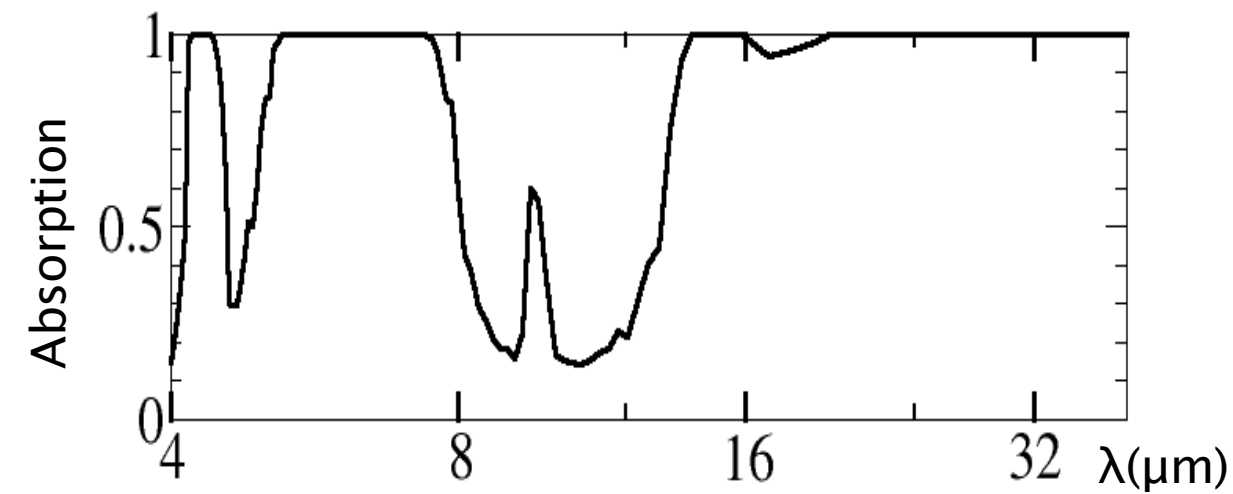
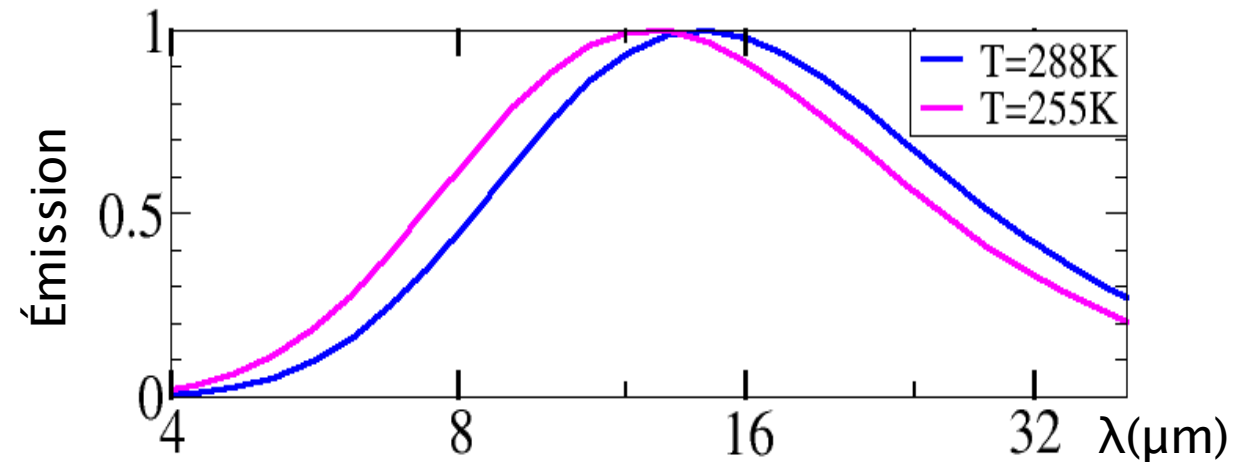
Spectre d'absorption de l'atmosphère



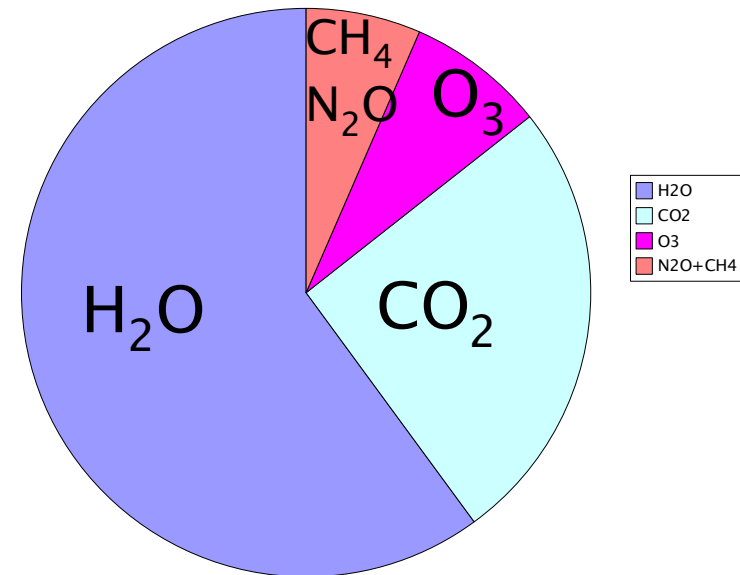
Plan

1. Histoire de la découverte de l'effet de serre
2. Physique de l'effet de serre, effet de « saturation » des bandes
3. Analyse de l'accroissement de l'effet de serre dû au CO_2 et à H_2O
4. Amplitude du réchauffement en réponse à une perturbation radiative
5. Conclusion

L'effet de serre sur Terre



Contribution à l'effet de serre

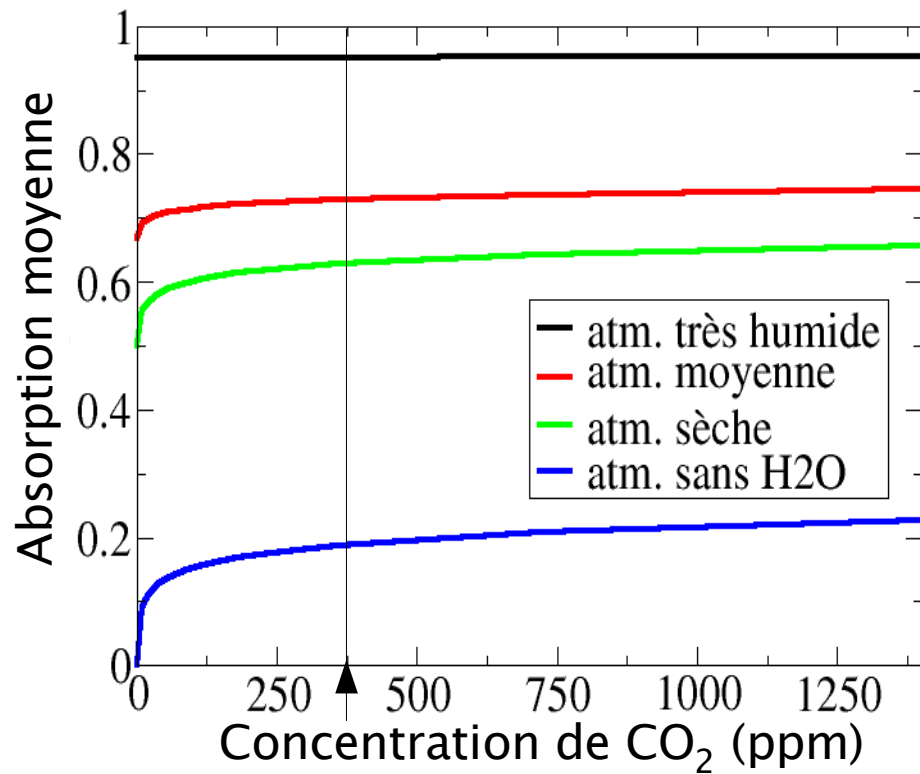


Effet de serre:

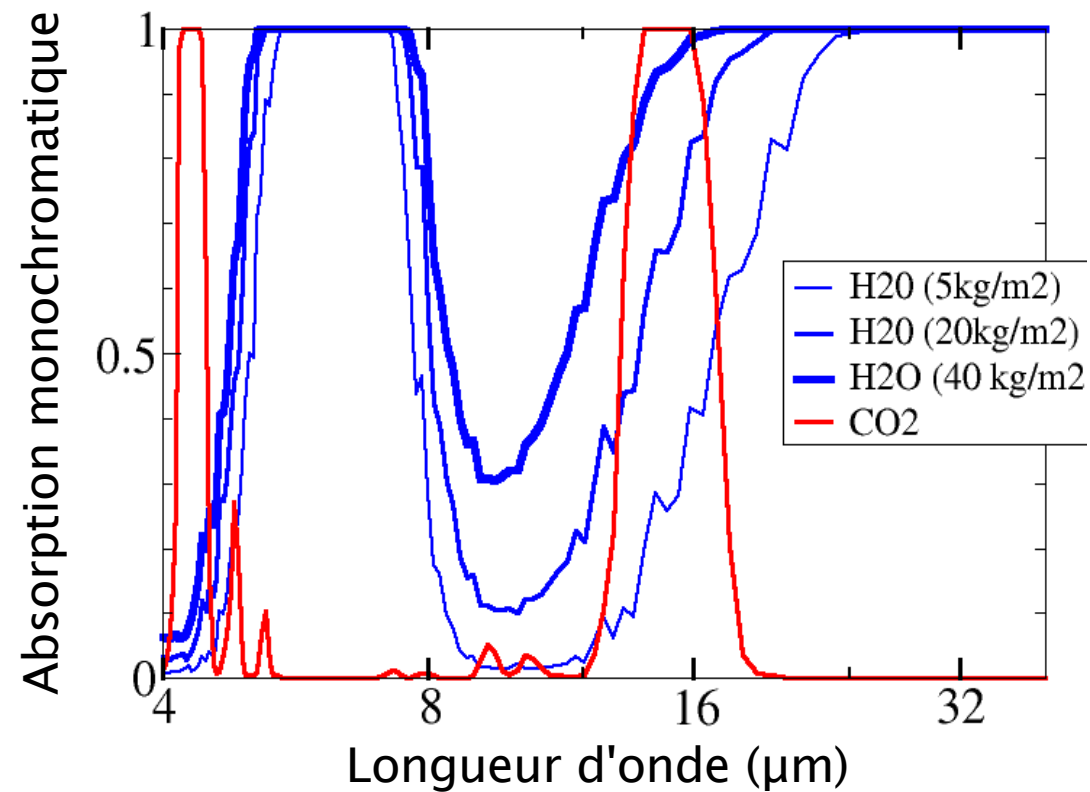
Vapeur d'eau	60%
CO ₂	26%
Ozone	8%
N ₂ O+CH ₄	6%

Effet de saturation

Absorption de l'atmosphère **moyennée** sur le domaine infra-rouge en fonction du CO_2 , pour différentes valeurs de H_2O



Absorption monochromatique de l'atmosphère due au CO_2 et à H_2O , pour différentes concentrations de H_2O



Analyse de l'effet de serre

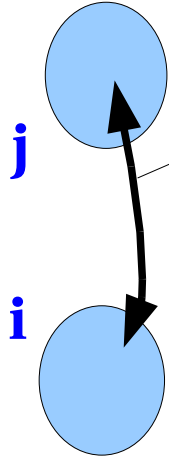
L'accroissement des gaz à effet de serre diminue les échanges entre la surface et l'espace:

- Que se passe-t-il dans l'atmosphère?
- Est-ce identique pour un accroissement de H_2O et de CO_2 ?

Démarche:

- Utilisation de la formulation en puissance nette échangée
- Étude analytique du cas monochromatique (ou un milieu “gris”)
- Analyse de ce qui se passe dans une atmosphère réaliste

Formulation en Puissance Nette Échangée



$$\psi_v(i, j) = Q_v(i, j) - Q_v(j, i)$$

$$\Phi_v(i) = \sum_j \psi_v(i, j)$$

Puissance Nette Échangée entre i et j:
différence entre le rayonnement
émis par i absorbé par j -
émis par j absorbé par i

$$\psi_v(i, j) = \int_{\Gamma} (\underbrace{B_v(y_y)}_{\text{Fonction de Planck}} - \underbrace{B_v(x_y)}_{\text{Fonction de Planck}}) \underbrace{O_v(x_y, y_y)}_{\text{Facteur optique d'échange}} d\gamma$$

Fonction de Planck **Facteur optique d'échange**

Si les deux extrémités sont des « surfaces »

$$O_v(x_y, y_y) = \tau_{v,y} \quad \tau: \text{transmissivité}$$

Si les deux extrémités volume et surface

$$O_v(x_y, y_y) = \left| \frac{\partial \tau_{v,y}}{\partial x_y} \right|$$

Si les deux extrémités sont des volumes

$$O_v(x_y, y_y) = \left| \frac{\partial^2 \tau_{v,y}}{\partial x_y \partial y_y} \right|$$

Analyse de l'effet de serre

Puissance nette échangée entre x et y: $\psi_v(x, y) = (B_v(y) - B_v(x)) O_v(x, y)$

Échanges **entre surface et volume**
élémentaire de masse dm :

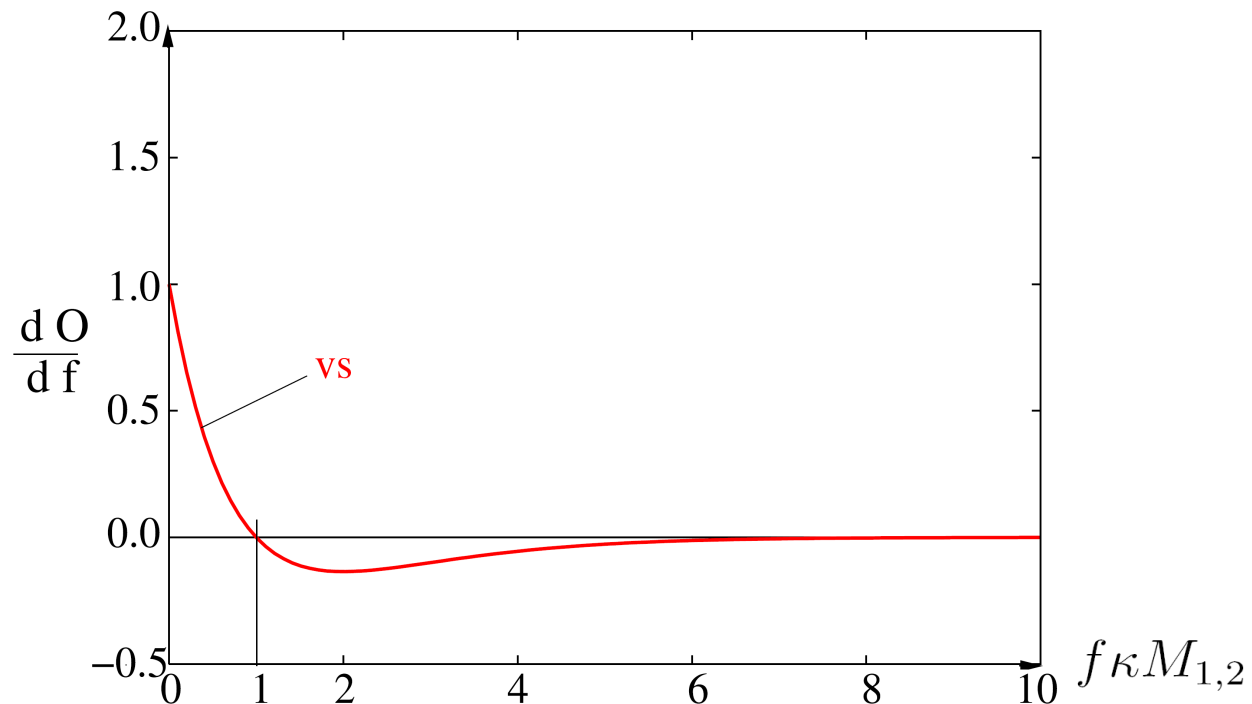
$$O_v(x, y) dm = \left| \frac{\partial \tau_v}{\partial m} \right| = f \cdot k \cdot \exp(-f \cdot k \cdot M) dm$$

avec:

f : fraction massique de gaz absorbant

k : coefficient d'absorption par unité de masse

M : masse entre x et y



Analyse de l'effet de serre

Puissance nette échangée entre x et y: $\psi_v(x, y) = (B_v(y) - B_v(x)) O_v(x, y)$

Échanges **entre surface et volume**
élémentaire de masse dm :

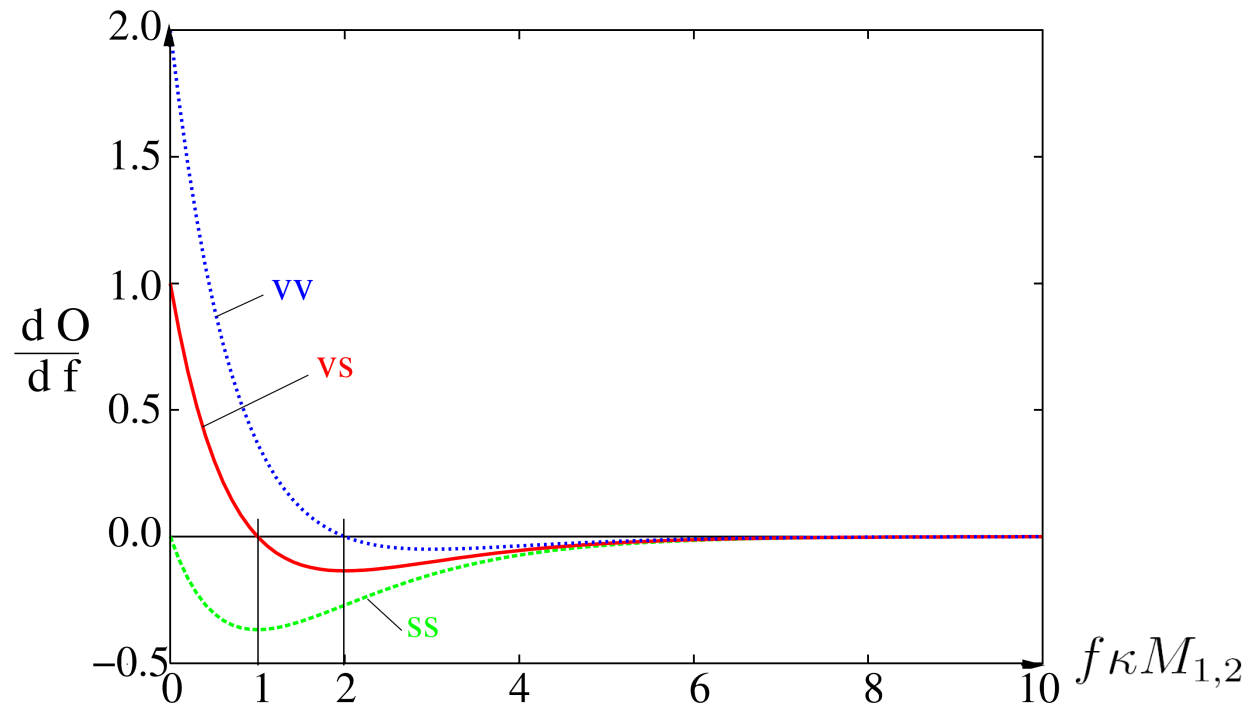
$$O_v(x, y) dm = \left| \frac{\partial \tau_v}{\partial m} \right| = f \cdot k \cdot \exp(-f \cdot k \cdot M) dm$$

avec:

f : fraction massique de gaz absorbant

k : coefficient d'absorption par unité de masse

M : masse entre x et y

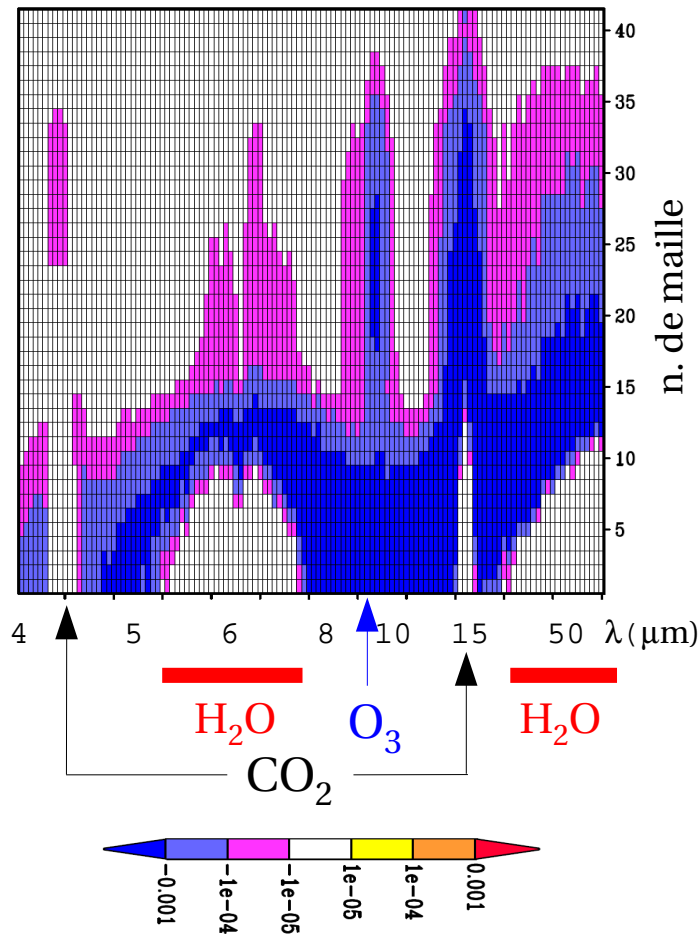


Analyse de l'effet de serre sur Terre

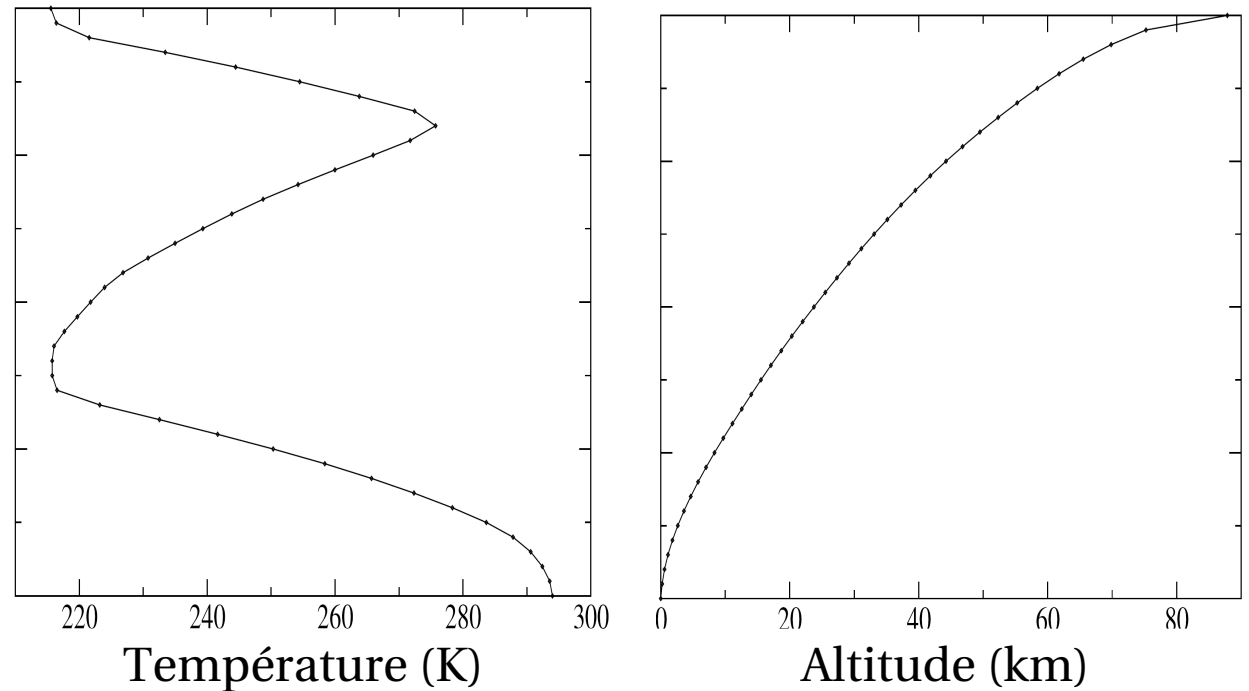
Bilan $\longrightarrow \Phi_i = \Psi_{i,e} + \Psi_{i,s} + \Psi_{i,a} \longleftarrow$ Échange net avec le reste de l'atmosphère

Échange net avec l'espace \longleftarrow $\Psi_{i,e}$ $\Psi_{i,s}$ \longleftarrow Échange net avec la surface

Échange net avec l'espace



Profil atmosphérique, été, moyenne latitude (MLS, RTMIP)

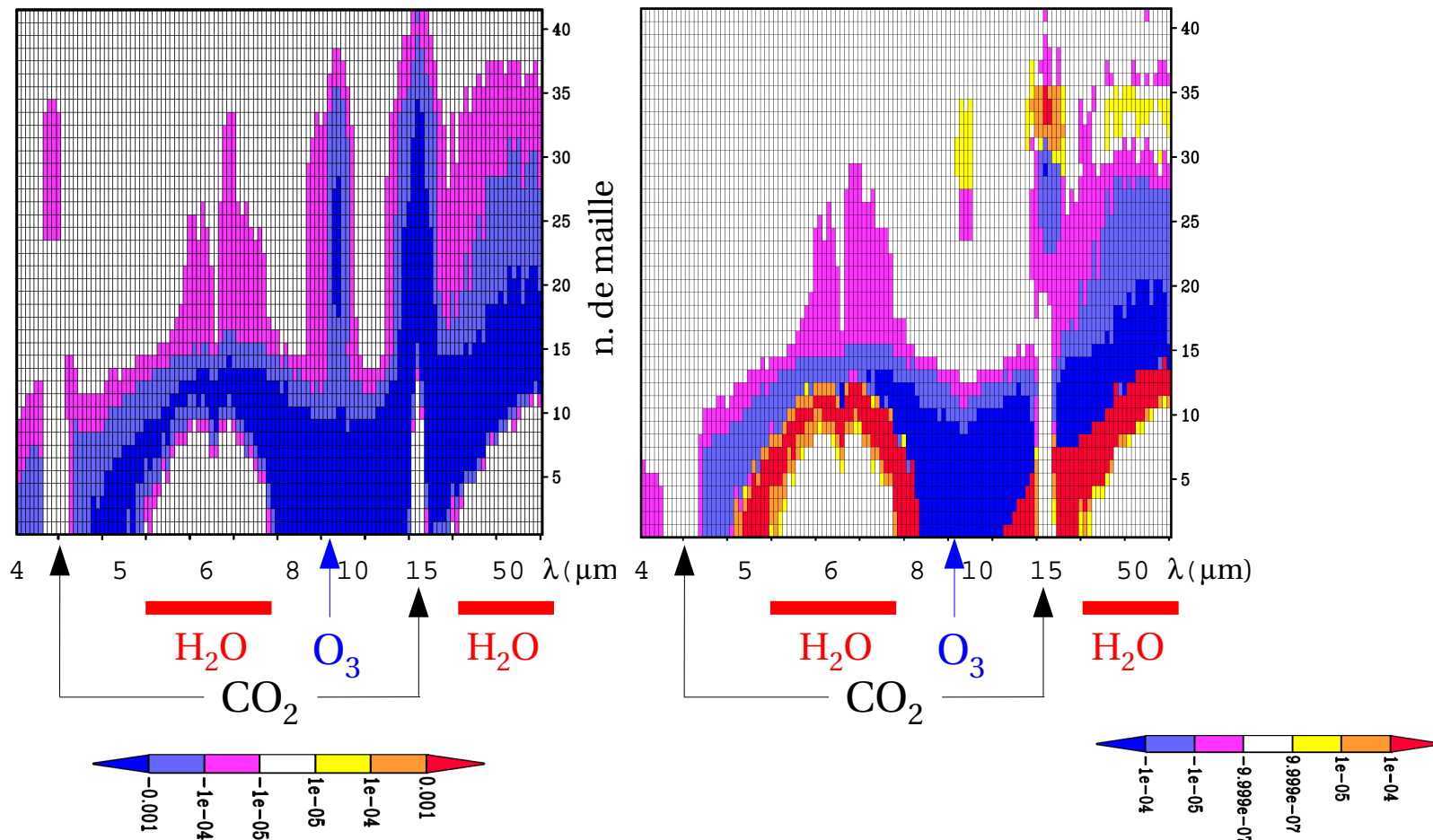


Analyse de l'effet de serre sur Terre

Échange avec l'espace
Atmosphère standard

Variation des échanges avec l'espace

H₂O + 20%



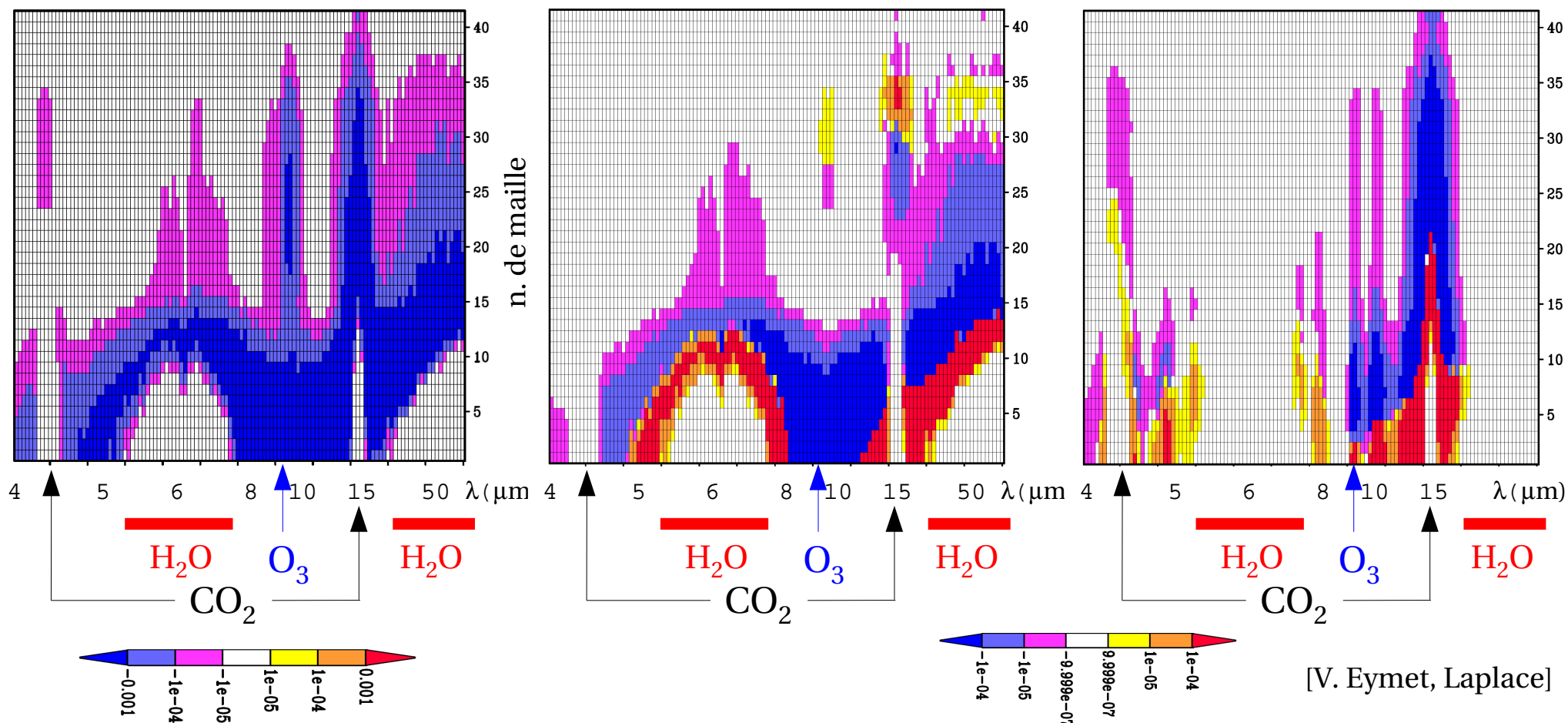
Analyse de l'effet de serre sur Terre

Échange avec l'espace
Atmosphère standard

Variation des échanges avec l'espace

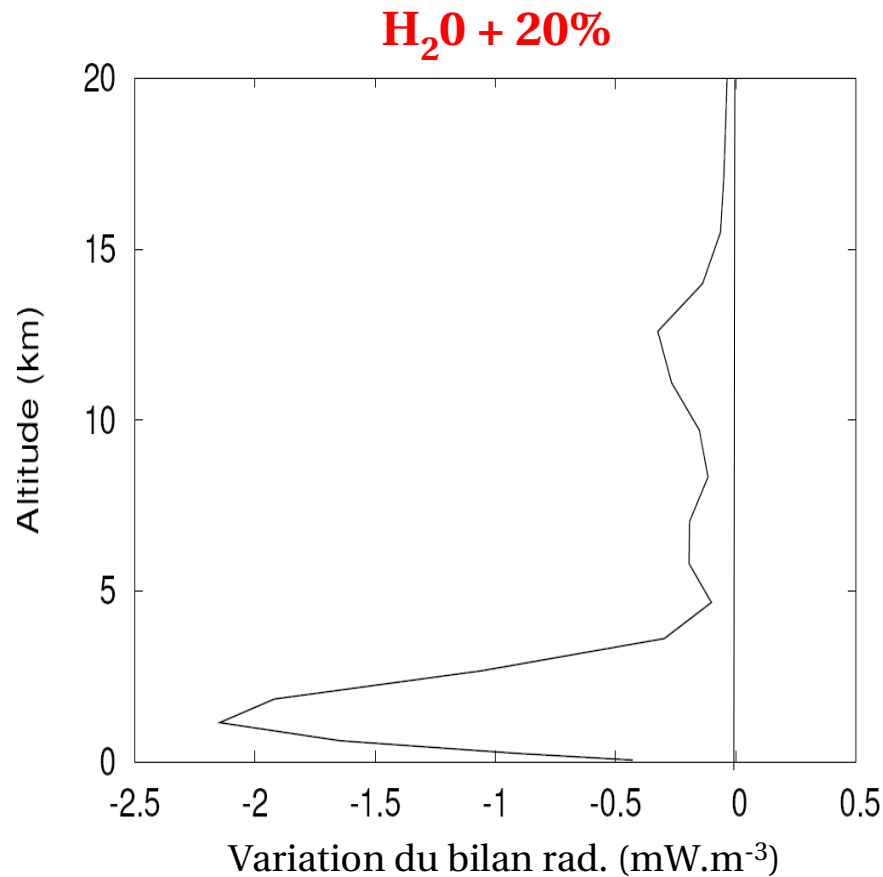
H₂O + 20%

CO₂ x 2



Analyse de l'effet de serre sur Terre

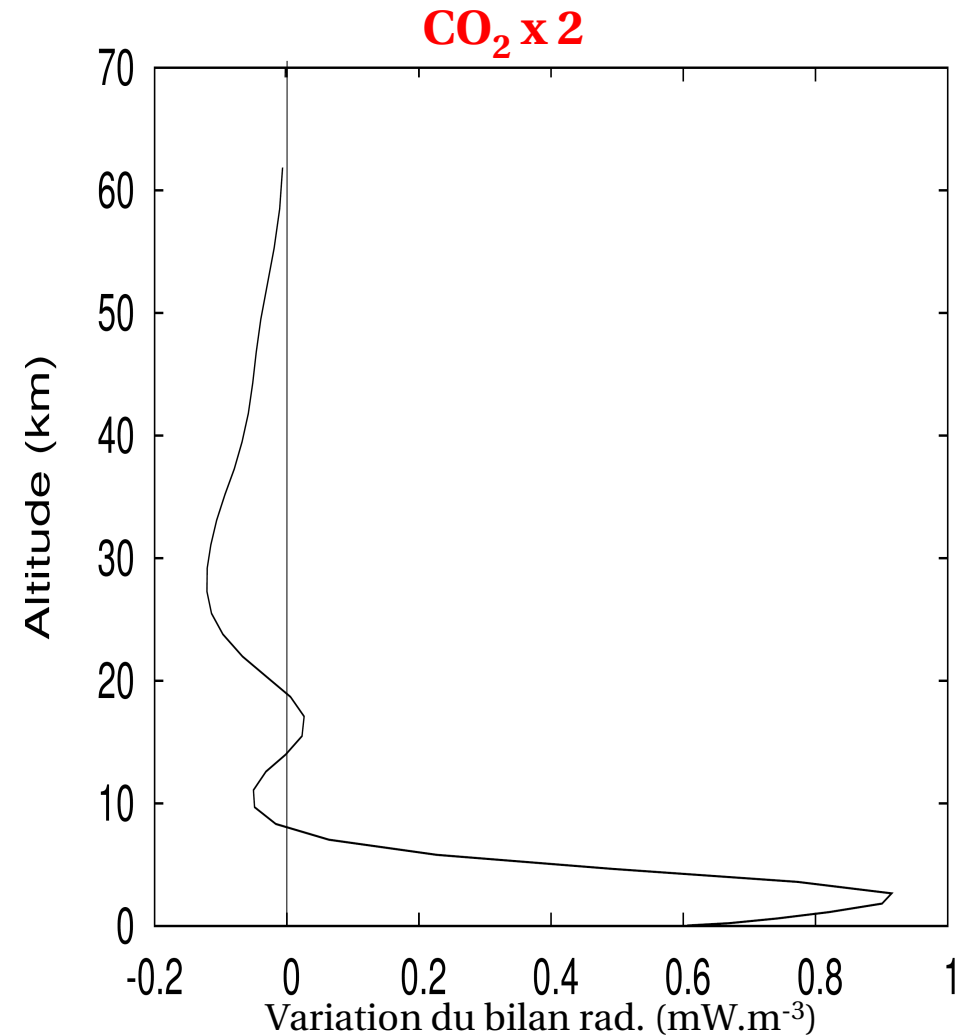
Variation des bilans radiatifs



Surface: **+ 12,1 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$**

Atmosphère: **- 8,1 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$**

Espace: **- 4,0 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$**



Surface: **+ 1,5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$**

Atmosphère: **+ 1,3 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$**

Espace: **- 2,8 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$**

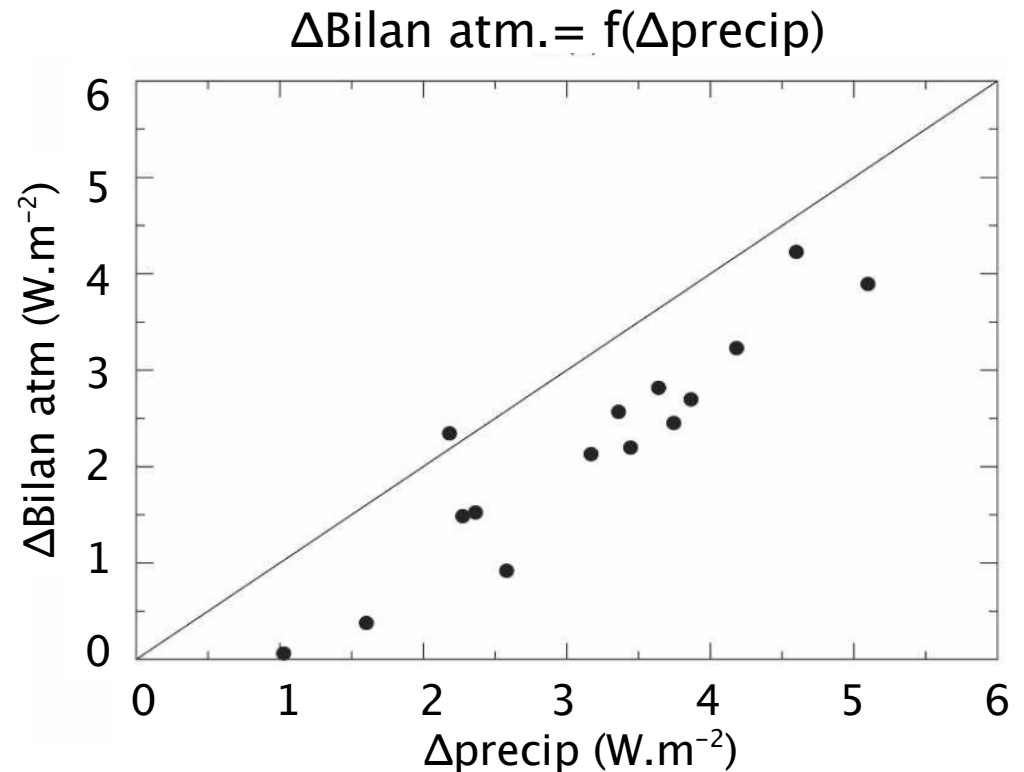
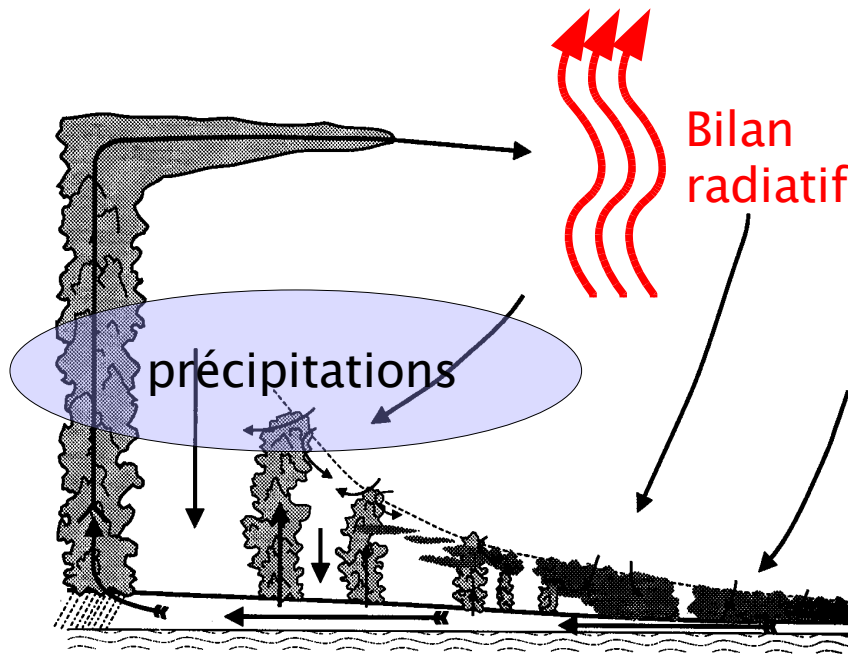
Bilan radiatif de l'atmosphère et précipitations

Augmentation de l'effet de serre dû à une augmentation de CO_2 :

- Diminution du refroidissement radiatif de l'atmosphère ($\approx 1.5 \text{ W m}^{-2}$ pour $2 \times \text{CO}_2$)
- => diminution des précipitations ($\approx -0.05 \text{ mm/j}$ pour $2 \times \text{CO}_2$)

Augmentation de l'effet de serre dû à une augmentation de H_2O :

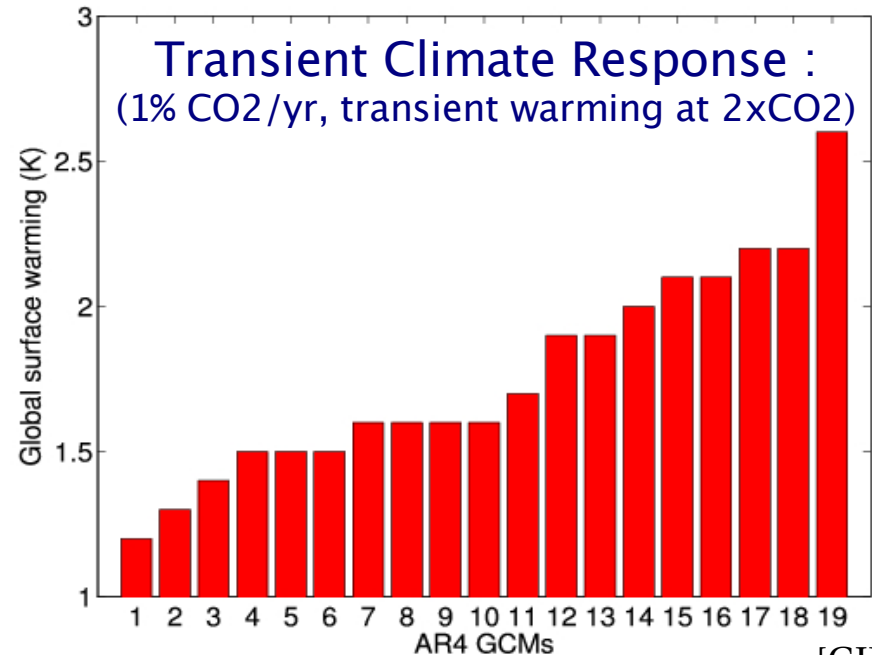
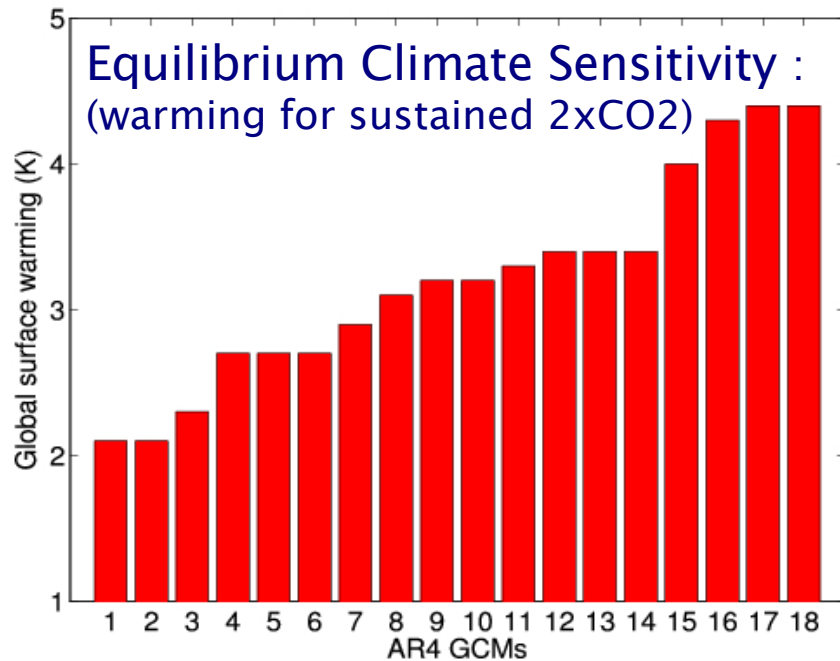
- Augmentation du refroidissement radiatif de l'atmosphère
- => augmentation des précipitations



Plan

1. Histoire de la découverte de l'effet de serre
2. Physique de l'effet de serre, effet de « saturation » des bandes
3. Analyse de l'accroissement de l'effet de serre dû au CO_2 et à H_2O
4. Amplitude du réchauffement en réponse à une perturbation radiative
5. Conclusion

Pour un forçage radiatif donné, quelle est l'amplitude du réchauffement ?



[GIEC, 2007]

Quelle est l'origine de cette forte dispersion?

Quels sont les contributions respectives :

- du forçage radiatif dû au doublement du CO₂
- des rétroactions climatiques
- de l'énergie thermique absorbée par l'océan (simulations transitoires)

Pour un forçage radiatif donné, quelle est l'amplitude du réchauffement ?

Réponse de la température moyenne de surface à forçage radiatif ΔQ

- Si l'accroissement de température est uniforme et qu'il **ne modifie que l'émission du corps noir** (calcul purement radiatif):

$$\Delta T_p = \frac{-\Delta Q}{\lambda_p}$$

avec λ_p paramètre de rétroaction de Planck

- Avec un **modèle climatique complet** (et diagnostic des résultats):

$$\Delta T = \frac{-\Delta Q}{\lambda_p + \lambda_w + \lambda_L + \lambda_C + \lambda_a + \lambda_o}$$

Planck vapeur d'eau grad. T nuages albédo de surf. océan

ou encore $\Delta T = \frac{1}{1-g} \Delta T_p$ avec g, gain de rétroaction $g = \sum_{x \neq P} g_x$ et $g_x = -\frac{\lambda_x}{\lambda_p}$

Pour un forçage radiatif donné, quelle est l'amplitude du réchauffement ?

Quel est l'accroissement de température dû à une rétroaction?

- Pas de réponse car cet accroissement dépend de toutes les rétroactions

Quel est la part de l'accroissement de température due à une rétroaction?

$$\Delta T = \Delta T_p + \Delta T_w + \Delta T_L + \Delta T_C + \Delta T_a + \Delta T_o$$

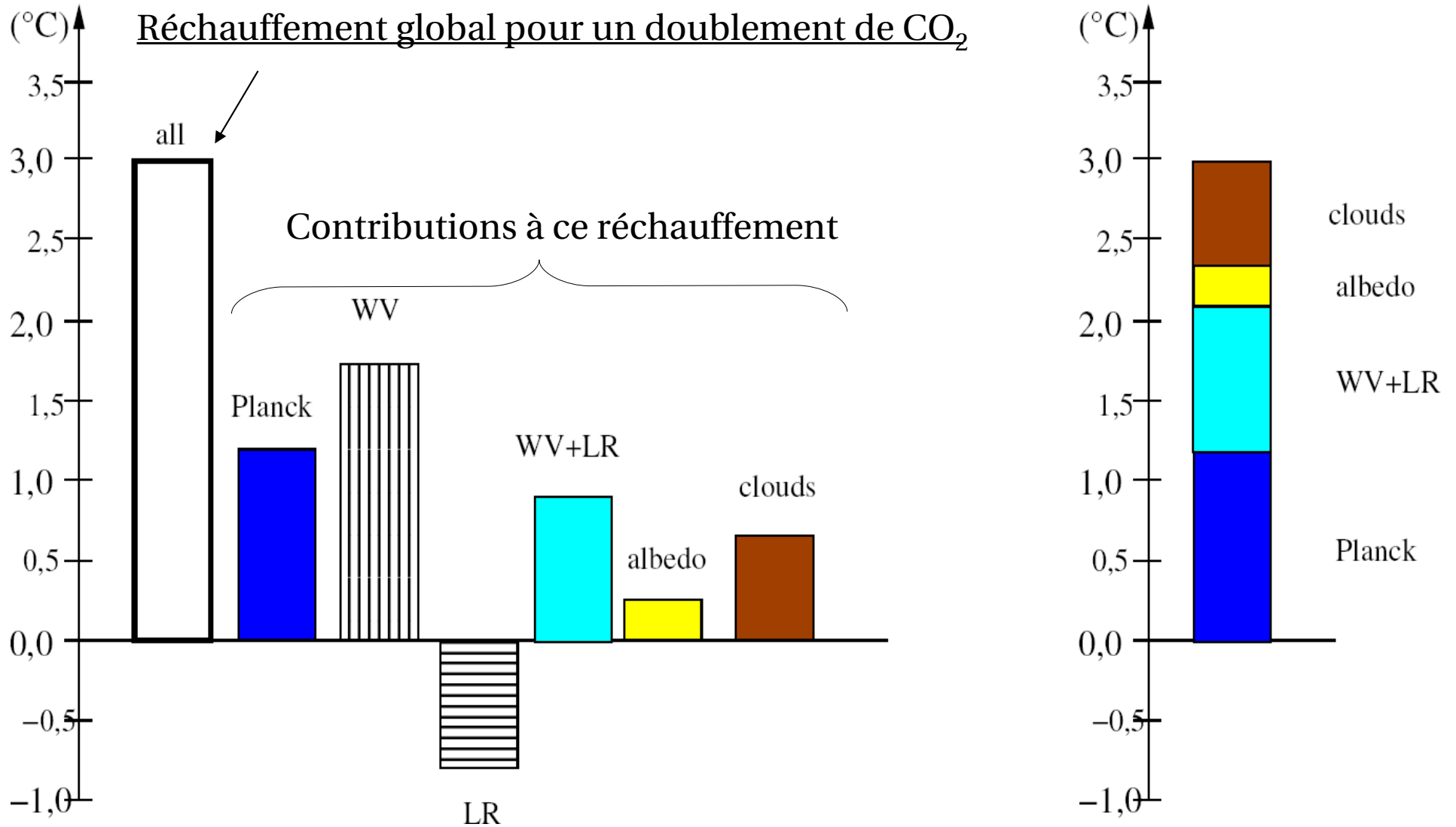
On obtient, pour $x \neq P$,

$$\Delta T_x = \frac{g_x}{1-g} \Delta T_p$$

$$\frac{\Delta T_x}{\Delta T} = g_x = -\frac{\lambda_x}{\lambda_p}$$

La *contribution relative* d'une rétroaction est mathématiquement *indépendante des autres rétroactions*. C'est une constante.

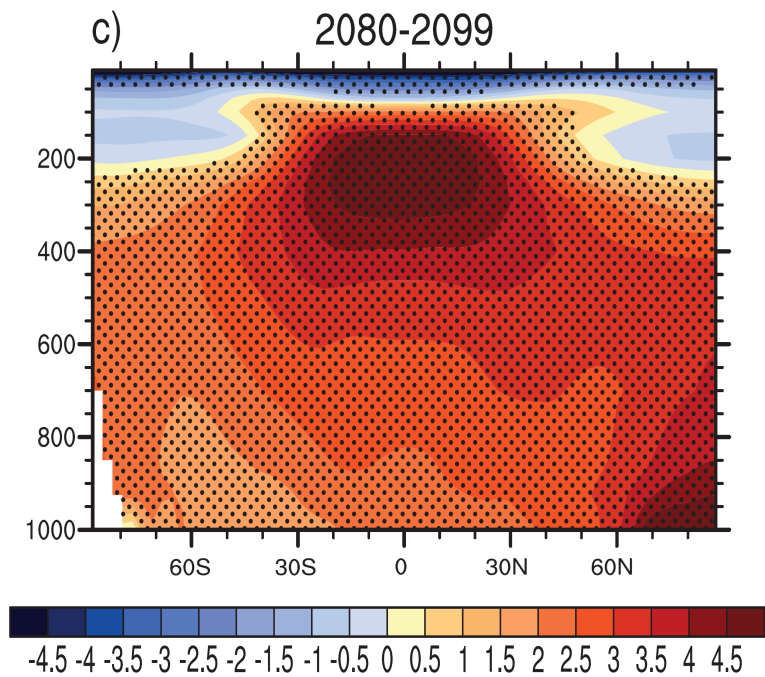
Contribution à l'accroissement de température à l'équilibre pour un doublement de CO₂



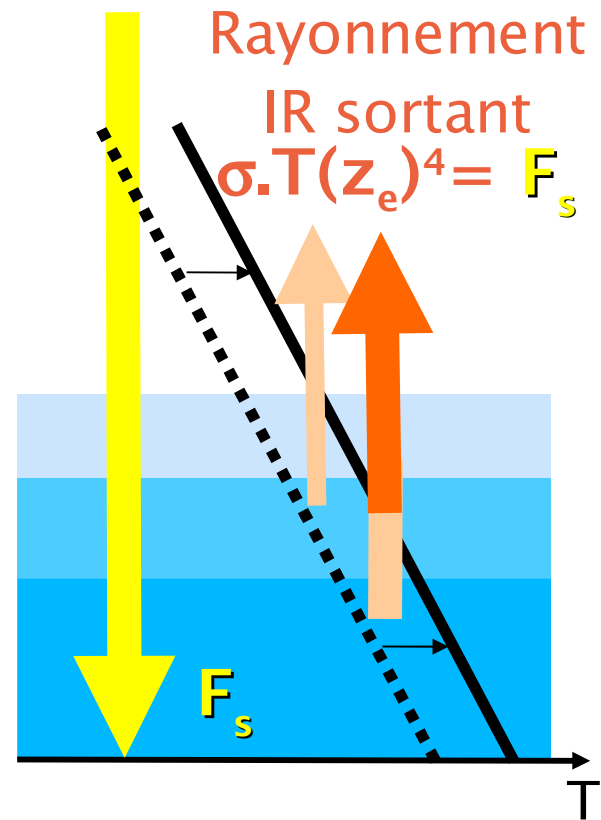
Avec les paramètres de rétroactions calculés par (Soden and Held, 2006)

Rétroaction due au changement de gradient vertical de température

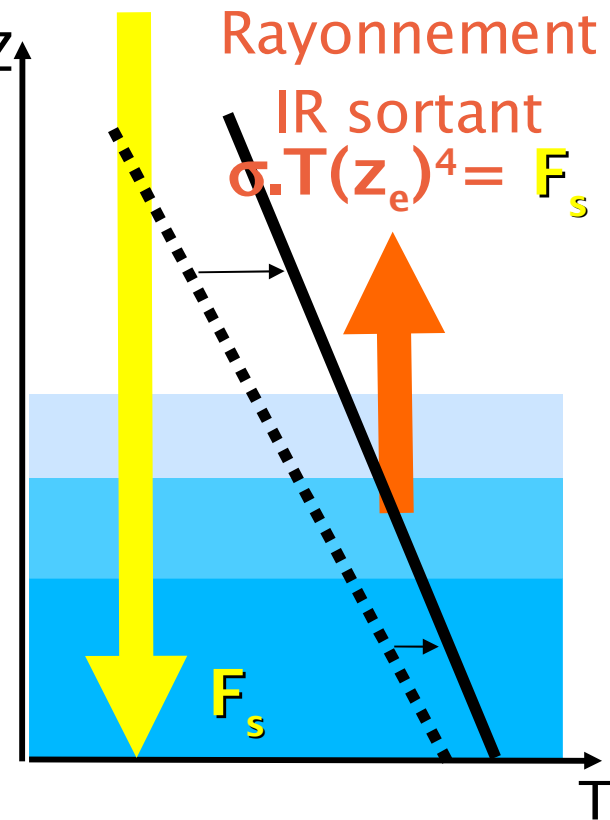
Moyenne zonale de la variation de température en réponse à un accroissement de GES (scénarios A1B)



Profil vertical de température fixe

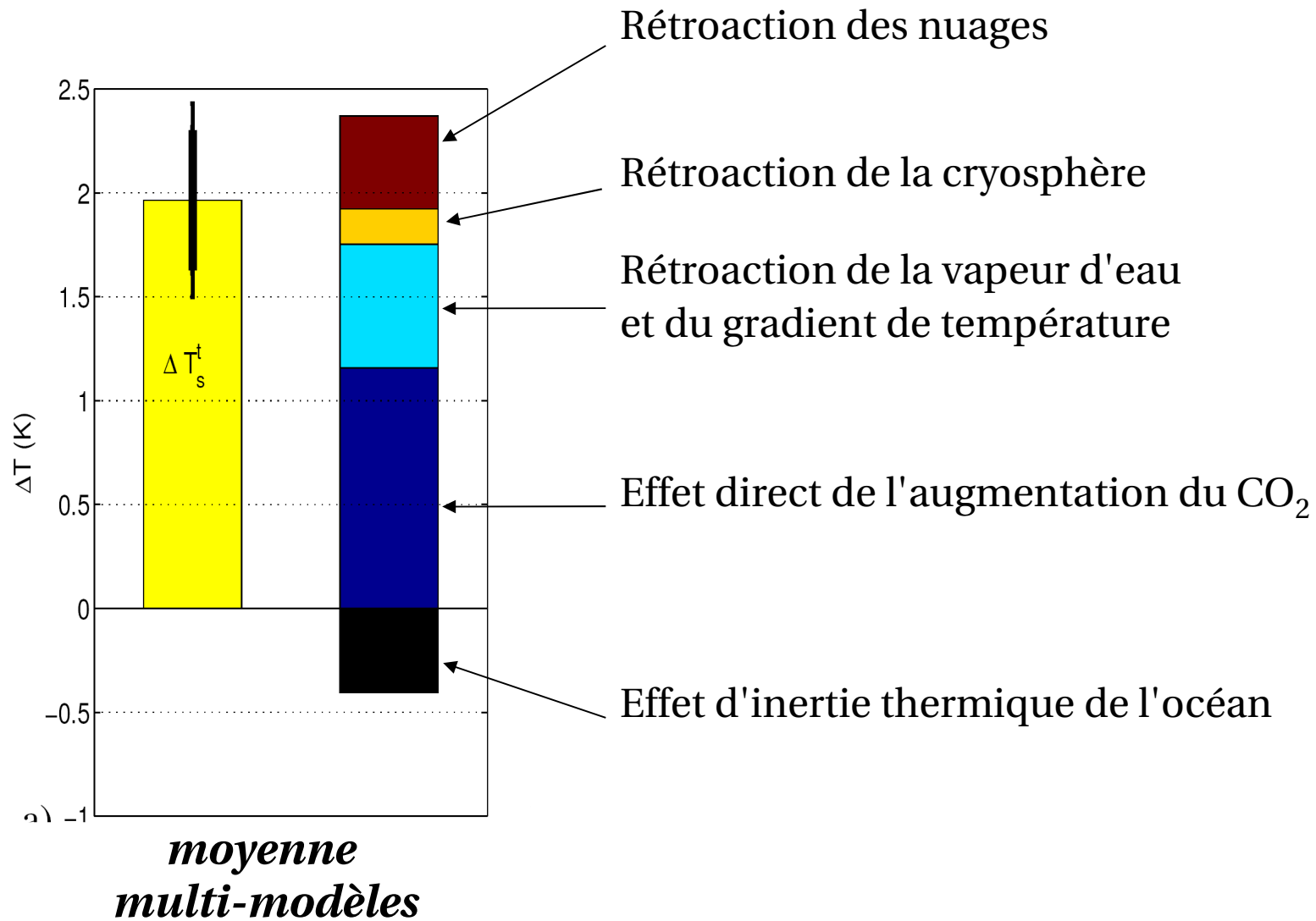


Profil vertical de température varie



Accroissement de température en transitoire

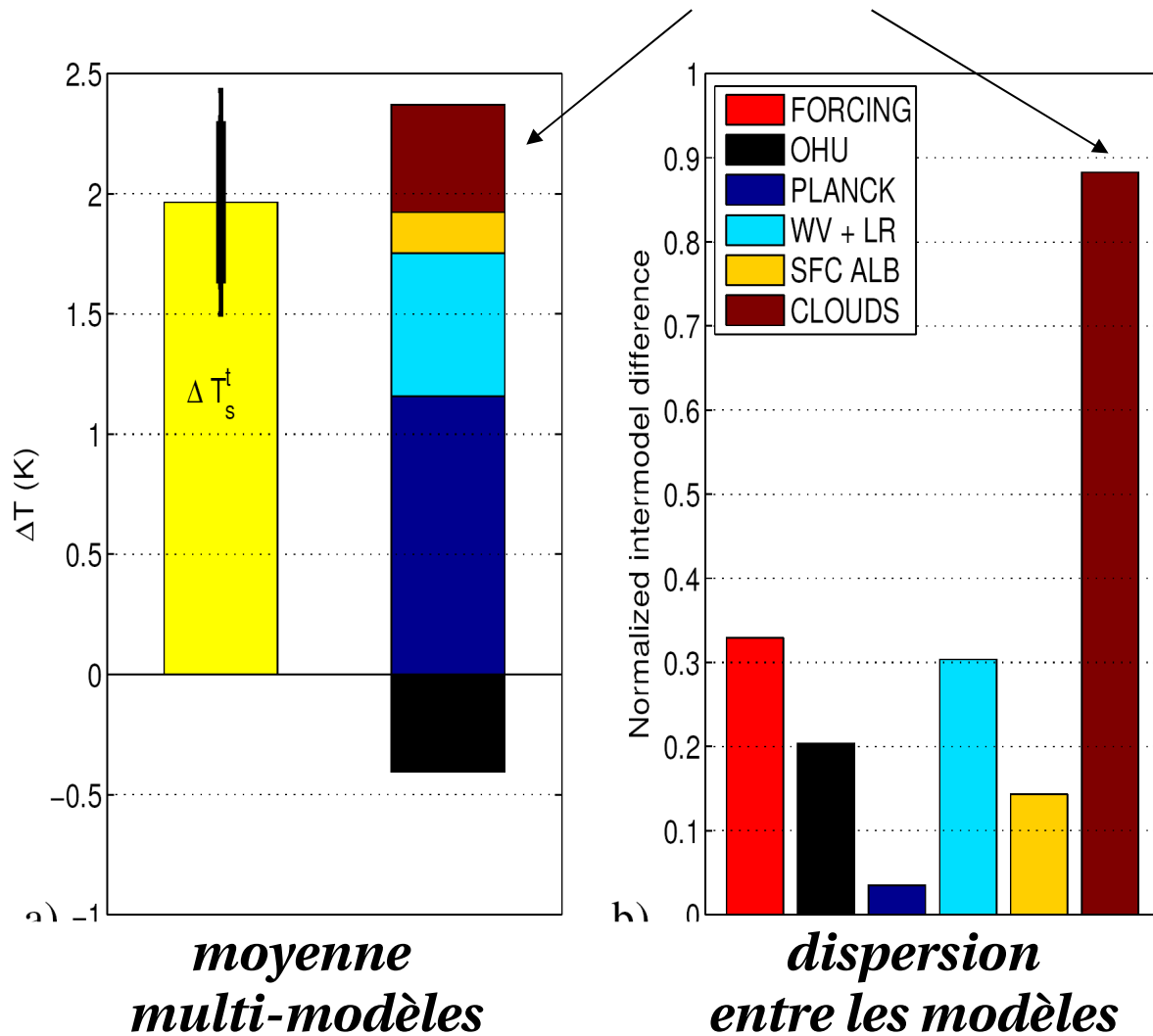
Accroissement de CO₂ de 1%/an



Accroissement de température en transitoire

Accroissement de CO₂ de 1%/an

Rétroaction des nuages

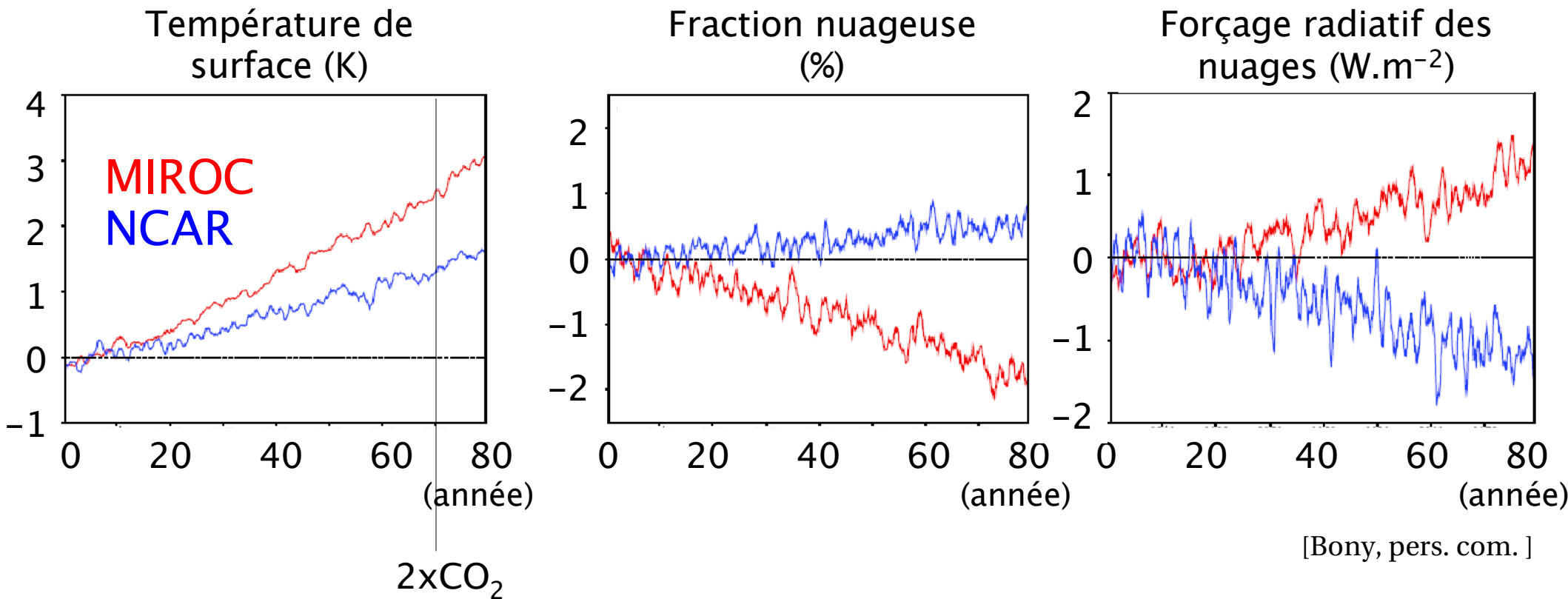


- Quantification de la contribution de chaque rétroaction, même en transitoire
- Dispersion des modèles, importance:
 - des rétroactions nuageuses
 - du calcul du forçage
- Contribution relative des rétroactions est constante
- En particulier même contribution relative à l'équilibre et en transitoire

Accroissement de température en transitoire

Accroissement de CO_2 de 1%/an

Résultats pour deux modèles (NCAR & MIROC)



[Bony, pers. com.]

En guise de conclusion

La physique du climat: née il y a 150 ans, elle constitue désormais une véritable discipline scientifique, avec des questions scientifiques bien abouties et d'autres plus exploratoires.

La température de surface:

- s'ajuste pour annuler le bilan d'énergie au sommet de l'atmosphère (en moyenne + variation saisonnière et en latitude)
- Cette température moyenne est contrôlée par:
 - Le flux solaire incident
 - L'albédo planétaire
 - L'effet de serre

L'effet de serre:

- Phénomène mal nommé mais qui repose sur des bases physiques solides
- Sa compréhension n'est pas si simple, mais son calcul ne pose pas de difficulté fondamentale (pour la Terre au moins)
- Sa variation entraîne forcément une perturbation radiative, et donc une variation de la température de surface


En guise de conclusion (2)

Réponse de la température de surface à une perturbation radiative (Soleil, effet de serre...):

- L'amplitude du réchauffement dépend fortement des processus de rétroactions, dont certains sont mal connus et mal contraints
- Plus l'amplitude de la perturbation est élevée, plus celle de la réponse en température l'est aussi
- Si la concentration des gaz à effet de serre continue de croître au rythme actuel, dans un siècle l'amplitude de la perturbation radiative sera
 - très élevée par rapport à celle estimée des derniers milliers d'années
 - comparable à celle correspondant à la différence entre périodes glaciaire et inter-glaciaire

Quelques questions ouvertes:

- Estimation plus précise de l'amplitude du réchauffement
- Comment ce changement de température se traduit en changement climatique ou environnementale
- Possibilité de bifurcation?
- ...



Merci de votre attention