

L'effet de serre: sa découverte, son analyse
par la méthode des puissances nettes
échangées et les effets de ses variations
récentes et futures sur le climat terrestre.

Jean-Louis Dufresne

Laboratoire de Météorologie Dynamique
Institut Pierre Simon Laplace

Soutenance pour l'habilitation à diriger les recherches
Université Pierre et Marie Curie
26 janvier 2009

Plan

1. La découverte de l'effet de serre
2. Analyse de l'effet de serre par la méthode des puissances nettes échangées (PNE)
3. Simulation des changements climatiques dus aux activités humaines
4. Perspectives

L'hypothèse de l'effet de serre

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

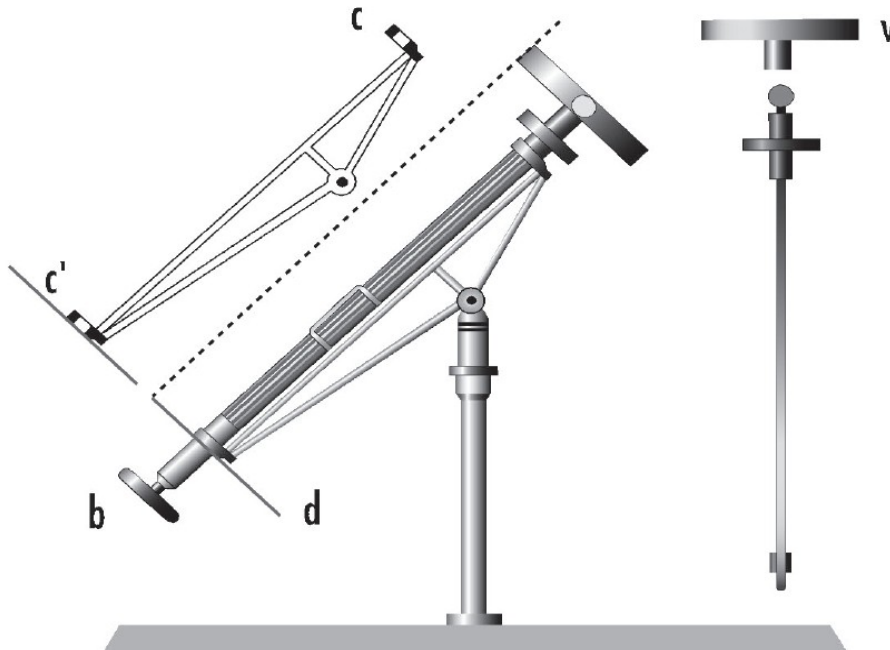
- La température d'une planète est déterminée par son bilan d'énergie
- Les principaux modes de transferts d'énergie sont
 1. Rayonnement solaire
 2. Rayonnement infra-rouge
 3. Conduction avec le centre de la Terre
- Les échanges de chaleurs entre la surface et l'intérieur de la Terre sont négligeables en moyenne annuelle
- Analogie entre l'atmosphère et la « boîte chaude » utilisé par H.B. de Saussure
- En hiver, la température des pôles est égale à la température de « l'espace planétaire »
- Toutes variations de l'ensoleillement ou des propriétés de surface modifieront la température de surface



Joseph Fourier
(1768-1830)

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

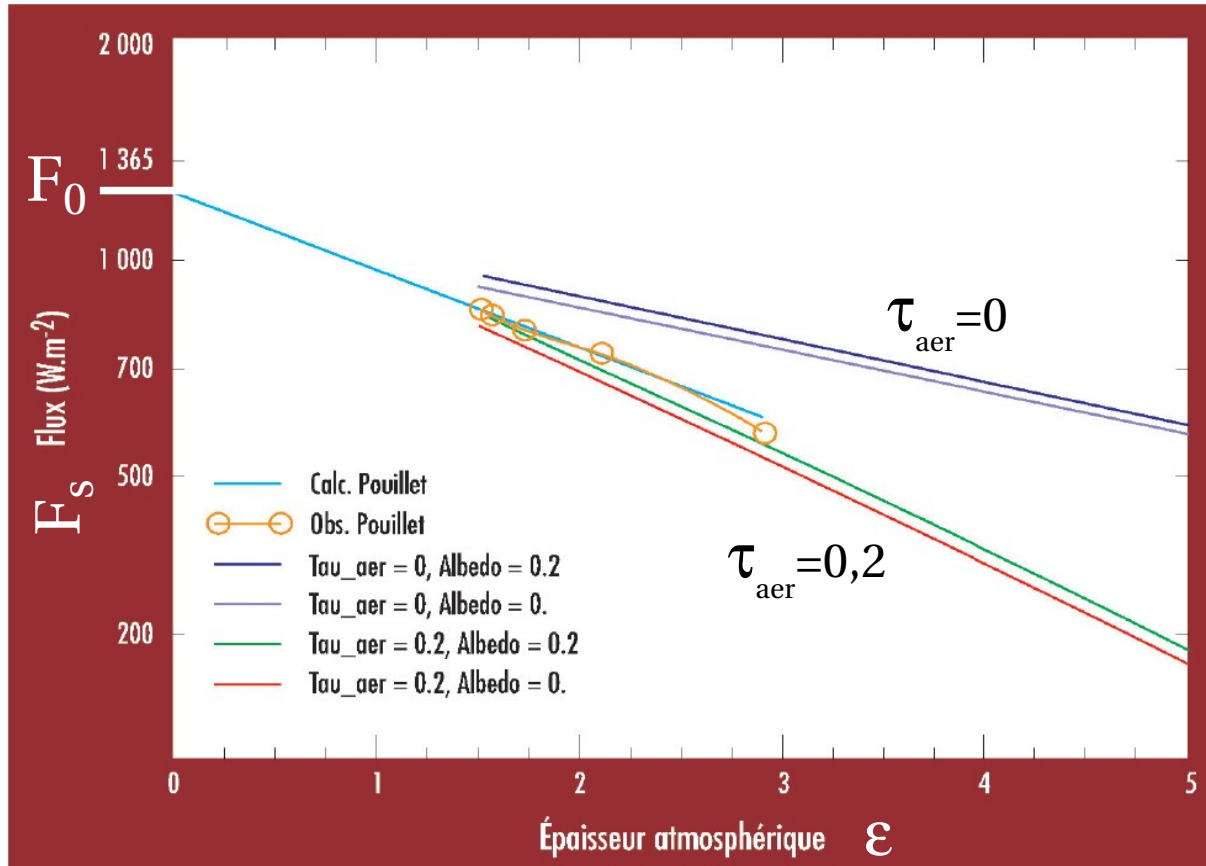


Claude Pouillet
(1790-1868)

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

$$F_s = F_0 T^\epsilon$$

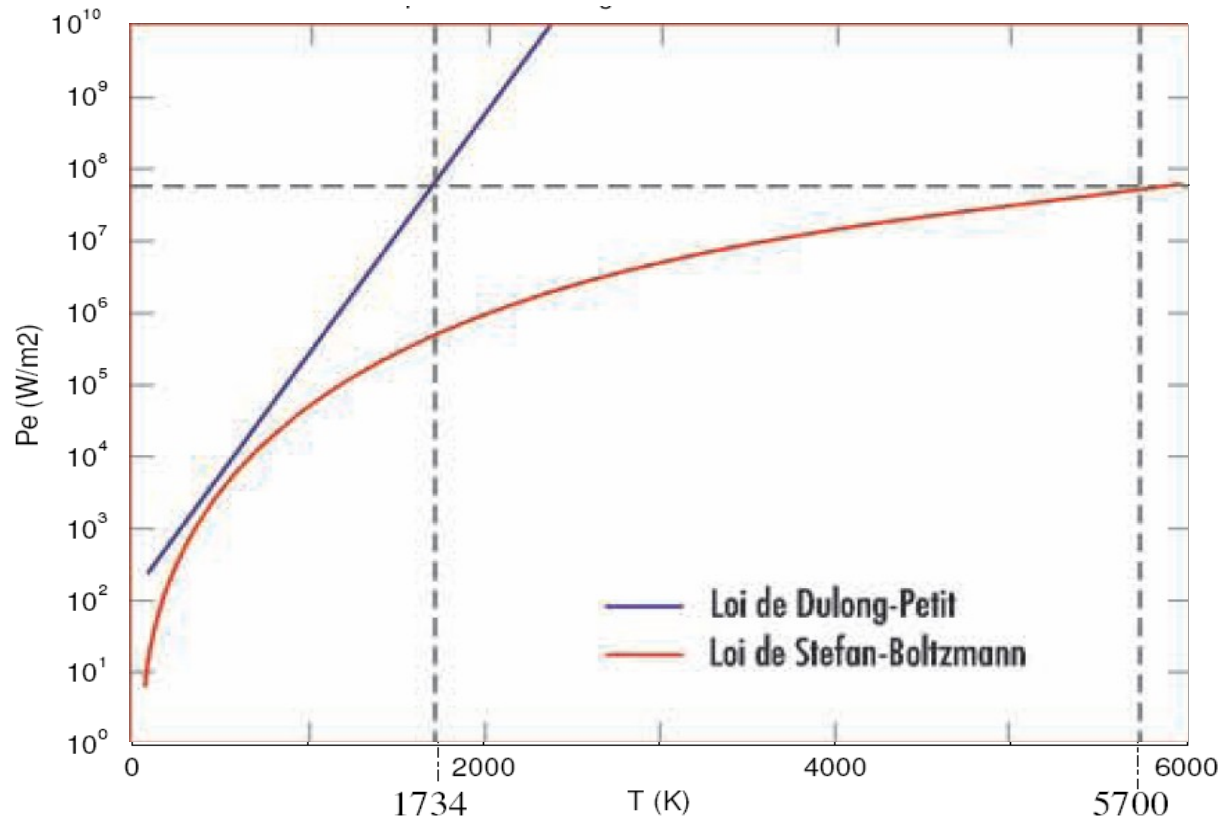
F_s : flux solaire incident
 F_0 : constante solaire
 ϵ : épaisseur atmosphérique
 Γ : transmissivité pour $\epsilon = 1$

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.

Détermination de la température du soleil



$$P_e = \frac{F_0}{\sin^2 \omega}$$

P_e : flux émis par le soleil

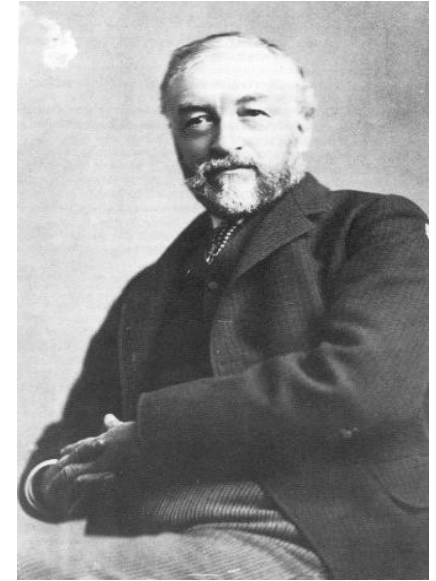
F_0 : constante solaire

ω : demis-angle sous lequel le soleil est vu

Flux du rayonnement émis par le soleil P_e en fonction de la température de surface du soleil

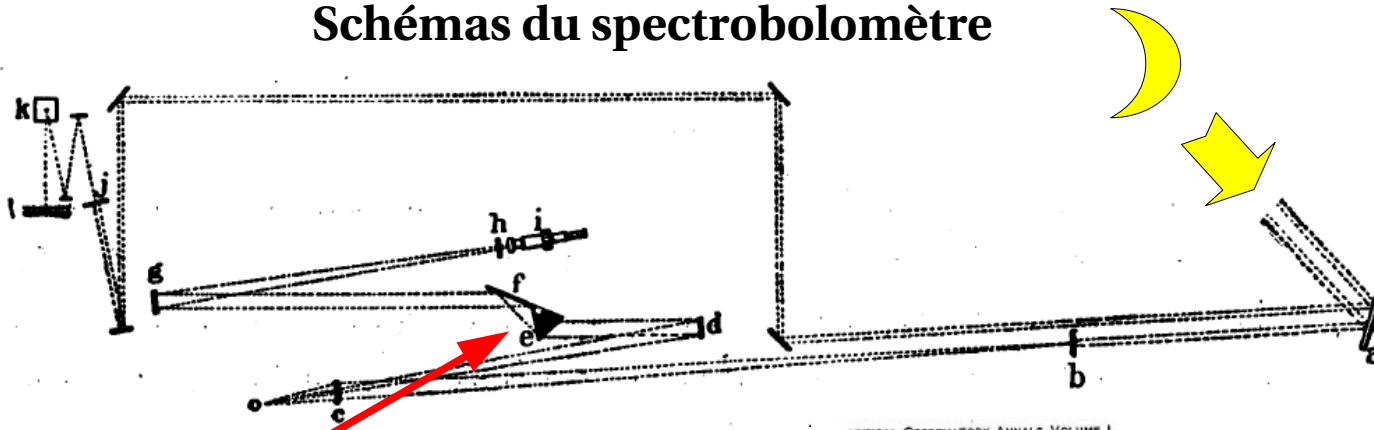
Mesure du spectre infra-rouge

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



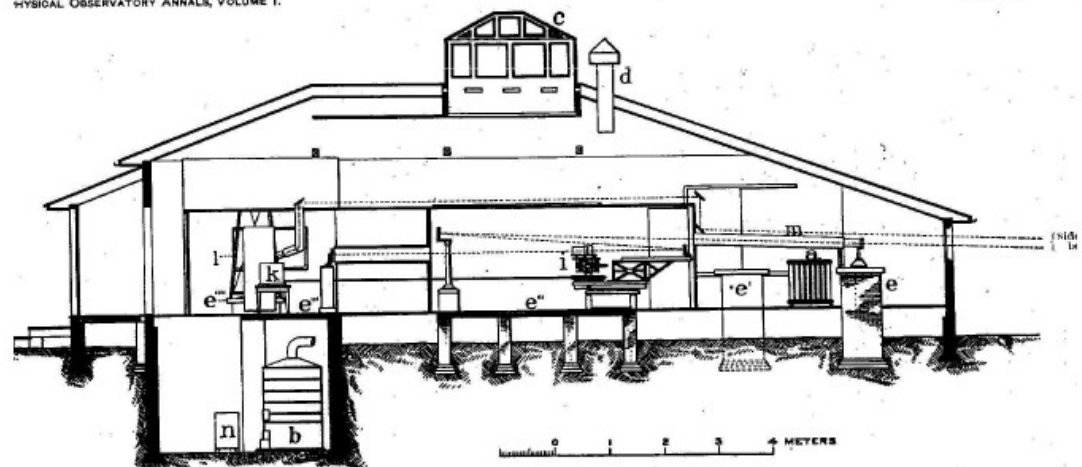
Samuel Langley
(1834-1906)

Schémas du spectrobolomètre



Prisme en sel gemme (NaCl)

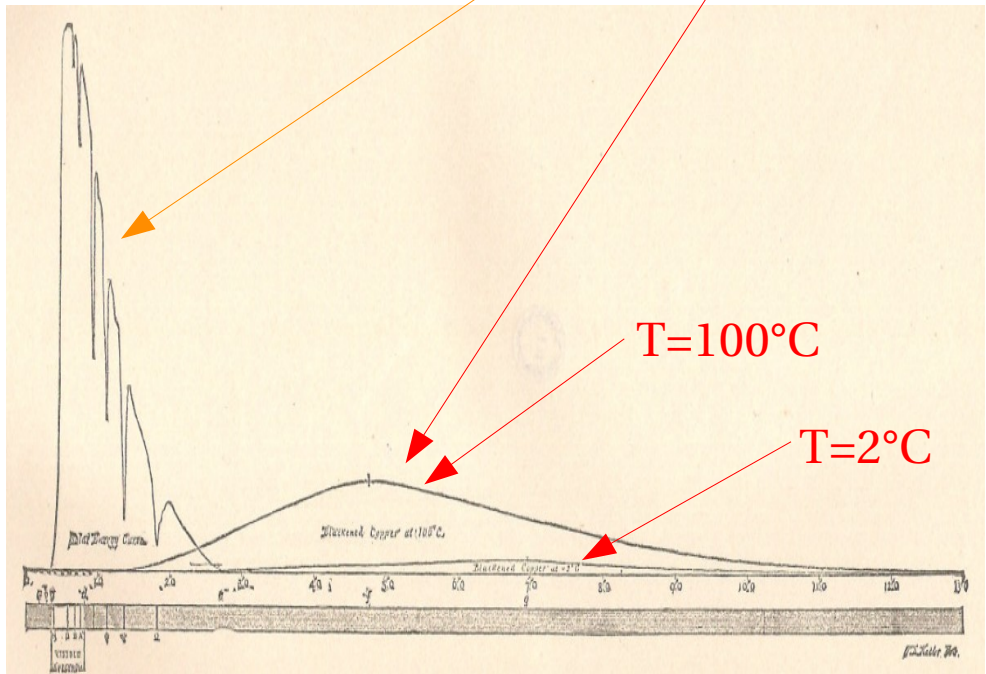
Lien entre angle de déviation
et longueur d'onde
=> loi de variation de l'indice
de réfraction



SECTION THROUGH MAIN OBSERVATORY BUILDING, 1897. LOOKING WEST.

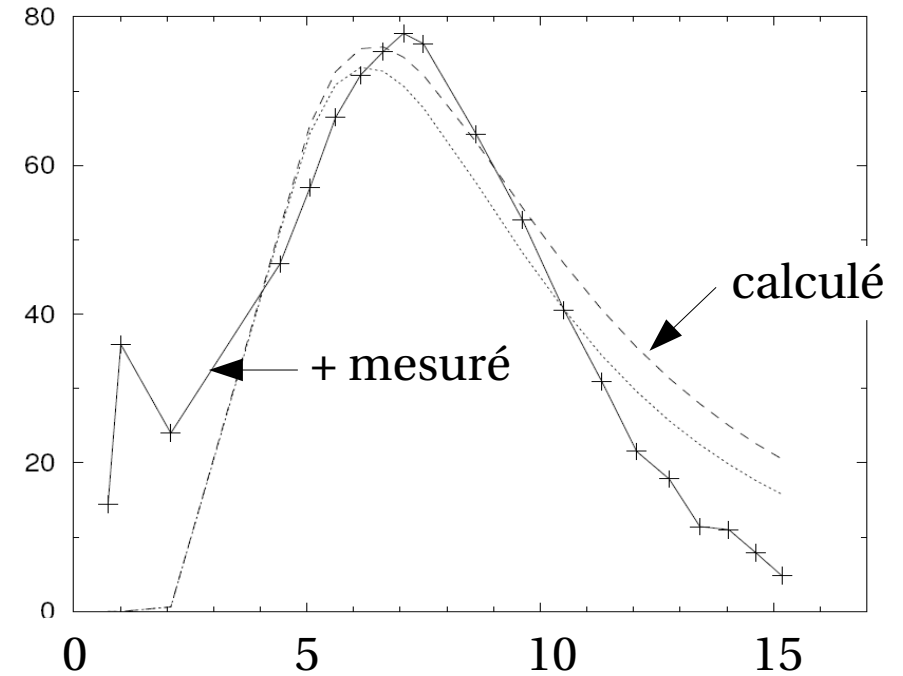
Mesure du spectre infra-rouge

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



Longueur d'onde (μ m)

- 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:

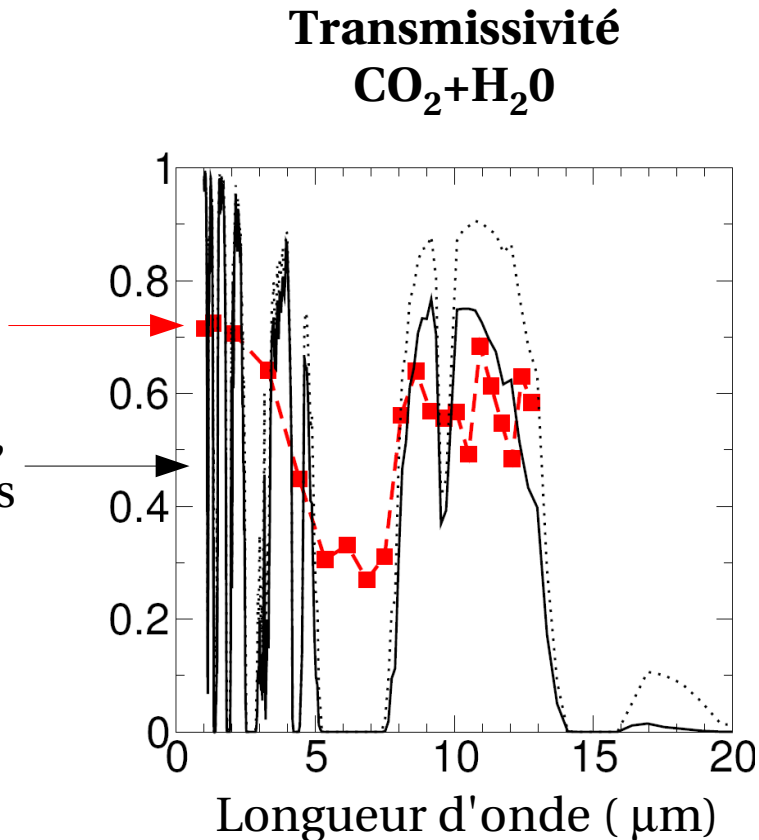
- Aborde le problème dans sa globalité
- Se base sur les travaux de Fourier, Pouillet, Tyndall et Langley
- **Utilise les observations de Langley pour estimer l'absorption du rayonnement IR par l'atmosphère**
- Propose et utilise un modèle de l'effet de serre

Transmissivité de l'atmosphère

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

les données d'Arrhenius

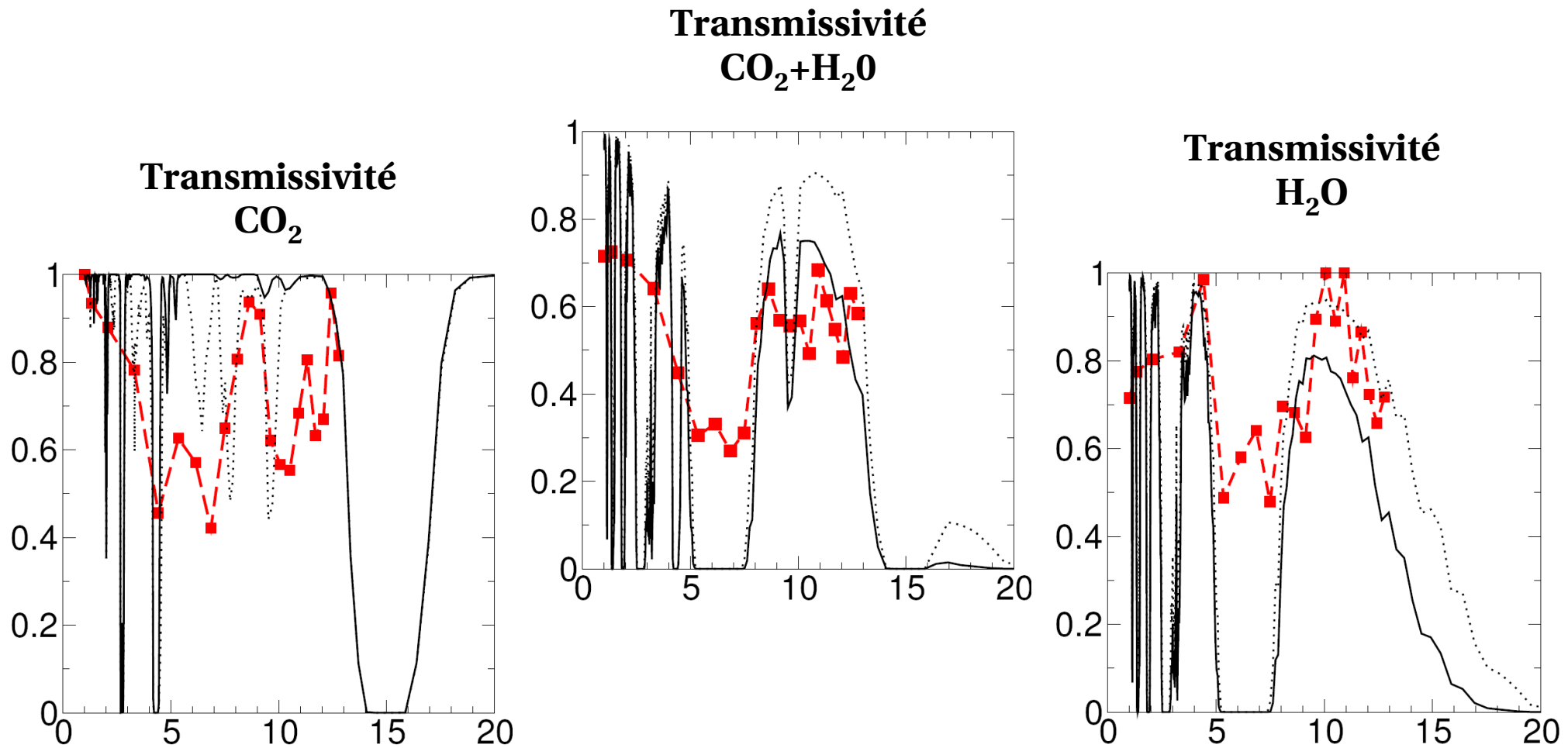
un modèle radiatif actuel, pour 2 quantités intégrées de H₂O (15 et 30 kg.m⁻²)



Cherche à identifier le rôle individuel du 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

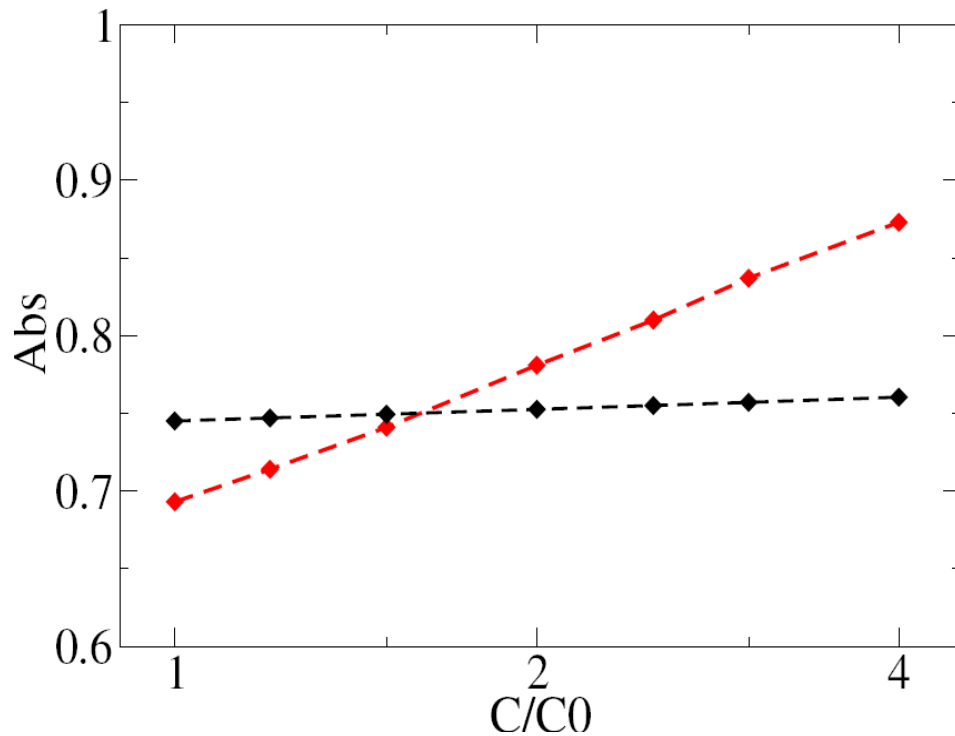


Les observations ne *couvrent pas la bande d'absorption à 15 μm du CO₂*

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

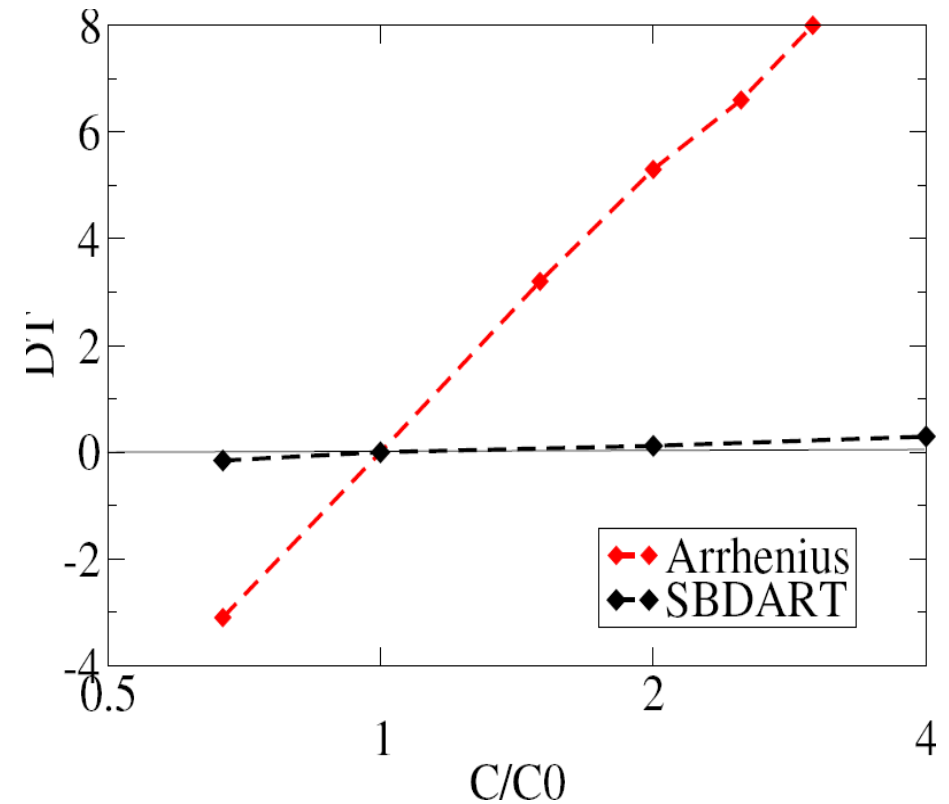
Variation de la concentration de CO₂

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/C_0 de CO₂ pour 3 quantités intégrées de vapeur d'eau

Modèle de serre à 1 vitre, purement radiatif



Variation de la température de surface en fonction de la concentration relative C/C_0 de CO₂

Calcul de l'effet de serre par S. Arrhenius

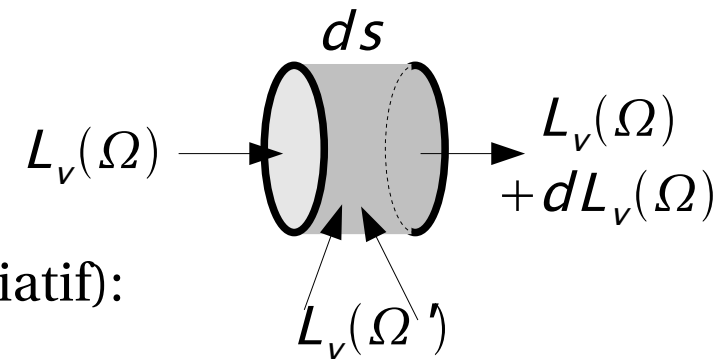
Nous avons montré que:

- Le spectre mesuré ne couvre pas la bande d'absorption du CO_2 à 15 μm
- L'absorption par le CO_2 est très surestimée (la séparation entre l'absorption par le CO_2 et par H_2O n'a pas vraiment été réalisée)
- Le modèle de serre à 1 vitre donne un accroissement très faible de la température si on utilise des valeurs d'absorptivité par le CO_2 réaliste
- Un modèle à N vitre, ou avec un traitement explicite du gradient verticale de la température est nécessaire
- Les résultats obtenus par S. Arrhenius résultent d'une compensation de ces différentes erreurs
- S. Arrhenius considère la question dans sa globalité, aborde beaucoup de questions (notamment les rétroactions de la vapeur d'eau, des nuages...) et apporte des solutions originales (approximation diffuse...)

Plan

1. La découverte de l'effet de serre
2. Analyse de l'effet de serre par la méthode des puissances nettes échangées (PNE)
3. Simulation des changements climatiques dus aux activités humaines
4. Perspectives

Formulation en Puissance Nette Échangée: principe



Formulation en flux:

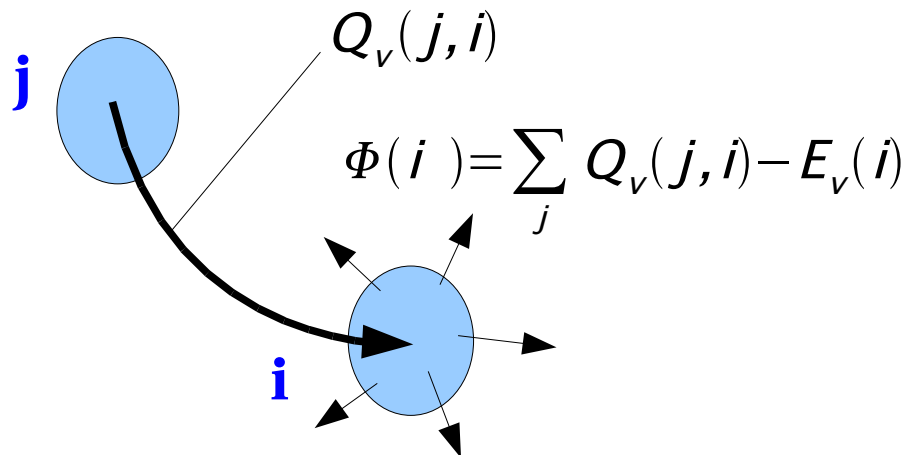
1- calcul de la luminance (équation de transfert radiatif):

$$\frac{dL_v(\Omega)}{ds} = -\kappa_v L_v(\Omega) + \kappa_v B_v(T) - \sigma_v L_v(\Omega) + \sigma_v \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} P(\Omega', \Omega) L_v(\Omega') d\Omega'$$

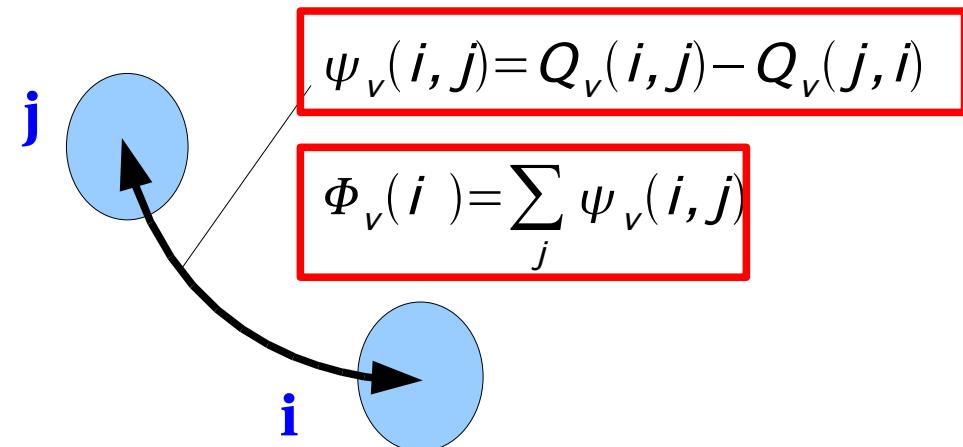
2- calcul du flux radiatif

3- bilan Φ_v : calcul de la divergence du flux

Formulation en puissance échangée:



Formulation en puissance nette échangée (PNE):



Formulation en Puissance Nette Échangée

Puissance $Q_\nu(S_i, S_j)$ du rayonnement monochromatique émis par S_i et absorbé par S_j (deux surfaces noires) :

$$Q_\nu(S_i, S_j) = \int_{\Gamma(S_i, S_j)} -B_\nu(\vec{x}_\gamma) \tau_{\nu, \gamma} d\gamma$$

$\Gamma(S_i, S_j)$: ensemble des chemins optiques de la surface S_i à la surface S_j

$B_\nu(\vec{x})$: luminance du corps noir à la température du point \vec{x}

$\vec{x}_\gamma, \vec{y}_\gamma$: coordonnées de la première et de la seconde extrémités du chemin optique γ

$d\gamma$: mesure d'intégration du chemin optique

$\tau_{\nu, \gamma}$: transmissivité monochromatique de γ

Puissance $Q_\nu(S_j, S_i)$ du rayonnement monochromatique émis par S_j et absorbé par S_i :

$$Q_\nu(S_j, S_i) = \int_{\Gamma(S_j, S_i)} -B_\nu(\vec{y}_\gamma) \tau_{\nu, \gamma} d\gamma$$

Puissance nette $\psi_\nu(S_i, S_j)$ échangée entre deux surfaces opaques S_i et S_j

$$\begin{aligned} \psi_\nu(S_i, S_j) &= Q_\nu(S_i, S_j) - Q_\nu(S_j, S_i) \\ &= \int_{\Gamma(S_i, S_j)} [B_\nu(\vec{y}_\gamma) - B_\nu(\vec{x}_\gamma)] \tau_{\nu, \gamma} d\gamma \end{aligned}$$

en utilisant le principe de réciprocité $\Gamma(S_i, S_j) = \Gamma(S_j, S_i)$

Formulation en Puissance Nette Échangée

Puissance nette $\psi_\nu(E_i, E_j)$ échangée entre deux éléments E_i et E_j :

$$\psi_\nu(E_i, E_j) = \int_{\Gamma(E_i, E_j)} [B_\nu(\vec{y}_\gamma) - B_\nu(\vec{x}_\gamma)] O(\vec{x}_\gamma, \vec{y}_\gamma) d\gamma$$

avec $O(\vec{x}_\gamma, \vec{y}_\gamma)$ facteur optico-géométrique d'échange.

Si les deux éléments sont des surfaces :

$$O(\vec{x}_\gamma, \vec{y}_\gamma) = \tau_{\nu, \gamma}$$

Si un élément est une surface, l'autre un volume de gaz :

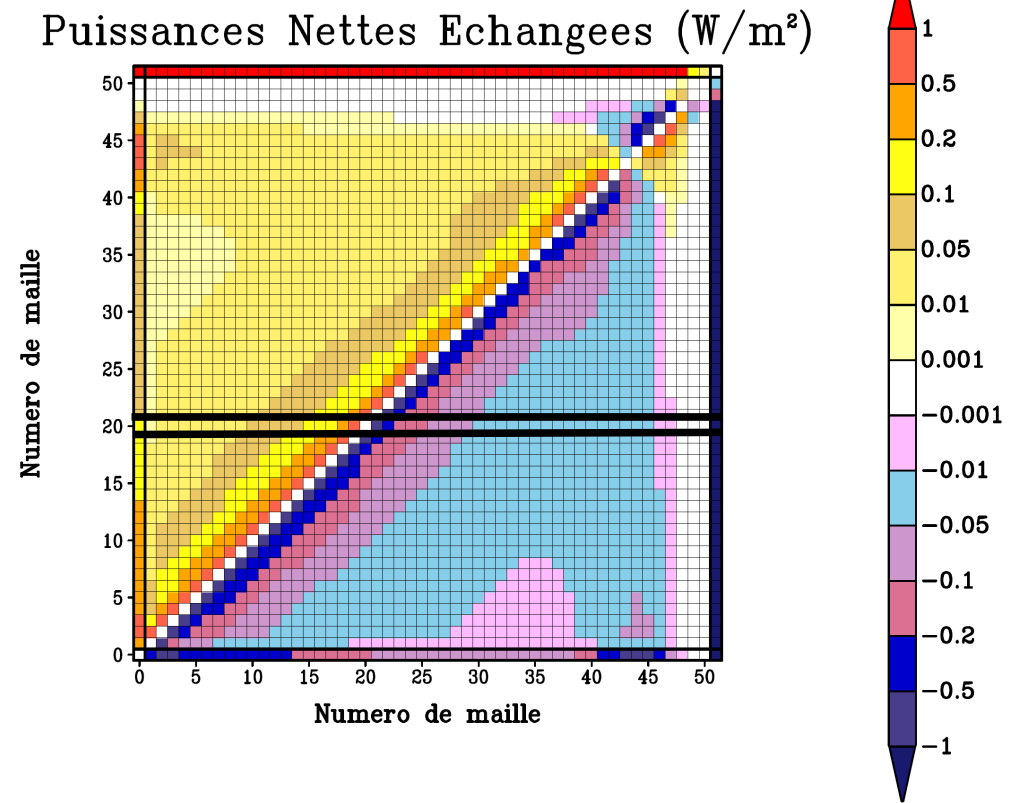
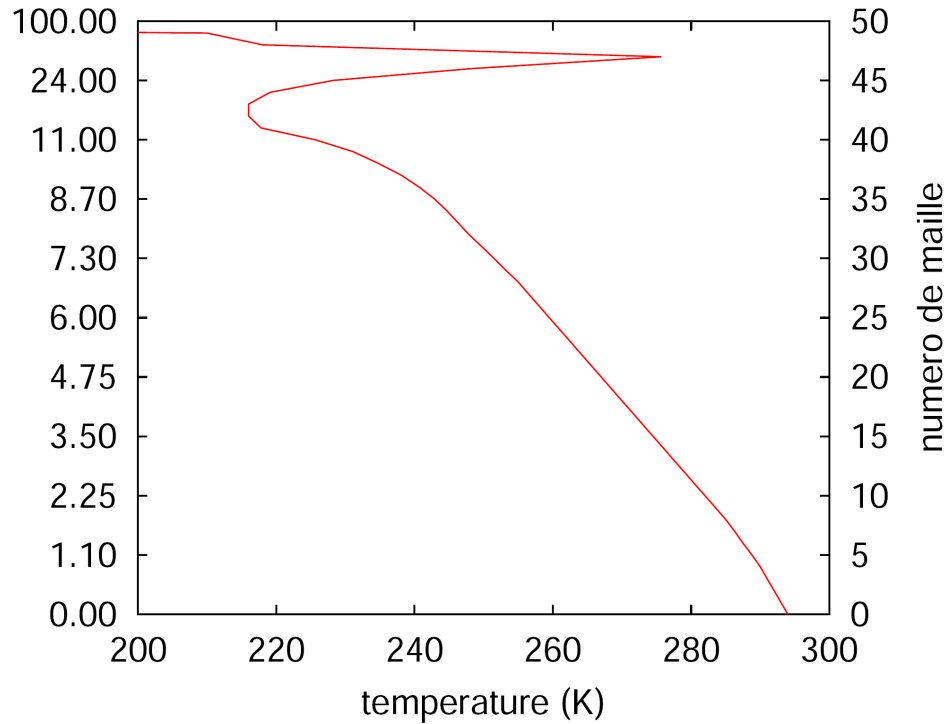
$$O(\vec{x}_\gamma, \vec{y}_\gamma) = \left| \frac{\partial \tau_{\nu, \gamma}}{\partial s_{x_\gamma}} \right|$$

Si les deux éléments sont des volumes de gaz :

$$O(\vec{x}_\gamma, \vec{y}_\gamma) = \left| \frac{\partial^2 \tau_{\nu, \gamma}}{\partial s_{x_\gamma} \partial s_{y_\gamma}} \right|$$

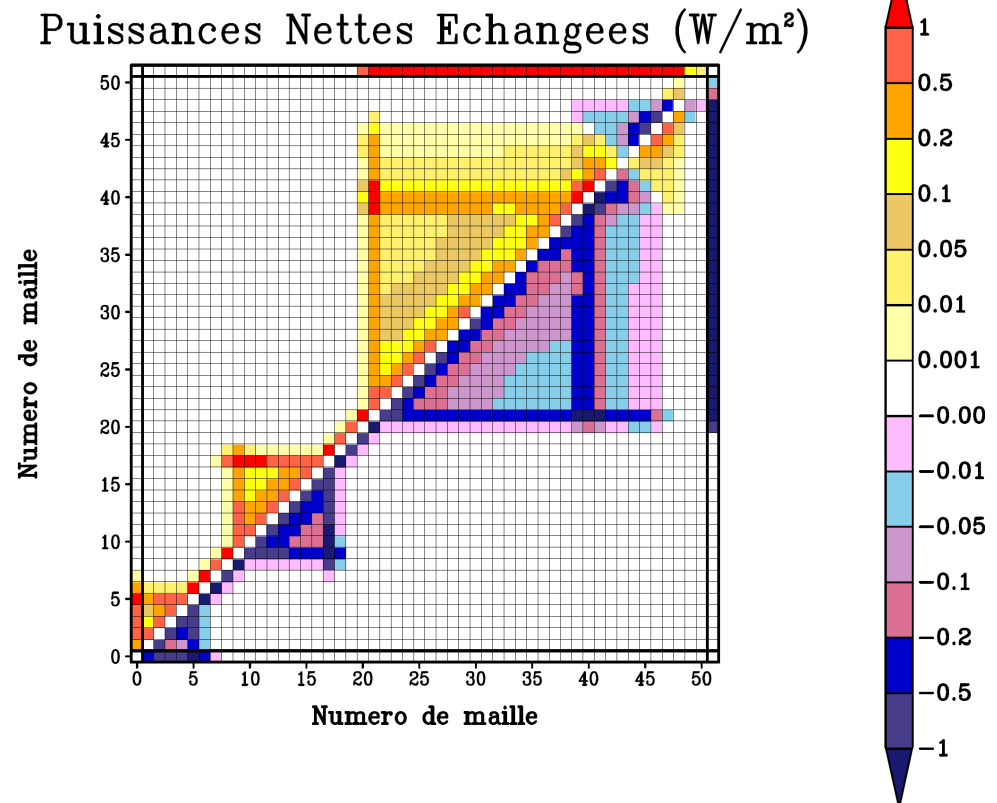
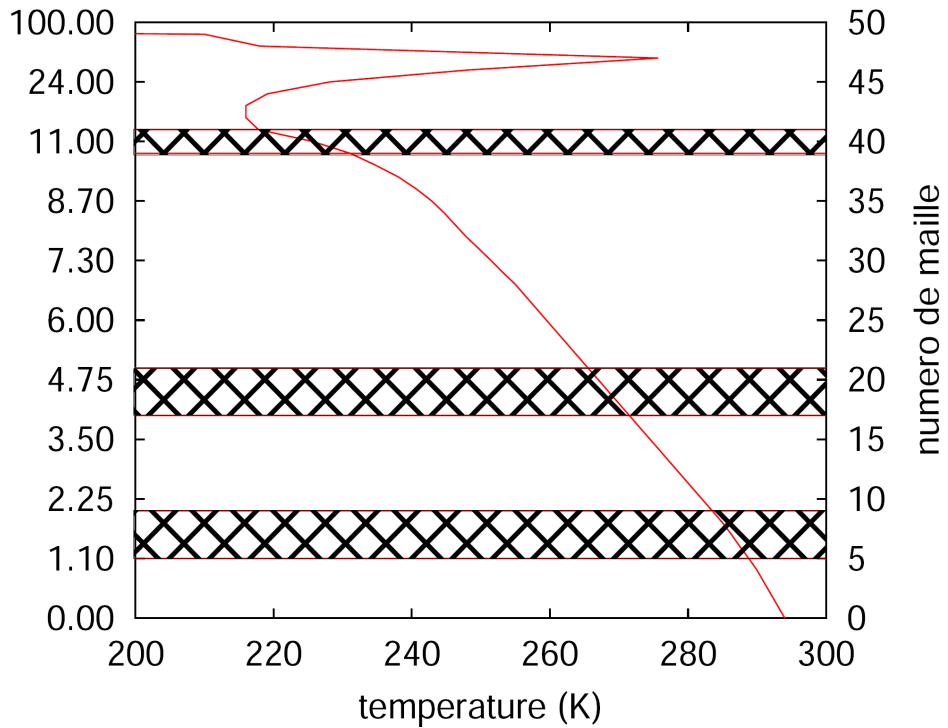
Analyse en Puissance Nette Échangée

Atmosphère moyenne latitude, été
ciel clair



Analyse en Puissance Nette Échangée

Atmosphère moyenne latitude, été
trois couches de nuages



Formulation en Puissance Nette Échangée

Spécificités:

- Le **premier et le second principe** de la thermodynamique sont conservés **quelles que soient les erreurs d'intégrations** de $O_v(x,y)$
- La précision de calcul ne se dégrade pas lorsque l'on s'approche d'un milieu isotherme
- Les **échanges radiatifs** entre les différentes parties du système peuvent être **calculés de façon indépendante**
- Facilite le **couplage** avec les autres modes d'échanges d'énergie

- L'analyse des échanges permet d'établir des approximations de calcul spécifiques aux différentes sous-parties

Utilisations:

- Thermique de l'habitat
- Chambre de combustion
- Atmosphères
 - Paramétrisation pour Mars et Venus
 - Analyse des échanges pour la Terre

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:

- Étude analytique du cas monochromatique (ou un milieu “gris”)
- Analyse de ce qui se passe dans une atmosphère réaliste

Analyse de l'effet de serre

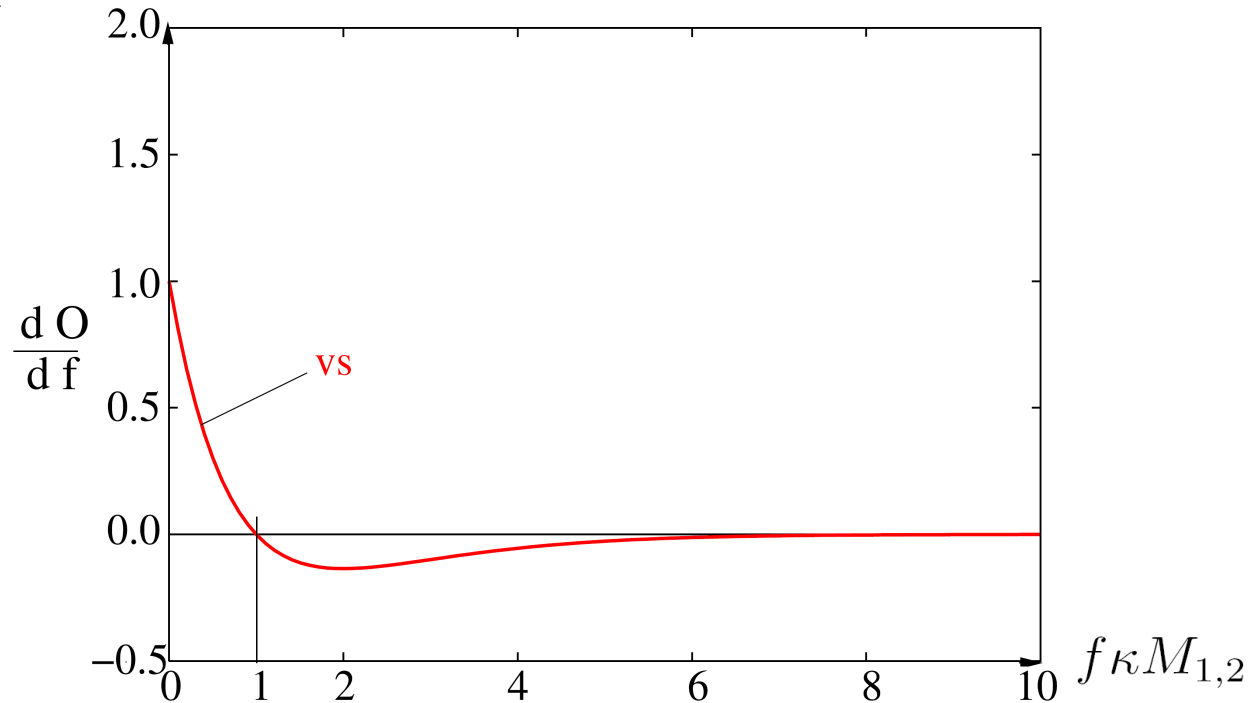
Densité de puissance nette échangée entre deux éléments \vec{x}_γ et \vec{y}_γ :

$$\psi_\nu(\vec{x}_\gamma, \vec{y}_\gamma) = [B_\nu(\vec{y}_\gamma) - B_\nu(\vec{x}_\gamma)] O(\vec{x}_\gamma, \vec{y}_\gamma)$$

Pour les échanges entre une surface et un volume élémentaire de masse dm :

$$O^{vs} dm = \left| \frac{\partial \tau_{\nu, \gamma}}{\partial m} \right| dm = f \kappa \exp(-f \kappa M_{1,2}) dm$$

avec f fraction massique de gaz absorbant, κ coefficient d'absorption par unité de masse, $M_{1,2}$ la masse d'atmosphère entre les deux extrémités.



Analyse de l'effet de serre

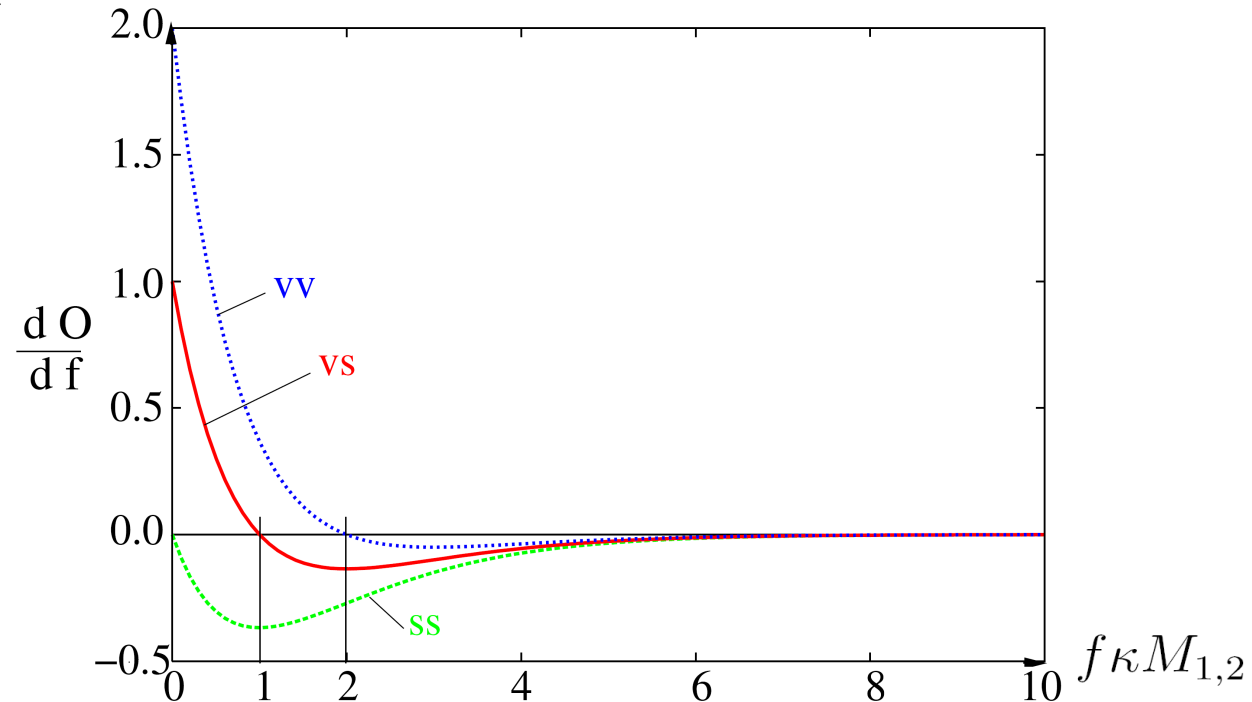
Densité de puissance nette échangée entre deux éléments \vec{x}_γ et \vec{y}_γ :

$$\psi_\nu(\vec{x}_\gamma, \vec{y}_\gamma) = [B_\nu(\vec{y}_\gamma) - B_\nu(\vec{x}_\gamma)] O(\vec{x}_\gamma, \vec{y}_\gamma)$$

Pour les échanges entre une surface et un volume élémentaire de masse dm :

$$O^{vs} dm = \left| \frac{\partial \tau_{\nu, \gamma}}{\partial m} \right| dm = f \kappa \exp(-f \kappa M_{1,2}) dm$$

avec f fraction massique de gaz absorbant, κ coefficient d'absorption par unité de masse, $M_{1,2}$ la masse d'atmosphère entre les deux extrémités.

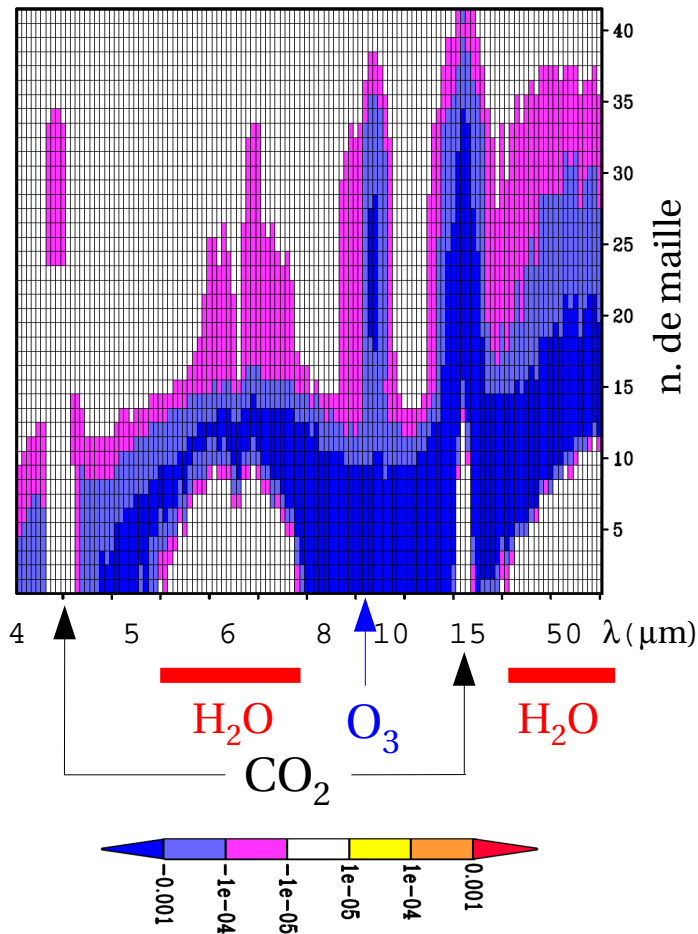


Analyse de l'effet de serre sur Terre

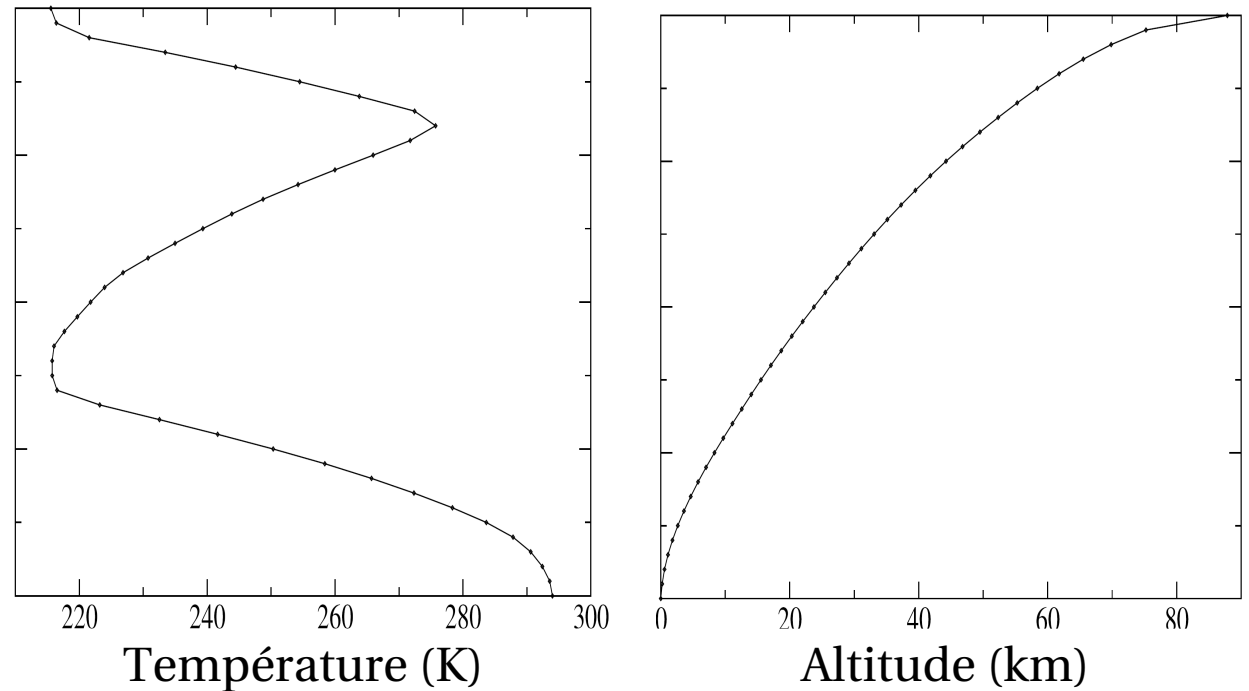
Bilan $\longrightarrow \Phi_i = \Psi_{i,e} + \Psi_{i,s} + \Psi_{i,a} \longleftarrow$ Échange net avec le reste de l'atmosphère

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

Échange net avec l'espace



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

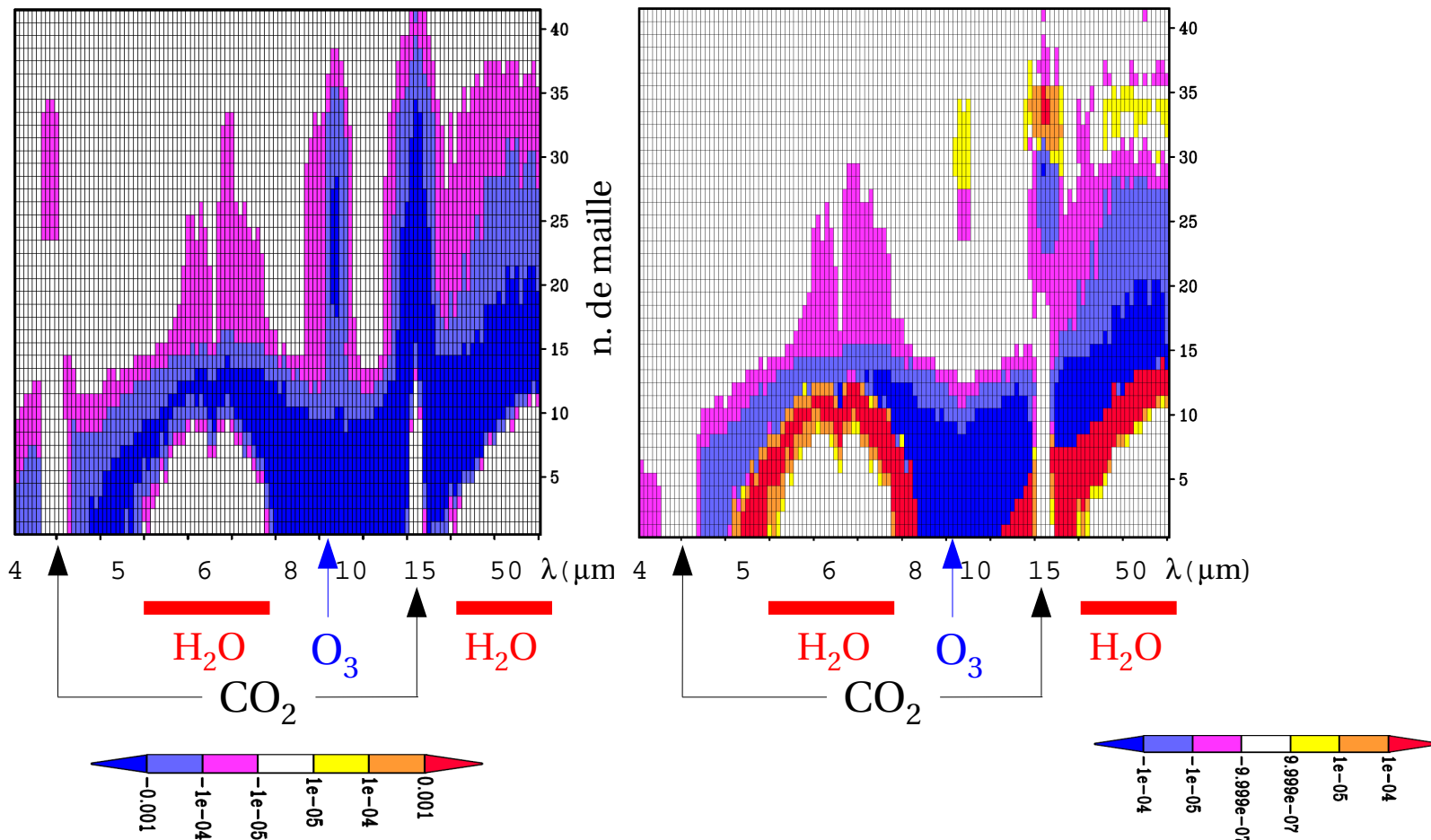


Analyse de l'effet de serre sur Terre

Échange avec l'espace
Atmosphère standard

Variation des échanges avec l'espace

H₂O + 20%



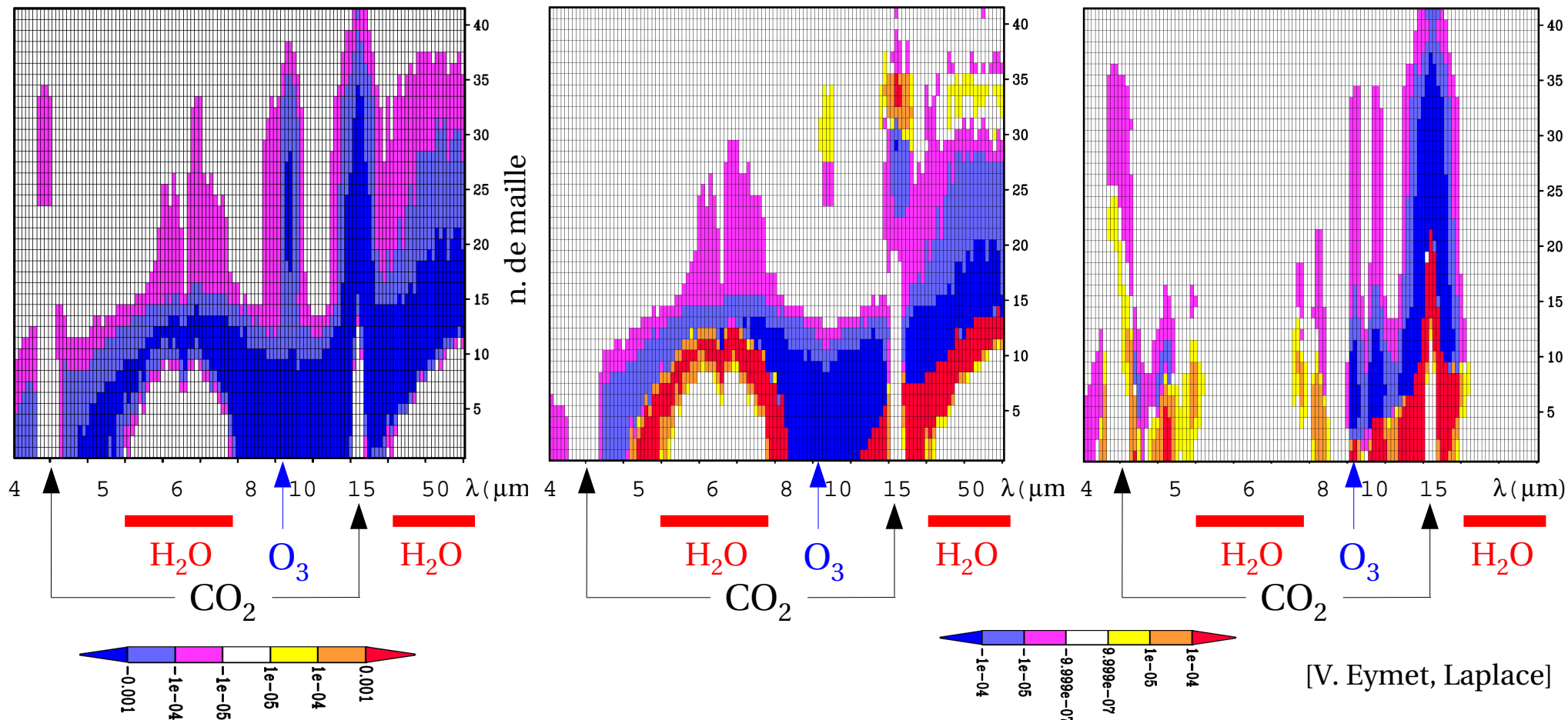
Analyse de l'effet de serre sur Terre

Échange avec l'espace
Atmosphère standard

Variation des échanges avec l'espace

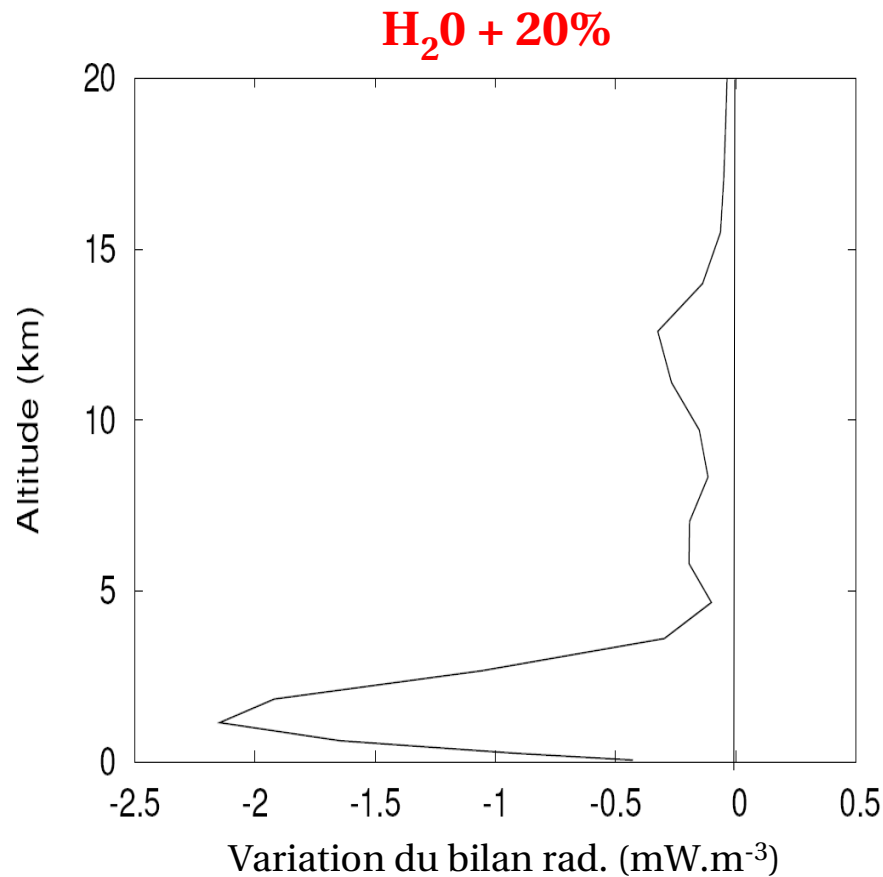
H₂O + 20%

CO₂ x 2

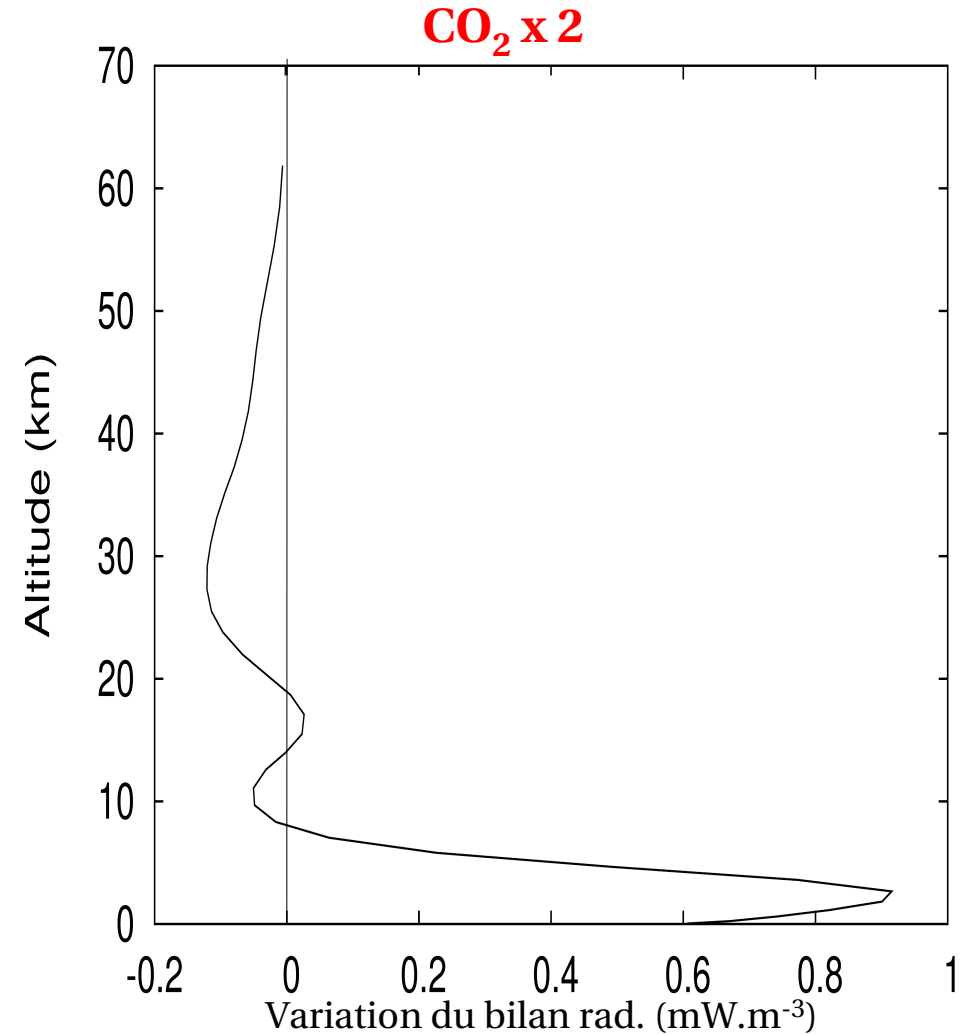


Analyse de l'effet de serre sur Terre

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 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

Plan

1. La découverte de l'effet de serre
2. Analyse de l'effet de serre par la méthode des puissances nettes échangées (PNE)
3. Simulation des changements climatiques dus aux activités humaines
4. Perspectives

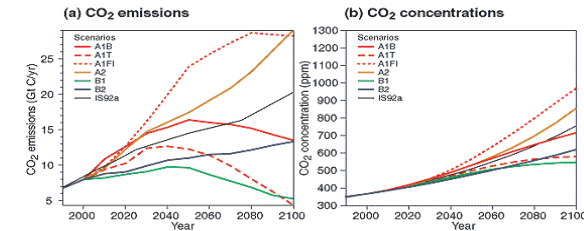
Modélisation numérique du climat

Modèle numérique :

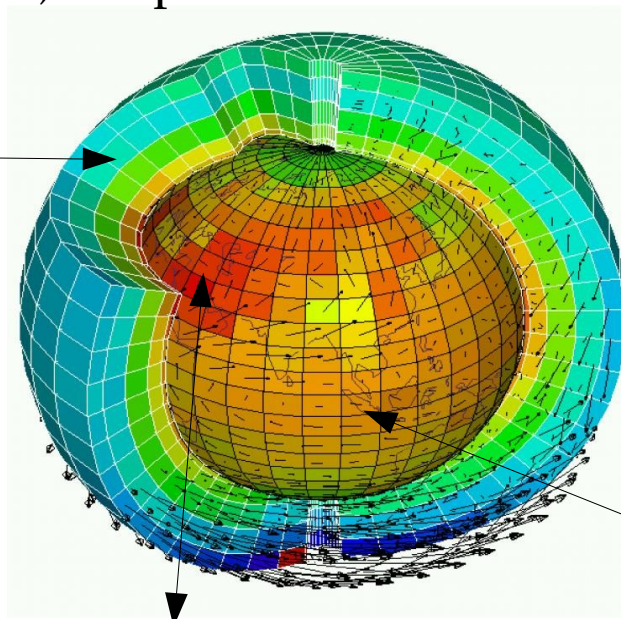
- basée sur les équations de la physique
- mise en oeuvre sur ordinateur
- Importance des processus sous-maille

Modèle de climat de l'IPSL :

- atmosphère, océan, cryosphère, biosphère



atmosphère



perturbations anthropiques

perturbations naturelles



végétation, sol

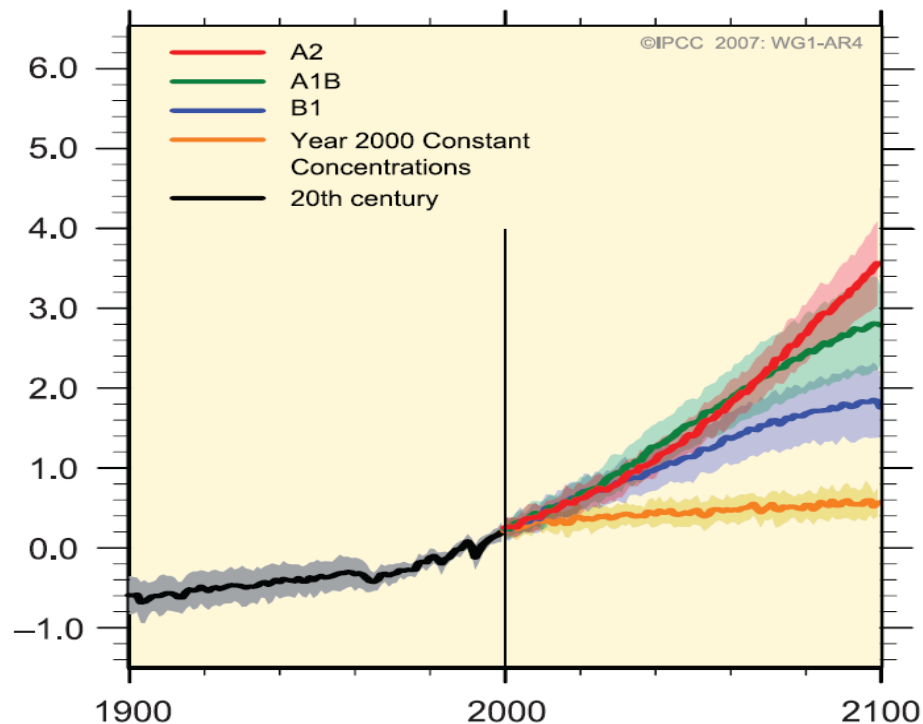
océan-glace



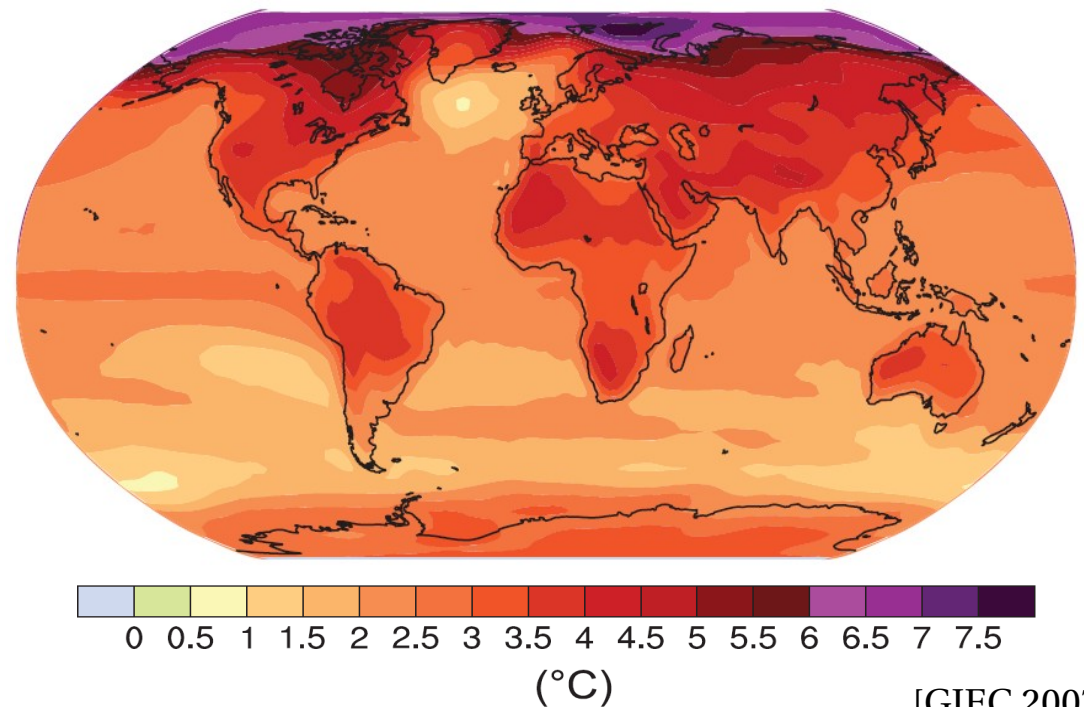
Évolution récente et future de la température moyenne

Anomalie de température (°C) de l'air près de la surface

Évolution pour différents scénarios



Moyenne de l'anomalie entre la fin du 21^e siècle et la fin 20^e siècle scénario A1B



1. Pour un forçage radiatif, quelle est l'amplitude du réchauffement?
2. Comment vont évoluer les forçages radiatifs?

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

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 noire** (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 diagnostique 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, quel est l'amplitude du changement climatique?

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?

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

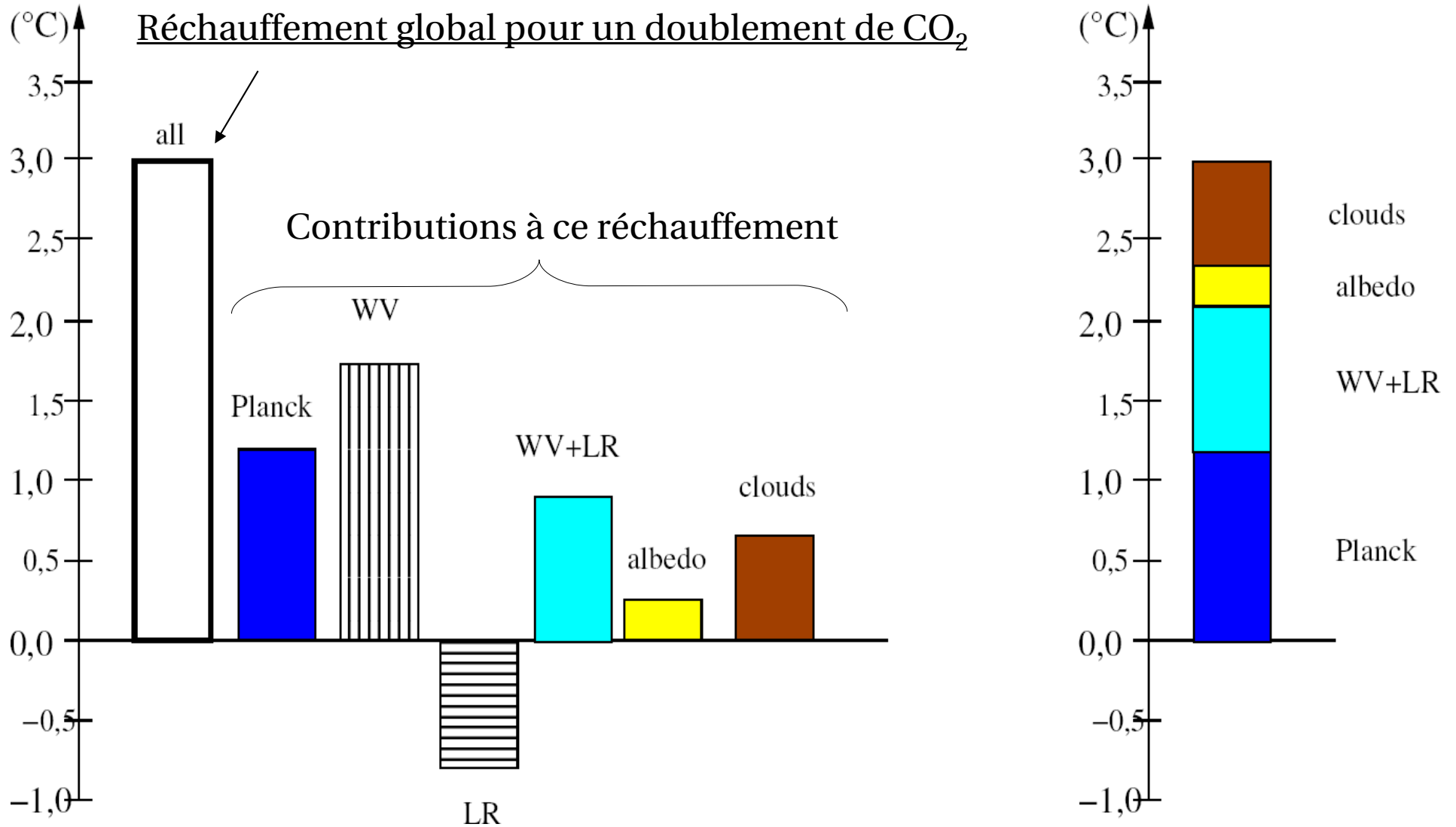
On obtient, pour $x \neq P$,

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

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

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

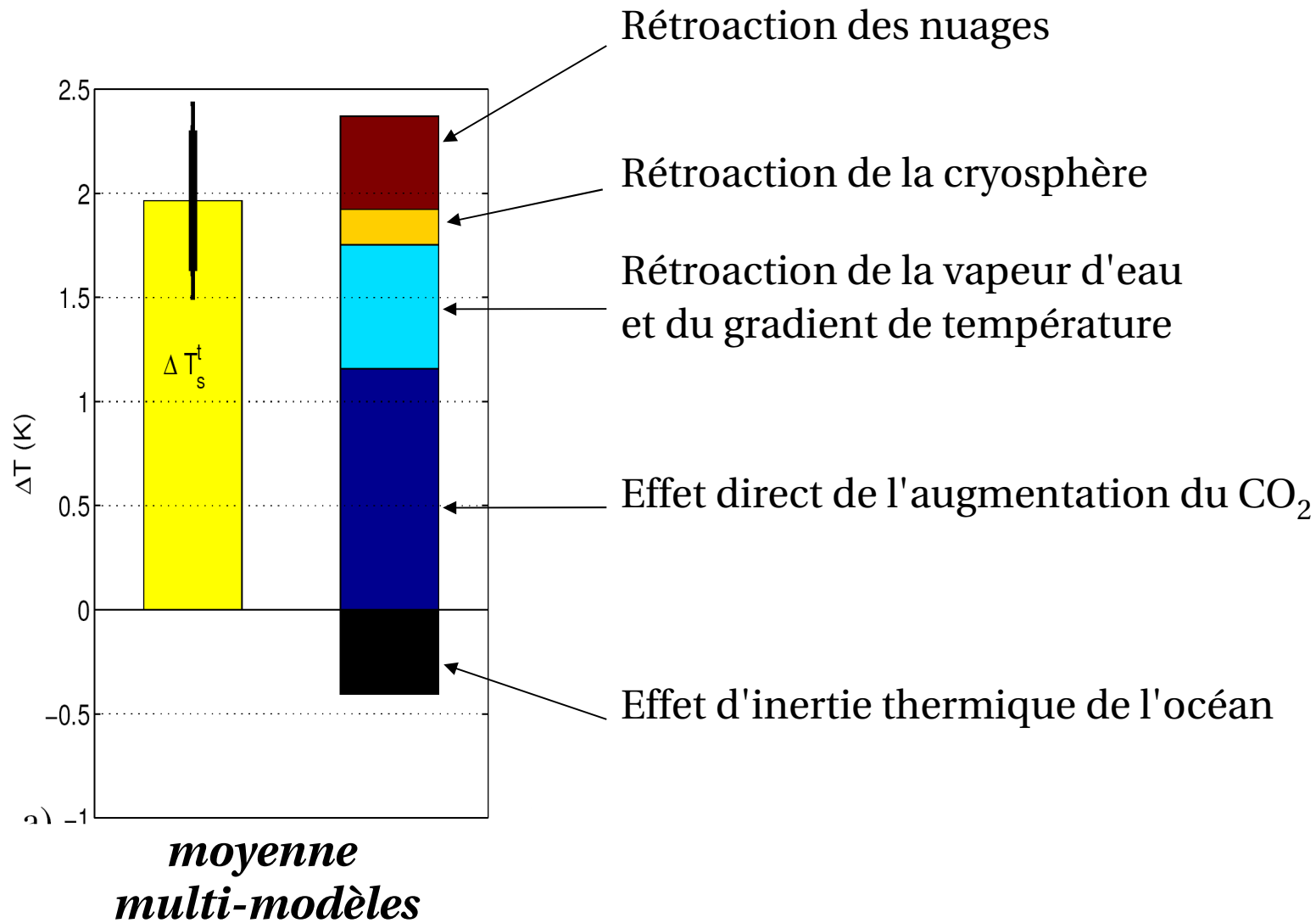
Contribution à l'accroissement de température à l'équilibre pour un doublement de CO₂



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

Accroissement de température en transitoire

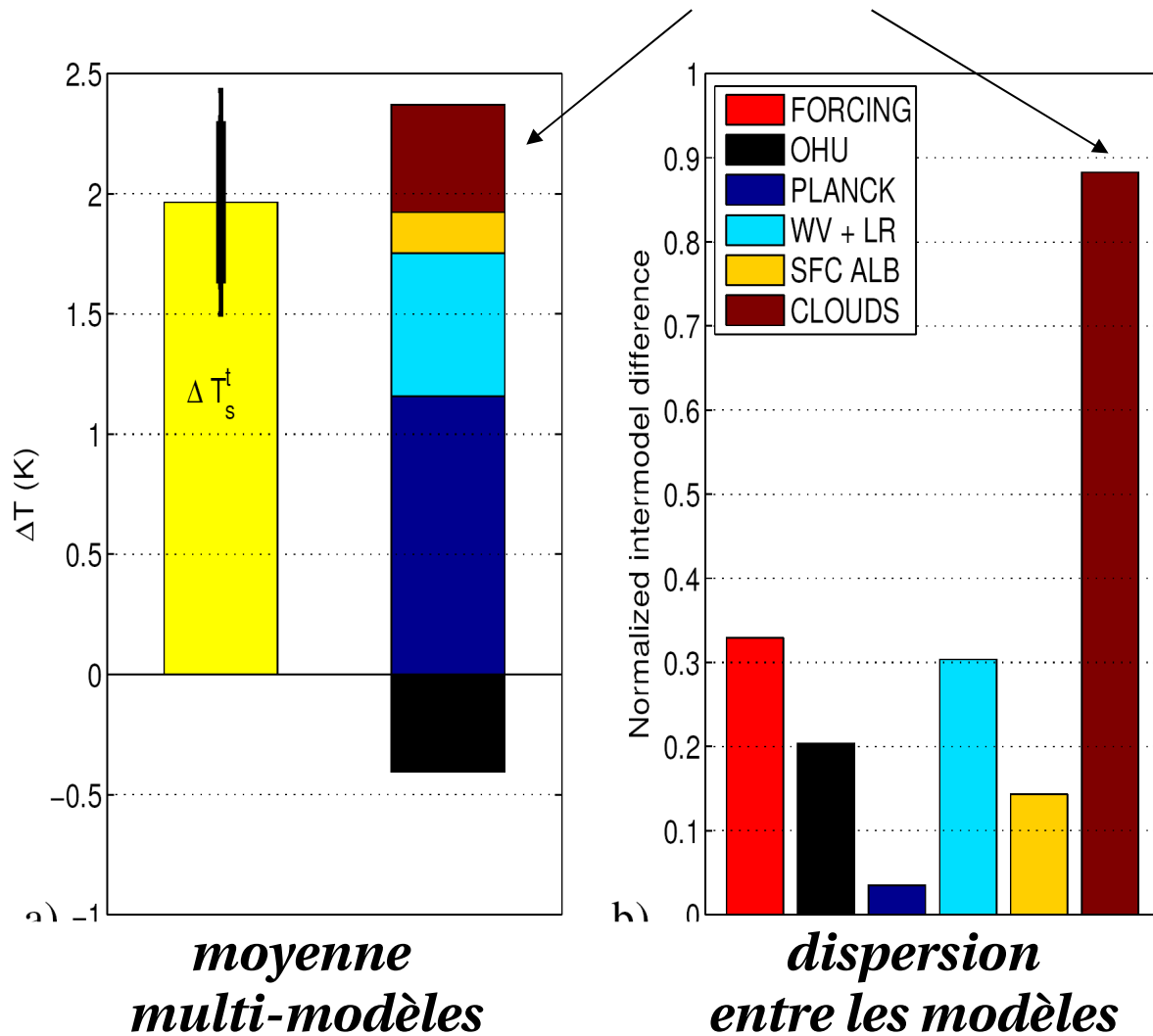
Accroissement de CO₂ de 1%/an



Accroissement de température en transitoire

Accroissement de CO₂ de 1%/an

Rétroaction des nuages

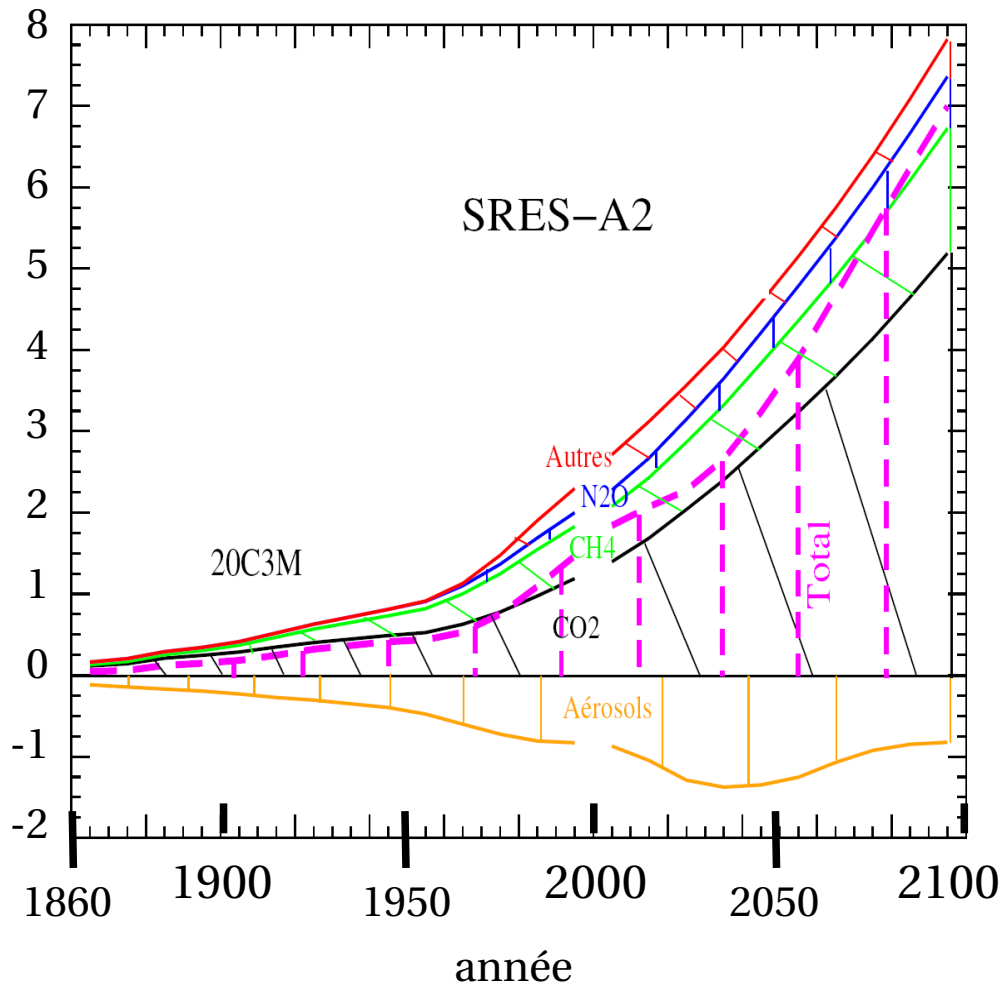


- Quantification de la contribution de chaque rétroaction, même en transitoire
- Dispersion des modèles, importance:
 - des rétroactions nuageuses
 - du calcul du forçage
- Contribution relative des rétroactions est constante
- En particulier même contribution relative à l'équilibre et en transitoire

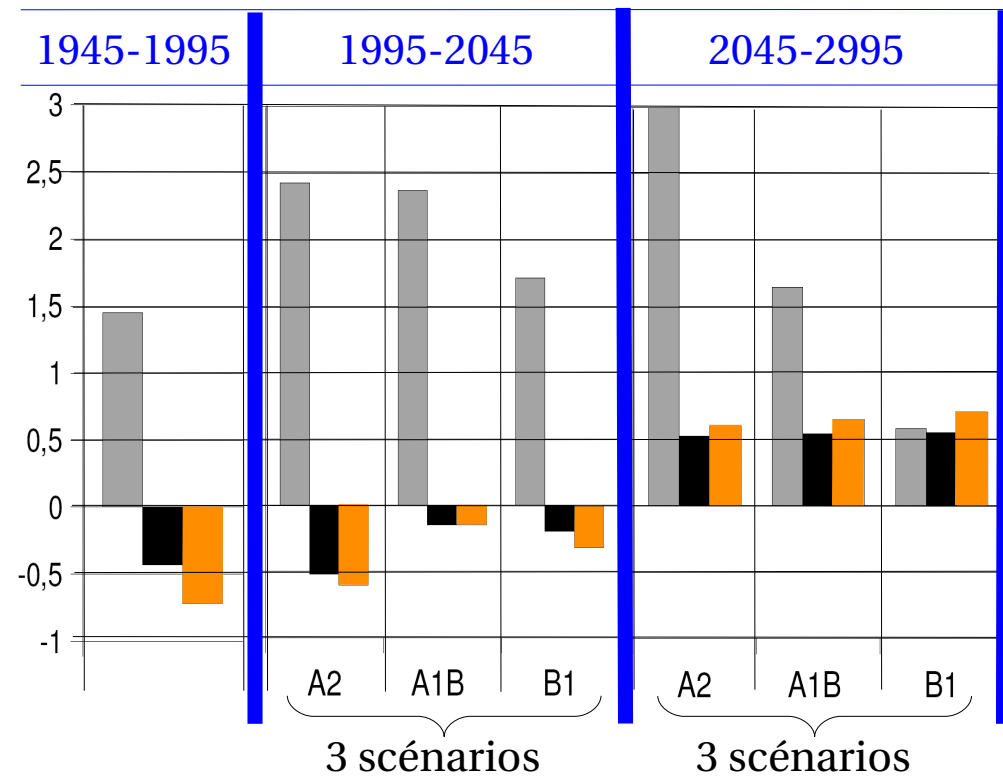
Évolution des forçages radiatifs dus aux activités humaines

Contribution des GES et des aérosols sulfatés

Évolution des forçages radiatifs ($W.m^{-2}$)



Différences des forçages radiatifs pour 3 périodes de 50 ans



GES



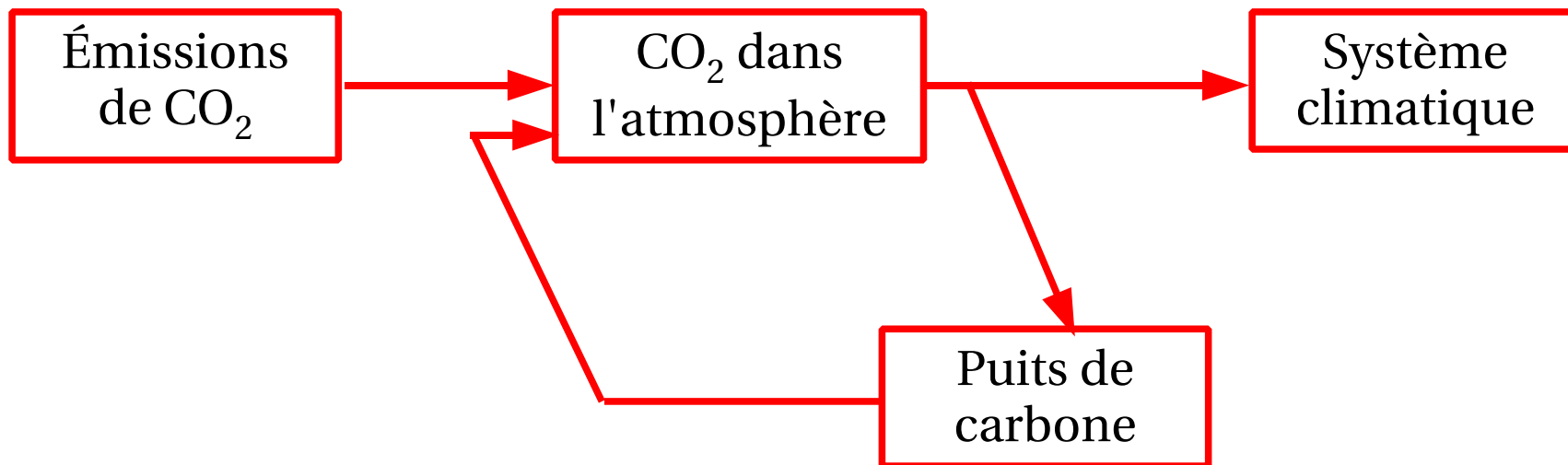
aérosols sulfatés



Évolution des forçages radiatifs dus aux activités humaines

Évolution des puits de carbone

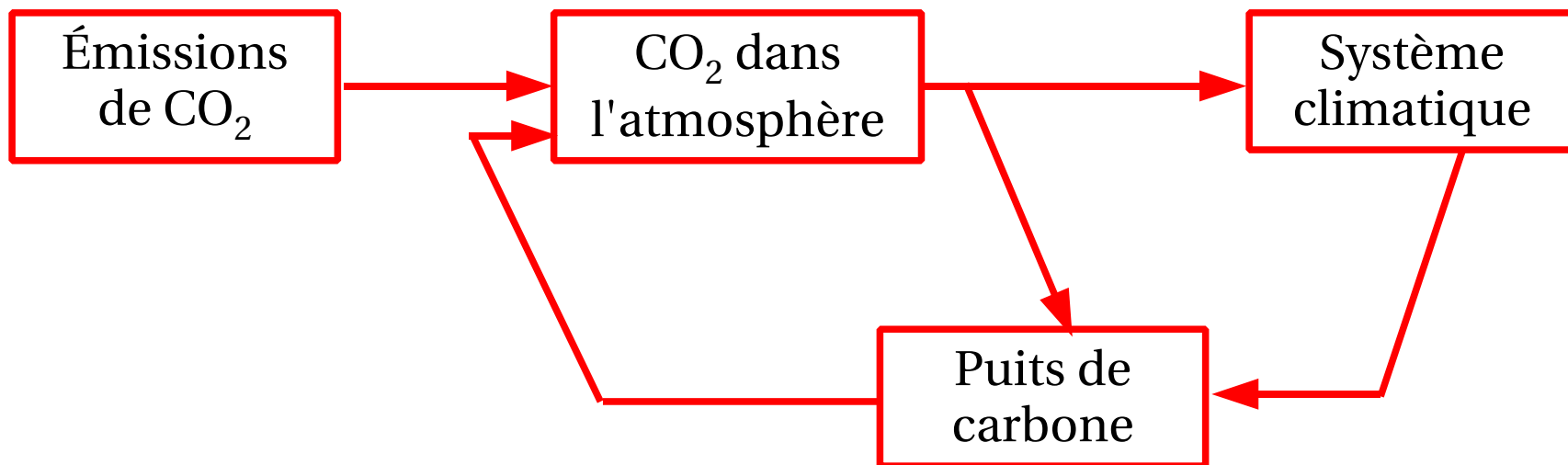
- Aujourd'hui on observe qu'après émission de CO₂, seulement 50% reste dans l'atmosphère après quelques années.
- Hogbom et Arrhenius supposent que le CO₂ a varié dans le passé
- Paléoclimats: observation de variations concomitantes du CO₂ et de la température
- Et dans le futur?



Évolution des forçages radiatifs dus aux activités humaines

Évolution des puits de carbone

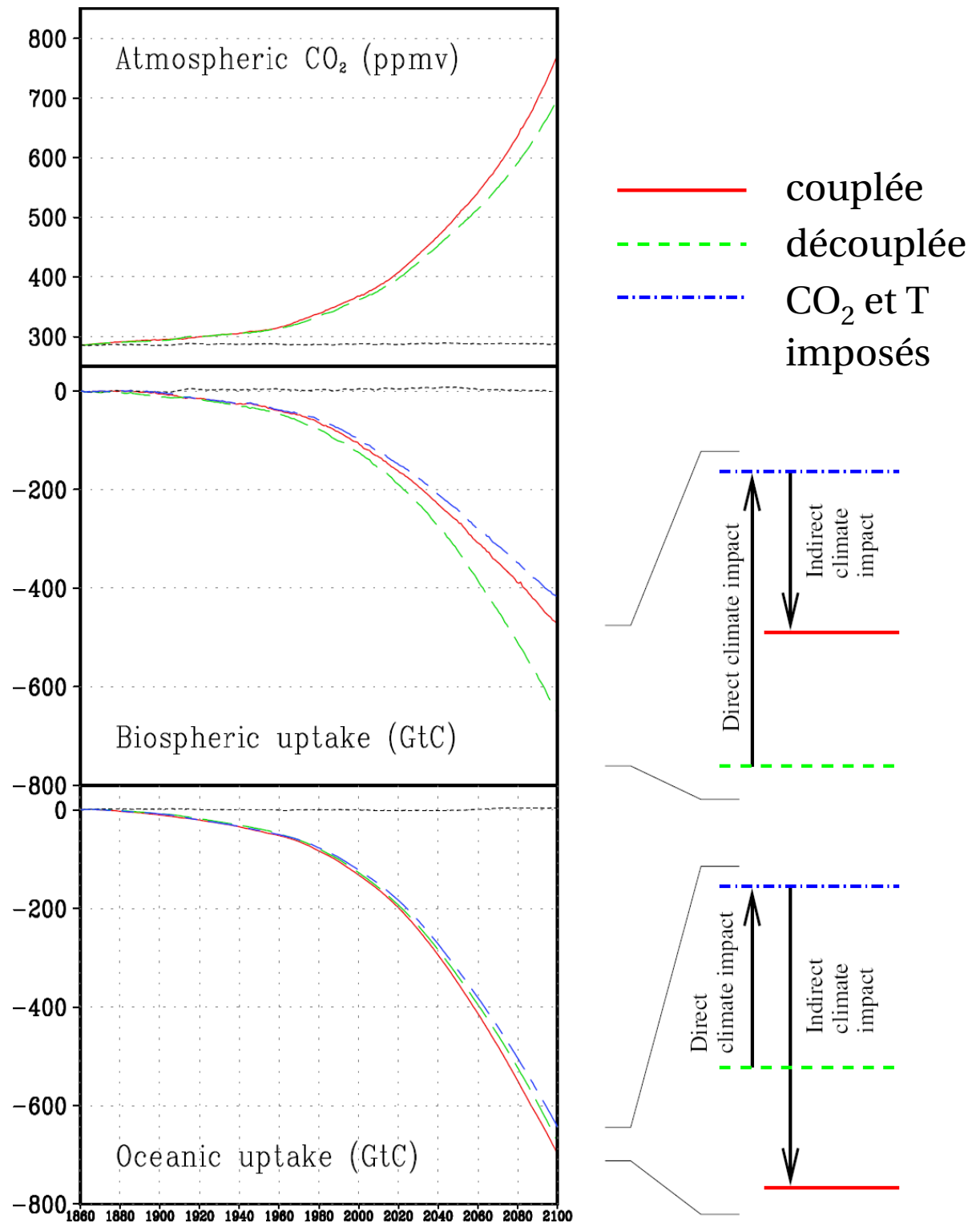
- Aujourd'hui on observe qu'après émission de CO₂, seulement 50% reste dans l'atmosphère après quelques années.
- Hogbom et Arrhenius supposent que le CO₂ a varié dans le passé
- Paléoclimats: observation de variations concomitantes du CO₂ et de la température
- Et dans le futur?



Rétroaction climat-carbone

- Rétroaction climat carbone est positive
- Facteur amplificateur 1,18
- L'océan absorbe l'essentiel du CO₂ non capté par la biosphère
- Une part importante de la dispersion des puits biosphériques est due à la différence de réponse climatique

[Friedlingstein et al., 2001]
 [Dufresne et al., 2002]
 [Berthelot et al., 2005]



Plan

1. La découverte de l'effet de serre
2. Analyse de l'effet de serre par la méthode des puissances nettes échangées (PNE)
3. Simulation des changements climatiques dus aux activités humaines
4. Perspectives

Étude des changements climatiques: les nouveaux enjeux

Après une phase *d'alerte* sur les risques de changement climatique:

- ❑ **Accroître la confiance** dans les projections, **mieux comprendre** les phénomènes en jeu
- ❑ **Mieux décrire**, en terme de « climat sensible », ces changements pour s'y préparer ou pour les éviter
- ❑ Simuler les **événements extrêmes** et les **ressources en eau**
- ❑ Mieux prendre en compte les **interactions** avec le milieu naturel et les activités humaines
- ❑ **Donner un large accès** aux résultats (acteurs économiques, politiques, éducatifs...)

Les priorités dans le cadre du pôle de modélisation du climat de l'IPSL

Prolonger:

- Amélioration de la pertinence des modèles** (contenu physique, résolution)
- Prise en compte de nouveaux phénomènes** (calotte polaire, méthane)
- Identification des mécanismes en jeu lors des changements climatiques**
(paléo, 20^e siècle, futurs..)

Renforcer:

- Évaluation des modèles**
- Changements climatiques régionaux**
- Distribution des données, valorisation des résultats**

Démarrer:

- Variations décennales et prévisibilité** (saisonnière à décennale)
- Nouvelle génération de modèle** (noyau dynamique, entrée-sortie)

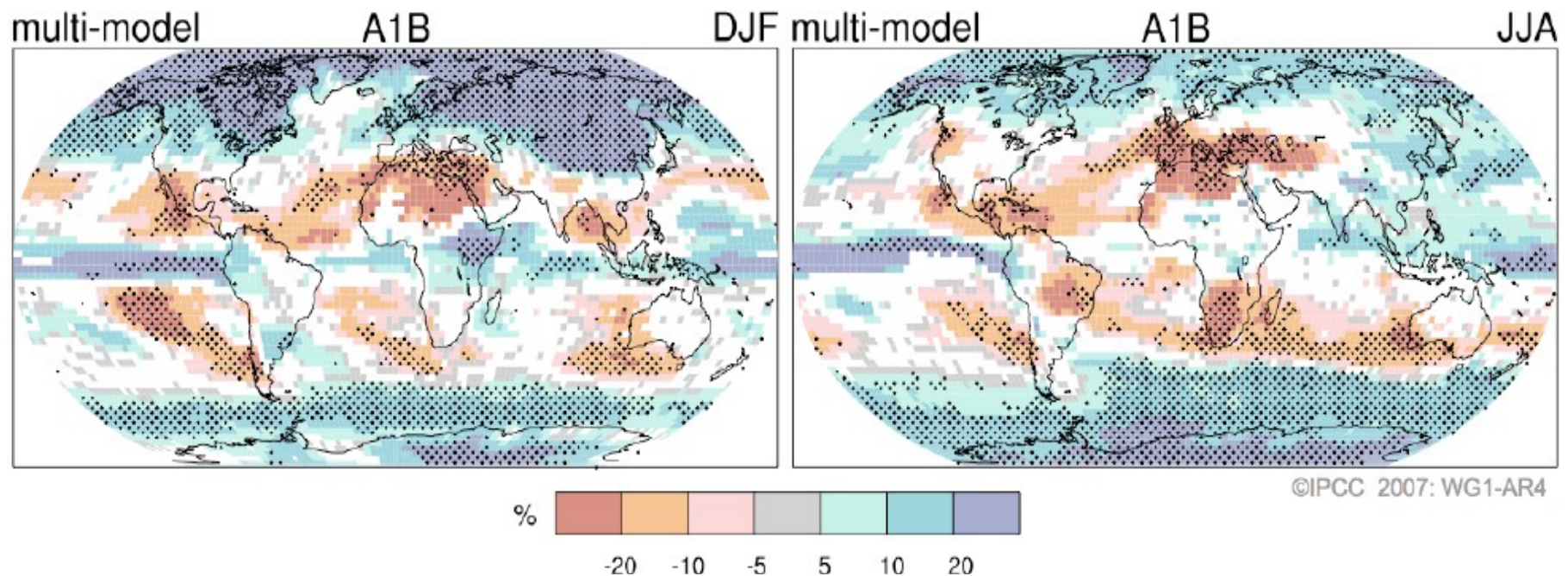
Accroître notre confiance dans les changements climatiques simulés

Amplitude des changements climatiques:

- Rôle clef des nuages, notamment des nuages bas océaniques

Caractéristiques des changements climatiques:

- Très grande dispersion des modèles pour les précipitations au dessus des continents



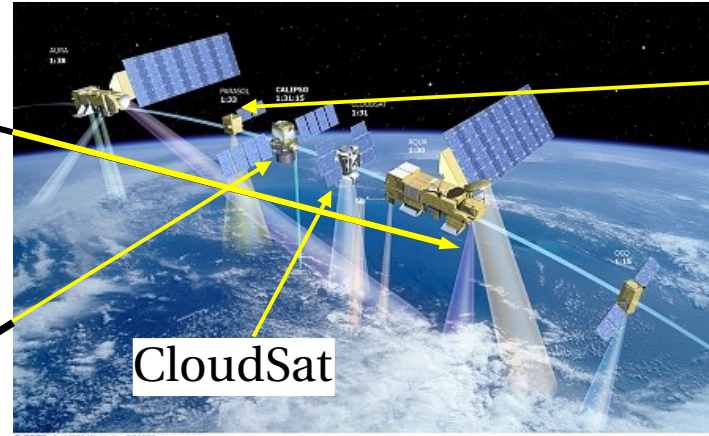
Changement relatif des précipitation [2099-2090] - [1980-1999], scénario A1B.

Zones blanches: moins de 66% des modèles en accord sur le signe de ces changements

Zones grisées: plus de 90% des modèles en accord sur le signe de ces changements

Meilleures évaluations des nuages

Constellation de satellites A-train



CERES

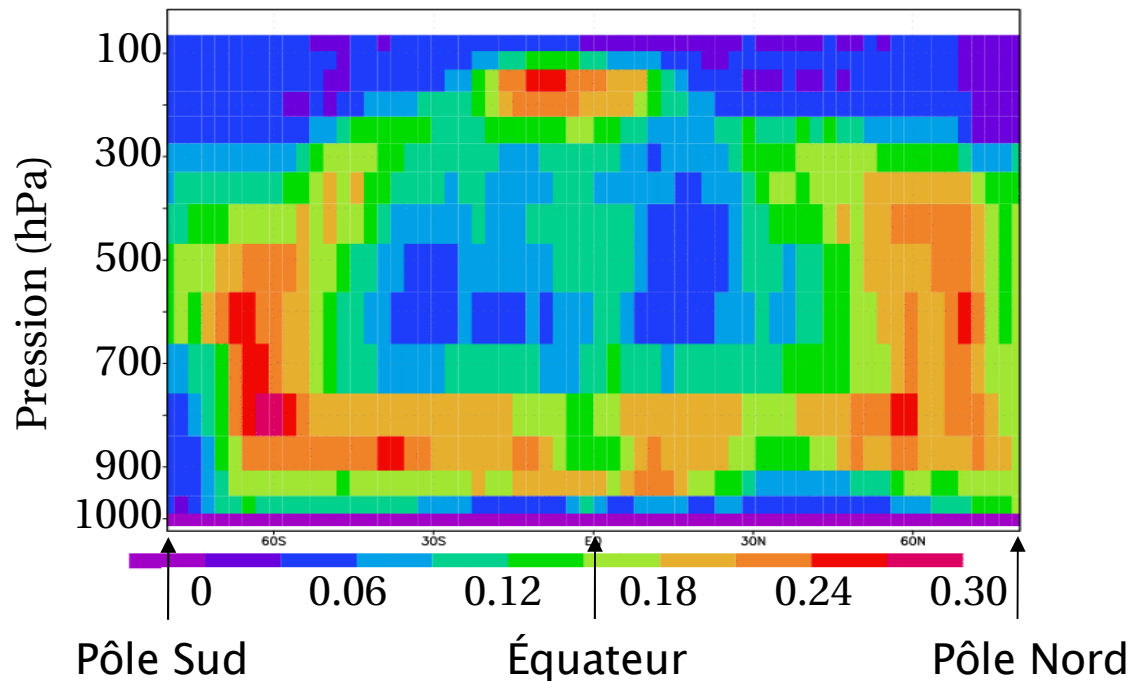
Valeurs moyennes de références pour les flux SW et LW.

PARASOL

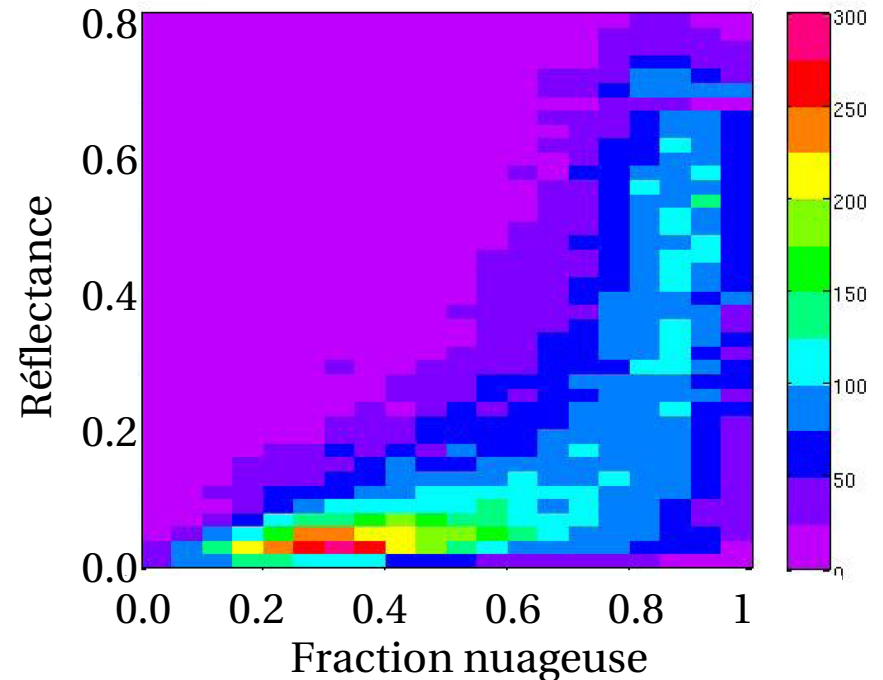
Mesures multi-directionnelles de luminance

CALIPSO

Distribution verticale des nuages



Valeurs instantanées de la réflectance directionnelle



Comprendre les mécanismes régissant les variations récentes et futures du climat.

Au cours des deux **dernières décennies**, plusieurs variations significatives du climat tropical ont été observées:

- température océanique (Rayner et al. 2006),
- humidité dans la haute troposphère (Soden et al. 2005),
- flux solaire réfléchi (Wong et al. 2006),
- circulation de Hadley-Walker (Vecchi et al. 2006),
- régimes de précipitation (Allan et Soden 2007).

Ces variations sont elles **cohérentes** ?

Quels ont les **mécanismes** sous-jacent ?

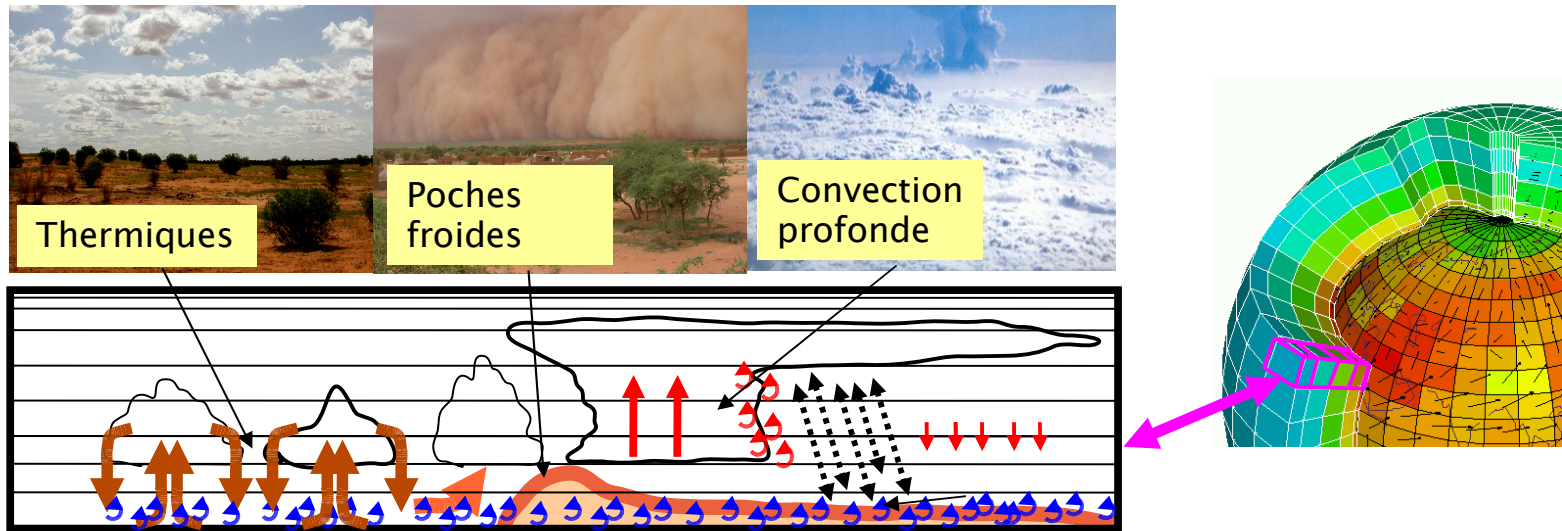
Sont-elles simulées par les **modèles** ?

Les retrouvent-ont dans les simulations de **changement climatique** ?

Modèle du système Terre

Évaluations des phénomènes atmosphériques dans ce cadre:

Paramétrisation de la couche limite et de la convection



Nuages

Interactions
avec la surface

Aérosols
[thèse de M. Gueye]

Composés
chimiques

Quelques défis:

- Développement de l'ossature \Leftrightarrow développement de nouvelles composantes
- Quel cadre d'analyse du système complet ?
- Articulation compréhension \Leftrightarrow complexification

En hommage à
Marie-Angèle Filiberti et Soumya Jamili

Merci à

Alain Lahellec, Jean-Yves Grandpeix, Robert Franchisseur,
Dominique Picard,


Richard Fournier, Vincent Eymet,

Sandrine Bony, Frédéric Hourdin, Pascale Braconnot, Pierre
Friedlingstein, Hélène Chepfer,

Laurent Fairhead, Sébastien Denvil,

Marie-Alice Foujols, Josefine Ghattas, Abderrahman Idelkadi, Claire
Lévy, Olivier Marti, Ionela Musat, Martine Maherou, Véronique
Fabart, Marie-Pierre Lefebvre,

à tous les collègues du LMD et du Pôle de Modélisation de l'IPSL

A photograph of a double rainbow in a cloudy sky. The primary rainbow is on the left, and the secondary rainbow is on the right. The text "Merci à tous" is overlaid in the center.

Merci à tous