

# Les paramétrisations des modèles de climat

Frédéric Hourdin

Laboratoire de Météorologie Dynamique / IPSL / UPMC

Responsable du développement du modèle global atmosphérique LMDZ

<http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/COURS/Grenoble/>

hourdin@lmd.jussieu.fr

1. Introduction et principes des paramétrisations
2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif
3. Approche classique de la turbulence de couche limite
4. Couche limite / convection / nuages
5. Stratégies de développement et d'évaluation

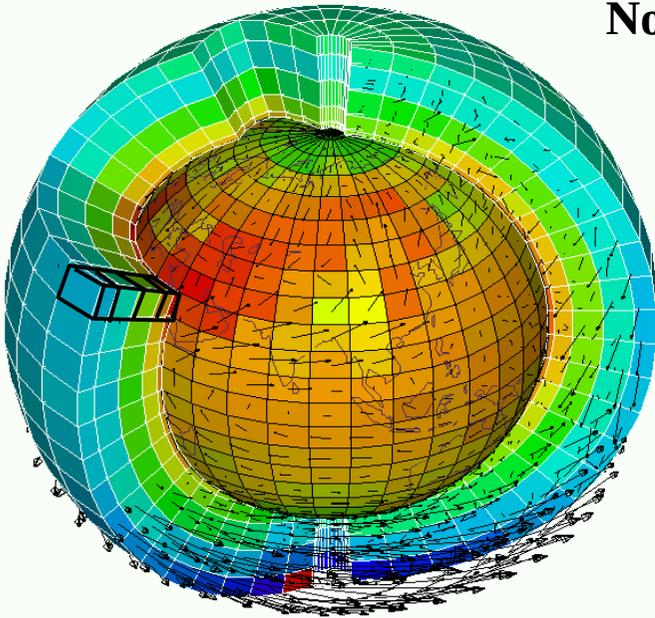
Pour 2 : <http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/PEDAGO/cours.pdf>, chapitre 3

<http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/these.pdf>, section 3.3

Pour 3-4 : <http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/HDR/habil.pdf>, sec 2.2.2 et ch 3

# 1. Introduction et principes des paramétrisations

## Noyau dynamique : équations de bases discrétisées sur la sphère



- Conservation de la masse  
 $D\rho/Dt + \rho \operatorname{div}\underline{U} = 0$
- Conservation de la température potentielle  
 $D\theta/Dt = Q / C_p (p_0/p)^\kappa$
- Conservation de la quantité de mouvement  
 $D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad}p - g + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{E}$
- Conservation des composants secondaires  
 $Dq/Dt = Sq$

**Objet des paramétrisations** : rendre compte de l'effet des processus non résolus par ces équations

→ **Termes « sources » additionnels dans les équations.**

- $Q$  : Chauffage par échanges radiatifs, conduction (négligée), condensation, sublimation, **mouvements sous maille (nuages, turbulence, convection)**
- $E$  : Viscosité moléculaire (négligée), **mouvements sous-maille (nuages, turbulence, convection)**
- $Sq$  : condensation/sublimation ( $q$ = vapeur d'eau ou eau condensée), réactions chimiques, photo-dissociation (ozone, espèces chimiques), microphysiques et lessivage (aérosols de pollution, poussières, ...), **mouvements sous maille (nuages, turbulence, convection)**

# 1. Introduction et principes des paramétrisations



- Calcul de l'**effet collectif des processus non résolus sur les variables d'état explicites** ( $\underline{U}$ ,  $\theta$ ,  $q$ ) du modèle global



- **description physique approchée** du comportement collectif des processus

- qui fait intervenir des **variables internes aux paramétrisations** (caractéristiques des nuages, écart-type de la distribution sous-maille d'une variable, ...)



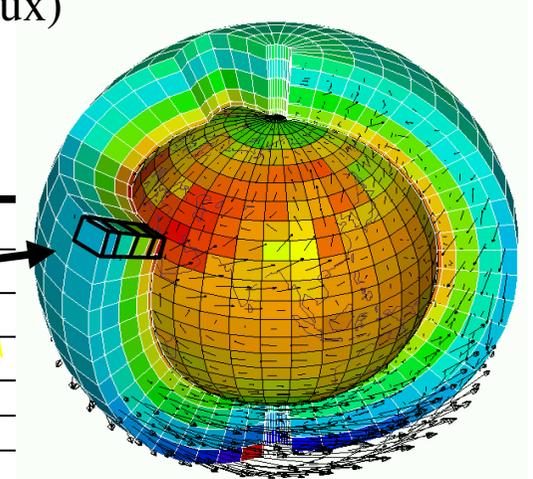
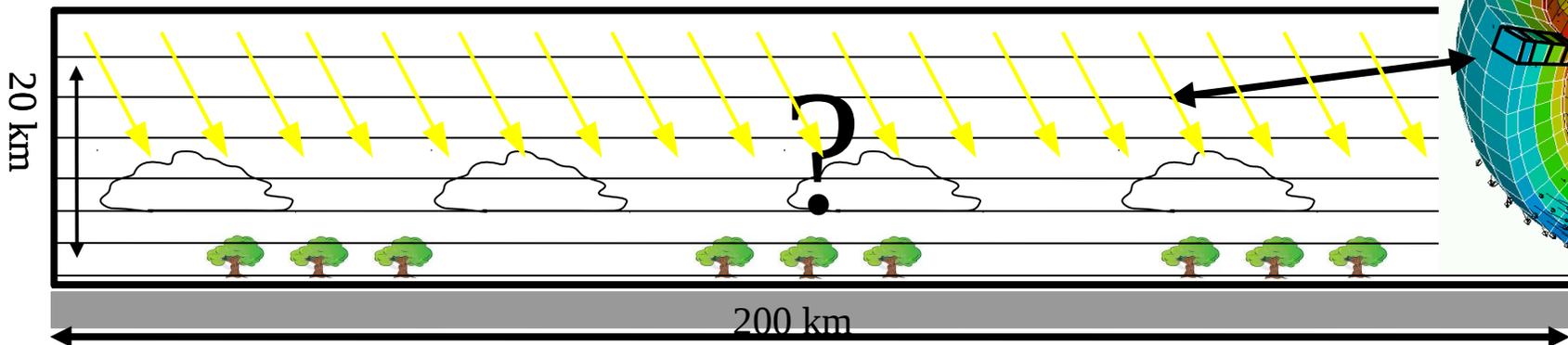
- dérivation d'**équations** reliant ces variables internes aux variables d'état

$\underline{U}$ ,  $\theta$ ,  $q$  à l'instant  $t$  → **variables internes** →  $\underline{E}$ ,  $Q$ ,  $Sq$  →  $\underline{U}$ ,  $\theta$ ,  $q$  à  $t+\delta t$



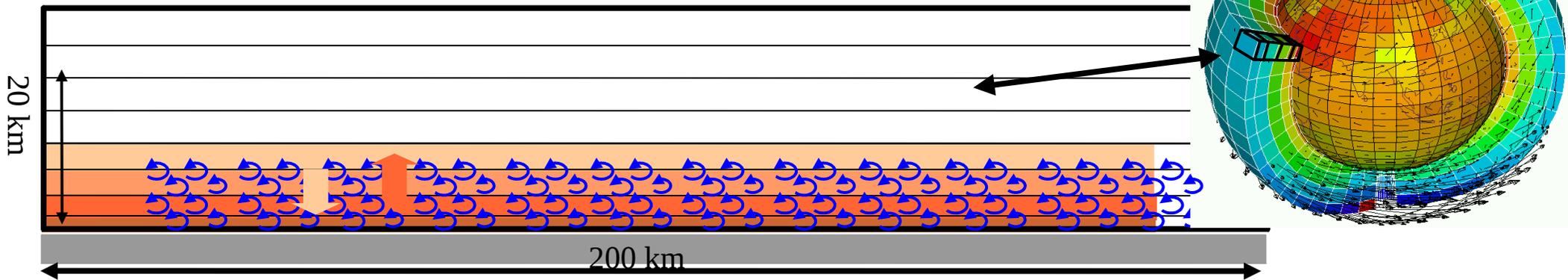
- **hypothèses d'homogénéité** (statistique) horizontale des processus représentés (comme dans l'hypothèse plan parallèle du transfert radiatif)
  - Equations uni-dimensionnelles en  $z$  (échanges verticaux)
  - Colonnes atmosphériques indépendantes

Dans une colonne du modèle ...



# 1. Introduction et principes des paramétrisations

Dans une colonne du modèle ...



## Paramétrisation de la turbulence



→ « **Mélange turbulent** » ou diffusion turbulente.  
Transport par des petits mouvements aléatoires.  
Analogue à la diffusion moléculaire.

$$Dq/Dt = Sq \quad \text{avec} \quad Sq = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial q}{\partial z} \right)$$

→ Longueur de mélange de Prandtl :  $K_z = l|w|$   
 $l$  : longueur caractéristique des mouvements  
 $w$  : vitesse caractéristique

→ Energie cinétique turbulente :  $K_z = l\sqrt{e}$

$$De/Dt = f(dU/dz, d\theta/dz, e, \dots)$$

$$Dl/dt = \dots$$

Les mêmes modèles sont utilisés en sciences de l'ingénieur  
Lois de similitudes → Tests à des échelles différentes en laboratoire

Un monde en soi ...

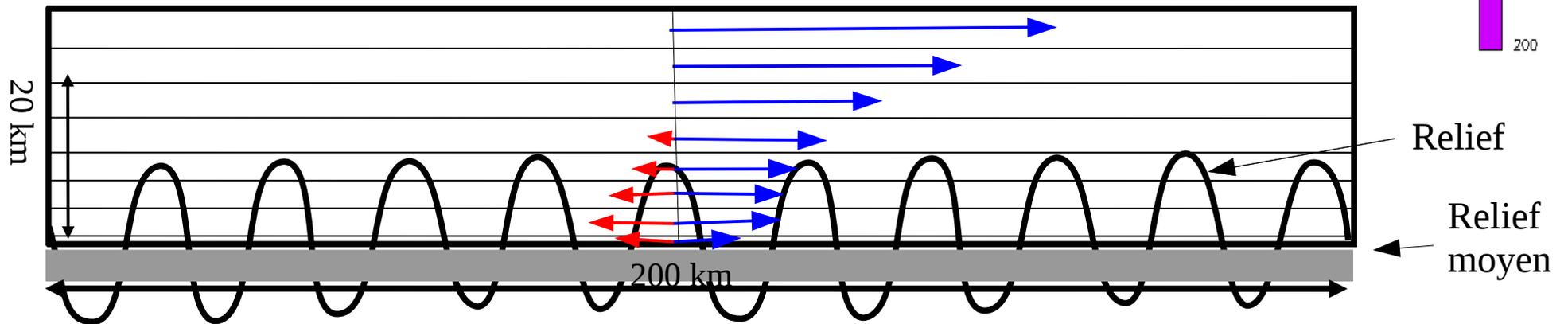
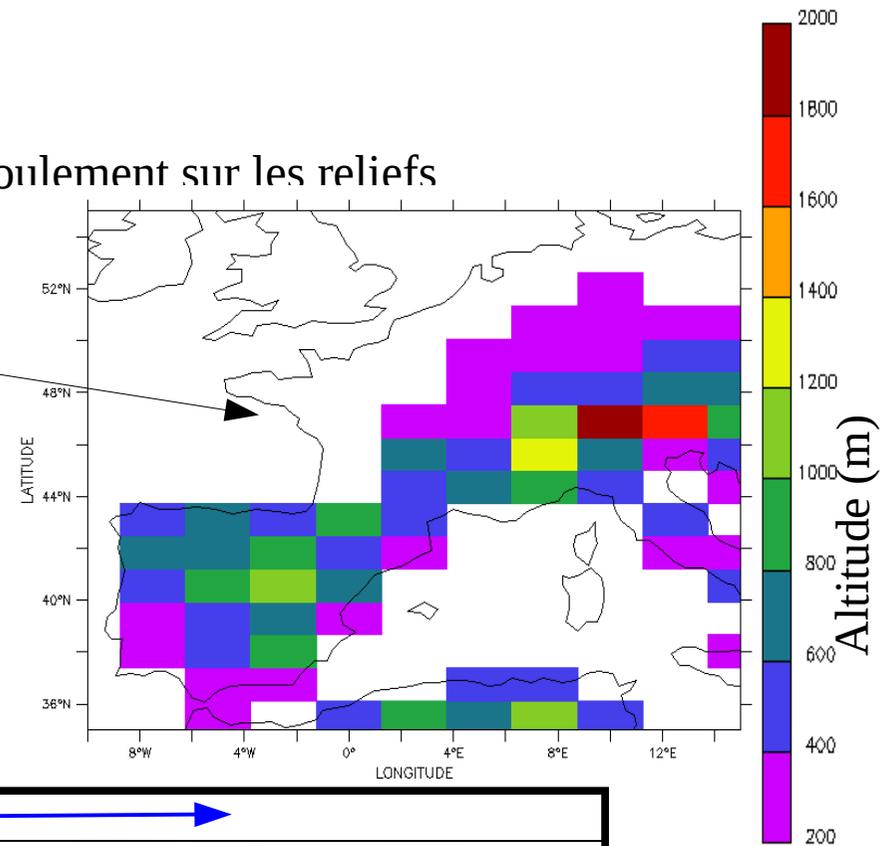
# 1. Introduction et principes des paramétrisations

Un exemple de processus sous-maille : l'écoulement sur les reliefs

- Le **relief moyen de la surface** intervient dans le noyau dynamique comme une condition à la limite inférieure
- Ce relief moyen ne rend pas compte de la barrière que représentent les montagnes les plus hautes pour l'écoulement
- Exemple simple de paramétrisation possible : introduction d'un terme de freinage dans les basses couches de l'atmosphère.

$$DU/Dt + (1/\rho) \text{grad}p - g + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{F}$$

$$\underline{F} = -a(z) \underline{U}$$



Dans les modèles actuels, on rend compte en plus de :

- l'injection d'ondes (de gravité) dans l'atmosphère
- l'effet de détournement (portance) du relief
- l'effet de la stabilité de l'atmosphère (franchissement plus facile dans une atmosphère moins stratifiée)

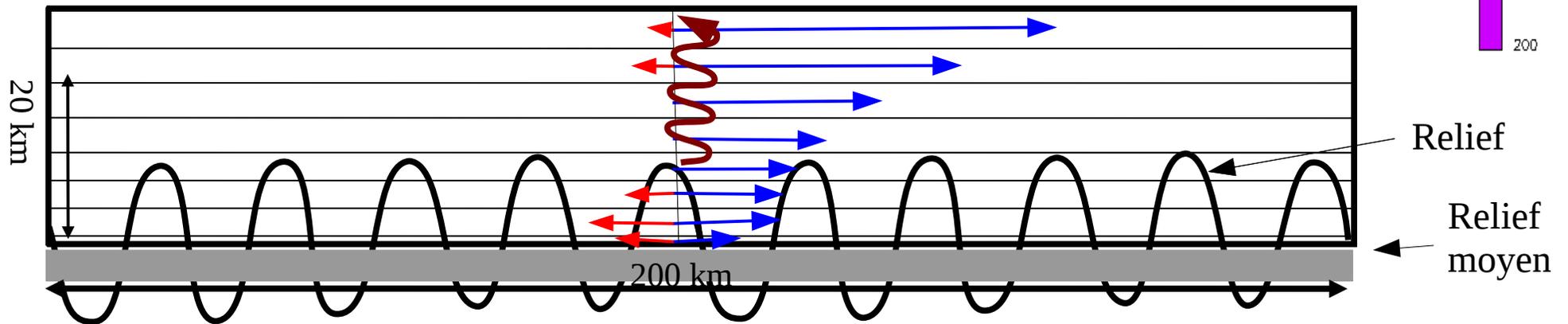
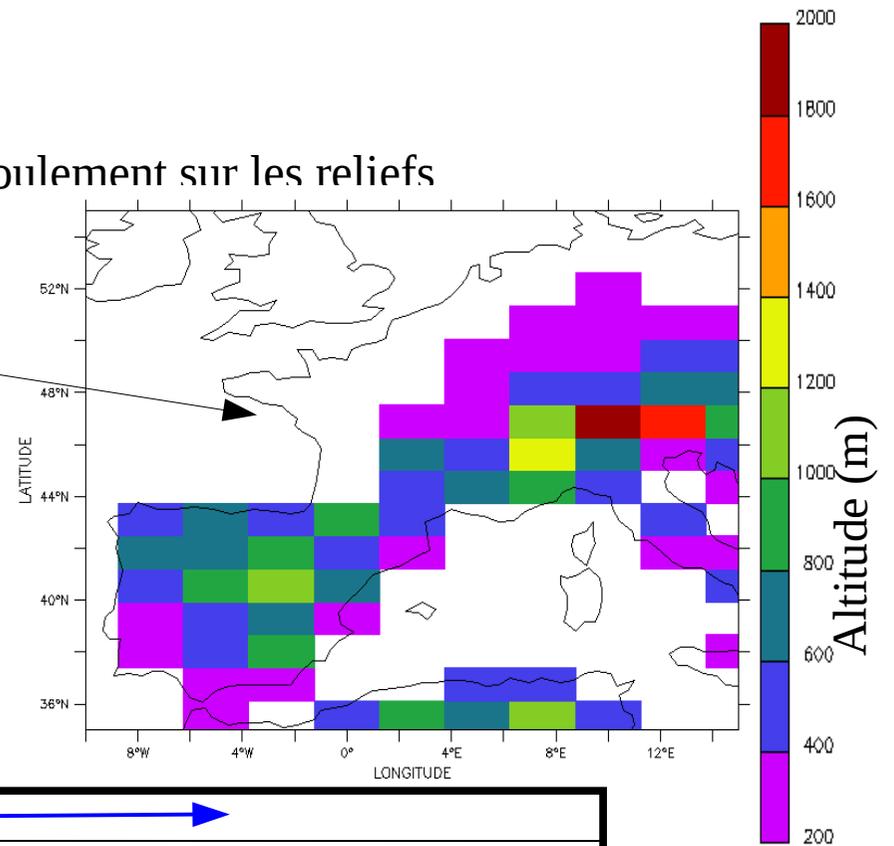
# 1. Introduction et principes des paramétrisations

Un exemple de processus sous-maille : l'écoulement sur les reliefs

- Le **relief moyen de la surface** intervient dans le noyau dynamique comme une condition à la limite inférieure
- Ce relief moyen ne rend pas compte de la barrière que représentent les montagnes les plus hautes pour l'écoulement
- Exemple simple de paramétrisation possible : introduction d'un terme de freinage dans les basses couches de l'atmosphère.

$$DU/Dt + (1/\rho) \text{grad}p - g + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{F}$$

$$\underline{F} = -a(z) \underline{U}$$

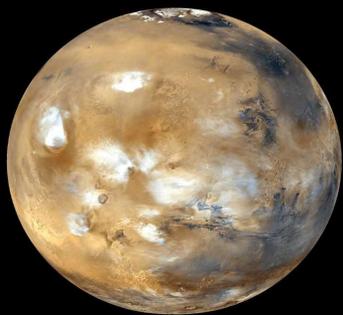


Dans les modèles actuels, on rend compte en plus de :

- l'injection d'ondes (de gravité) dans l'atmosphère
- l'effet de détournement (portance) du relief
- l'effet de la stabilité de l'atmosphère (franchissement plus facile dans une atmosphère moins stratifiée)



The Earth

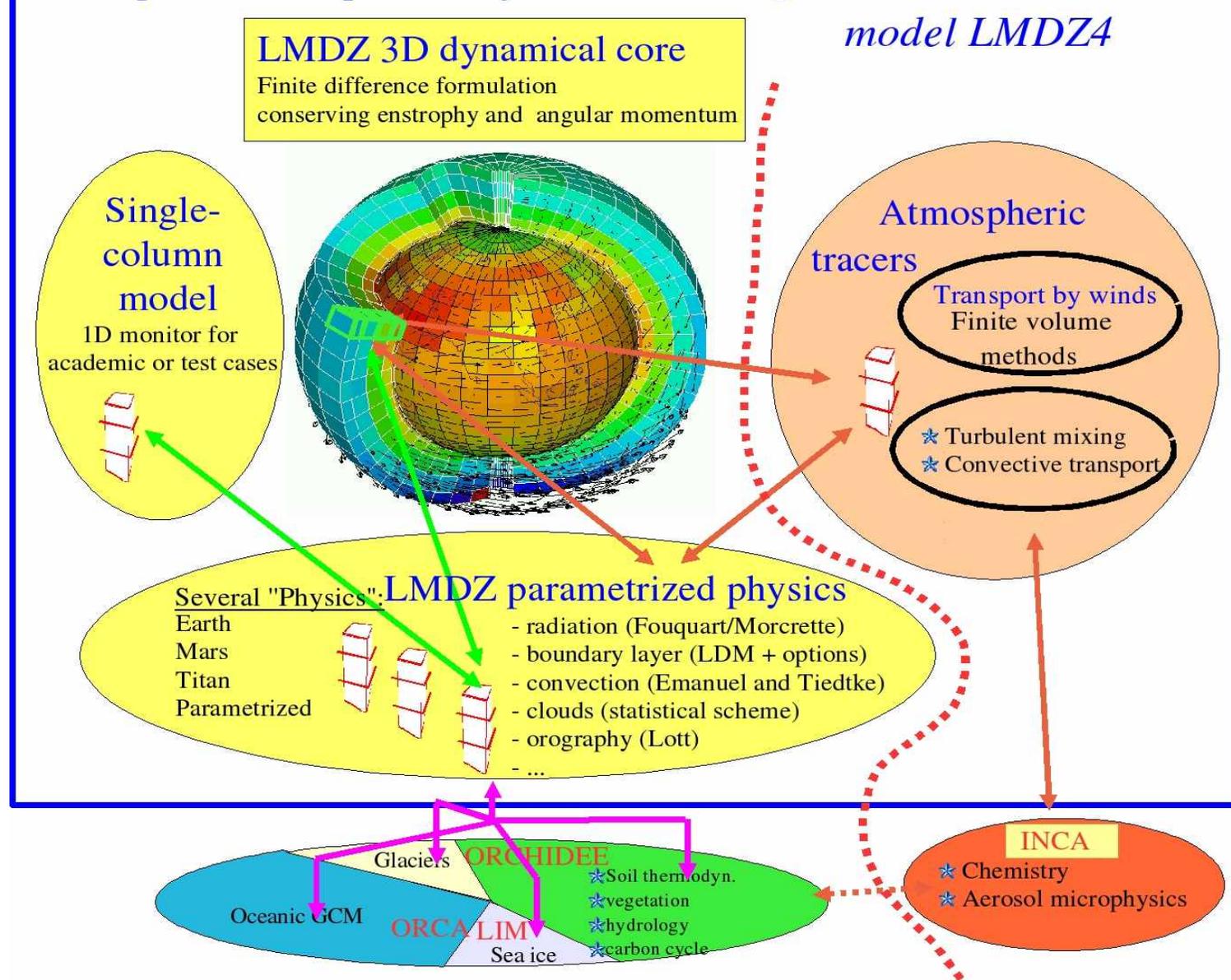


Mars



Titan

# Atmospheric component of the IPSL integrated climate



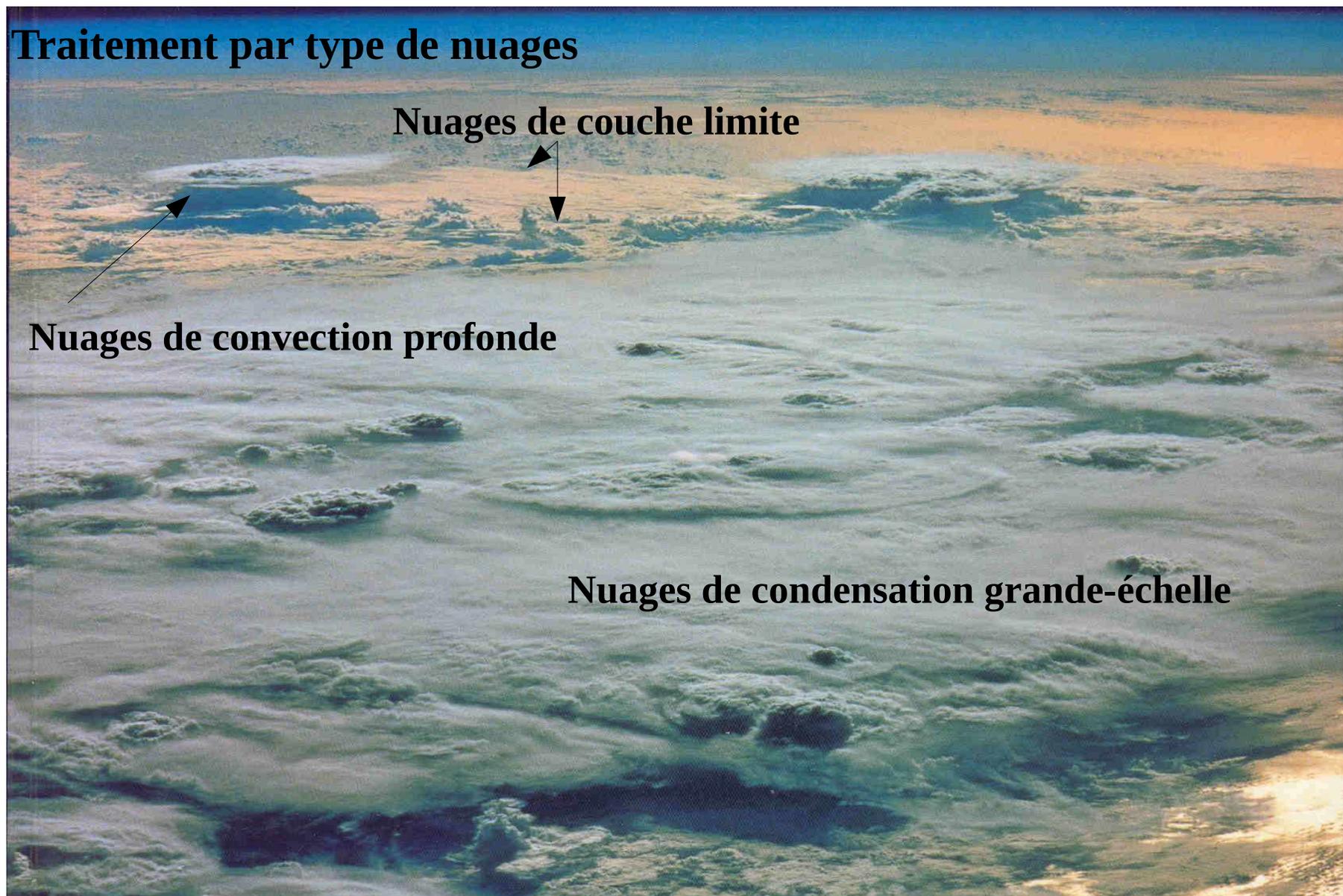
Lignes de codes

27000 : noyau dynamique

127000 : lignes, physique dont ancien rayonnement

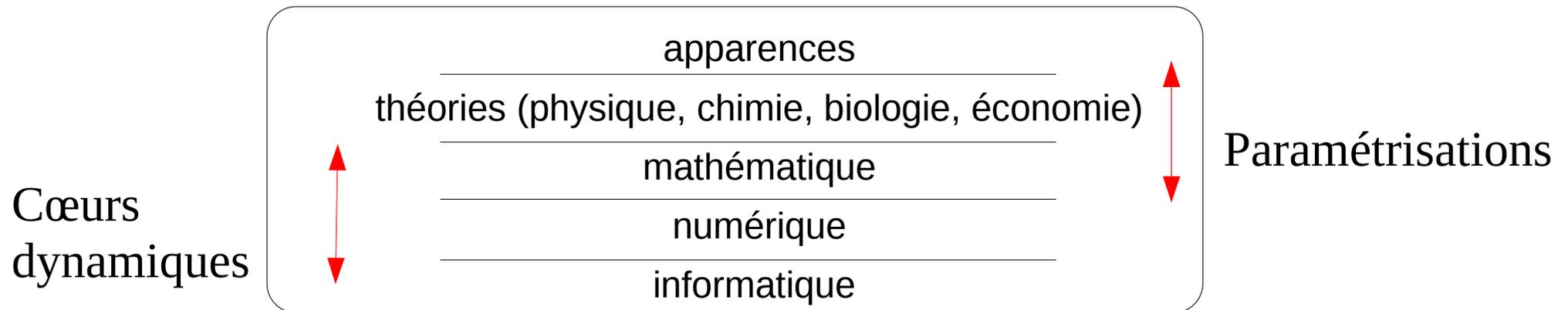
250000 : nouveau rayonnement

# 1. Introduction et principes des paramétrisations



# 1. Introduction et principes des paramétrisations

## The world of numerical models



La modélisation concerne l'ensemble de ces couches.

→ L'accent est mis sur le passage d'équations bien établies à leur discrétisation pour les cœurs dynamiques.

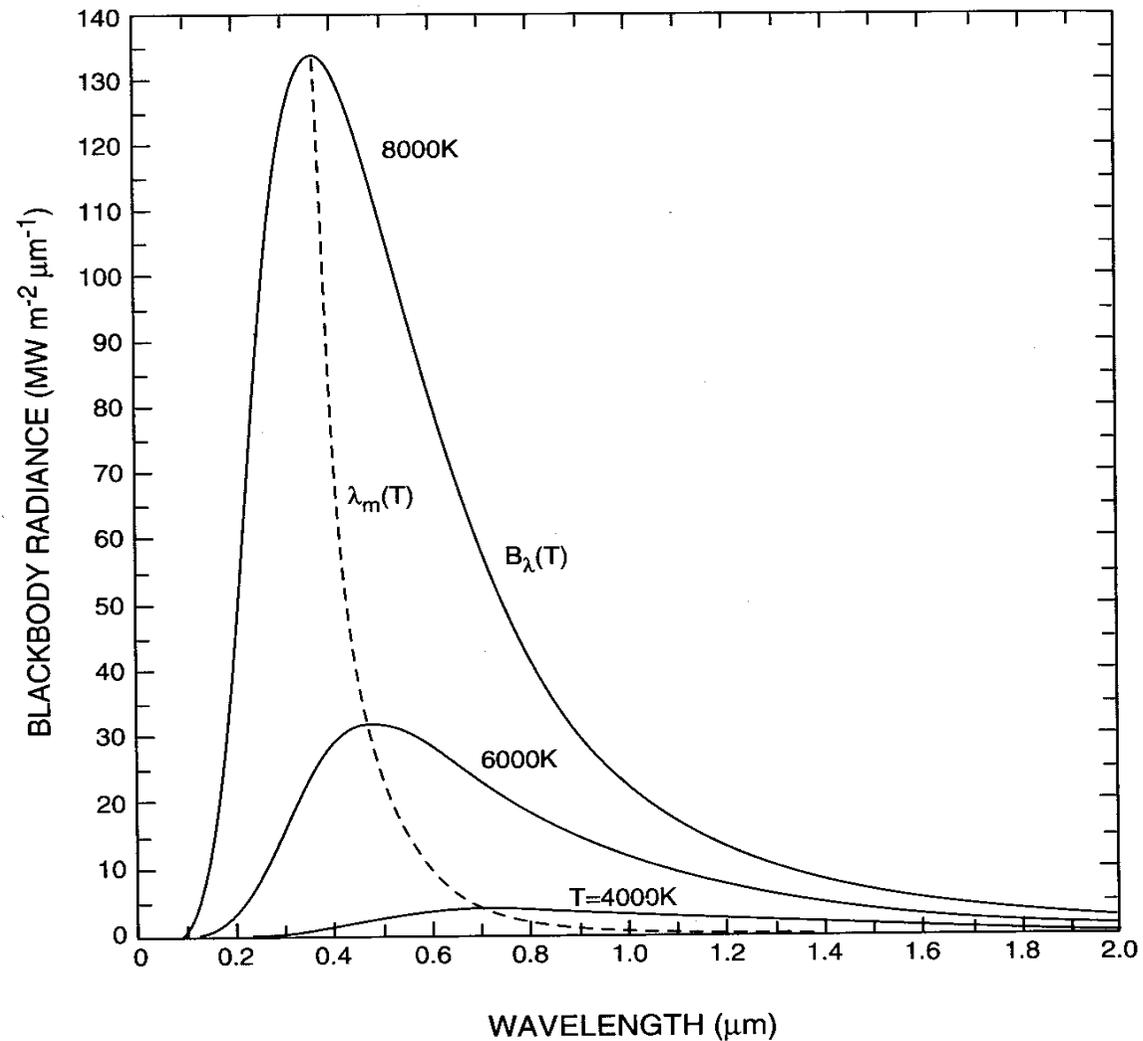
→ Le travail porte davantage sur l'établissement de modèles mathématiques pour les paramétrisations (parfois pensés directement dans la couche numérique, voir informatique ...).

Point commun : le retour vers la couche supérieure

# Emission du corps noir

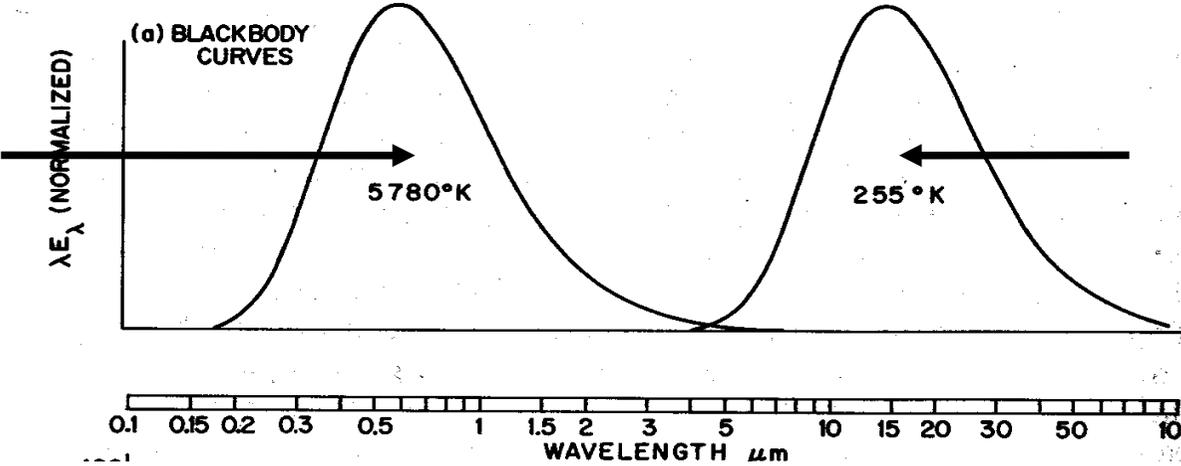
$$\text{Flux total} = \sigma \cdot T^4$$

$$\lambda \text{ maximum} \propto T^{-1}$$



## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

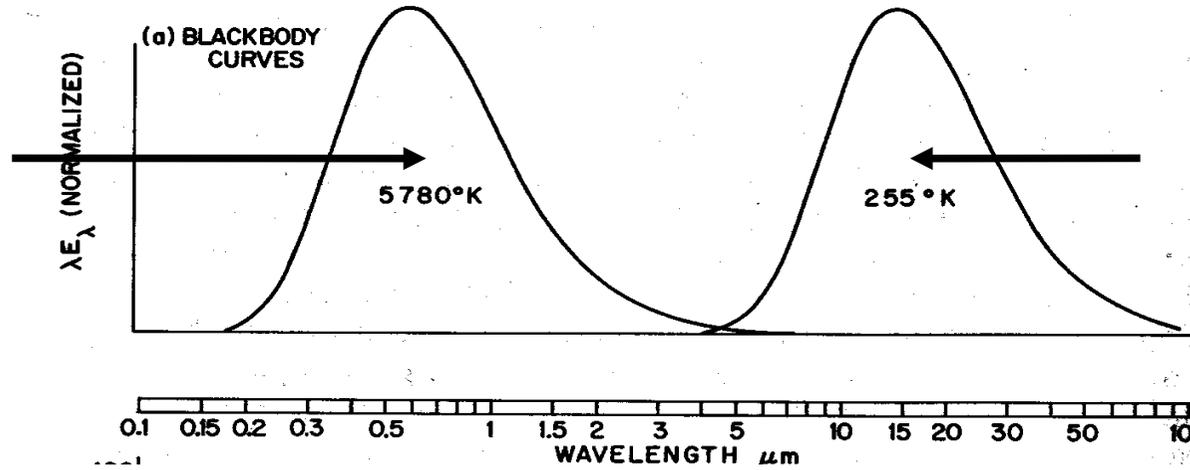
Rayonnement solaire (vis.)



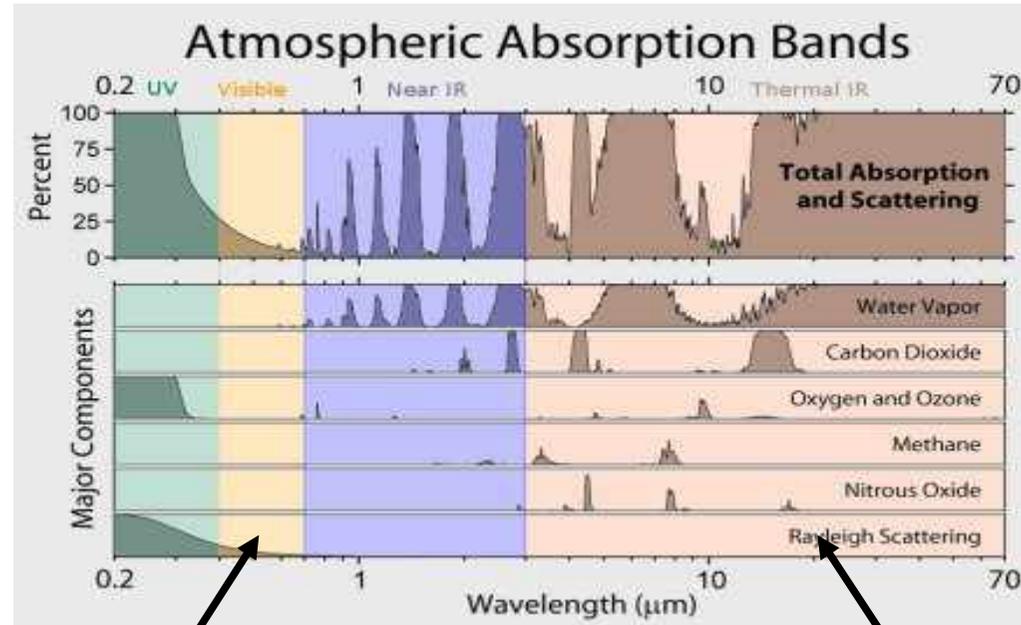
Rayonnement IR terrestre

## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

Rayonnement solaire (vis.)



Rayonnement IR terrestre

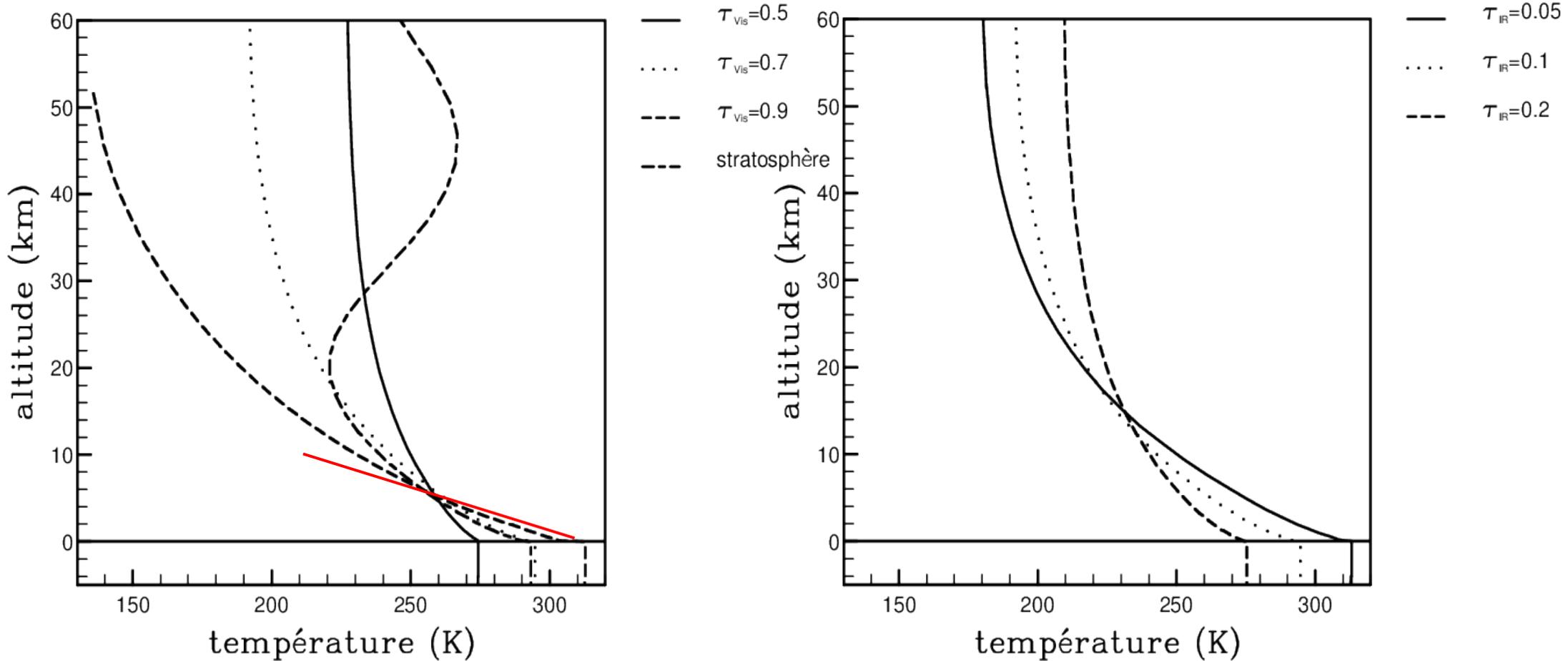


~Transparent

~Opaque

## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

Profil vertical de référence pour un modèle gris dans le visible  
Et « saturé gris » dans l'infrarouge



## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

# Formulation en Puissance Nette Échangée: principe

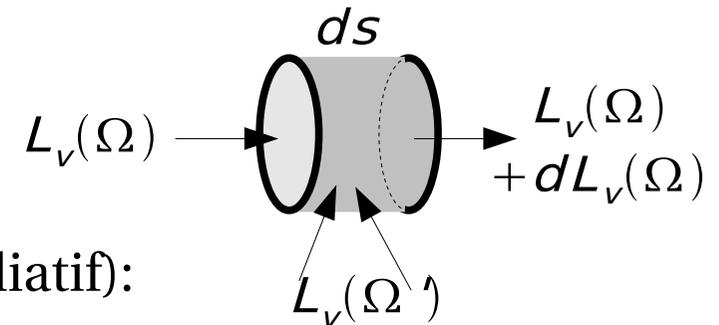
### Formulation en flux:

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

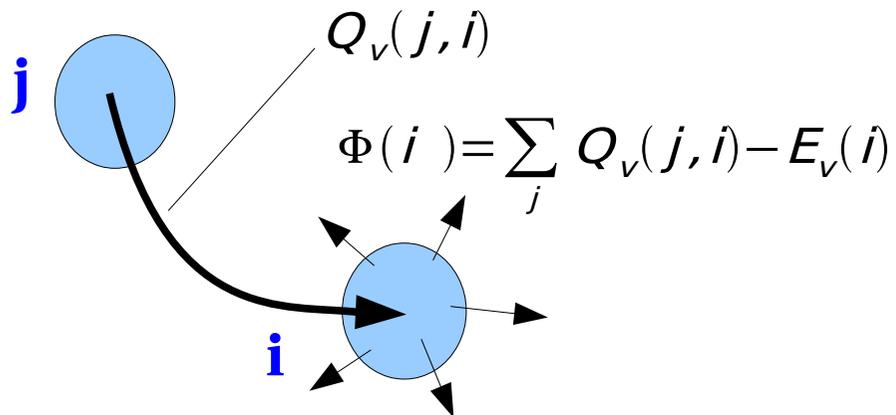
$$\frac{dL_\nu(\Omega)}{ds} = -\kappa_\nu L_\nu(\Omega) + \kappa_\nu B_\nu(T) - \sigma_\nu L_\nu(\Omega) + \sigma_\nu \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} P(\Omega', \Omega) L_\nu(\Omega') d\Omega'$$

2- calcul du flux radiatif

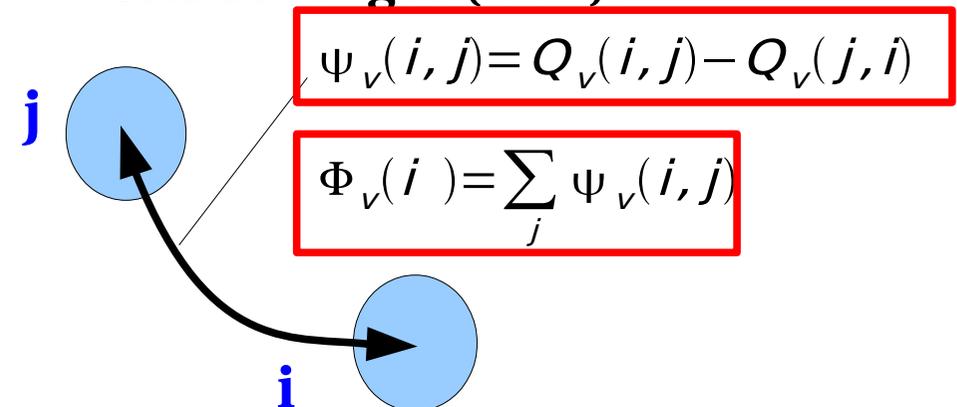
3- bilan  $\Phi_\nu$ : calcul de la divergence du flux



### Formulation en puissance échangée:



### Formulation en puissance nette échangée (PNE):



[Green, 1967]

## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

# 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 noire) :

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

$\Gamma(S_i, S_j)$  : 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  $\gamma$

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

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

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  $\Gamma(S_i, S_j) = \Gamma(S_j, S_i)$

[Dufresne et al., 1998]

## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

# 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 :

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

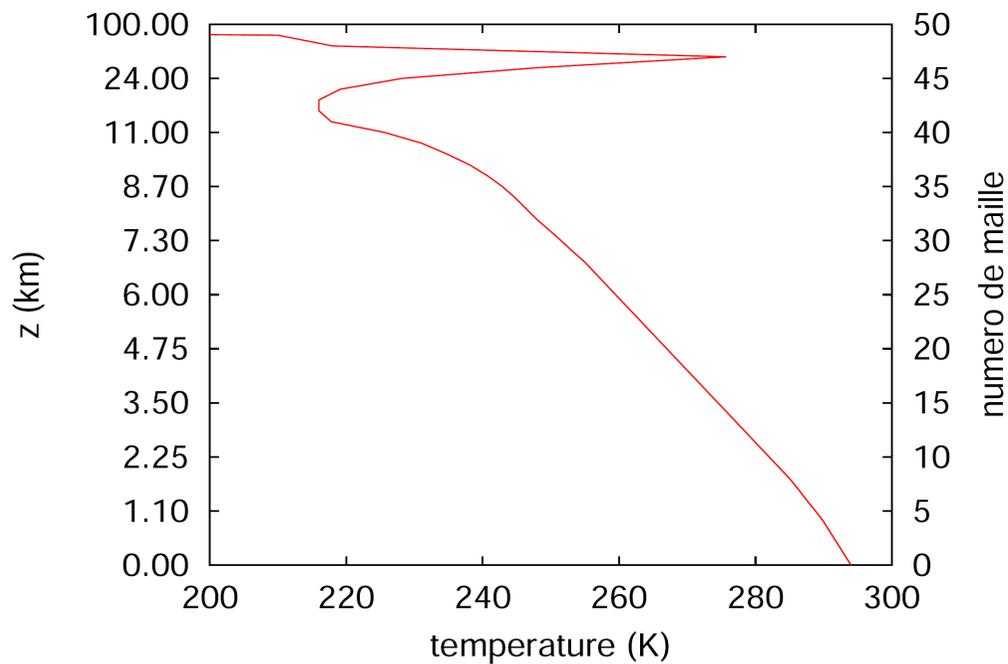
Si les deux éléments sont des volumes de gaz :

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

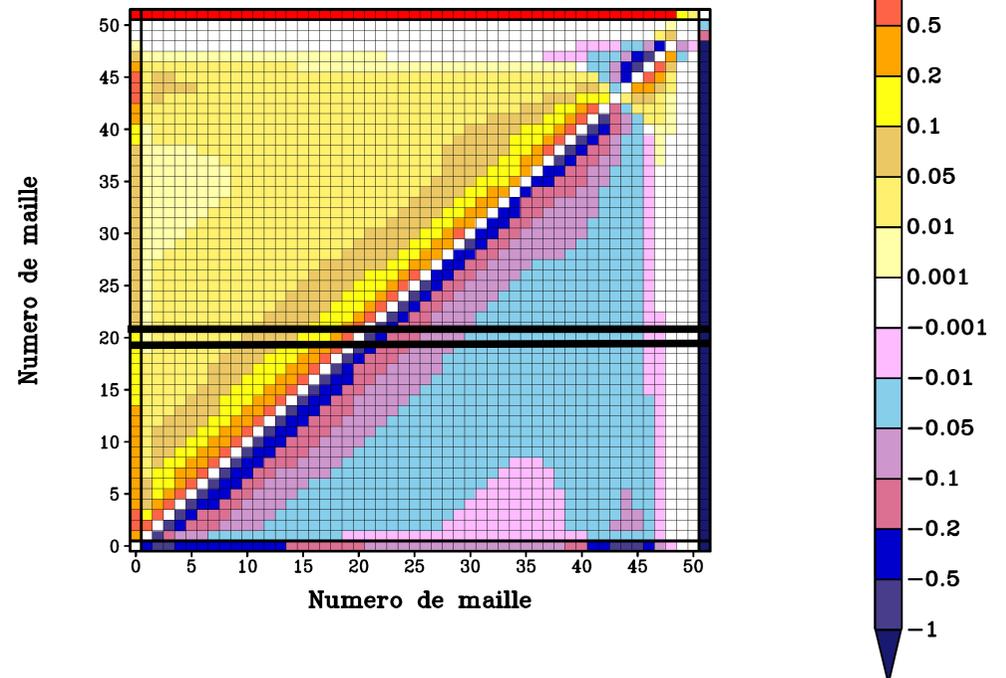
## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

# Analyse en Puissance Nette Échangée

Atmosphère moyenne latitude, été  
ciel clair



Puissances Nettes Echangees ( $W/m^2$ )



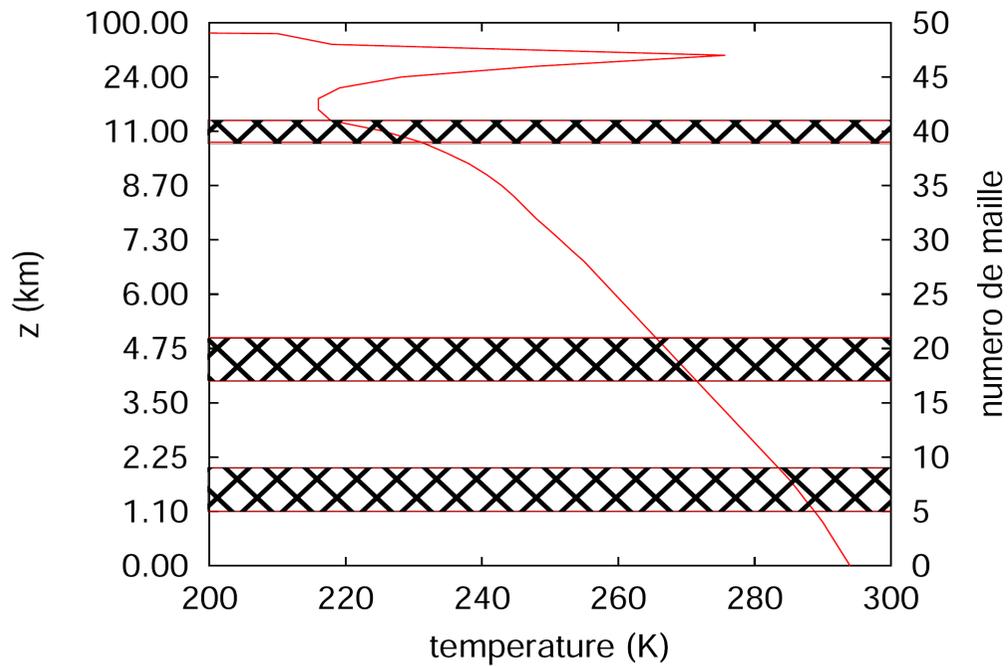
[Eymet et al., 2004]

Transparents Jean-Louis Dufresne

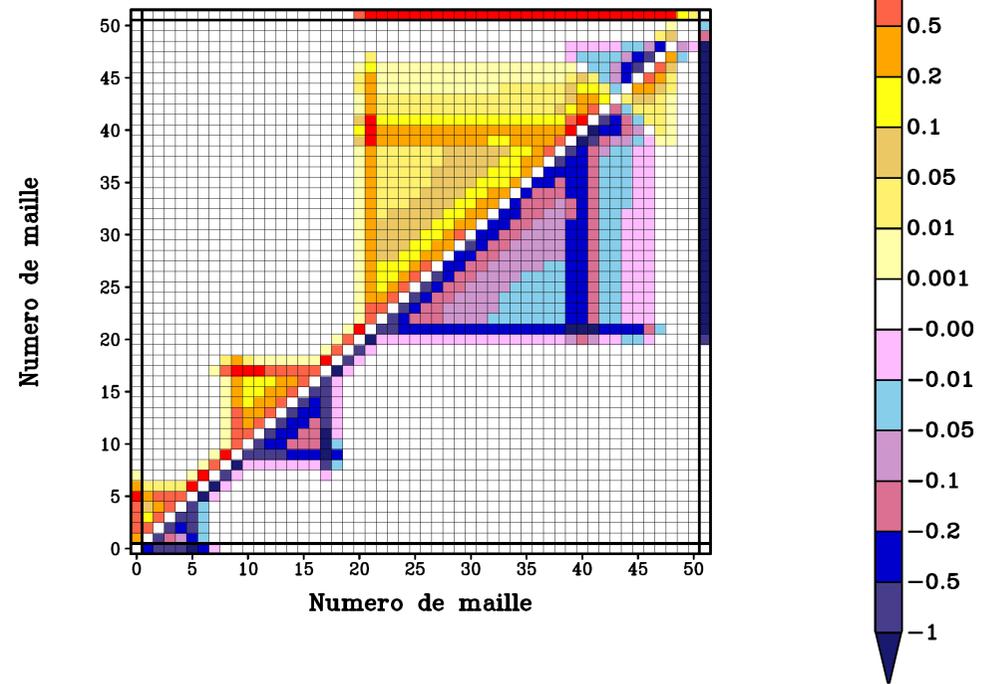
## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

# Analyse en Puissance Nette Échangée

Atmosphère moyenne latitude, été  
trois couches de nuages



Puissances Nettes Echangees ( $W/m^2$ )



[Eymet et al., 2004]

Transparents Jean-Louis Dufresne

## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

# 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

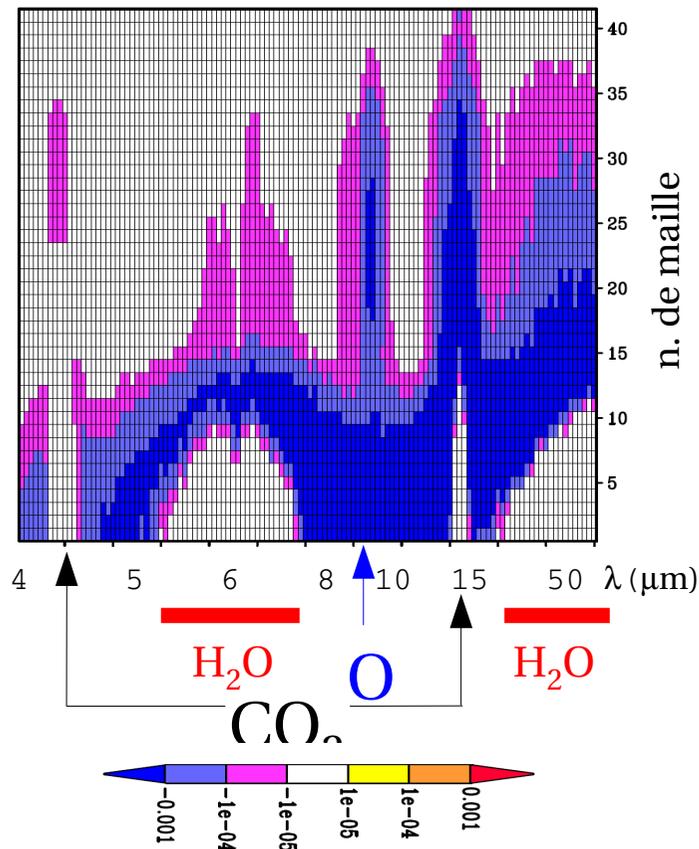
## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

# Analyse de l'effet de serre sur Terre

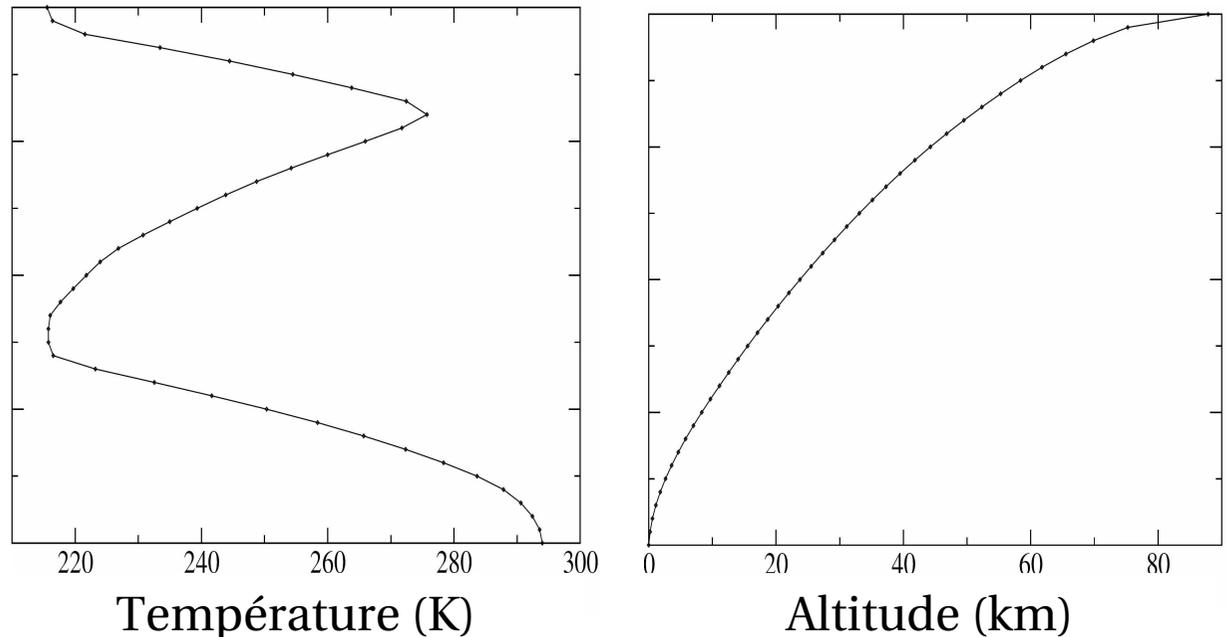
$$\text{Bilan} \longrightarrow \Phi_i = \Psi_{i,e} + \Psi_{i,s} + \Psi_{i,a} \longleftarrow \text{Échange net avec le reste de l'atmosphère}$$

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

Échange net avec l'espace



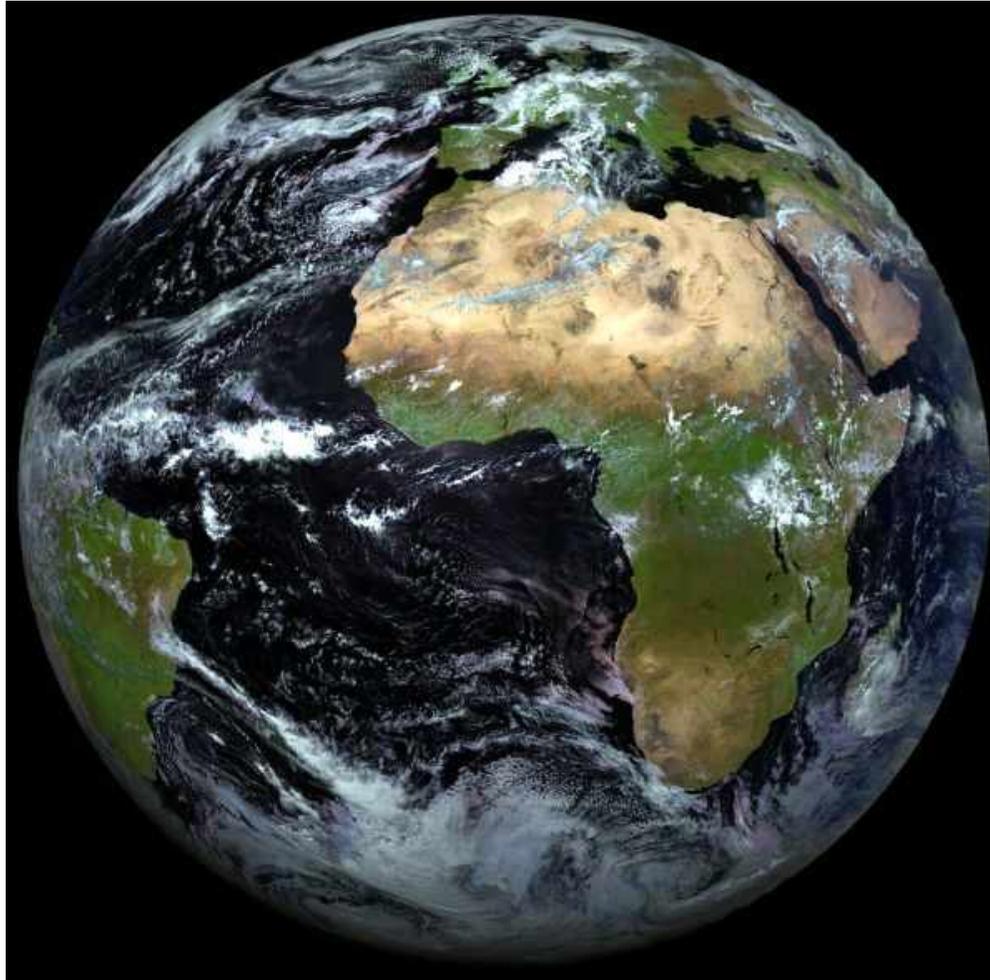
Profil atmosphérique, été, moyenne latitude (MLS, RTMIP)



[V. Eymet, Laplace]

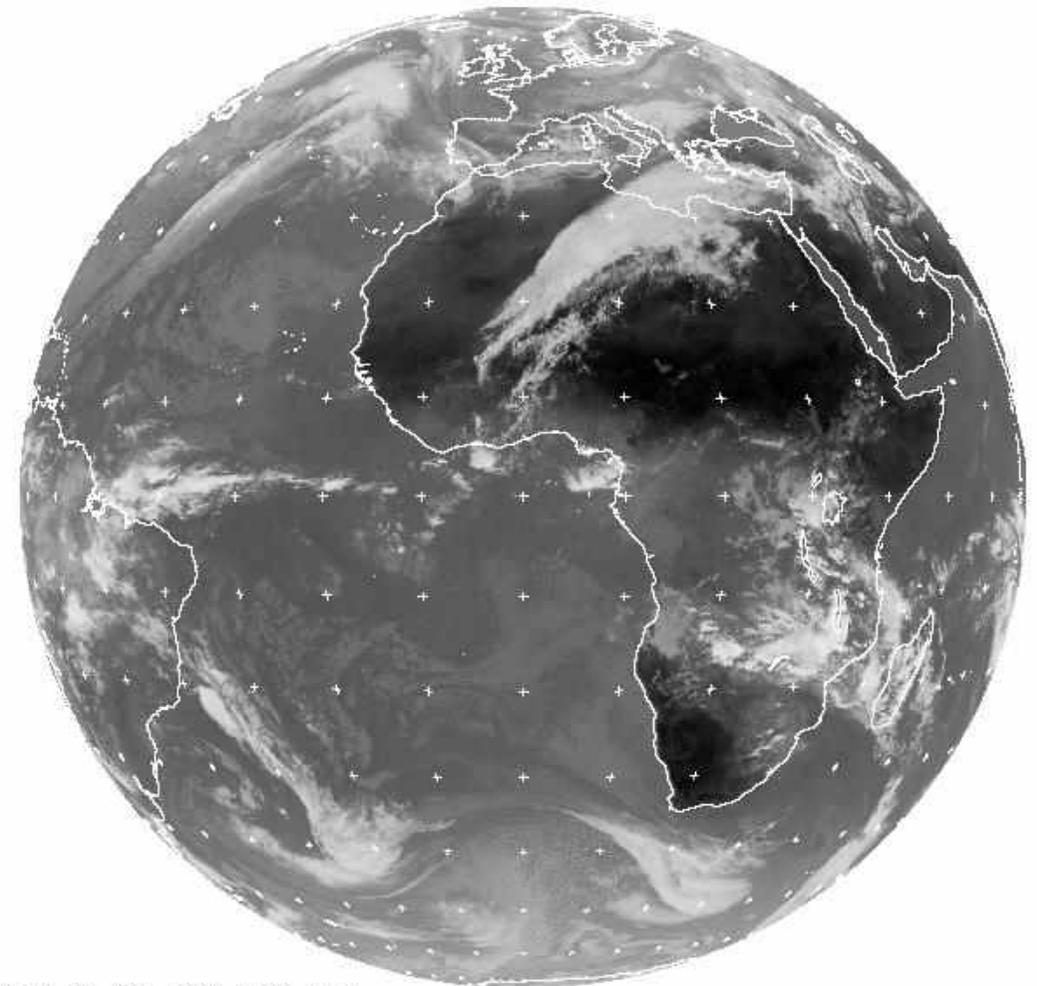
## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

### Image visible meteosat



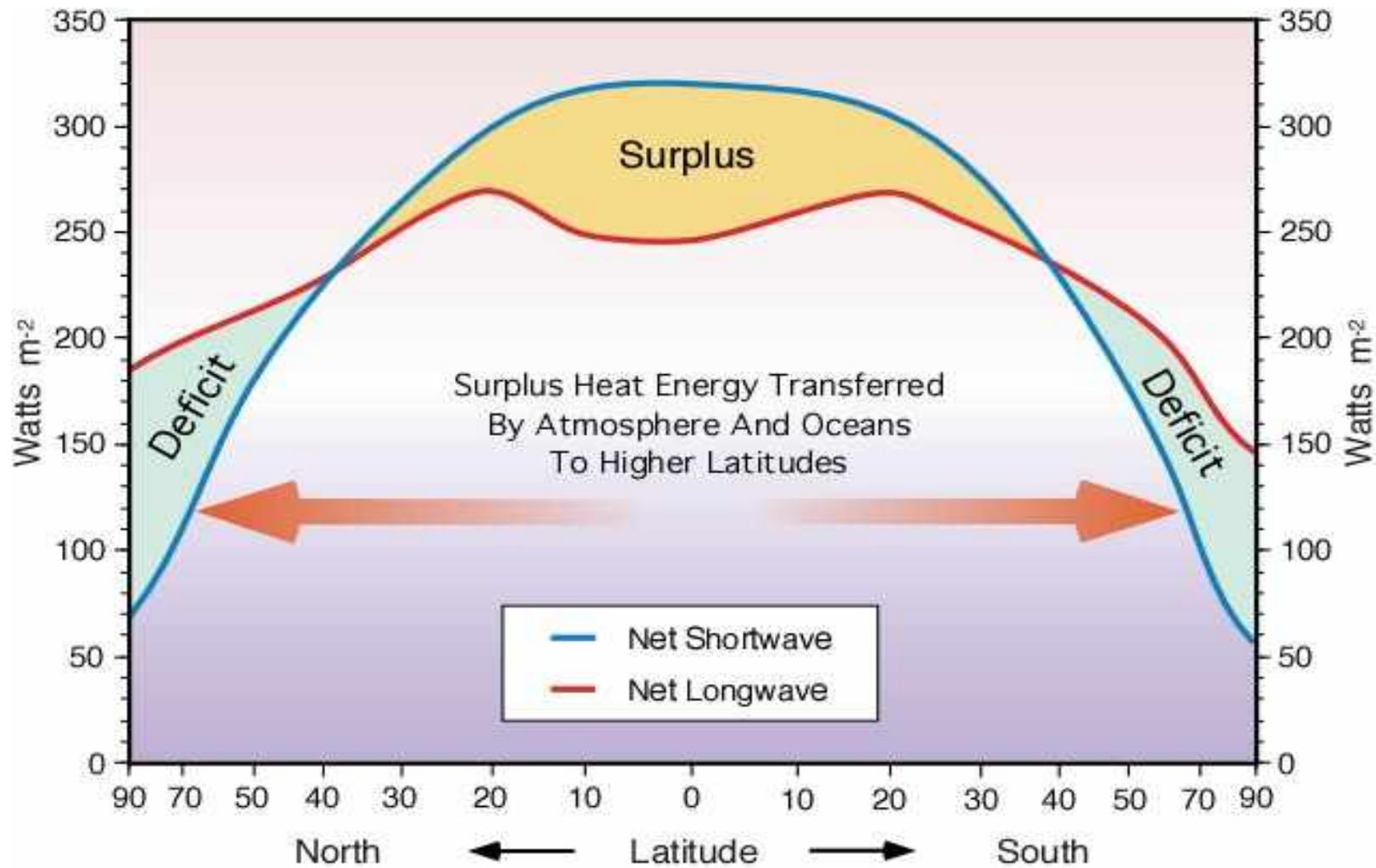
09 May 2003,  
1215 UTC

### Image infra-rouge meteosat



MET7 01 MAR 2004 1200 DTOT

©EUMETSAT



## 2. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

### Quelques idées à retenir :

- Composante essentielle d'un modèle de climat
- Transfert radiatif, problème bien connu mais intrinsèquement extrêmement « coûteux »
- Le poids relatif des différentes raies varie le long du trajet optique en fonction de  $p$  et  $T$ .
- Les échanges proches sont dominés par les centres des raies alors que les échanges gaz-gaz à distance se passent dans les ailes
- Deux grandes familles pour l'intégration spectrale : modèles de bandes où on perd la multiplicité des transmissions et approches en  $k$ -distributions ou  $k$ -corrélé où on essaie de maintenir cette propriété dans le monde spectrale.
- L'intégration angulaire est remplacée par un angle moyen.
- Dans le visible : la prise en compte de la diffusion est essentielle.
- Elle est la plupart du temps négligée dans l'infra-rouge
- Dans beaucoup de modèles on se « débrouille » en ayant un rayonnement directionnel en provenance du soleil, et un rayonnement après diffusion traité avec le même angle moyen que l'infra-rouge.
- Avec tout ça, on pense que le calcul radiatif ciel clair est correct à quelques  $W/m^2$
- Les incertitudes liées à la distribution et aux propriétés optiques des aérosols et des nuages sont au moins aussi grandes.
- Très peu d'évolution des codes terrestres. Peu de codes. Investissement énorme et pas toujours très gratifiant pour amélioration faible.
- Reformulation possible dite en « puissances nettes échangées », basée sur la réciprocité des chemins optiques et qui garantit le second principe (une couche ne peut pas contribuer à réchauffer une couche plus chaude qu'elle).
- Evaluation : test des méthodes d'accélération par comparaison à des calculs le plus exact possibles (raie par raie, avec intégration angulaire). Evaluation difficile / obs.

### 3. Approches classiques pour la turbulence de couche limite

#### Quelques idées à retenir :

- La paramétrisation des mouvements convectifs et turbulents repose sur la décomposition de Reynolds.
- Cette décomposition ne nécessite pas d'hypothèses incompressible ou Boussinesq
- Les développements aux perturbations des équations permettent de repousser la « fermeture » à des ordres plus loin.
- Les fermetures en diffusion turbulente utilisant la TKE pour pronostiquer l'intensité de la turbulence sont largement utilisées dans les modèles d'océan et d'atmosphère.
- Les fermetures sont rarement poussées à un ordre supérieur dans les modèles de climat.
- Dans les modèles « grande échelle » seuls les termes verticaux sont considérés alors que la diffusion 3D est importante dans les simulations LES (mailles de quelques dizaines de m).
- Le couplage entre les modèles se passe au niveau des couches limites.
- Utilisation systématique de schémas implicites.
- Le découpage entre système nécessite de penser spécifiquement leur raccordement.
- Les fermetures à des ordres supérieurs sont peu utilisées

Modèle	LMDZ5NP / 6	ARPEGE-Climat (AR5)	ARPEGE-Climat (pre-AR6)	ARPEGE-PNT	AROME/MesoNh	MAR
Diffusion turbulente / TKE						
Général	TKE pronostiq. Yamada 83	<b>TKE d'eq. Ricard-Royer 93</b>	TKE pronostiq. Cuxart 2000	TKE pronostiq. Cuxart 2000	TKE pronostiq. Cuxart 2000	Duynkerke 88
Stabilité	dt=10min	dt= 30 mn	dt=15 mn	dt=10min	dt=60s	dt=6min
CL surface	classique	Louis	Louis/continent Coare ou <b>Ecume</b> /océans	Louis/continent <b>Ecume</b> /océans	Louis/continent <b>Ecume</b> /océans + Canopy	