

# Les paramétrisations des modèles de climat

## I. Modélisation du transport non résolu

1. Décomposition de Reynolds et fermetures en diffusion turbulente
2. Couche limite convective
3. Convection profonde



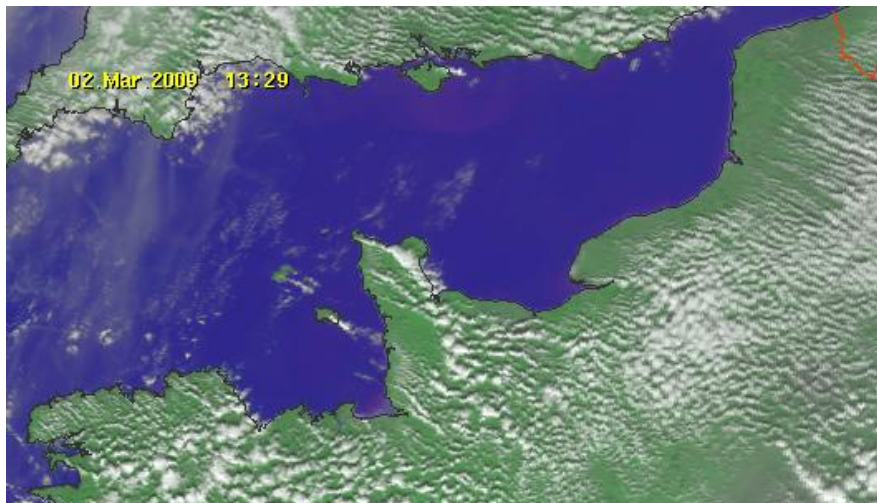
# Limitations of turbulent diffusion

## Assumption leading to the diffusive approach :

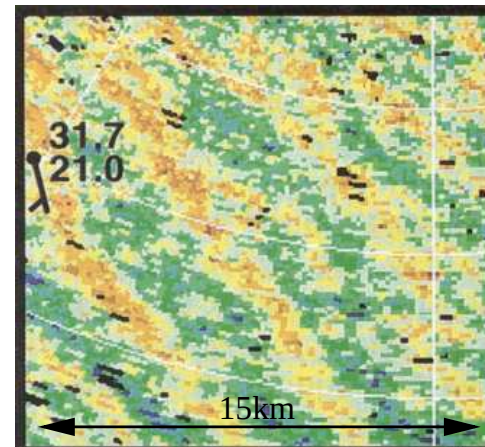
- Turbulence as a random process
- Small scale turbulence, i.e. of size  $l \ll h$  with  $h = \left[ \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial z} \right]^{-1}$

## In the planetary boundary layer

- Long range vertical transport (from the bottom to PBL top)
- Organized structures



Cloud streets on North of France (March 2009, MSG)

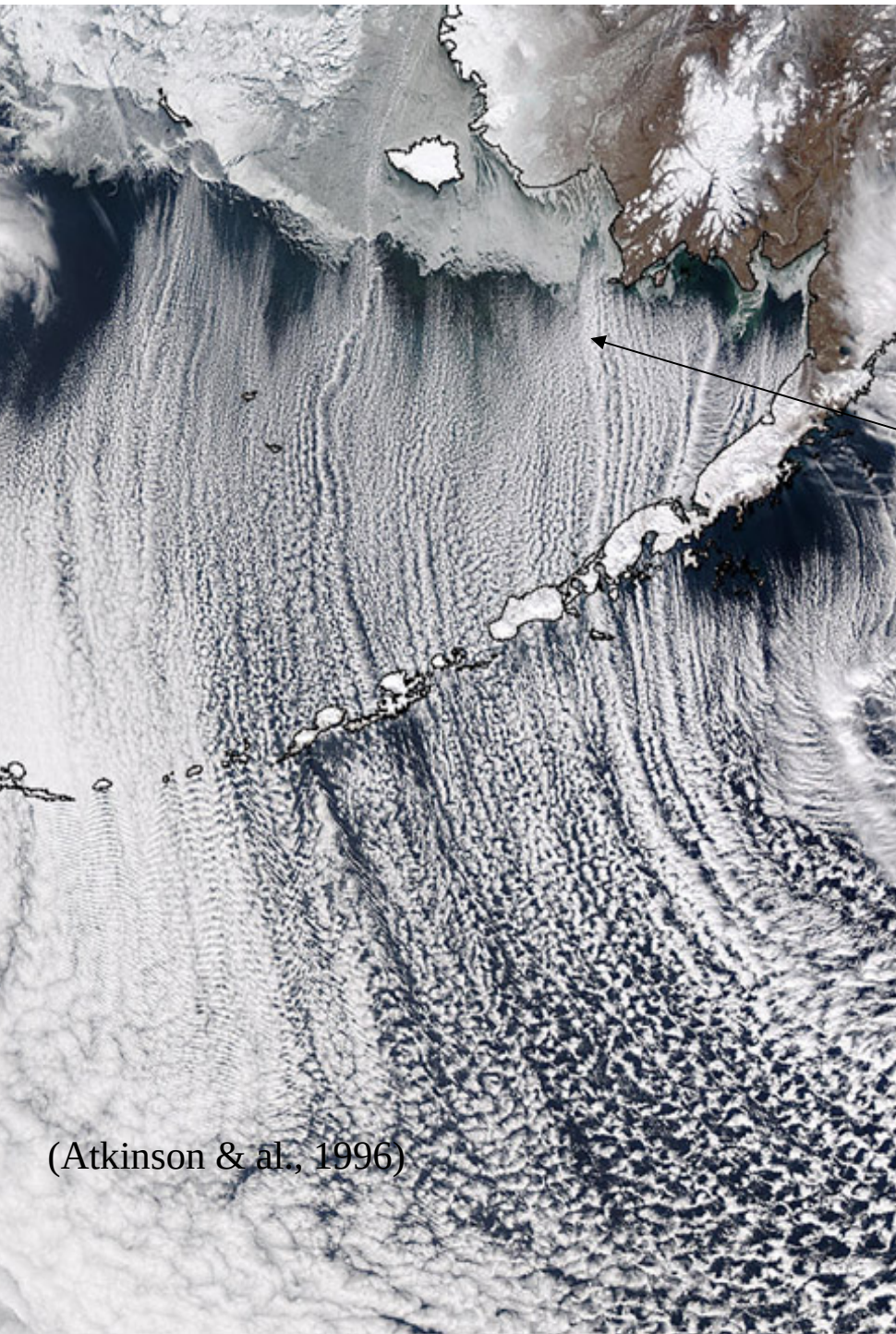


Radar echoes  
dry convective  
boundary layer  
Florida, Hiop  
Campaign

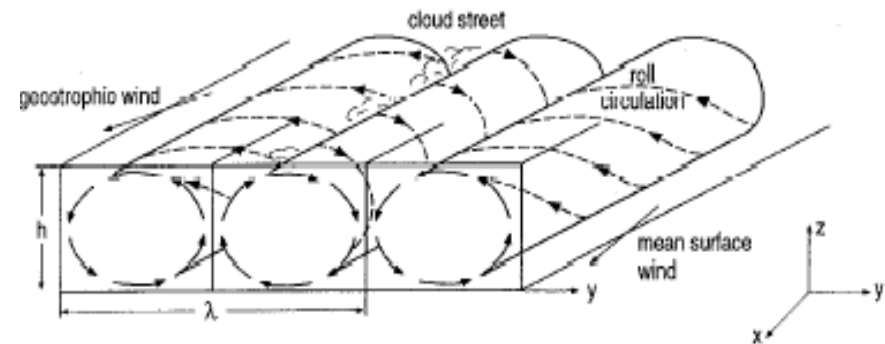
Weckwerth et al., 1997



## 2. Couche limite convective

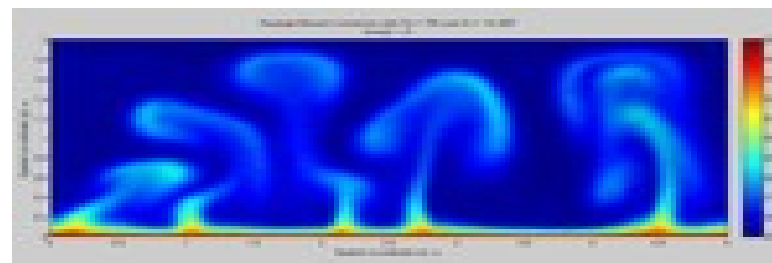
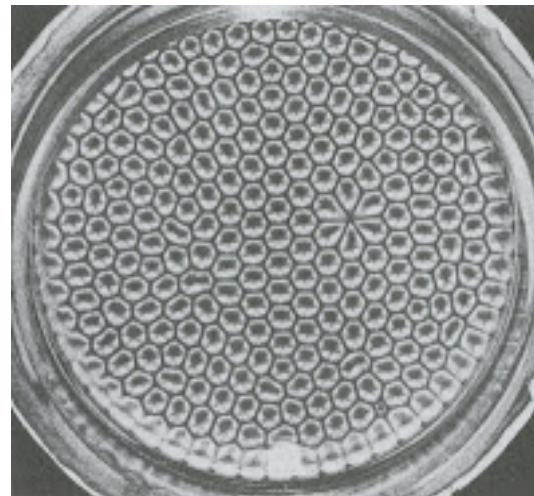


(Atkinson & al., 1996)



Classical examples of cloud streets obtained at the top of thermal rolls

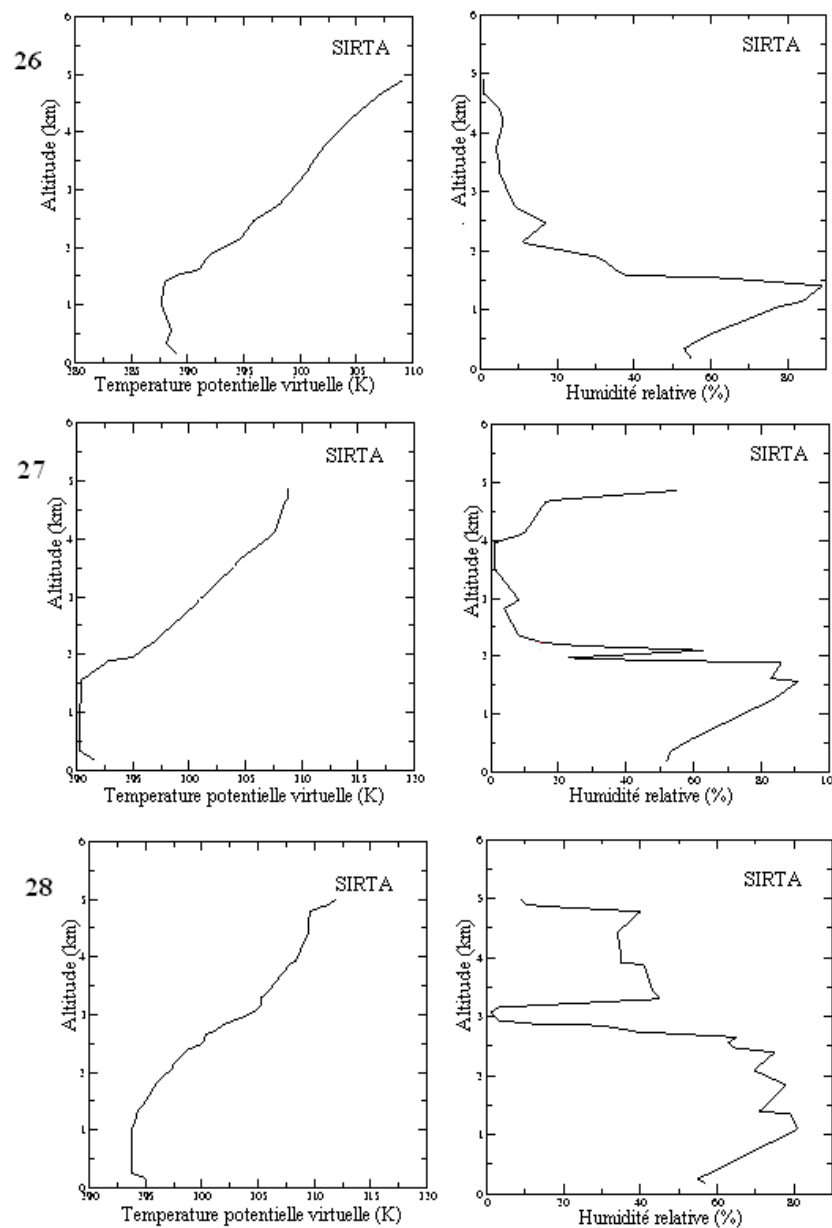
- Polar air arriving on warm air masses
- Entry of maritime air on a warmer continent



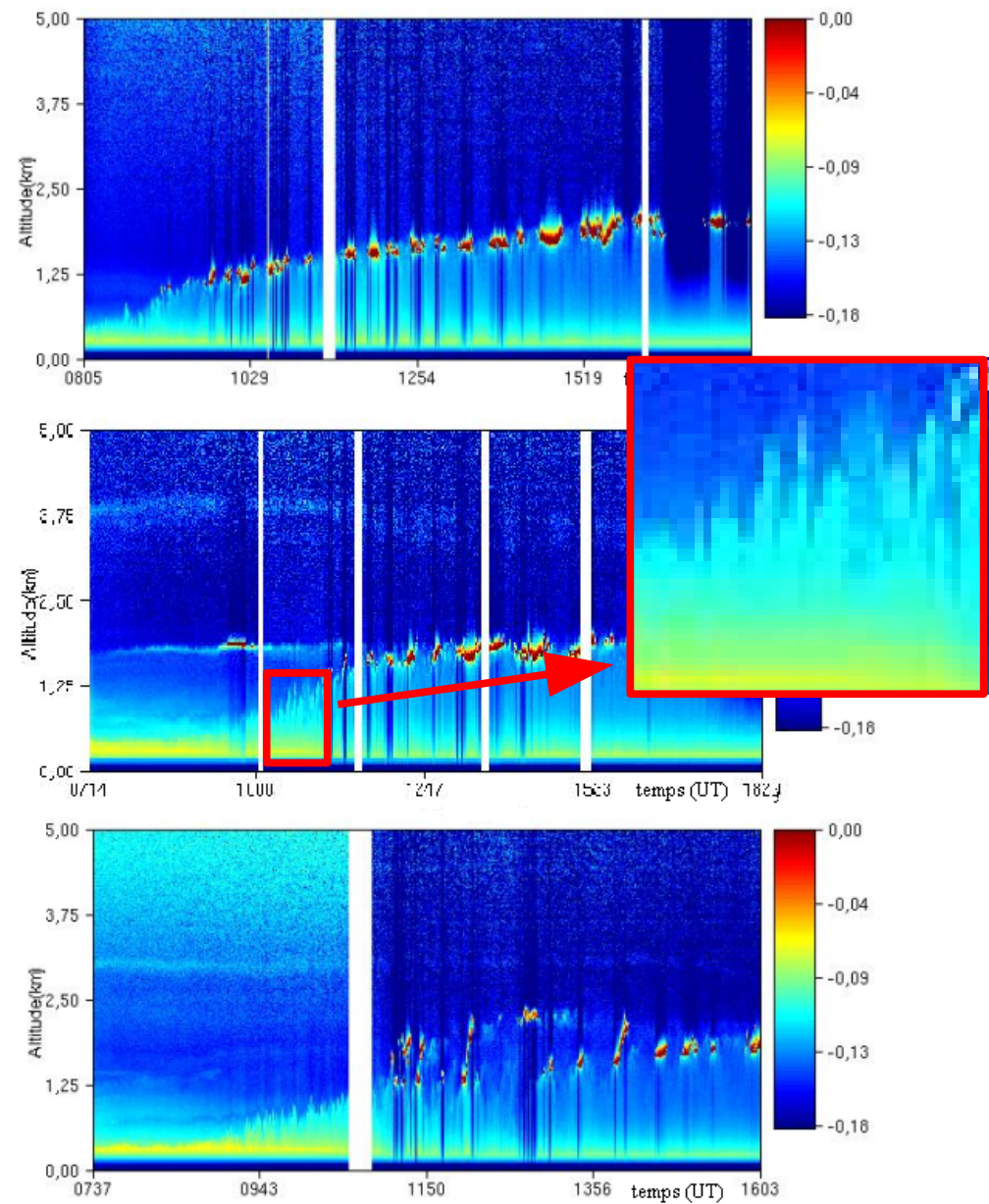


## 2. Couche limite convective

Z(km)

T (K) RH (g/kg)  
Sondages Trappes, 12:00  
3 jours consécutifs

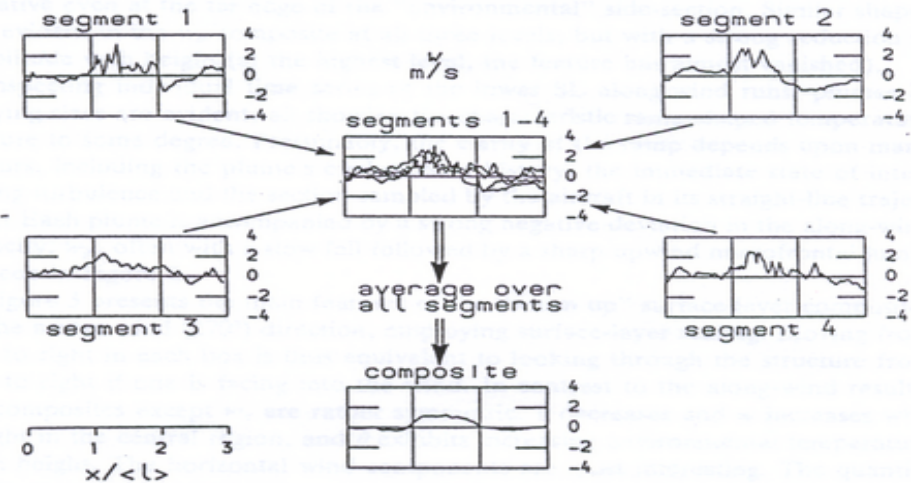
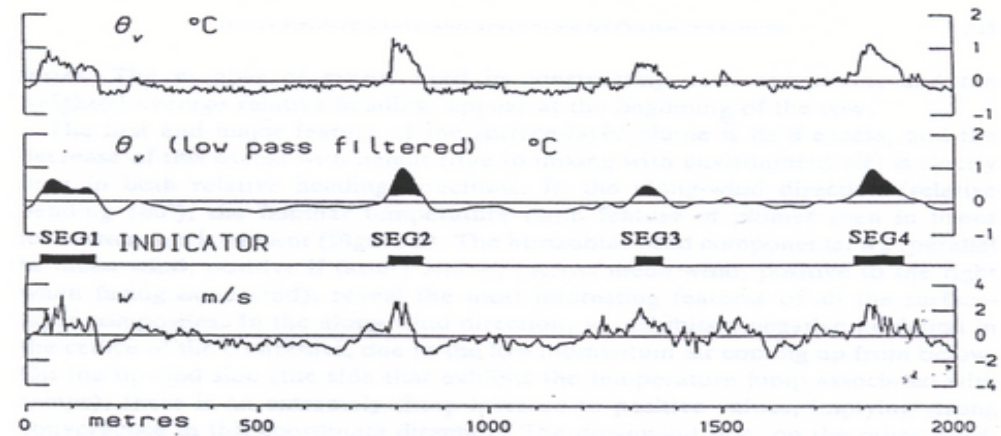


Echos Lidar, Sirta (site IPSL proches Trappes)

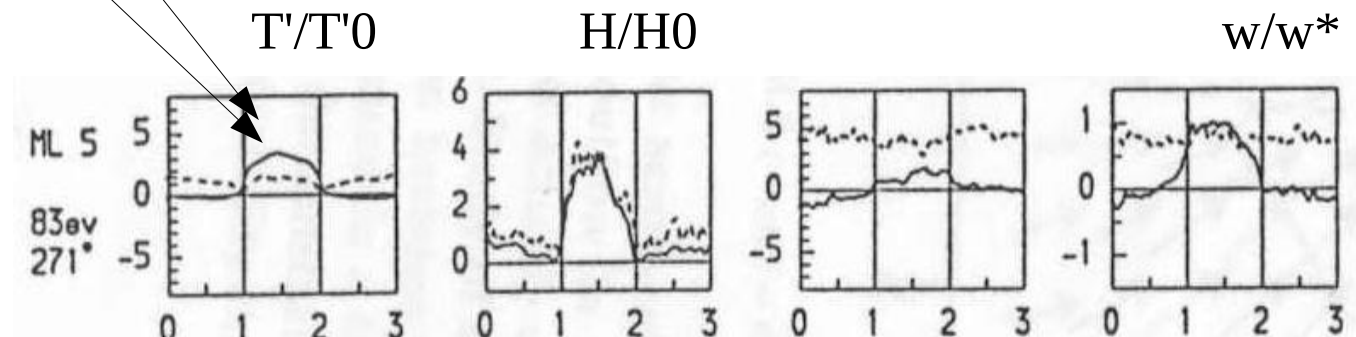
## 2. Couche limite convective

Reconstruction des thermiques par composite sur la température potentielle à Parir de vols avions.

Williams et Hacker 1992



Moyenne  
Ecart-type





## 2. Couche limite convective

Convection organisée même pour les couches limites non nuageuses.

Mise en évidence dans des « Large Eddy Simulations » ou « Simulation des grands tourbillons », domaine de quelques km, mailles de qq 10m.

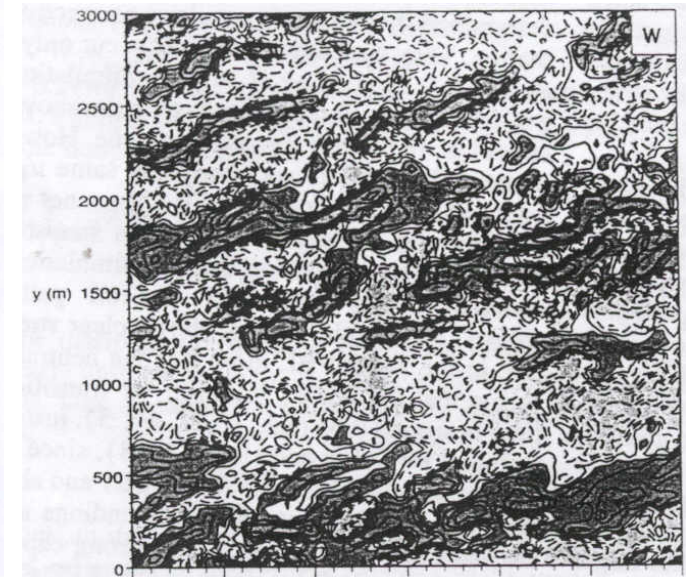
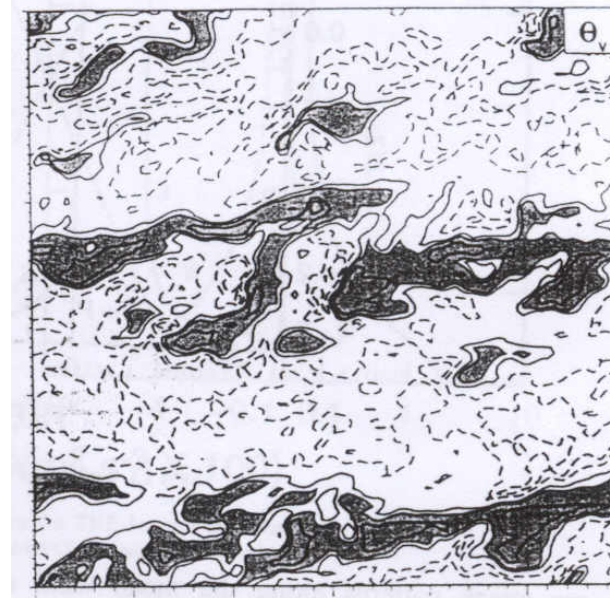
Forcé par un flux de chaleur venant de la surface

$\theta'$

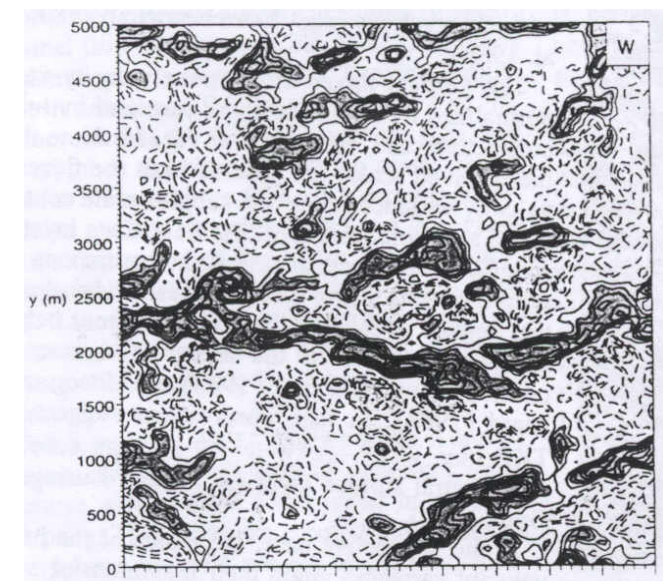
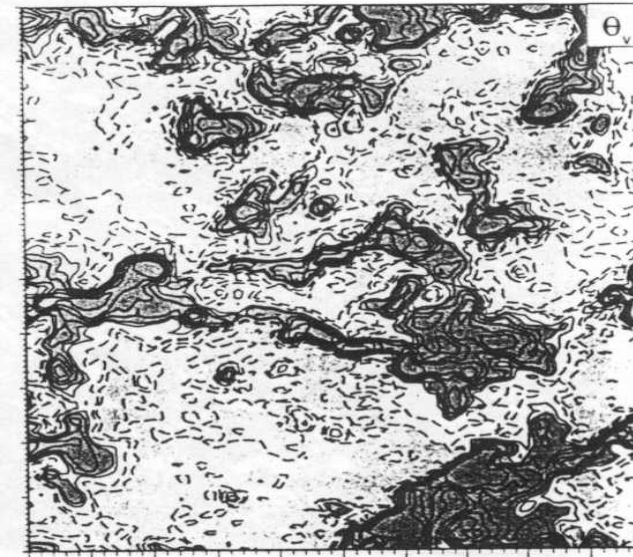
$w'$

Exemple de résultats de simulations LES. Coupes instantannées au niveau  $0.2 Z_i$  où  $Z_i$  est la hauteur de la couche limite. Moeng et al, 1994

Simulation avec convection + cisaillement

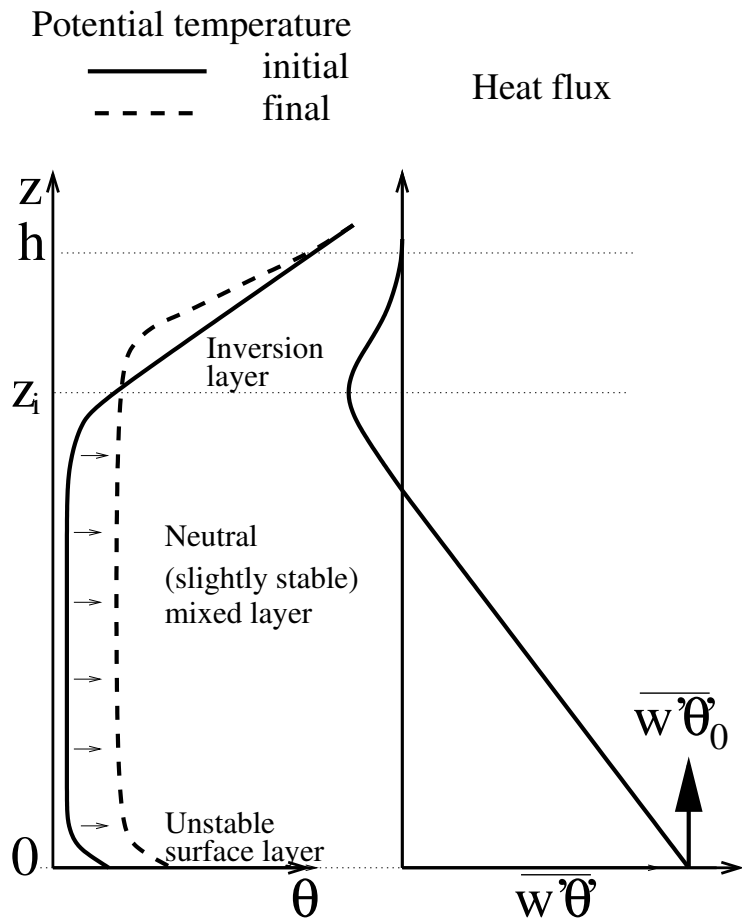


Simulation avec convection sans cisaillement (convection libre)



# Limitations of turbulent diffusion

Idealized view of the dry convective boundary layer.



## In the mixed layer

- Diffusive formulation

$$\overline{w'\theta'} = -K_z \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad \text{or slightly } < 0$$

- Uniform heating by the surface

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \simeq \frac{\overline{w'\theta'_0}}{z_i} \quad (\text{Cste} > 0)$$

$$\overline{w'\theta'} \simeq \frac{z - z_i}{z_i} \overline{w'\theta'_0} > 0$$

# Extension of diffusive formulations

- **Introduction of a countergradient term**

$$\overline{w'\theta'} = K_z \left[ \Gamma - \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] = 0 \quad \text{with } \Gamma \simeq 1K/km \quad (6)$$

Imposed countergradient Deardorf, 1966

Revisited by Troen & Mart, 1986, Holtzlag & Boville, 1993, based on a similarity approach.

- **Non local mixing length** (Bougeault)

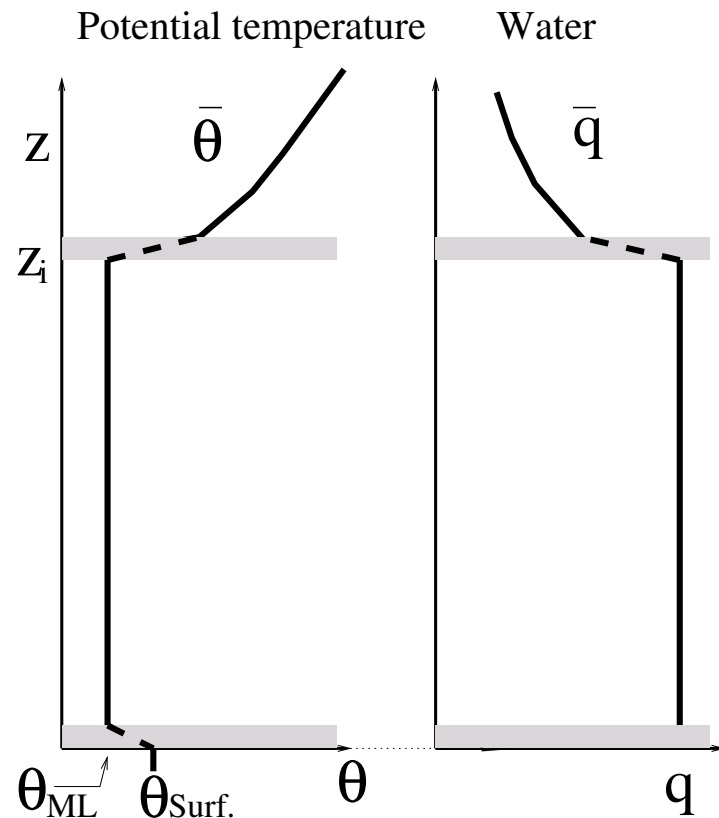
- **Higher order closures**

- Mellor & Yamada 1974, hierarchy at successive orders. Complex and still local.

- Abdella & Mc Farlane, 1997, Introduce a mass flux approach to compute the 3rd order moments in a Mellor and Yamada scheme.

# "Bulk" models

Constant value (or prescribed profiles)  $c_{ML}$  with discontinuities  $\Delta c$  at boundaries.



$$z_i \frac{\partial c_{ML}}{\partial t} = \left[ \overline{w'c'}_0 - \overline{w'c'}_{z_i} \right] \quad (7)$$

$$\text{with } \overline{w'c'}_{z_i} = -C\Delta c \quad (8)$$

Betts, Albrecht, Wang, Suarez et al 1983

Randall et al. 1992 and Lapen and Randall, 2002 : Combination of bulk models with higher order closures



# Transilient matrices

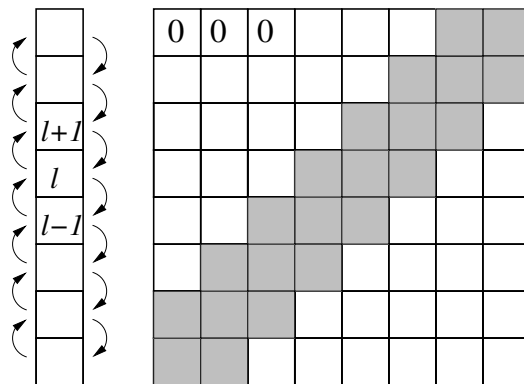
Numerical formalism (after Stull 1984)

$C$  : Air mass exchange rate matrices between model layers

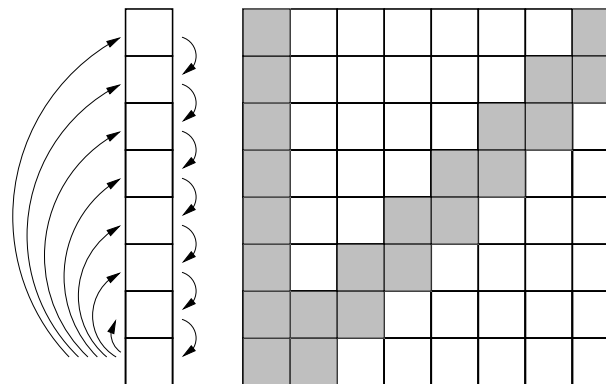
For turbulent diffusions

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \simeq \frac{K_{l+1/2} (c_{l+1} - c_l) - K_{l-1/2} (c_l - c_{l-1})}{\delta z^2}$$

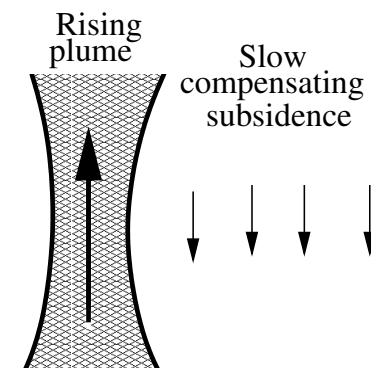
$$\Rightarrow C_{l,l+1} = K_{l+1/2} \frac{\delta t}{\delta z^2}, C_{l,l} = -(K_{l-1/2} + K_{l+1/2}) \frac{\delta t}{\delta z^2}, C_{l,m} = 0 \text{ for } |l - m| > 1$$



Turbulent diffusion



Assymetric Convective Model of Pleim and Chang 1992



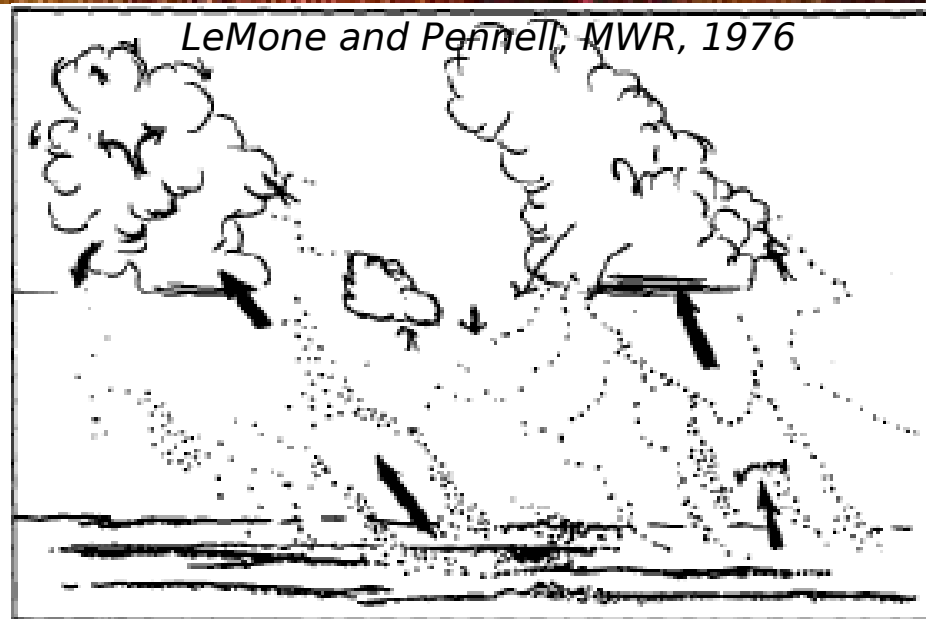
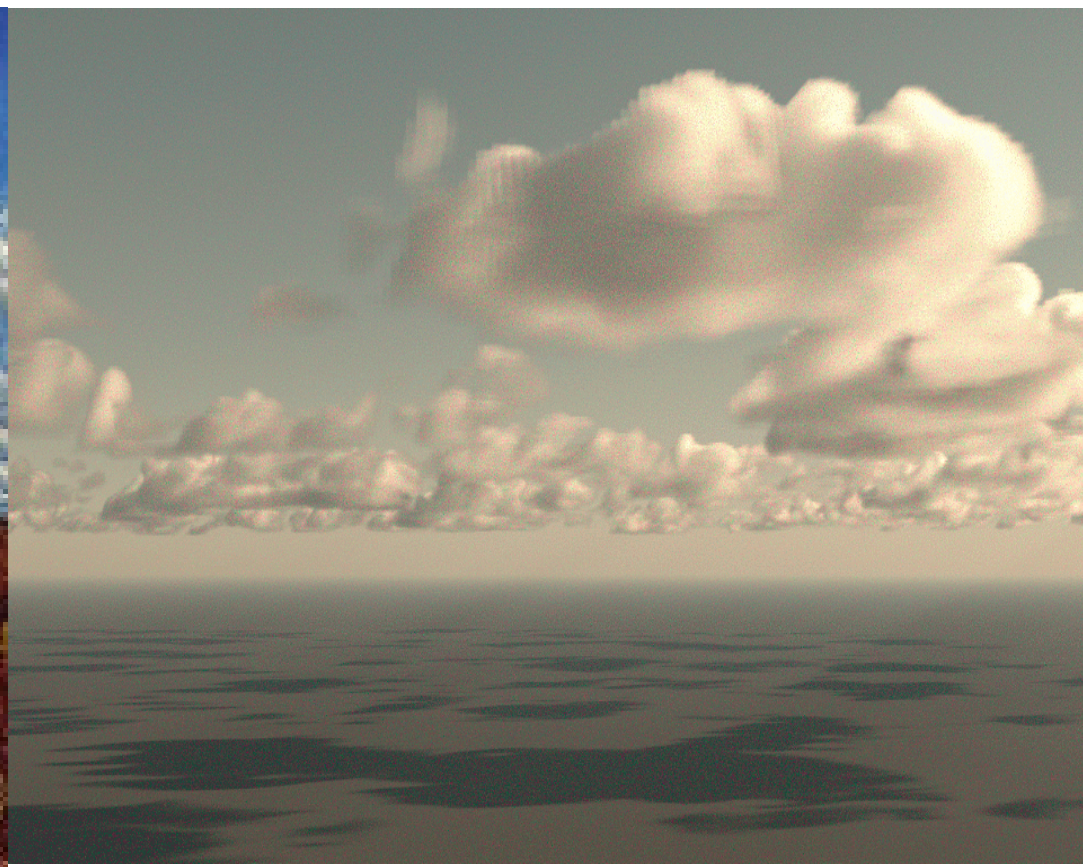




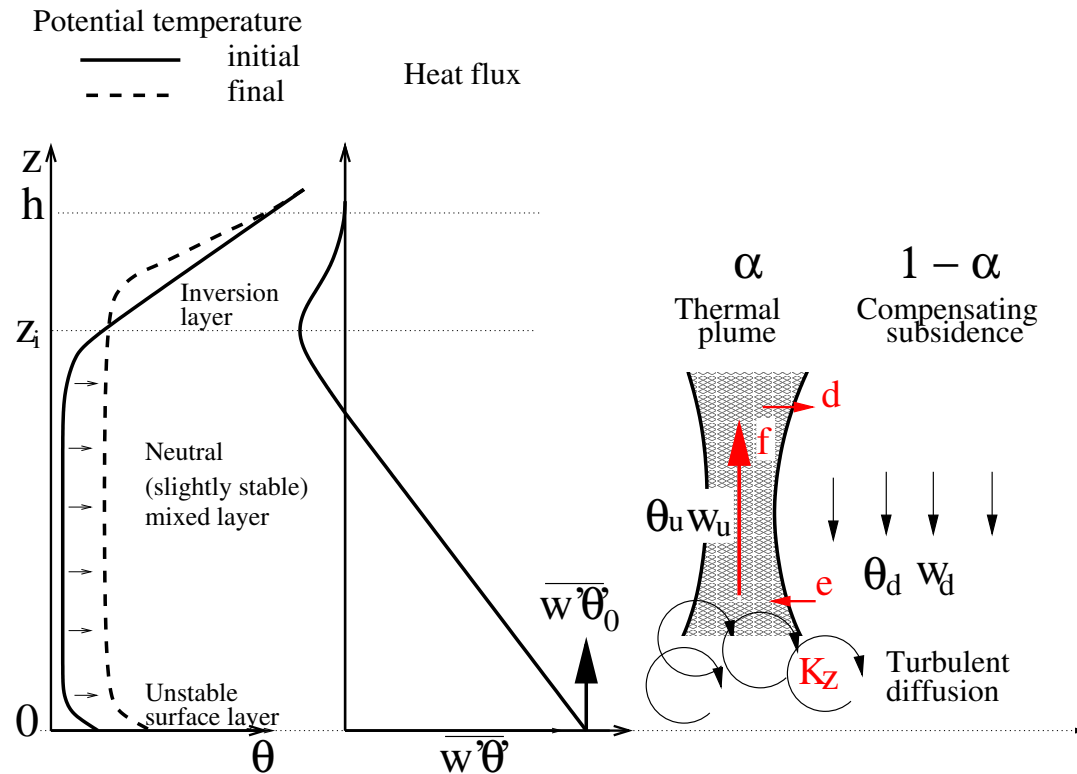


Copyright (C) 2019 CNRS, MétéoFrance, Meso-Star, UPS (najda.villefranke@gmail.com)  
This video is licensed under a Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License.





# Mass flux schemes combined with turbulent diffusion



Separation into 2 sub-columns :

$$X = \alpha X_u + (1 - \alpha) X_d$$

ascending plume of mass flux

$$f = \alpha \rho w_u$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = e - d$$

$$\frac{\partial f c_u}{\partial z} = e c_d - d c_u$$

$$\rho \overline{w'c'} = -\rho K_z \frac{\partial c}{\partial z} + f (c_u - c_d) \quad (9)$$

Chatfield and Brost, 1987, Hourdin et. al., 2002, Siebesma, Soares et al, 2004

# Mass flux schemes combined with turbulent diffusion

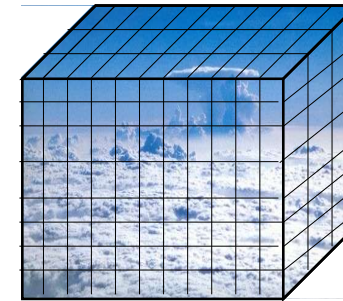
Comparison with LES

Dry convective boundary layer.

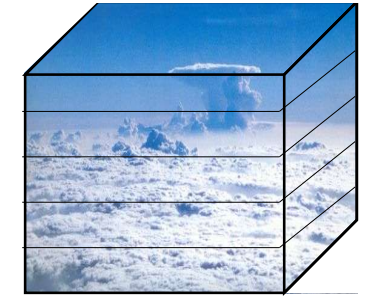
Forcing :  $\overline{w'\theta'_0} = 0.24\text{K m/s}$

geostrophic wind of 10 m/s

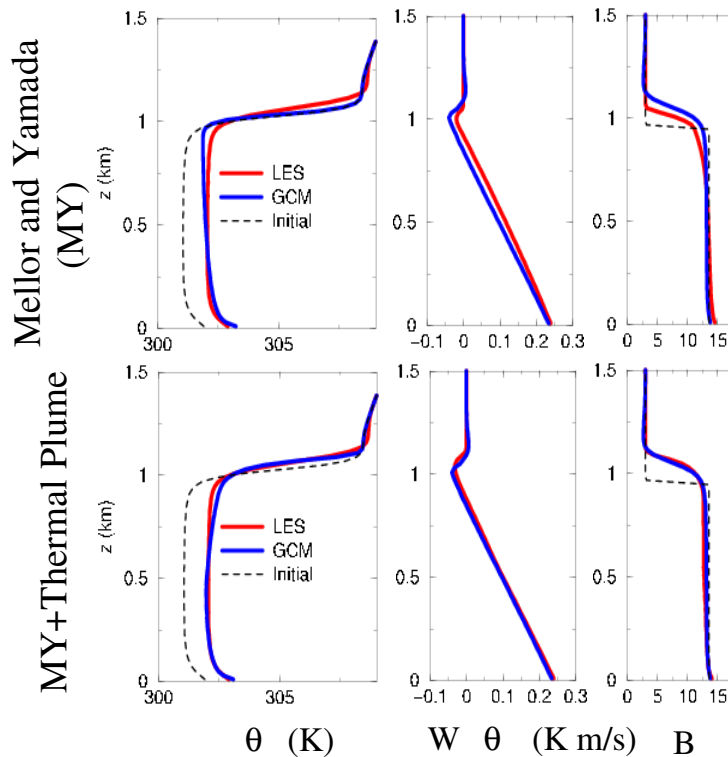
Thermal Plume model (Hourdin et al. 2002).



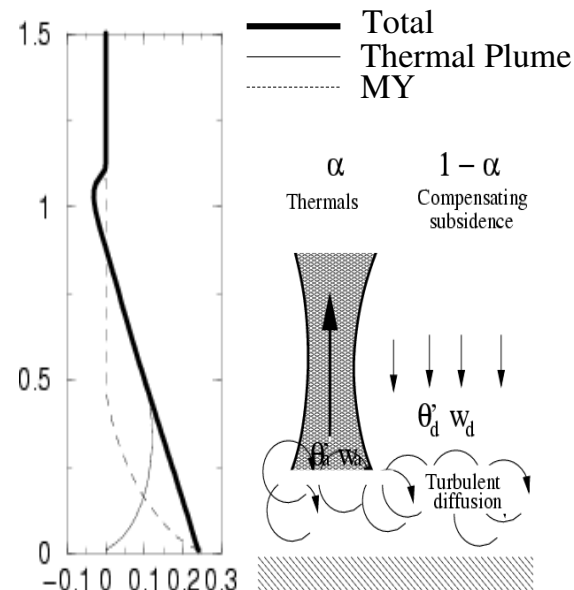
LES



SCM (1D GCM)



Heat flux decomposition for  
The MY+thermiques case

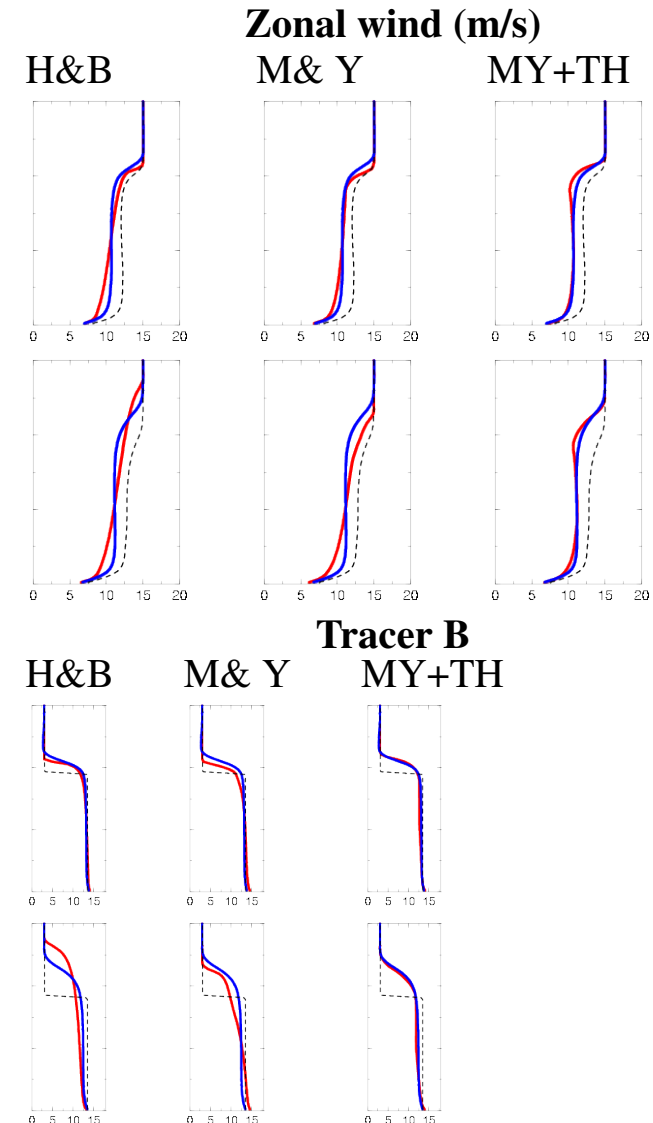
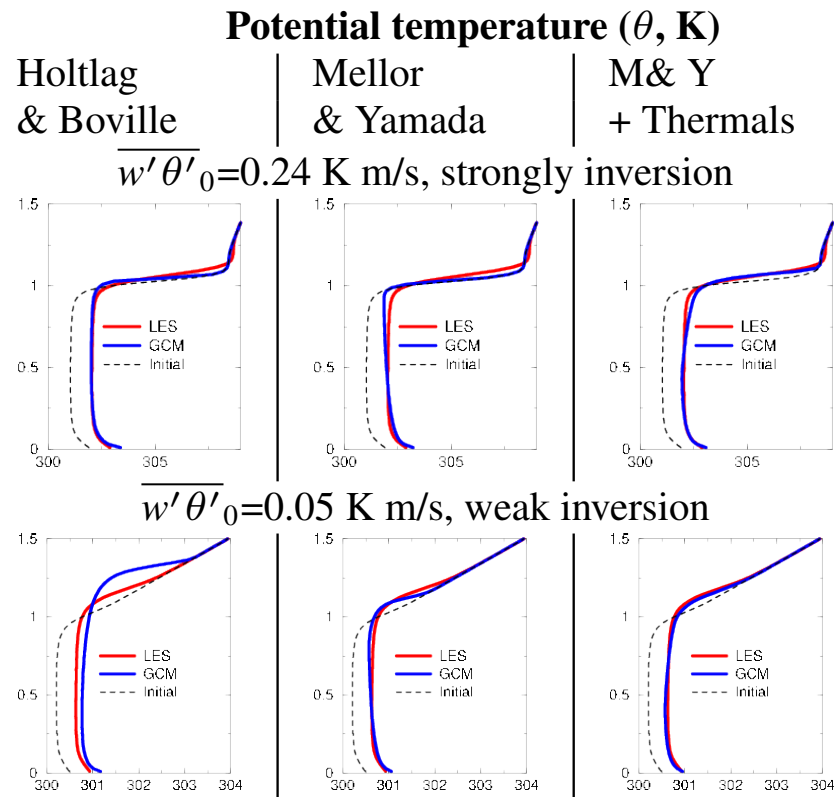


$$MY = -\rho K \frac{\partial c}{\partial z}$$

$$TP = f(c_u - c_d) \quad w$$

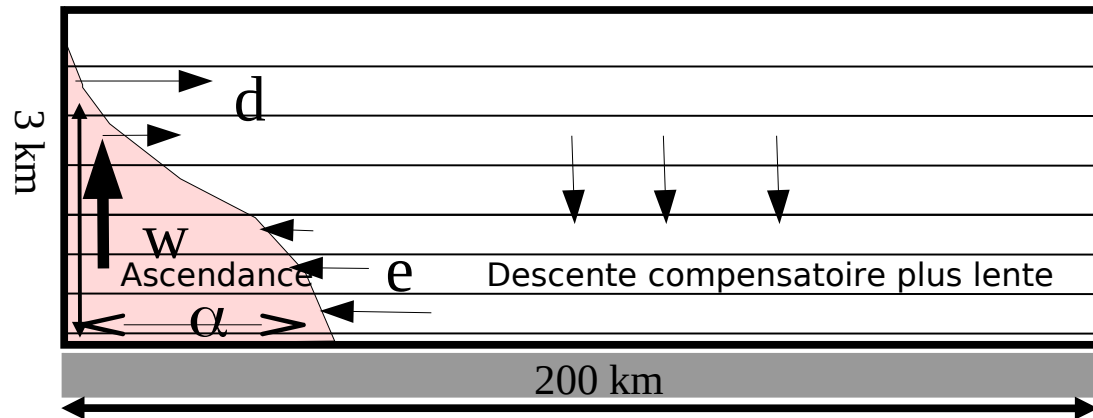


# Mass flux schemes combined with turbulent diffusion



## 2. Couche limite convective

### Le modèle du thermique



#### Variables internes de la paramétrisation :

$w$  : vitesse moyenne des panaches ascendants

$\alpha$  : fraction de la surface couverte par les ascendances

$e$  : taux d'entrée latérale d'air dans le panache (entraînement)

$d$  : sorties d'air depuis le panache (détrainement)

$q_a$  : concentration du composant  $q$  dans l'ascendance

#### Terme source pour les équations explicites

$$S_q = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \overline{\rho w' q'} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \rho K_z \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} [\rho \alpha w (q_a - q)]$$

**Diffusion turbulente**

**Transport par le modèle de panache**

#### 4 Paramètres libres :

$$a_1 = \frac{2}{3}, \beta_1 = 0.9, b = 0.002, c = 0.012 m^{-1}, d = 0.5$$

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial f}{\partial z} = e - d \quad \text{avec } f = \alpha \rho w$$

Conservation de la masse du composant  $q$

$$\frac{\partial f q_a}{\partial z} = e q - d q_a$$

Equation du mouvement

$$\frac{\partial f w}{\partial z} = -d w + \alpha \rho B$$

$B$  étant la poussée d'Archimède

$$B = g \frac{\theta_{va} - \theta_v}{\theta_v}$$

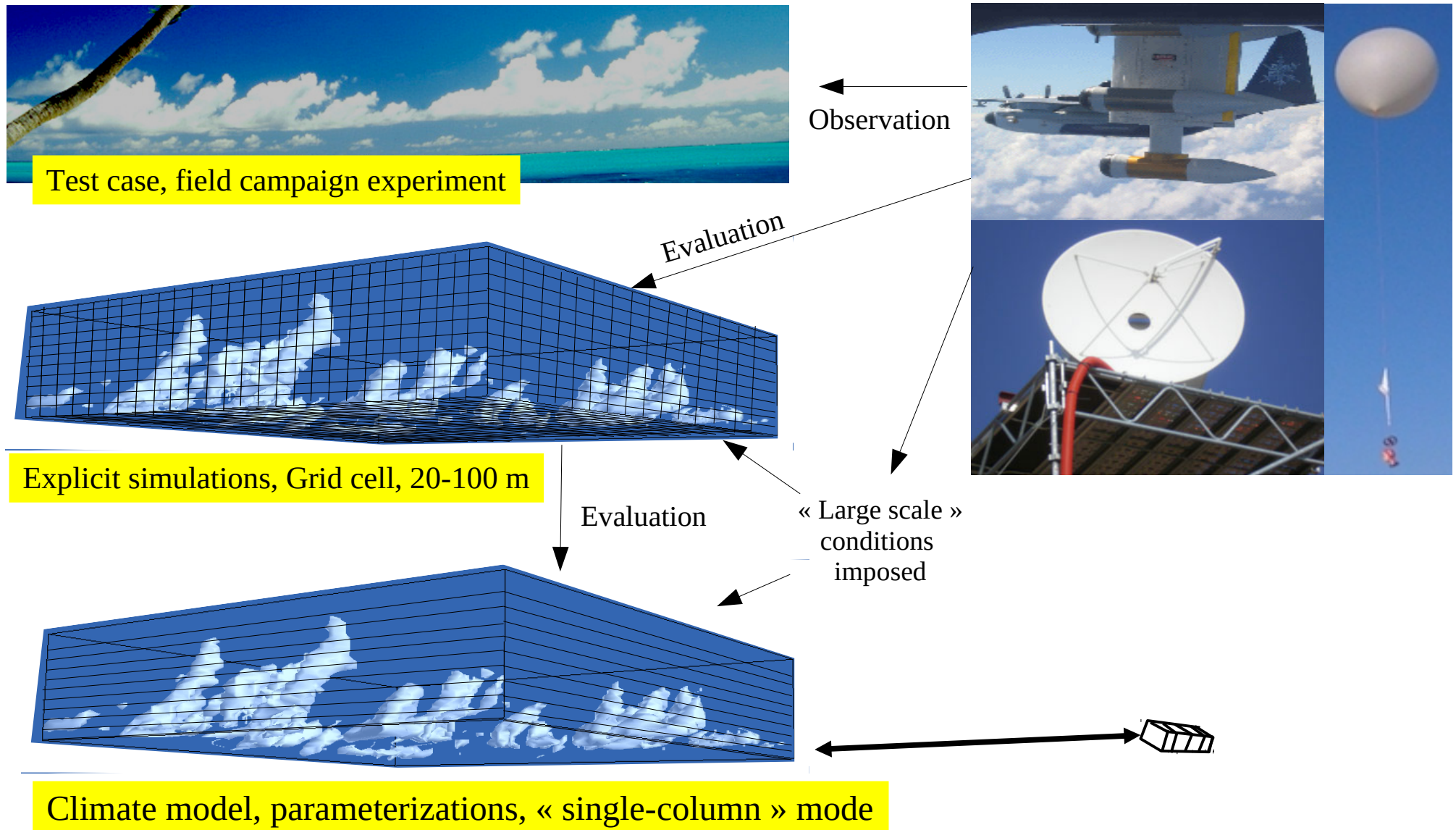
$$e = f \max(0, \frac{\beta_1}{1 + \beta_1} (a_1 \frac{B}{w^2} - b))$$

$$d = f \max(0, -\frac{a_1 \beta_1}{1 + \beta_1} \frac{B}{w^2} + c (\frac{q_a - q}{w^2})^d)$$

Etc ...

## 2. Couche limite convective

### 1.2 Cloud process studies and the use of high resolution explicit models

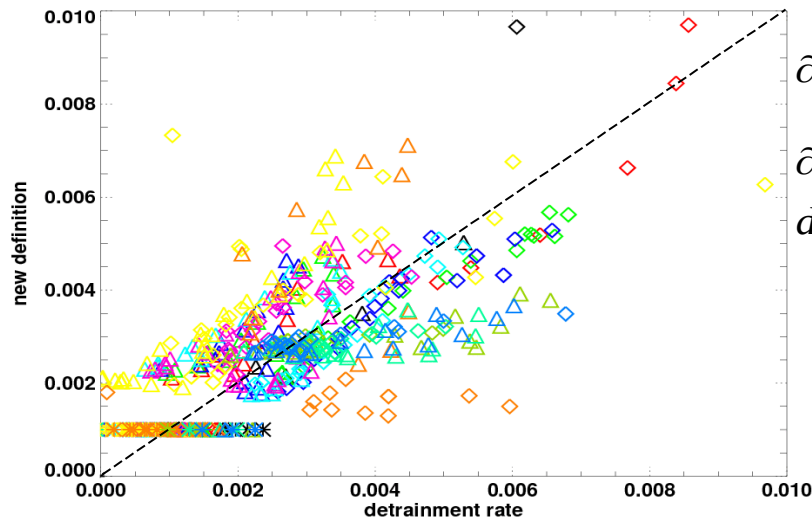


- **Parameterizations are evaluated against other models**
- **Can be done for realistic test cases but also with more idealized forcing (check the response of the parameterization to perturbations)**



# Towards a more physical definition for $\varepsilon / \delta$ : LES

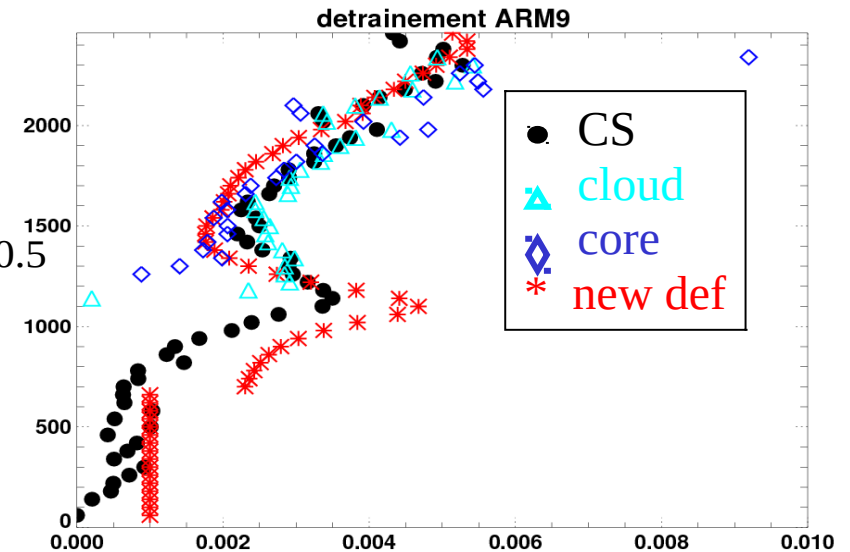
(Couvreur and Rio to be submitted)



$$\partial = \max(\partial_1, d_1 - d_2 \frac{\gamma}{w_u^2})$$

$$\partial_1 = 0.001 \text{ ou } 0.003$$

$$d_1 = 0.001 \text{ ou } 0.003; d_2 = 0.5$$



(Yves Bouteloup)

Équation de la vitesse verticale :

Schéma des thermiques

$$\frac{1}{2} \frac{\partial w_u^2}{\partial z} = a_1 B_u - (b + \varepsilon) w_u^2$$

EDKF

$$\left( \frac{1}{2} \frac{\partial w_u^2}{\partial z} = a_1 B_u - \varepsilon w_u^2 \right)$$

Entraînement :

$$\varepsilon = \max \left( 0, \frac{\beta_1}{1 + \beta_1} \left( a_1 \frac{B_u}{w_u^2} - b \right) \right)$$

$$\left( \varepsilon_{dry} = \max \left( 0, C_\varepsilon \frac{B_u}{w_u^2} \right) \right)$$

Détrainement :

$$\delta = \max \left( 0, - \frac{a_1 \beta_1}{1 + \beta_1} \frac{B_u}{w_u^2} + c \left( \frac{\Delta r_t / r_t}{w_u^2} \right)^d \right)$$

$$\left( \delta_{dry} = \max \left( \frac{1}{L_{up} - z}, C_\delta \frac{B_u}{w_u^2} \right) \right)$$

## 2. Couche limite convective

### Représentation des nuages

$q$  : concentration en vapeur d'eau

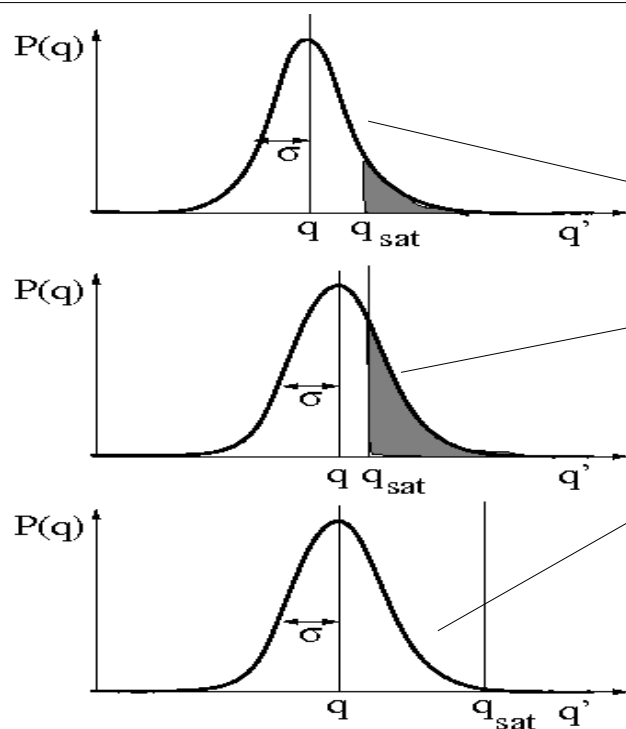
$q_{\text{sat}}$  : concentration maximum à saturation

Si  $q > q_{\text{sat}}$  :

→ la vapeur d'eau condense = nuage

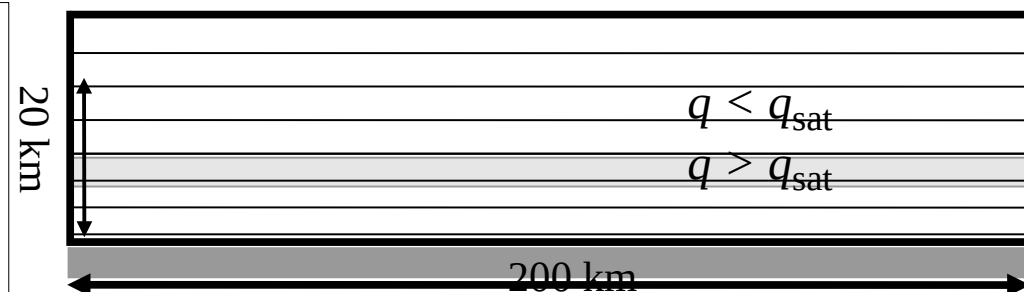
On connaît  $q$  et  $q_{\text{sat}}$  à l'échelle de la maille

→ Fraction de la maille couverte de nuages ?



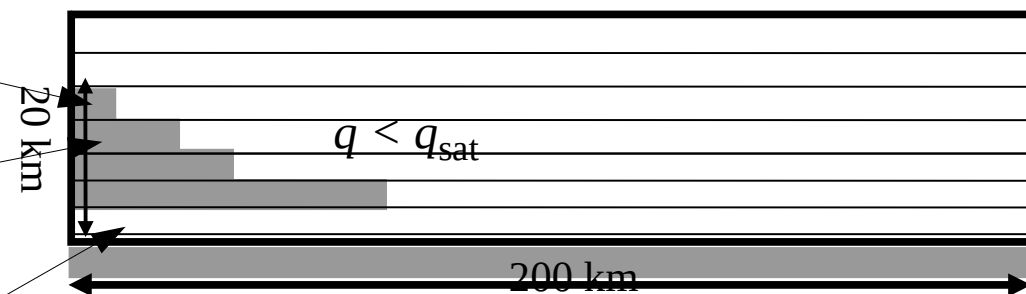
### Modèle « tout ou rien » :

Si  $q > q_{\text{sat}}$  maille nuageuse, sinon ciel clair.



### Modèle « statistique » :

On suppose une distribution statistique de  $q'$  dans la maille autour de  $q$



Intervient dans **Q**

→ condensation

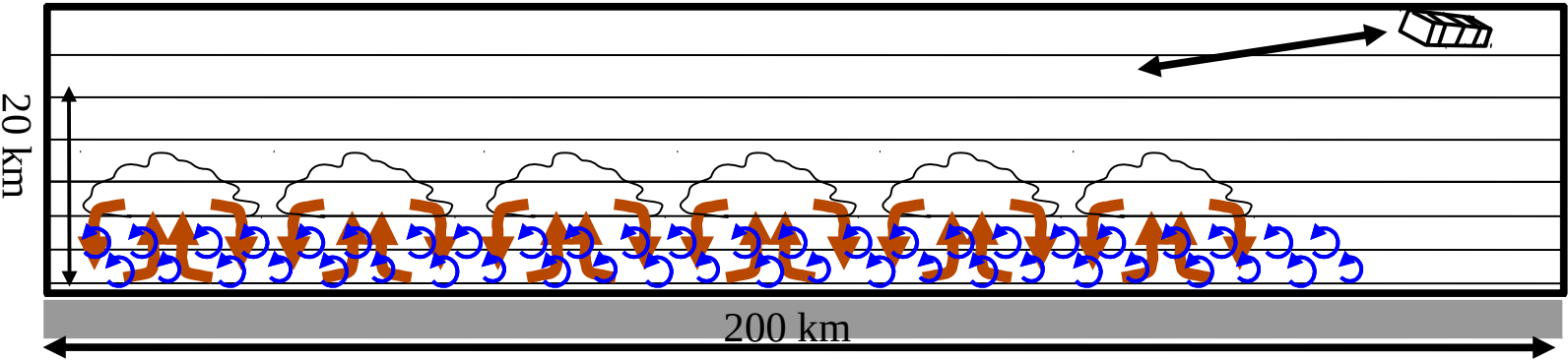
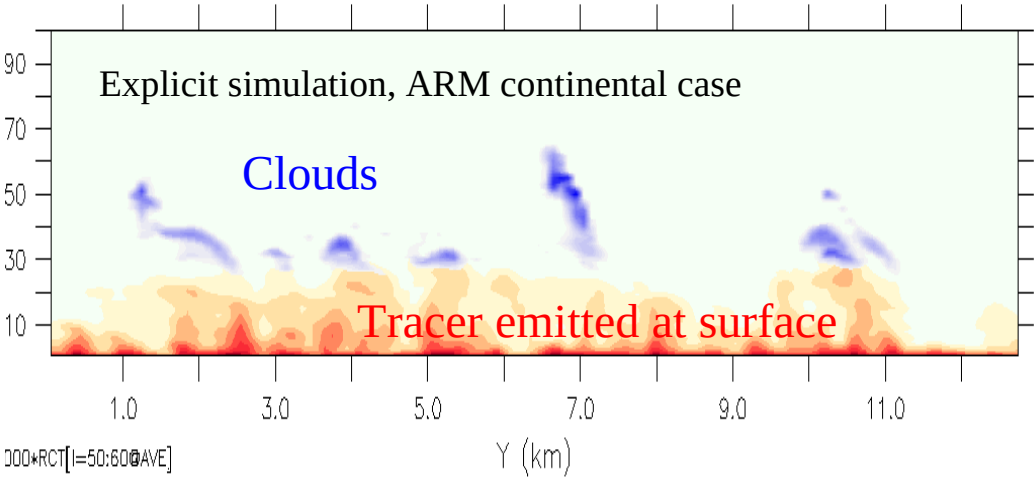
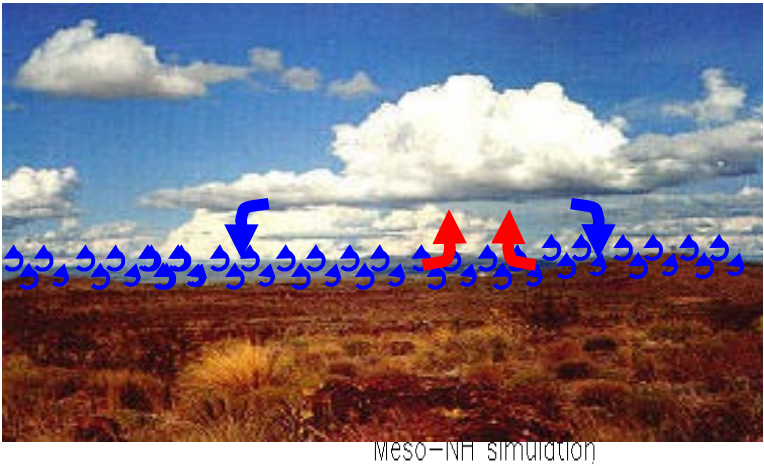
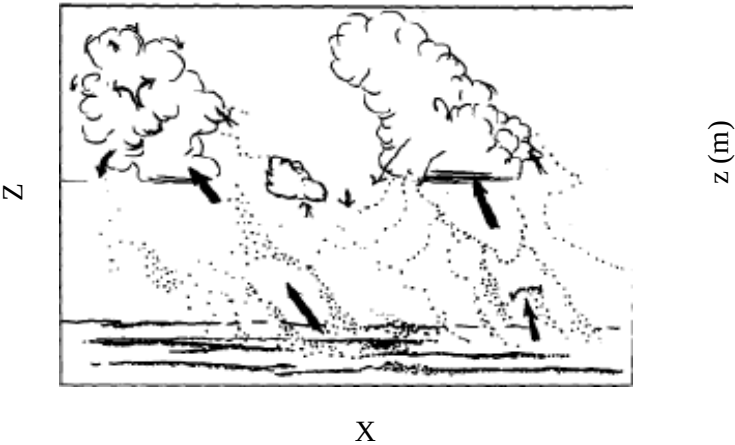
→ prise en compte des nuages dans le code radiatifs

Paramétrisation simple : gaussienne  $\sigma / q = 20\%$

2. Couche limite convective

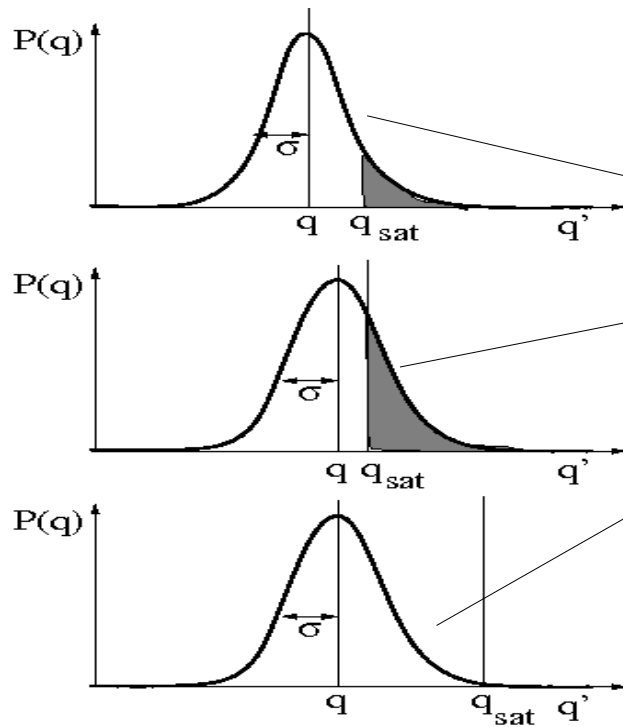
Thermal plumes and clouds

LeMone and Pennell, MWR, 1976



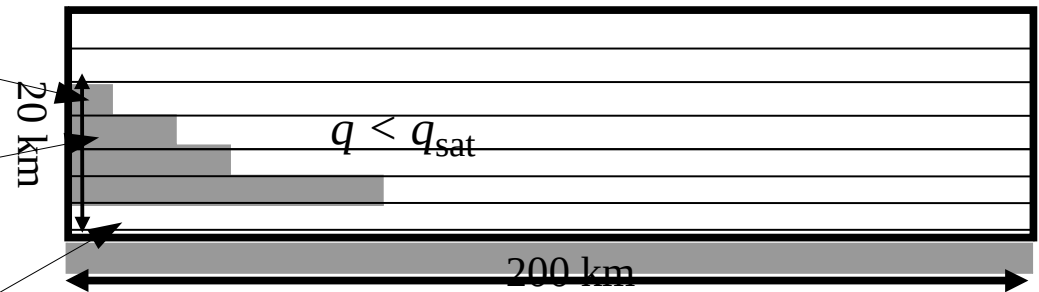


## 2. Couche limite convective

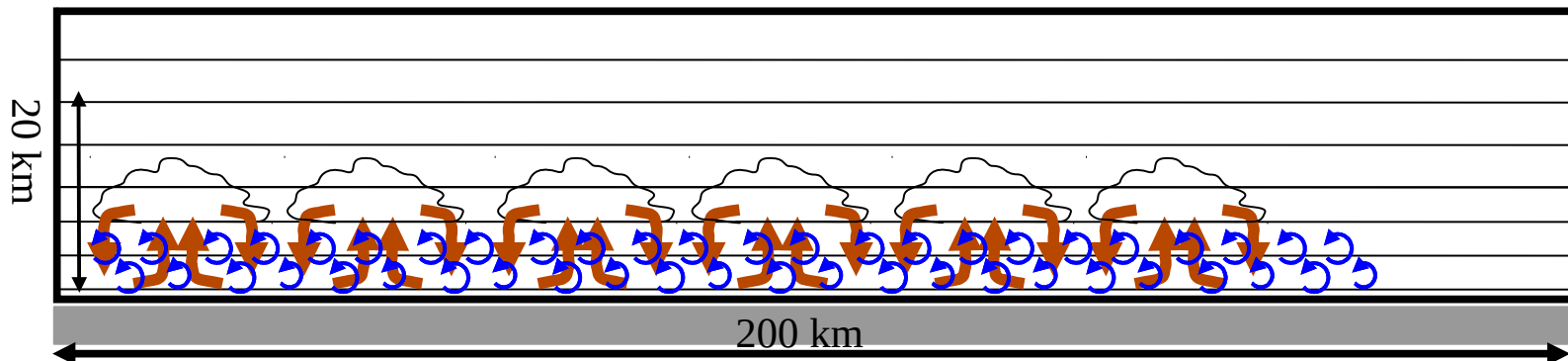


### Modèle « statistique » :

On suppose une distribution statistique de  $q'$  dans la maille autour de  $q$



Paramétrisation simple : gaussienne  $\sigma / q = 20\%$



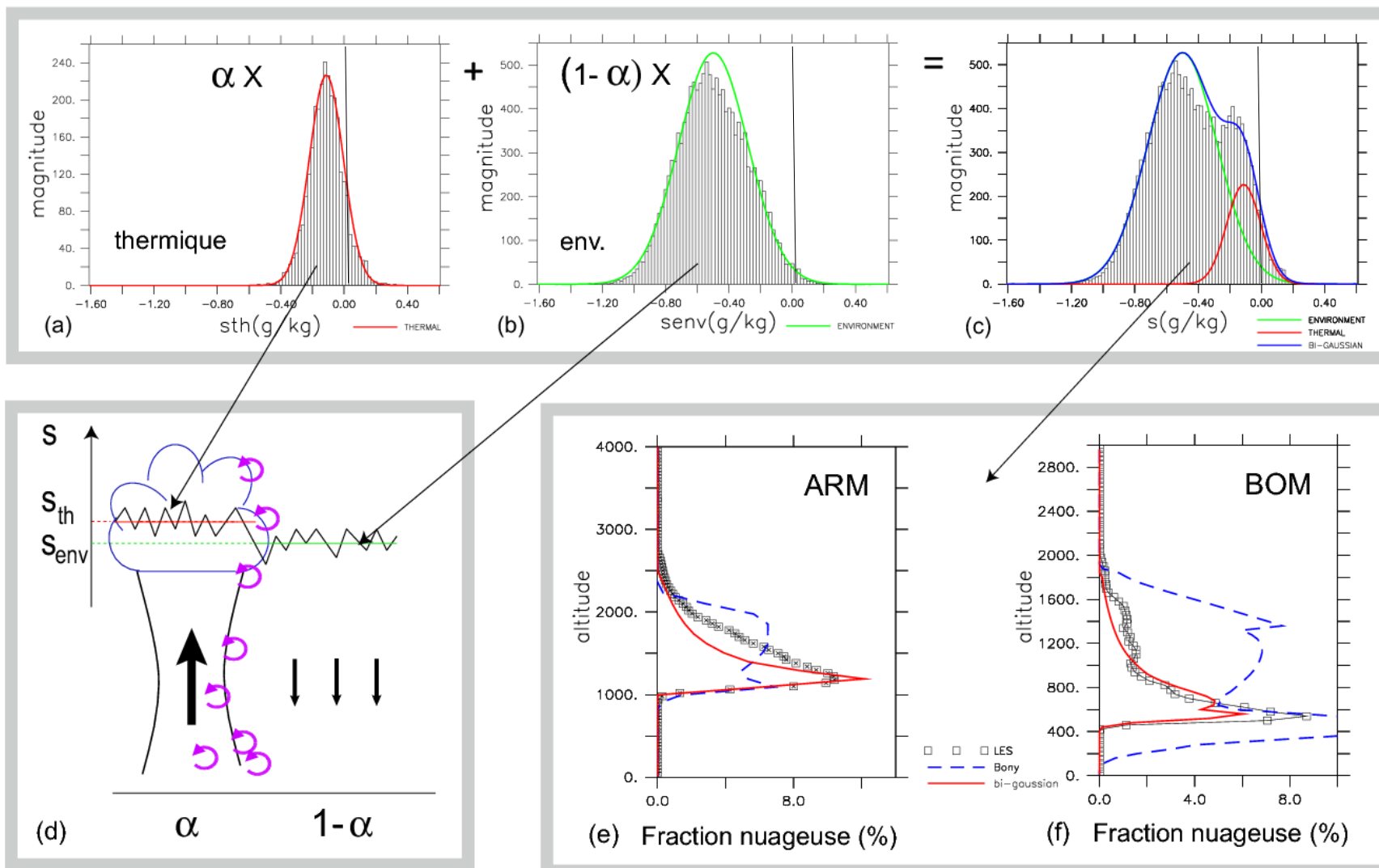
## 2. Couche limite convective

### Nouvelle paramétrisation de nuages couplée aux thermiques :

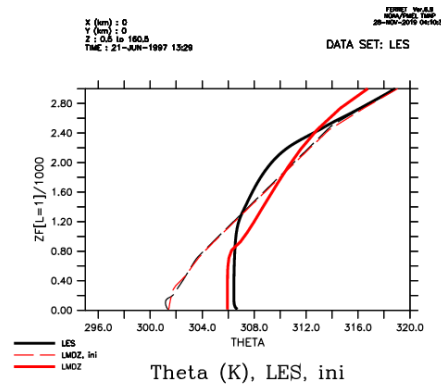
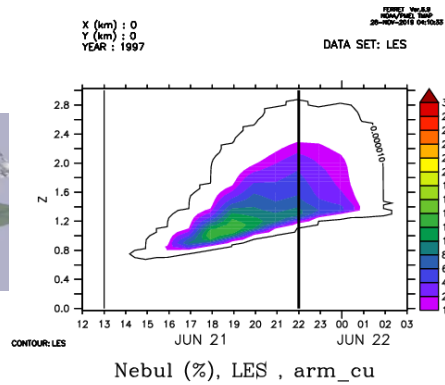
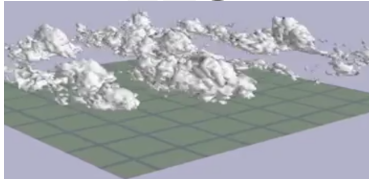
Utilisation d'une PDF bi-gaussienne pour la distribution d'eau totale sous nuageuse

Une gaussienne pour les panaches thermiques et une pour l'environnement

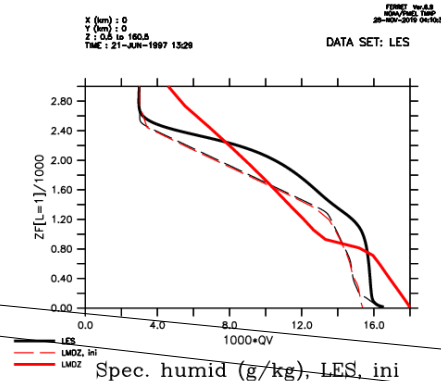
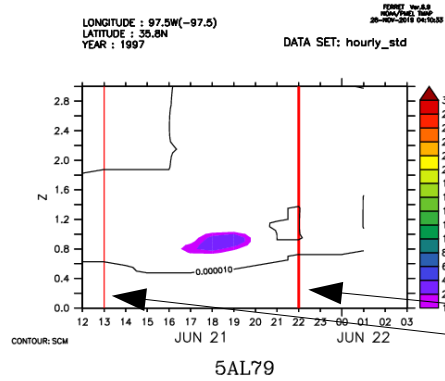
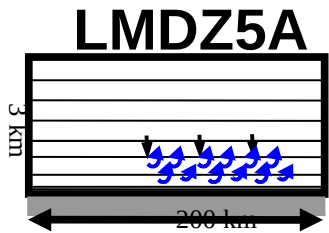
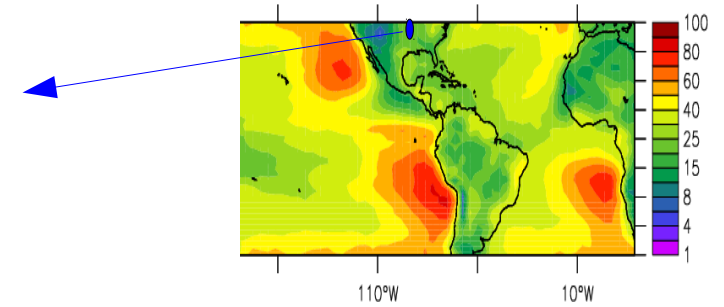
Comparaison des distributions prédites par ce schéma avec les distributions des LES



# LES



# Cas ARM cumulus

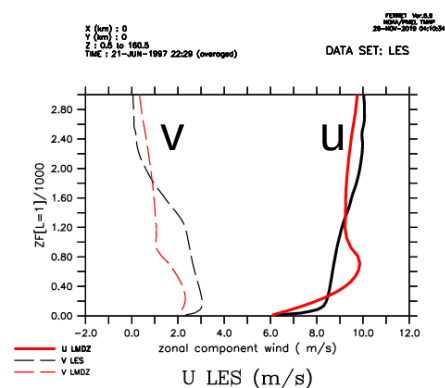
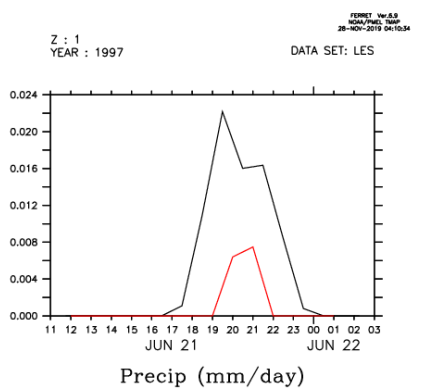
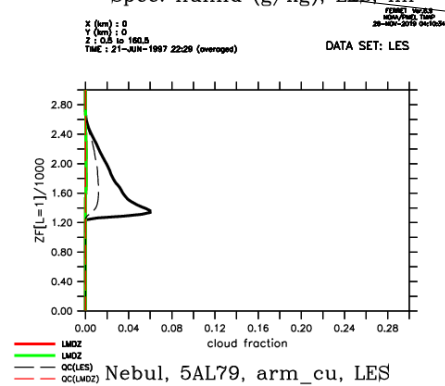
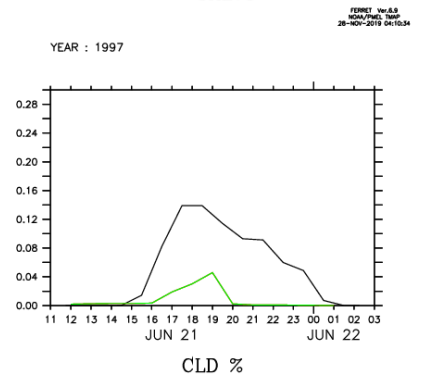


— LES

— LES

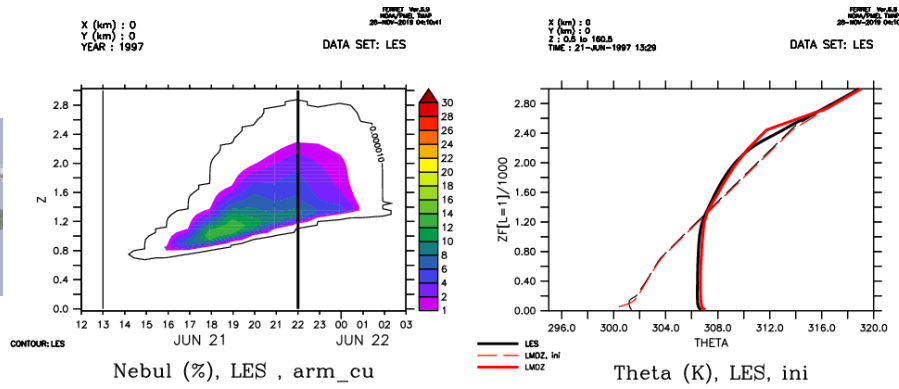
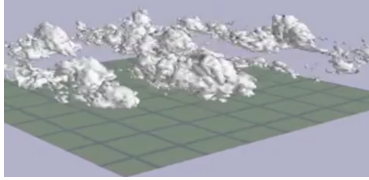
— Milieu d'après midi

- - - Début de la simulation

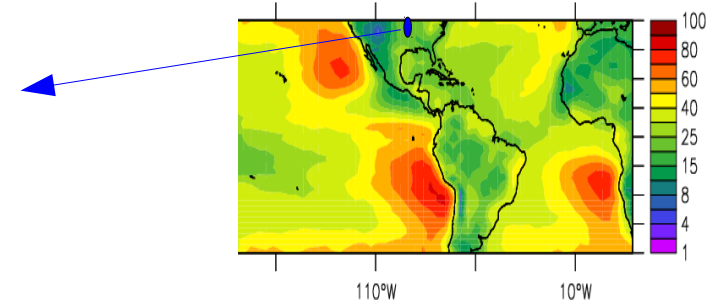




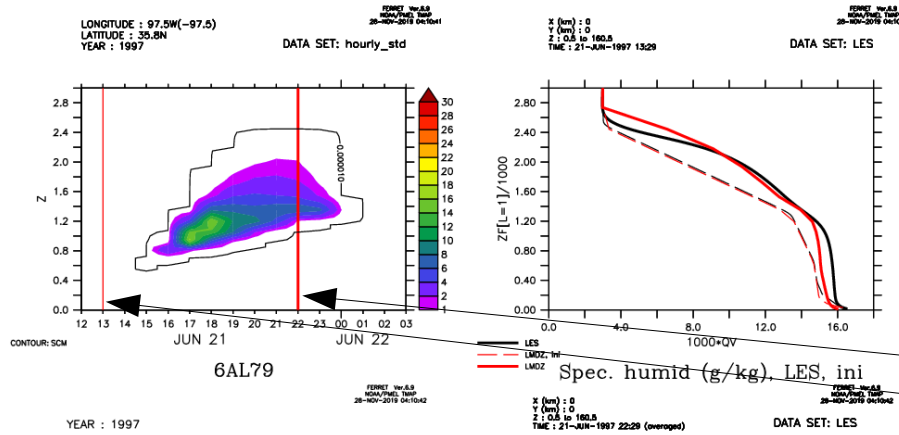
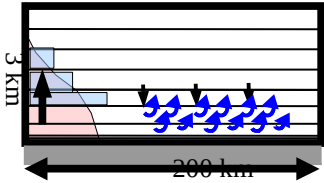
# LES



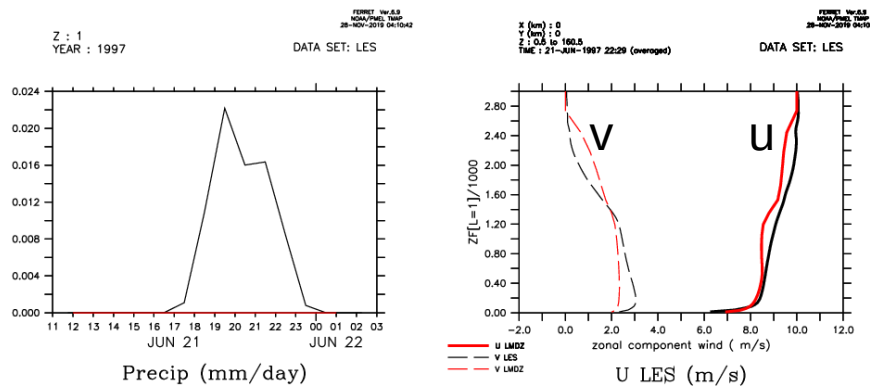
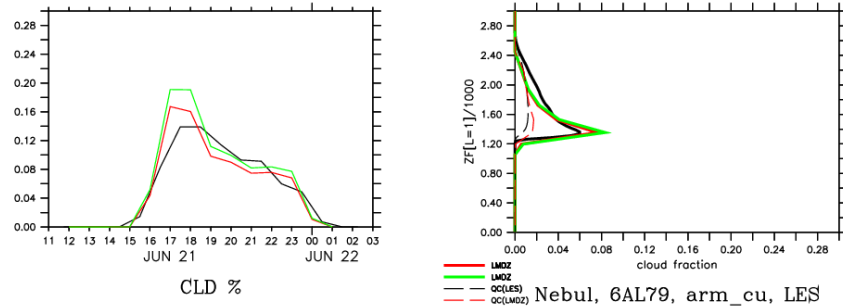
# Cas ARM cumulus

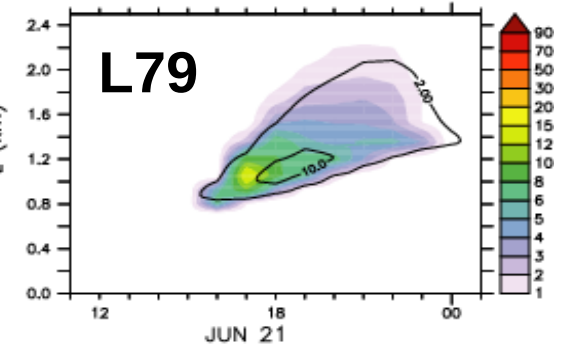
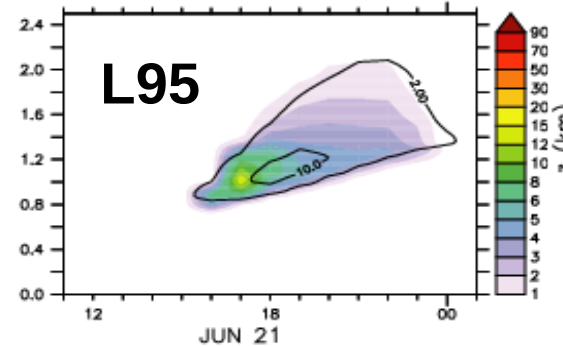
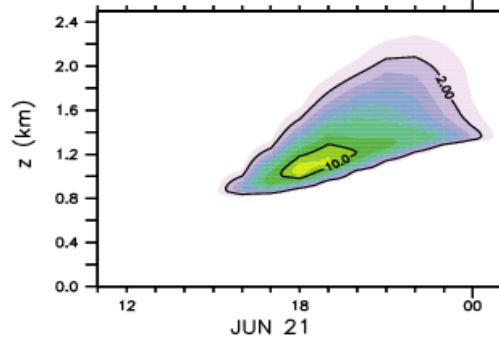
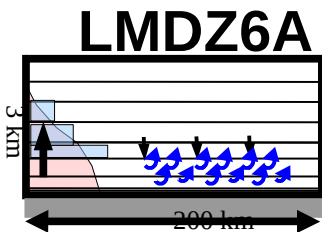
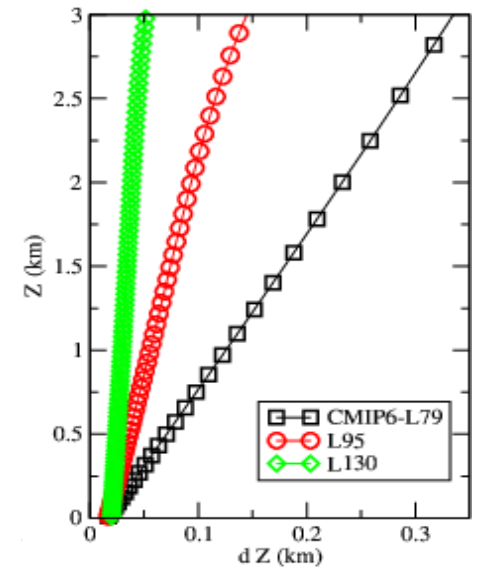
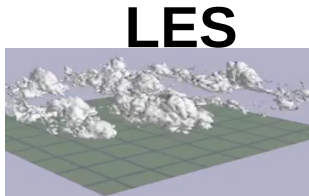
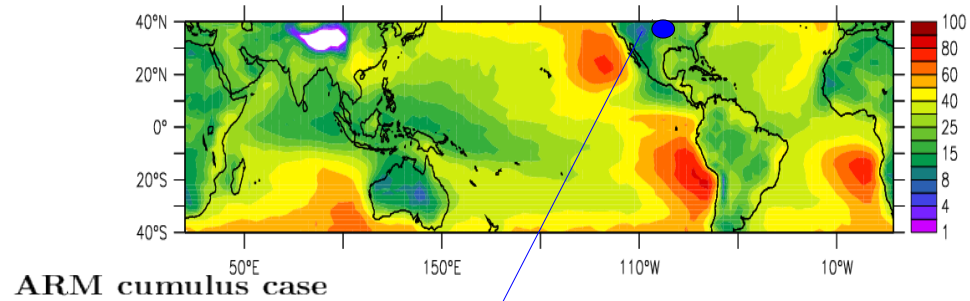


# LMDZ6A



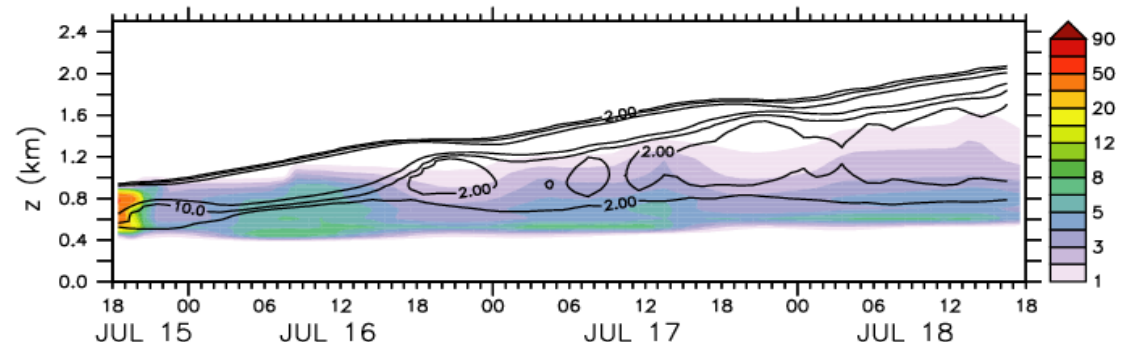
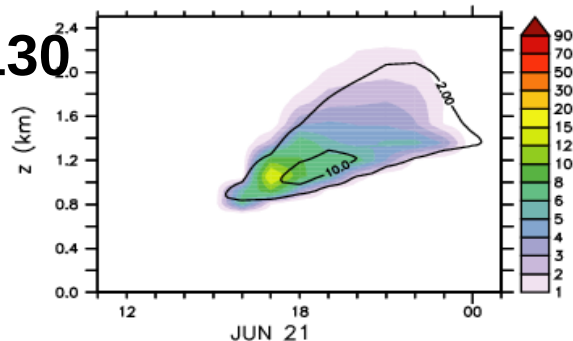
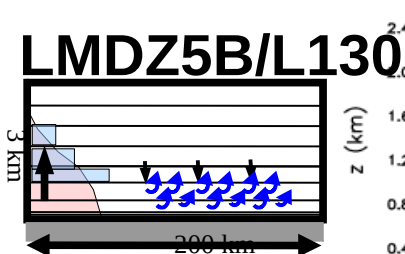
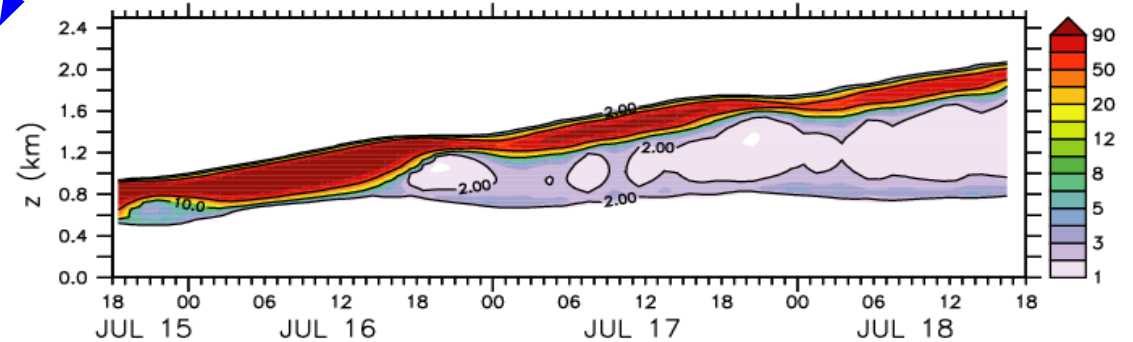
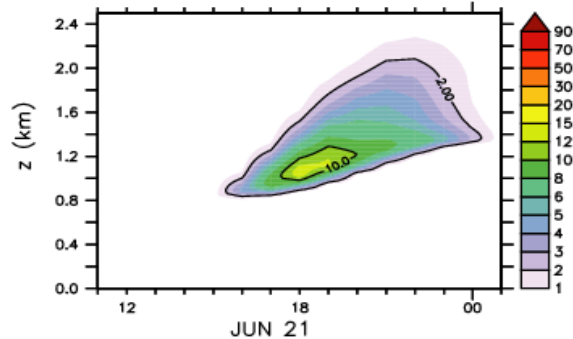
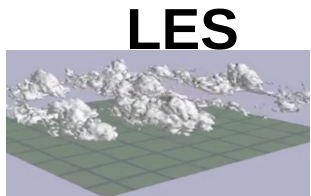
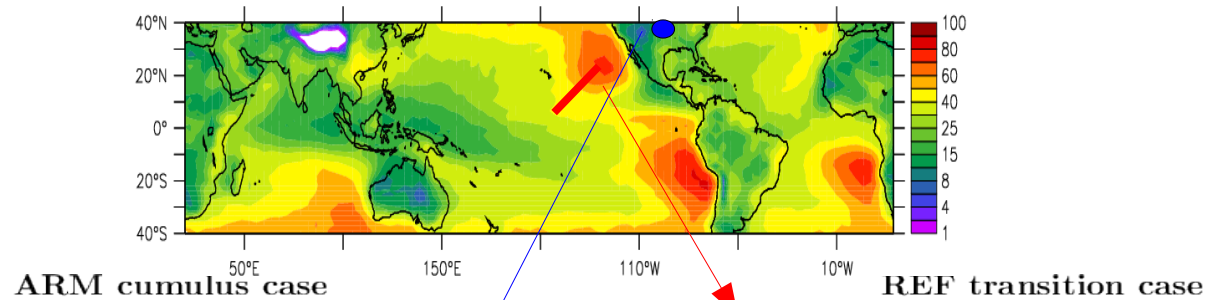
— LES  
 — LES  
 — Milieu d'après midi  
 - - - Début de la simulation





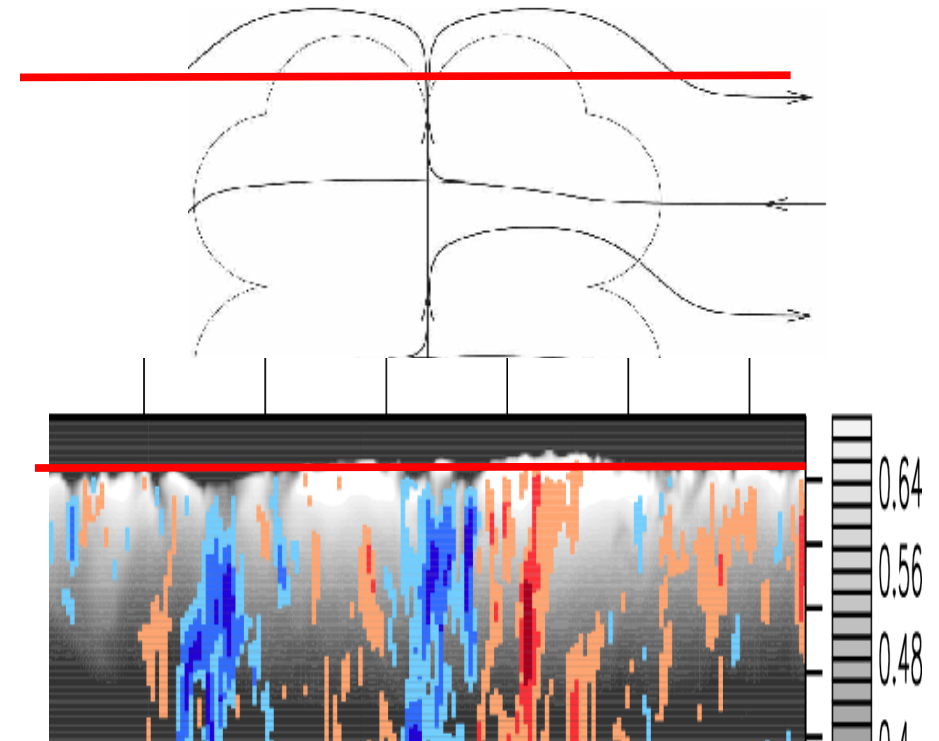
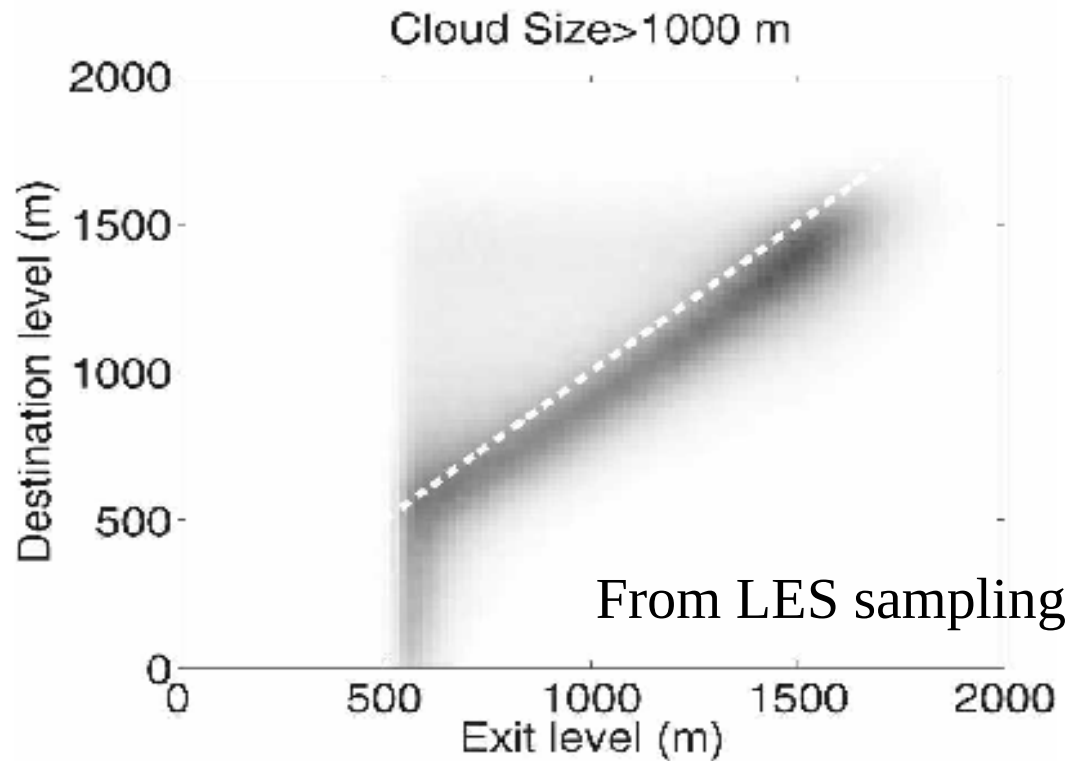
SCM/LES comparison, LMDZ5B version = thermal plume model with bigaussian distribution

→ Reasonable representation of cumulus clouds



SCM/LES comparison, LMDZ5B version = thermal plume model with bigaussian distribution

- Reasonable representation of cumulus clouds
- But not the stratocumulus clouds nor the transition from cumulus to stratocumulus



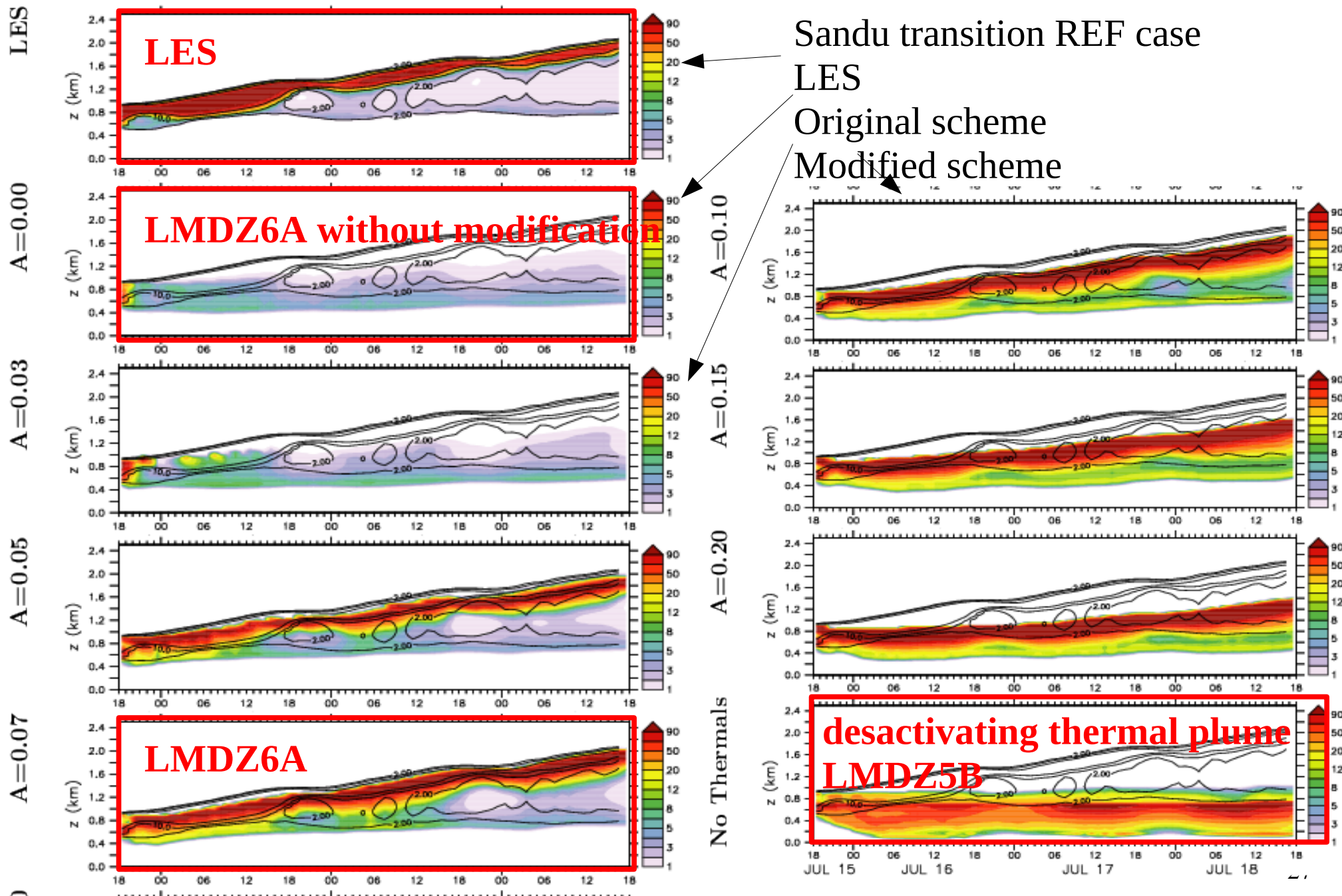
**Fig 14c : Destination level versus exit level**

→ **Modified detrainment**  $d = f \max(0, -\frac{a_1 \beta_1}{1 + \beta_1} \frac{\mathbf{B}^*}{w^2} + c(\frac{(q_a - \mathbf{q})}{q_a})d)$

$$\mathbf{B}^*(z) = g \frac{\theta_{v.th}(z) - \theta_{v.env}(z + \mathbf{h})}{\theta_v(z)}$$

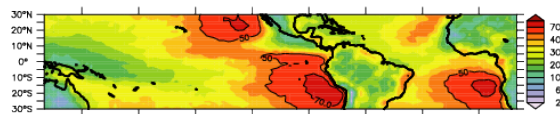
**Destination level : z**  
**Exit level : z+h with  $\mathbf{h} = \mathbf{A} z$**





Does not affect too much the cumulus cases

Low cloud cover (%)  
Calipso

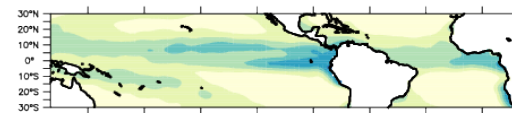


Model

Obs Calipso  
Nuages bas

Climato DaSilva  
RH 2m

Relative humidity observations (%)

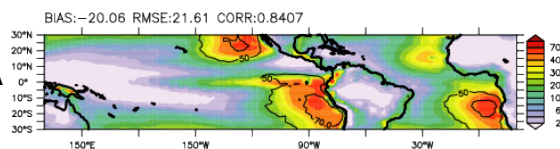


Model value

Model bias

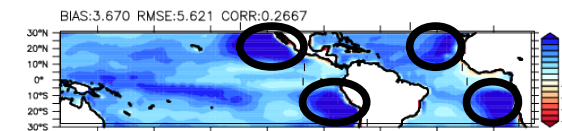
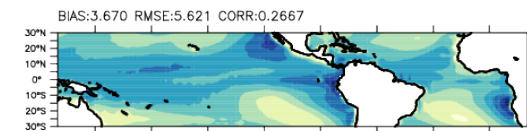
Biais

5A

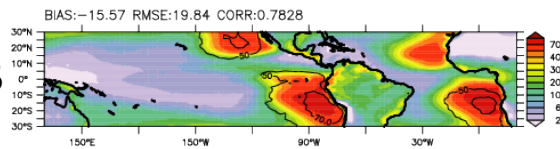


Diffusion turbulente

5A

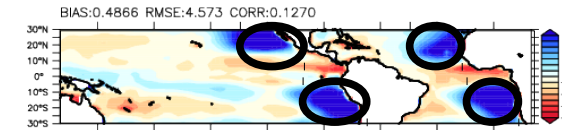
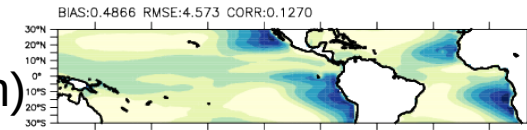


5B

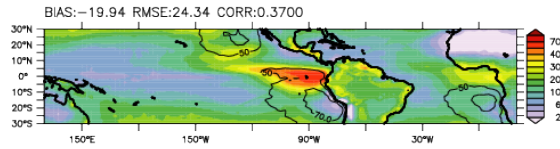


+ Thermiques  
(sauf forte inversion)

5B

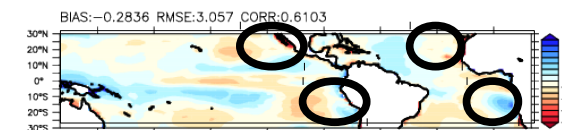
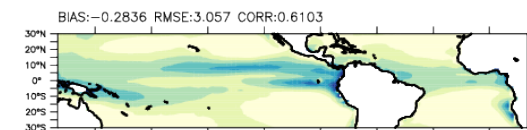


D00

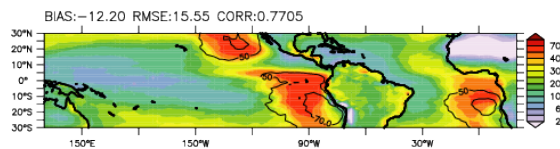


+ Thermiques  
partout D=0

D00

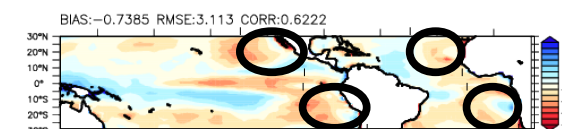
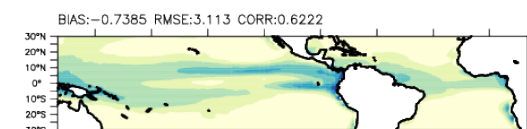


D05

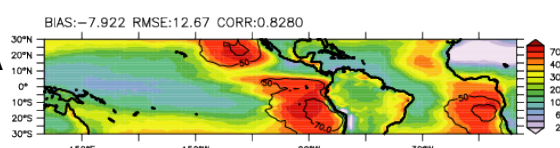


D=0.05

D05

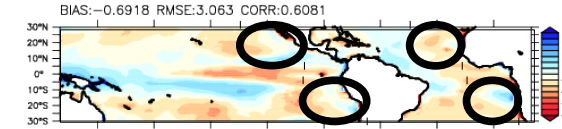
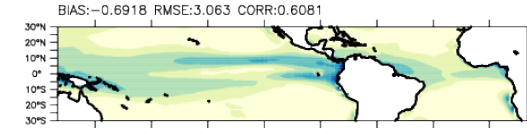


6A

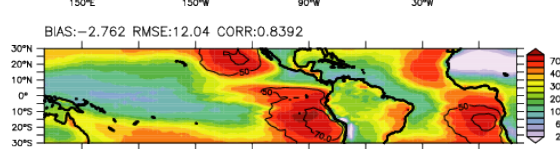


D=0.07

6A/D07

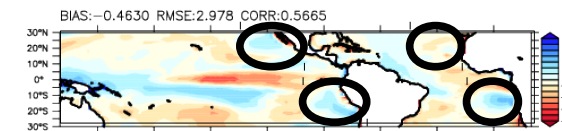
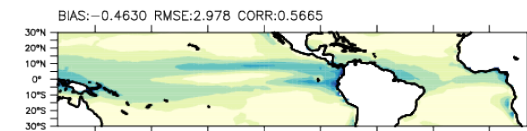


6A/D07

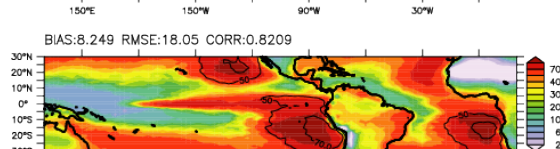


D=0.10

D10

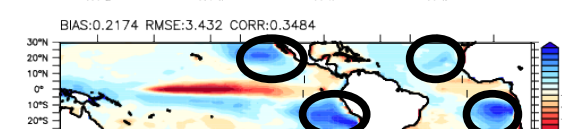
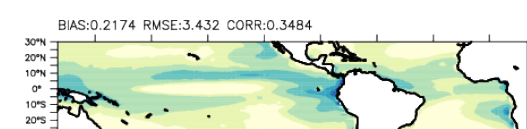


D10

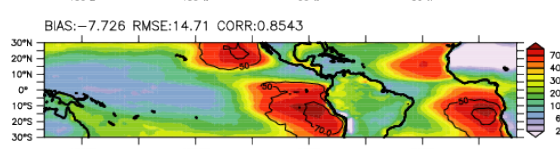


D=0.20

D20

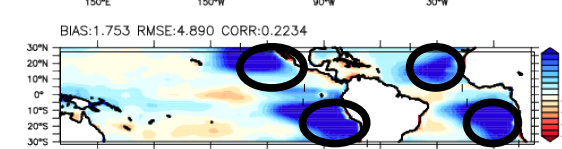
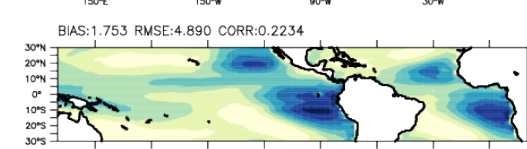


SWITCH



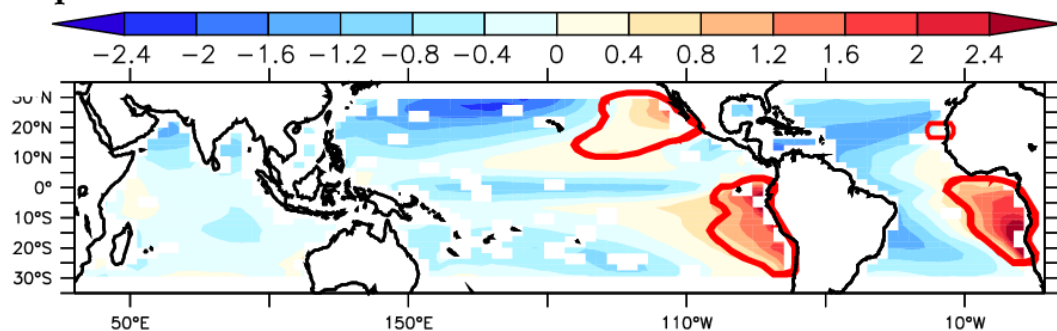
Thermiques  
désactivés si  
Forte inversion  
(come 5B)

SWITCH

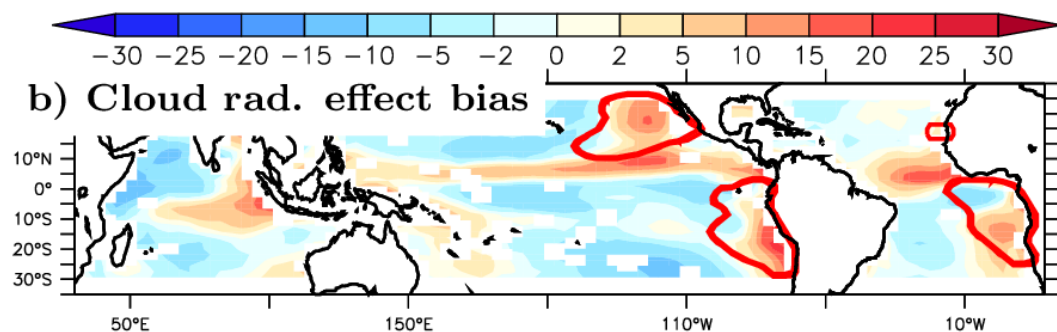




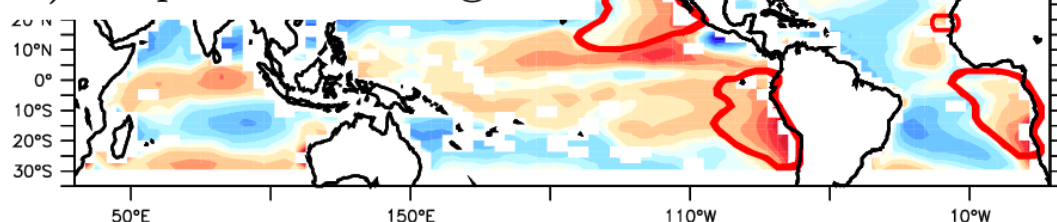
a) Surface temperature bias pattern (K),  
coupled simulations:



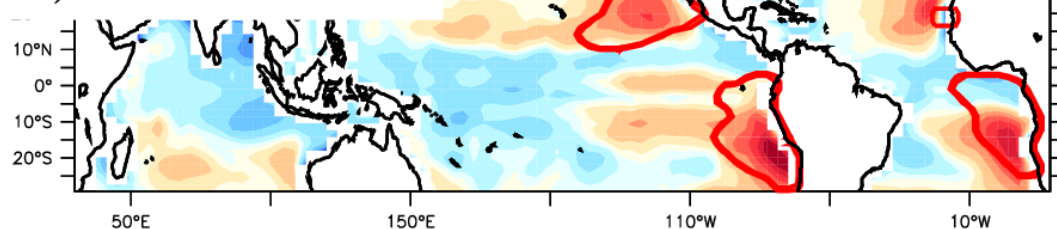
Heat flux bias pattern ( $\text{W/m}^2$ ), atmosphere-alone:



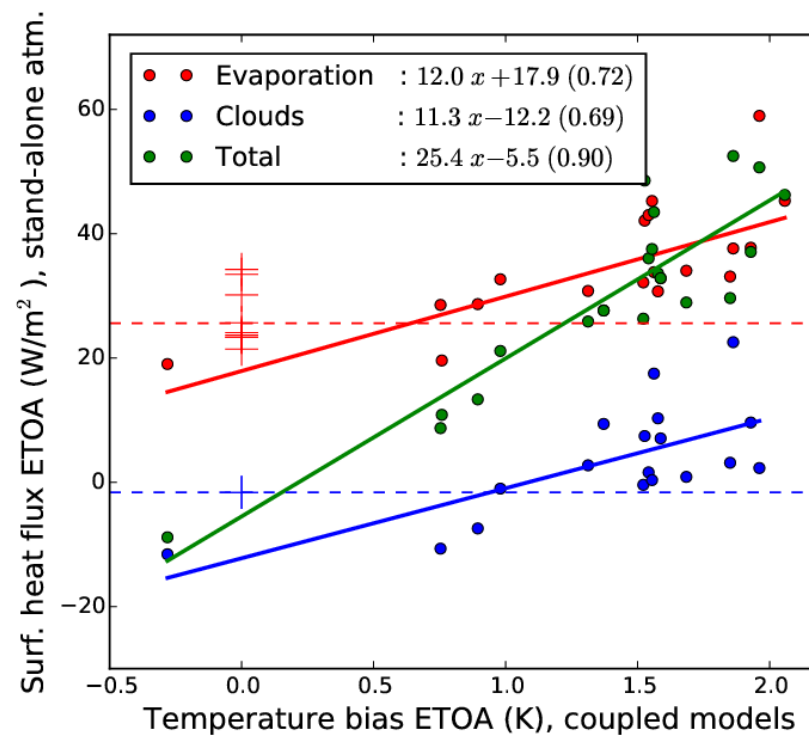
c) Evaporative cooling bias



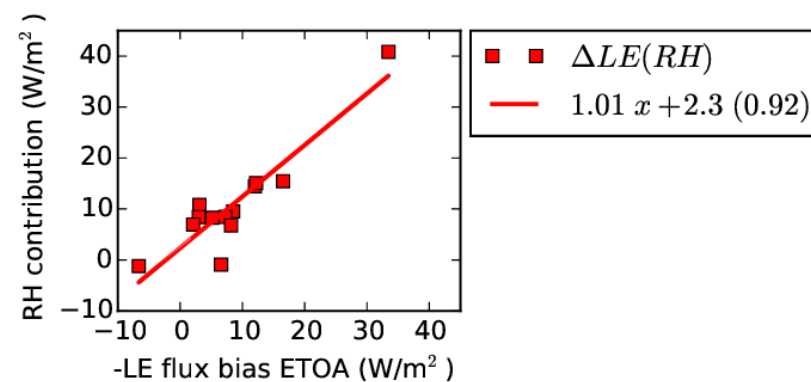
d) RH induced bias



e) Heat flux/temperature ETOA relationship



f)  $-LE$  ETOA bias explained by RH



## 2. Couche limite convective

| Modèle                                                                     | LMDZ5NP / 6<br>Et Mars                         | ARPEGE-Climat<br>(AR5)       | ARPEGE-Climat<br>(pre-AR6)                                                                 | ARPEGE-PNT                                                                                 | AROME/MesoNh                                                                            | MAR          |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Diffusion turbulente / TKE                                                 |                                                |                              |                                                                                            |                                                                                            |                                                                                         |              |
| Général                                                                    | TKE pronostiq.<br>Yamada 83                    | TKE d'eq.<br>Ricard-Royer 93 | TKE pronostiq.<br>Cuxart 2000                                                              | TKE pronostiq.<br>Cuxart 2000                                                              | TKE pronostiq.<br>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<br>Coare ou<br>Ecume /océans                                               | Louis/continent<br>Ecume/océans                                                            | Louis/continent<br>Ecume/océans +<br>Canopy                                             |              |
| TKE humide                                                                 | Non                                            | Oui                          | Oui+coupl conv                                                                             | Oui                                                                                        | Oui                                                                                     | Oui          |
| Spécifique<br>CL stables                                                   | Holtlag Boville<br>+Kz min                     |                              | TKE <sub>min</sub> =10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup><br>futur avec<br>TPE ? | TKE <sub>min</sub> =10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup><br>futur avec<br>TPE ? | TKE <sub>min</sub> =10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup><br>futur avec TPE ? | Duynkerke 88 |
| Autre                                                                      |                                                |                              | L non locale                                                                               |                                                                                            |                                                                                         |              |
| Traitements spécifiques couche limite convective / Convection peu profonde |                                                |                              |                                                                                            |                                                                                            |                                                                                         |              |
| Général                                                                    | Modèle du<br>thermique<br>Hourdin, Rio ...     | Non                          | PCMT (Pirou,<br>Gueremy)                                                                   | Bechtold 2000 +<br>TKE_in trigger<br>Futur : PMMC09                                        | PMMC09                                                                                  |              |
| Stabilité                                                                  | Adv amont<br>Implicite<br>dt=10m               |                              | dt =15 mn                                                                                  | dt=10min                                                                                   | dt=60s                                                                                  |              |
| Couplage avec<br>la TKE                                                    | Indirect via la<br>modification<br>des profils |                              | Non                                                                                        | Prod.<br>Thermique pour<br>TKE + mod Lm                                                    | Prod thermique<br>pour TKE                                                              |              |
| Couplage<br>nuages                                                         | Bi-gaussienne<br>couplée (Jam)                 |                              | Pdf mixte<br>Bougeault<br>Nébul convect =<br>f(frac convect)                               | Pdf Smith                                                                                  | Pdf mixte<br>Bougeault                                                                  |              |
| Autre                                                                      | Couplé convec :<br>(ALE/ALP)                   |                              |                                                                                            | Conv. Prof. Mod<br>Lm                                                                      |                                                                                         |              |
| Autres/Divers                                                              |                                                |                              |                                                                                            |                                                                                            |                                                                                         |              |



## Quelques idées à retenir

Plus de la moitié du flux en milieu de couche limite est expliqué par les structures kilométriques.

→ **rompre avec les formulations en diffusion pour des mailles  $> 200\text{m}$**

L'approche combinant diffusion turbulente et flux de masse pour les structures cohérentes est aujourd'hui partagée par LMDZ/MesoNH/Arpege/Arome (coordination des développements dans le cadre du projet national Dephy)

Alternative : fermeture avec moment d'ordre 3, avec fit de distributions asymétriques (GFDL)

Processus rapides et paramétrisations facilement instables numériquement.

A des résolutions de quelques km, on est dans la zone la plus énergétique de la couche limite convective. cf. étude sur la « zone grise » de la couche limite convective, Rachelle Honnert, Valery Masson, Fleur Couvreur

Importance pour le transport vertical de moment, de température et d'humidité, et les nuages.

L'introduction d'une paramétrisation des thermiques assèche et réchauffe la surface, accélère les vents et améliore la représentation des nuages de couche limite.

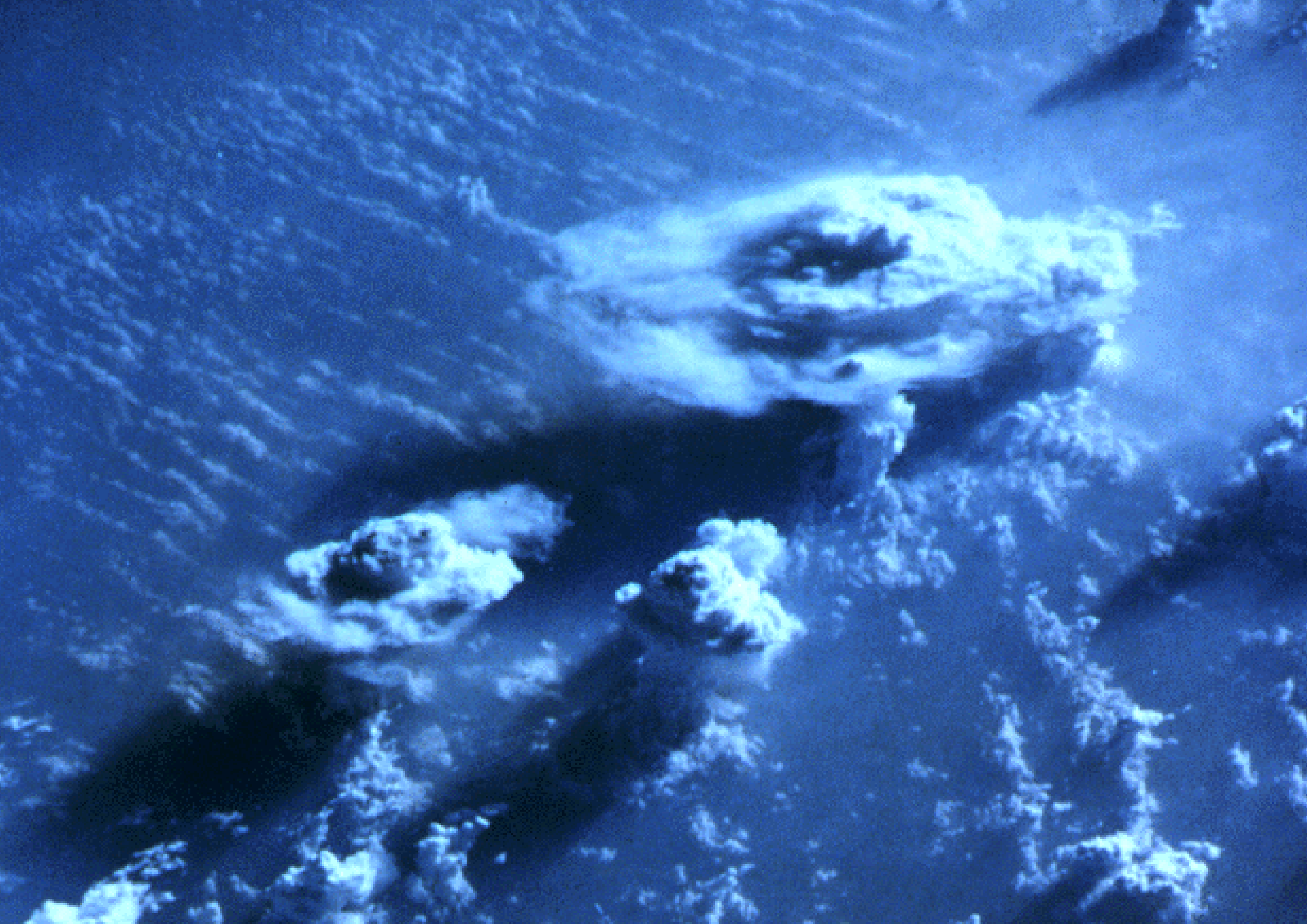
Les LES sont des outils pertinents pour tester les idées et modèles dans ce domaine. Bien pour la dynamique des tourbillons. Encore très dispersés pour les nuages.

Approche équivalentes en cours de test dans l'Océan (NEMO, Giordani)

# Les paramétrisations des modèles de climat

## I. Modélisation du transport non résolu

1. Décomposition de Reynolds et fermetures en diffusion turbulente
2. Couche limite convective
3. Convection profonde

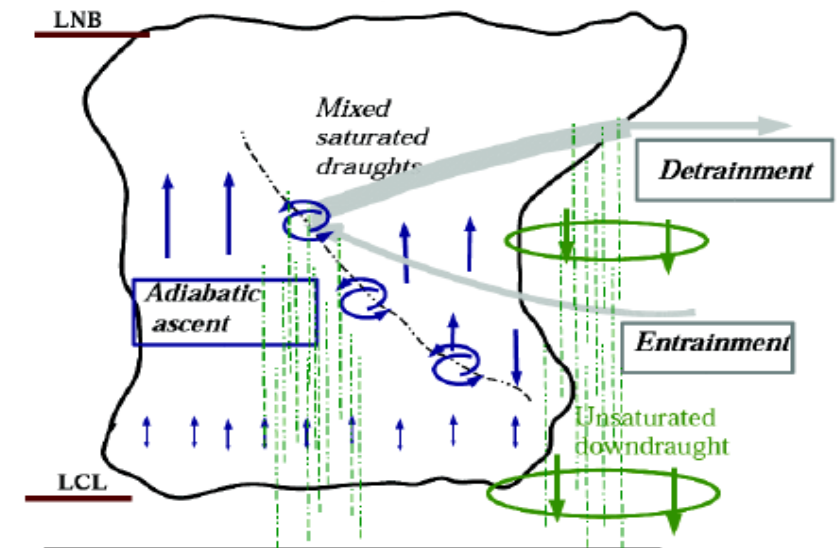
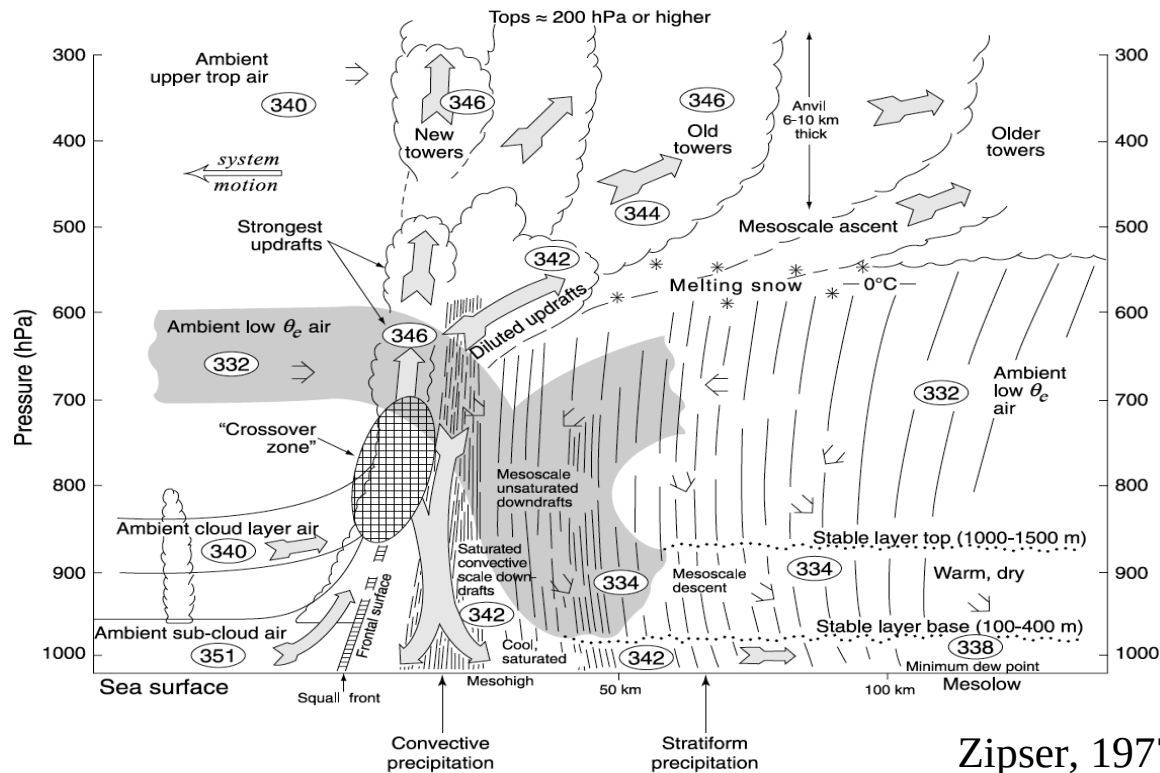


### 3. La convection profonde

#### Spécificités de la convection profonde

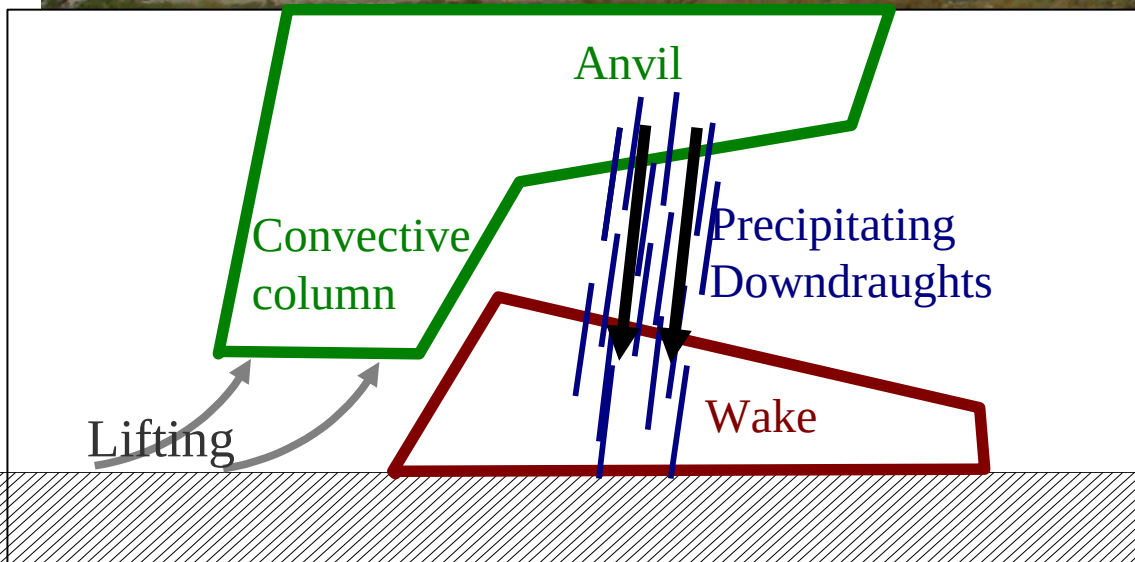
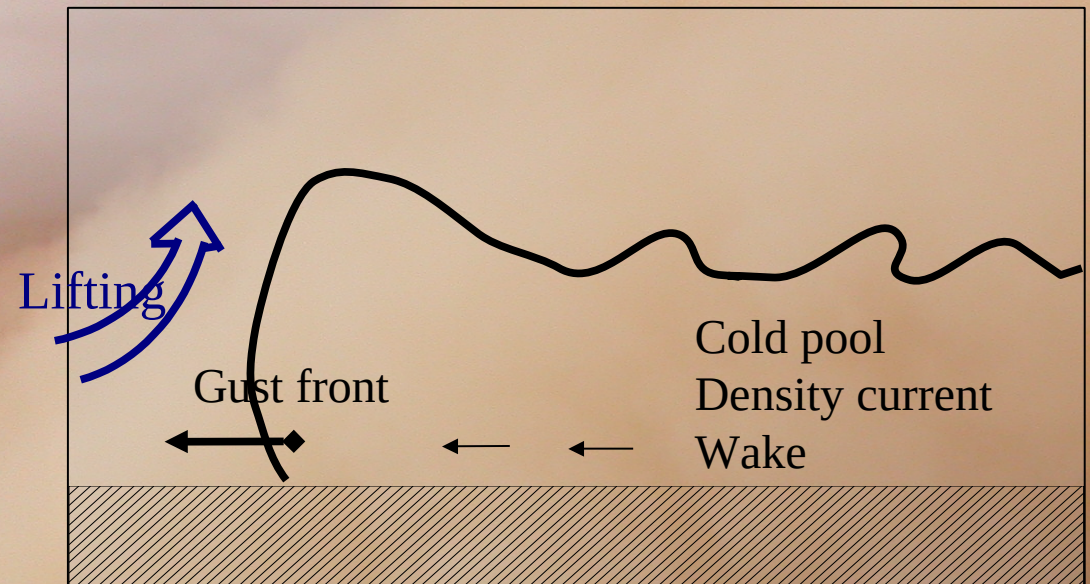
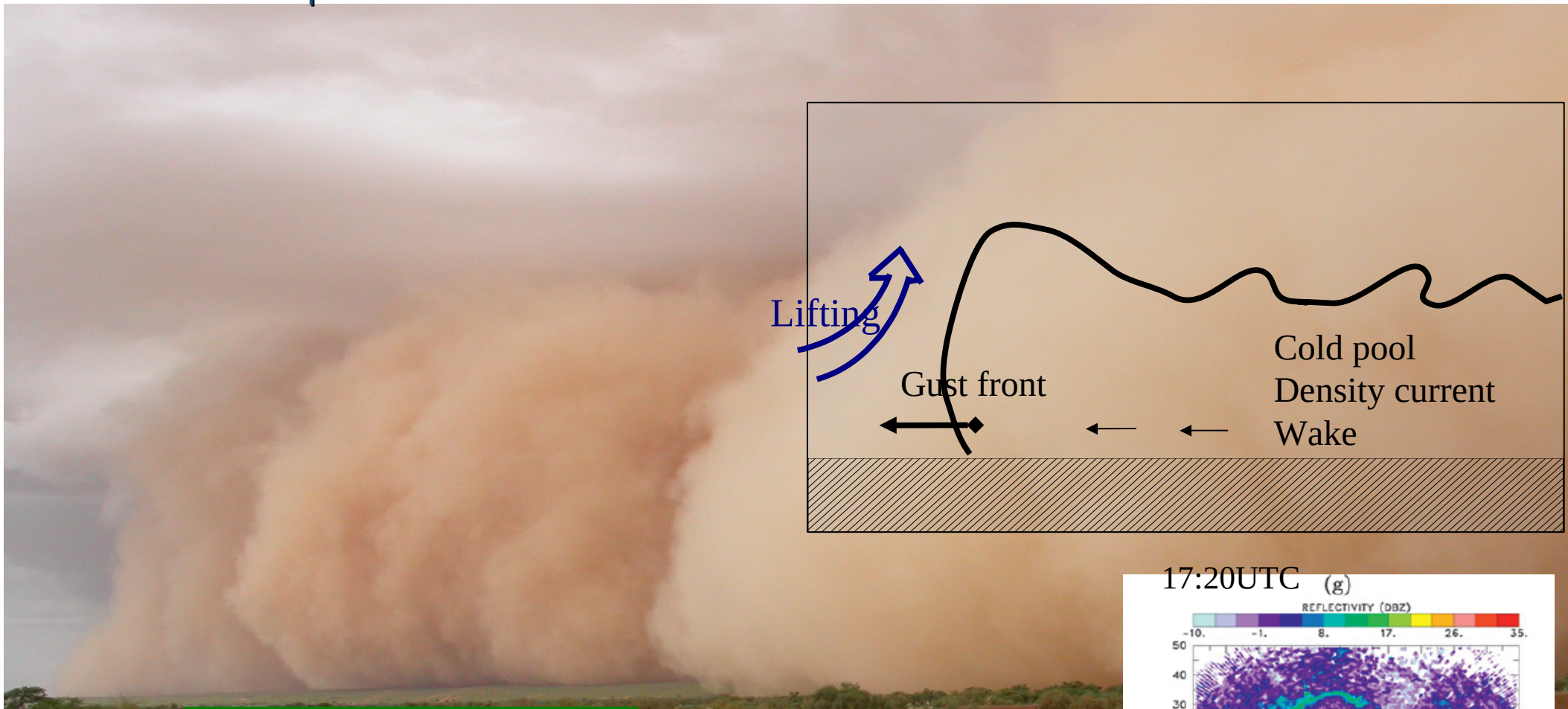
- Profonde (typiquement jusqu'à la tropopause)
- Instabilité conditionnelle → Processus de déclenchement (triggering)
- Importance de la microphysique. La pluie joue un rôle déterminant.
- Importance de l'organisation méso-échelle (formes variées)

Conceptual model of convection highlighted by field campaigns

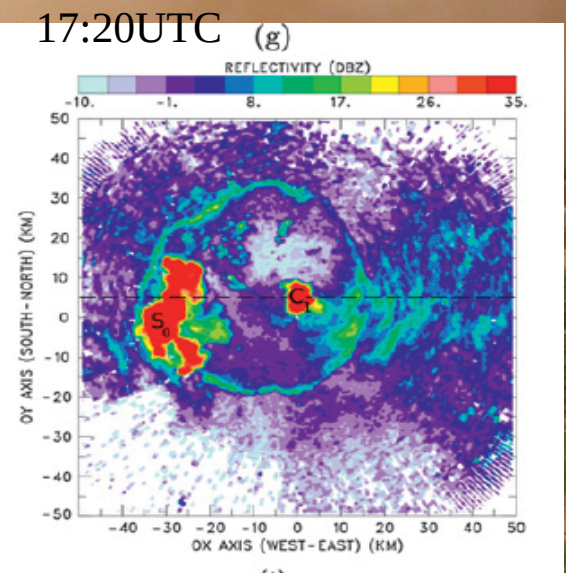




### 3. La convection profonde



Radar :  
Coupe  
horizontale  
à 600m  
Poches froides  
Autour de Niamey  
10 Jul 2006



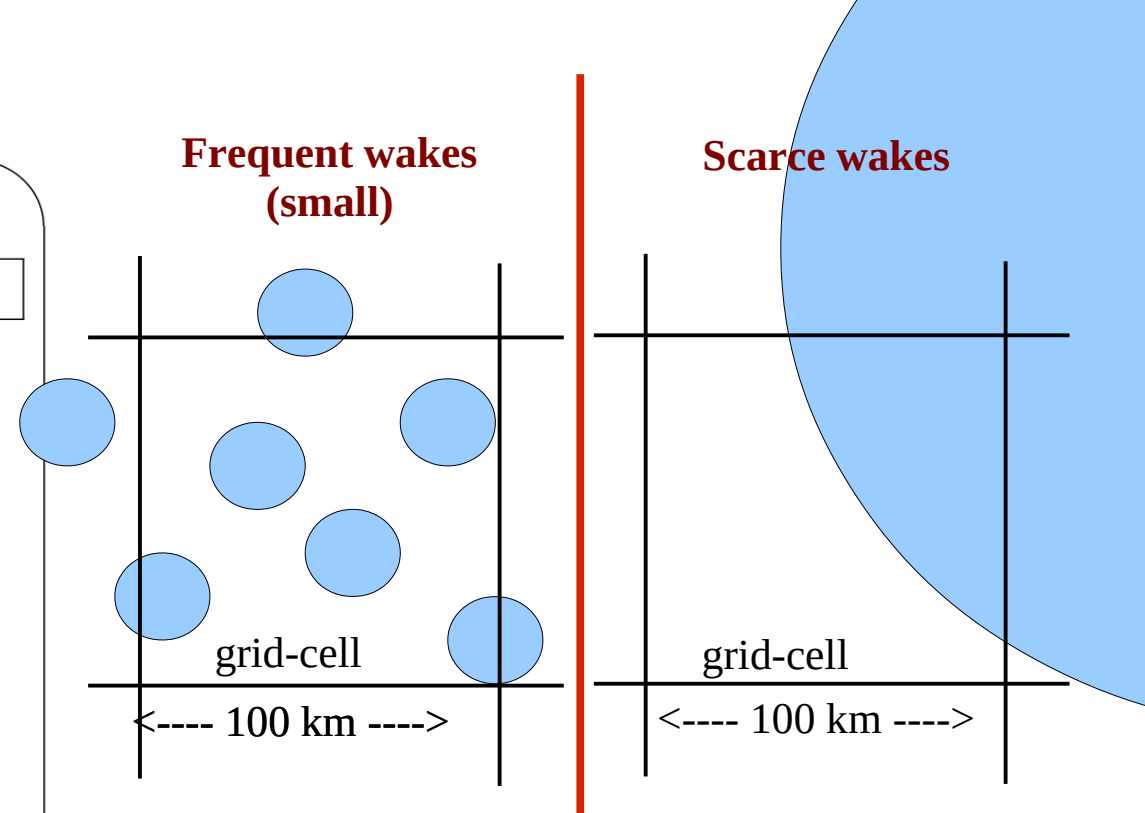
Mali, August 2004  
F. Guichard, L. Kergoat

### 3. La convection profonde

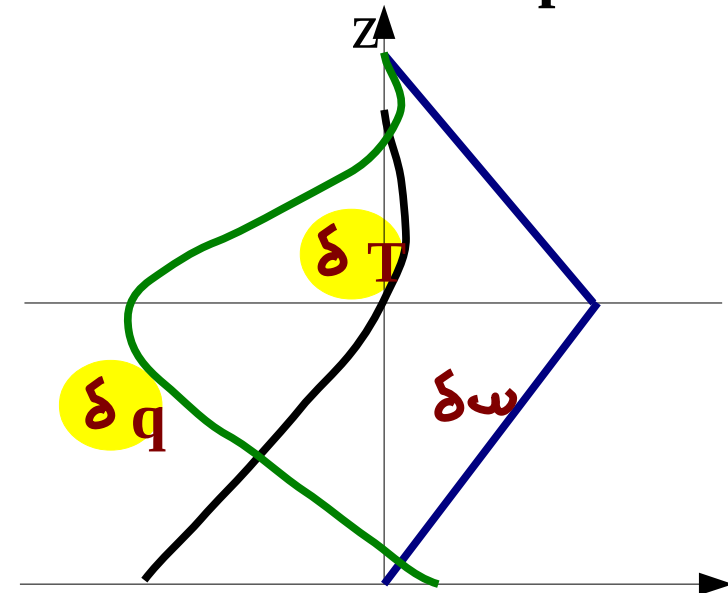
#### The density current (wake) parametrization

(Grandpeix and Lafore, JAS, 2010; Grandpeix et al., JAS 2010)

- Representation of a part of an infinite plane where identical cold pools (radius  $r$ , height  $h$ ) are scattered with an homogeneous density  $D_{wk}$ .
- State variables : (i) surface fraction covered by the wakes  $\sigma_w = \frac{S_w}{S_t}$  ( $\sigma_w = \pi r^2 D_{wk}$ ), (ii) temperature and humidity differences (resp.  $\delta\theta(p)$  and  $\delta q(p)$ ) between wake and off-wake regions.
- Spreading speed :  $C_*$  such that  $C_*^2 \simeq WAPE$  (Wake Potential Energy);  $WAPE = \int_{p_{top}}^{p_{surf}} R_d \delta T_v \frac{dp}{p}$
- Evolutions of  $\delta\theta$  and  $\delta q$  profiles are given by conservation equations of mass, energy and water taking into account vertical advection, turbulence and phase changes.
- Turbulence and phase change terms are assumed to be given by the deep convection scheme.
- $\delta\omega$  profile is linear between the surface and the wake top (no mass exchange through the wake boundary); it goes back to 0 linearly between the wake top and an arbitrary altitude (about 4000 m).

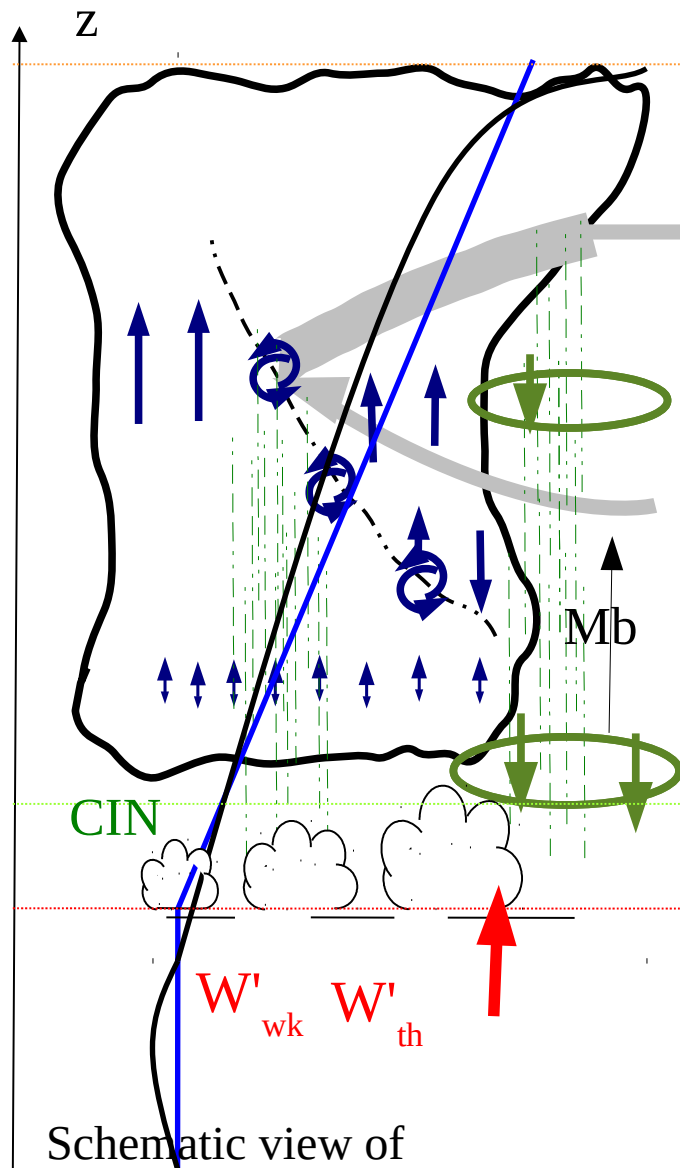


#### Wake differential profiles





### 3. La convection profonde « Nouvelle physique » : contrôle de la convection par les processus sous-nuageux



Schematic view of  
Emanuel (1993) scheme  
Deep convection

→ Paramétrisation des poches froides (Grandpeix and Lafore 2010)  
→ Fermeture basée sur les processus sous-nuageux  
Dans LMDZ : on se base sur la vitesse verticale  $W'$  estimée par les paramétrisations des thermiques et des poches froides.  
(thèse Catherine Rio)

K: Energie de soulèvement disponible

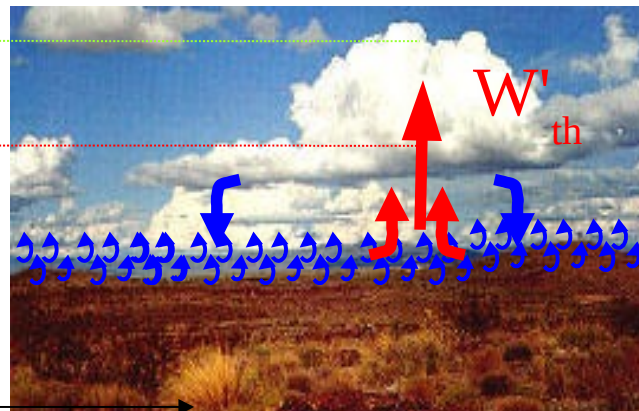
**ALE en J/kg, proportionnel à  $w'^2$ .**

→ **Déclenchement** :  $\max(ALE_{th}, ALE_{wk}) > |CIN|$

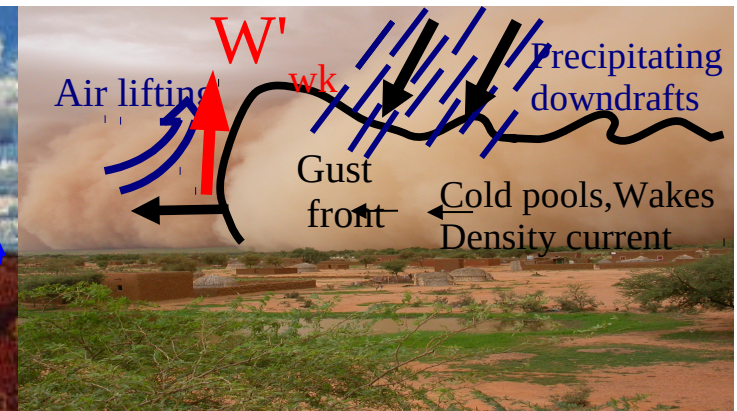
P: Puissance de soulèvement disponible

**ALP en W/m<sup>2</sup>, proportionnel à  $w'^3$ .**

→ **Fermeture** :  $MB = f(ALP_{th} + ALP_{wk})$



$\theta_v$

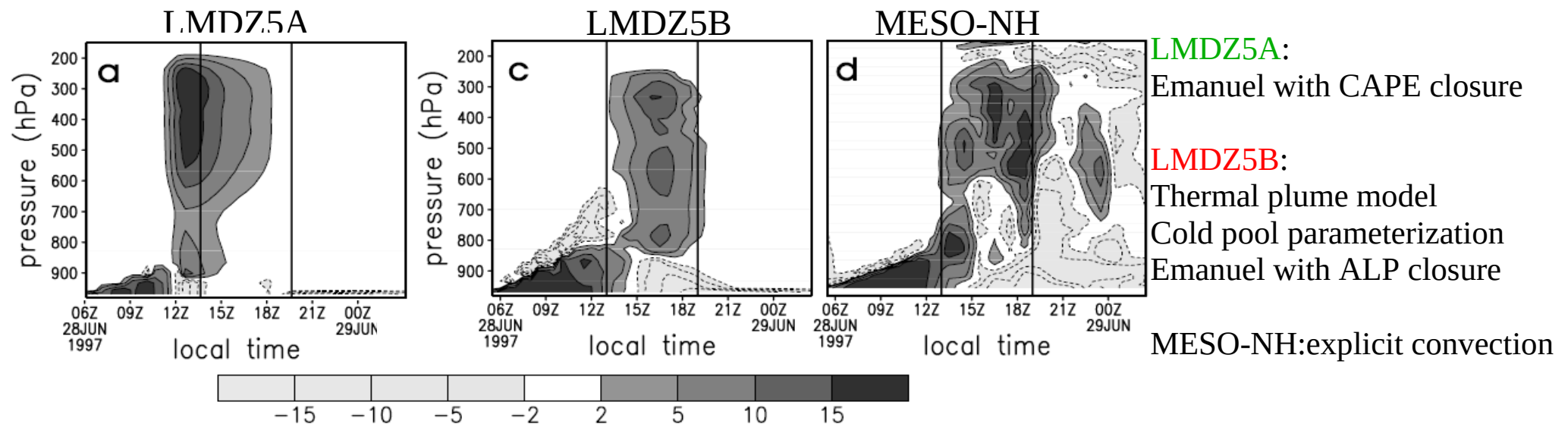


### 3. La convection profonde

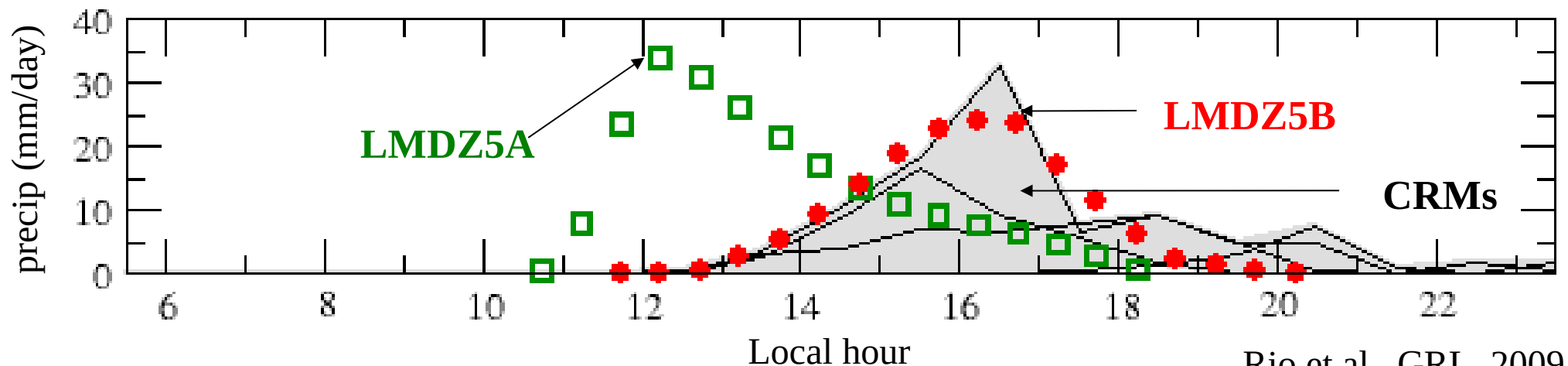
## 2. Cold pools: Impact on the diurnal cycle of convection over land

Shifting the diurnal cycle of parameterized deep convection over land

Diurnal cycle of heating rate (K/day)



Diurnal cycle of precipitation the 27 June 1997 in Oklahoma: the EUROCS case study



Rio et al., GRL, 2009



### 3. La convection profonde

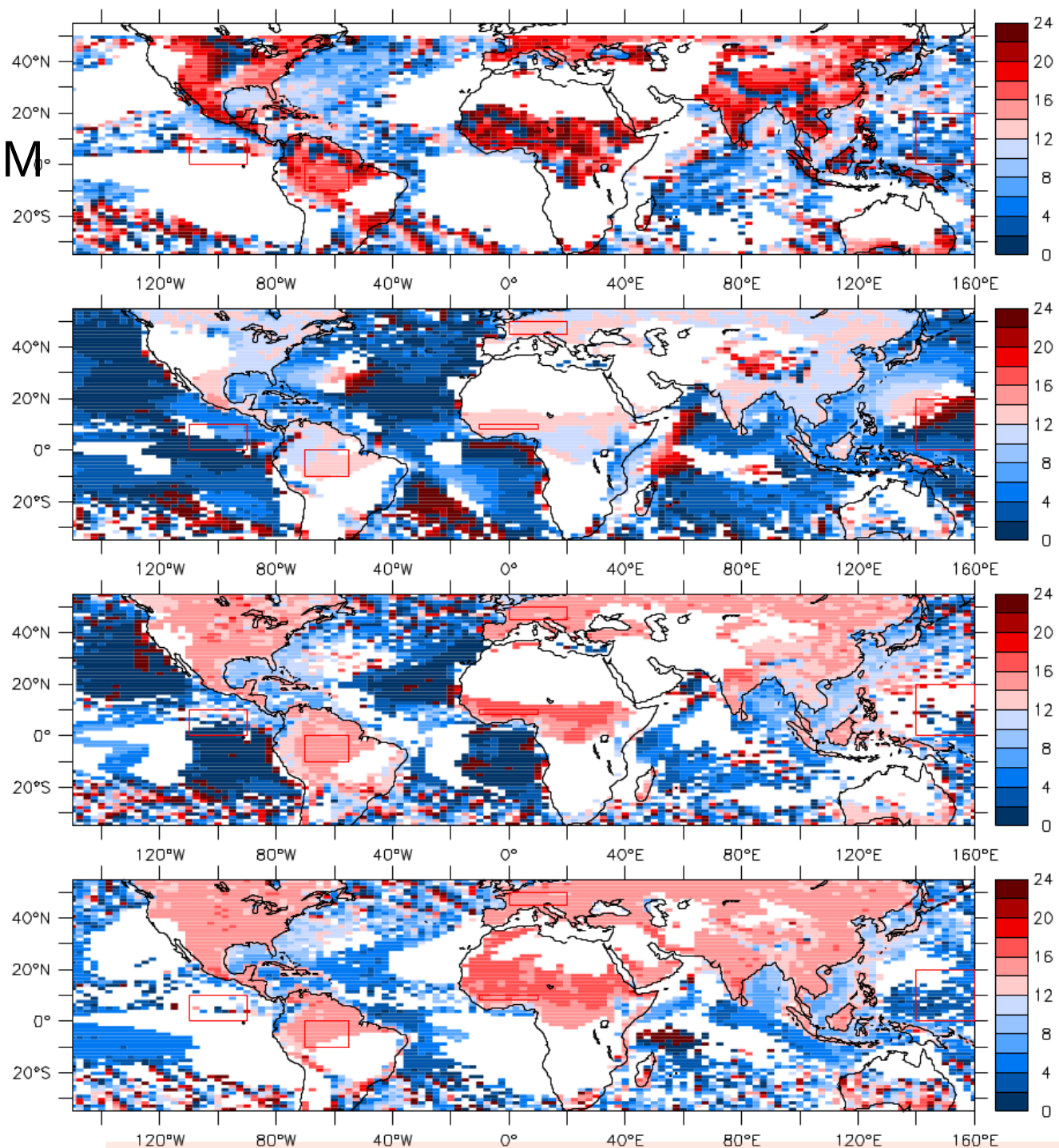
Heure du maximum  
de précipitation  
(Juillet Août)

Obs. TRMM

LMDZ5A

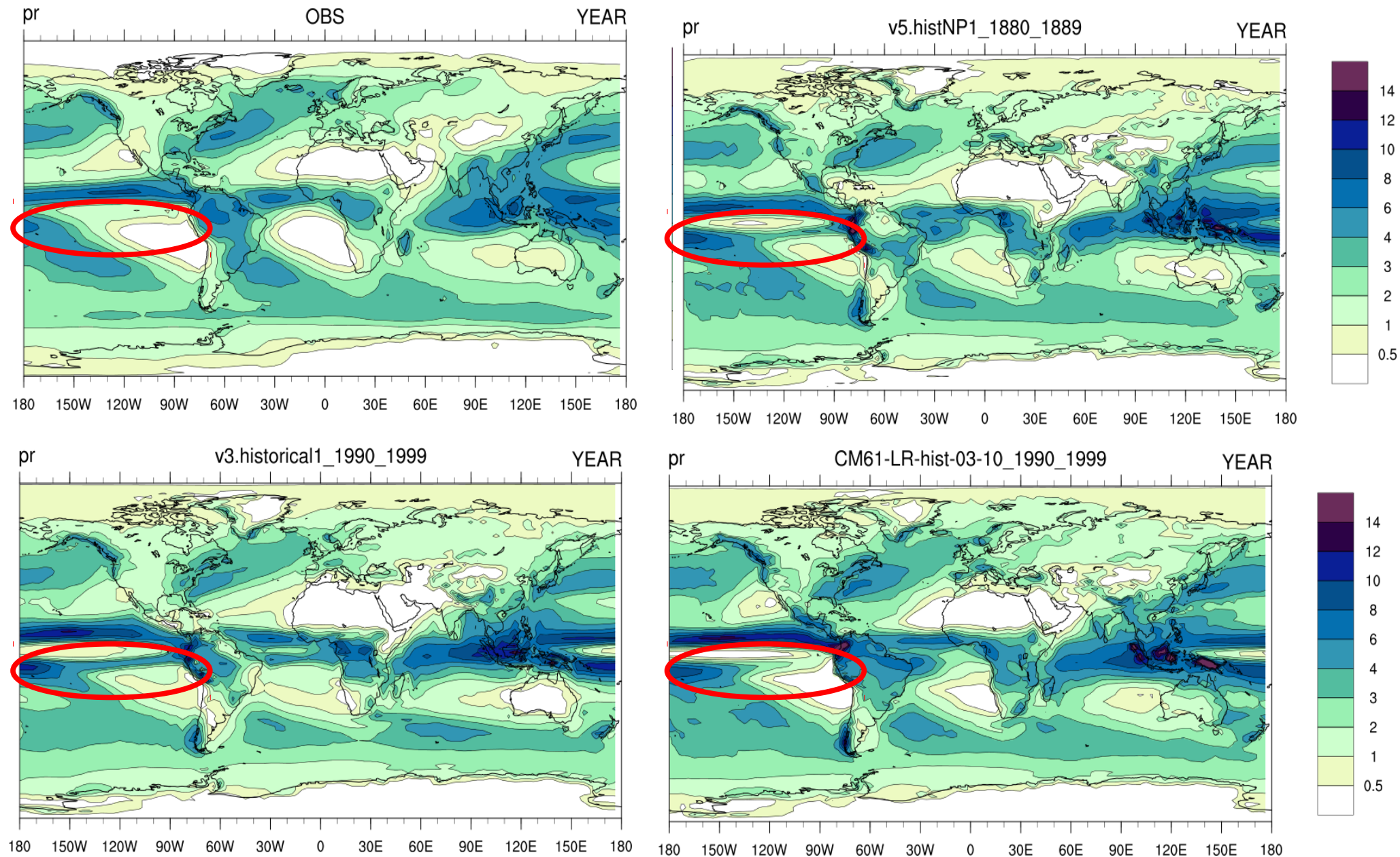
LMDZ5B

LMDZ6A

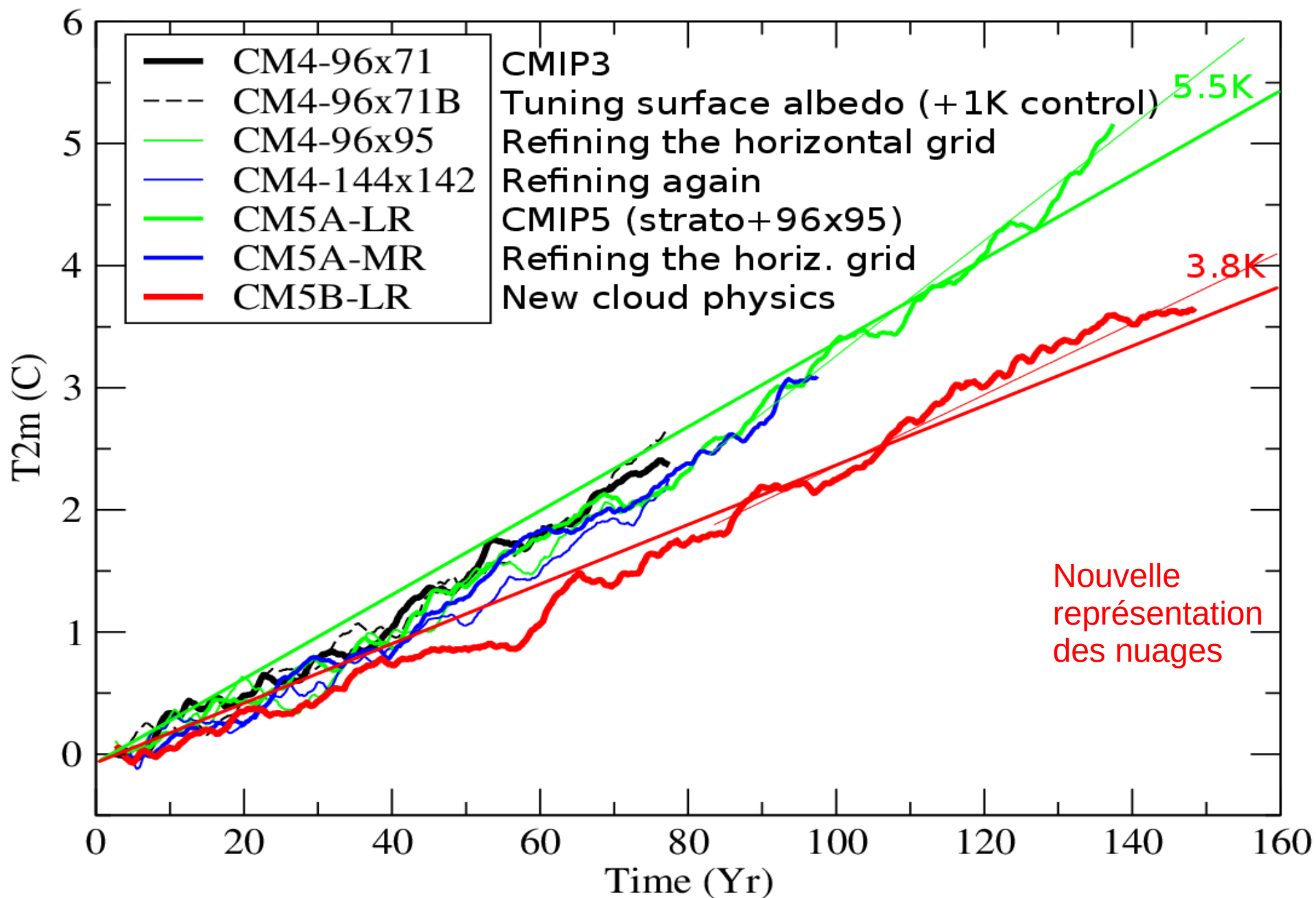


### 3. La convection profonde

#### Des biais classiques : double ITCZ

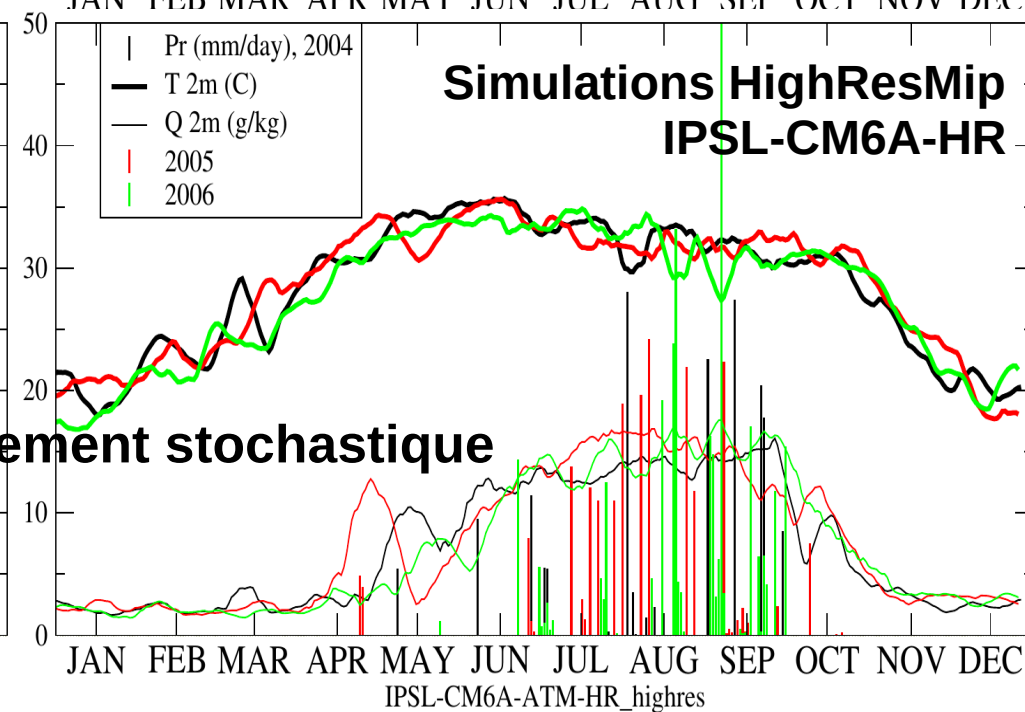
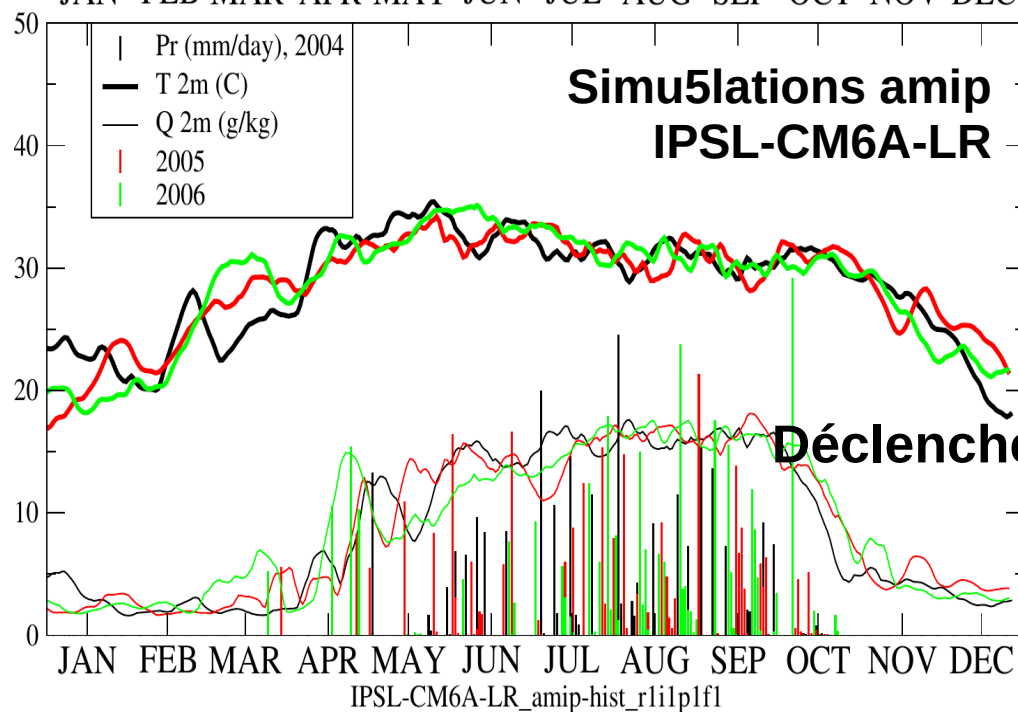
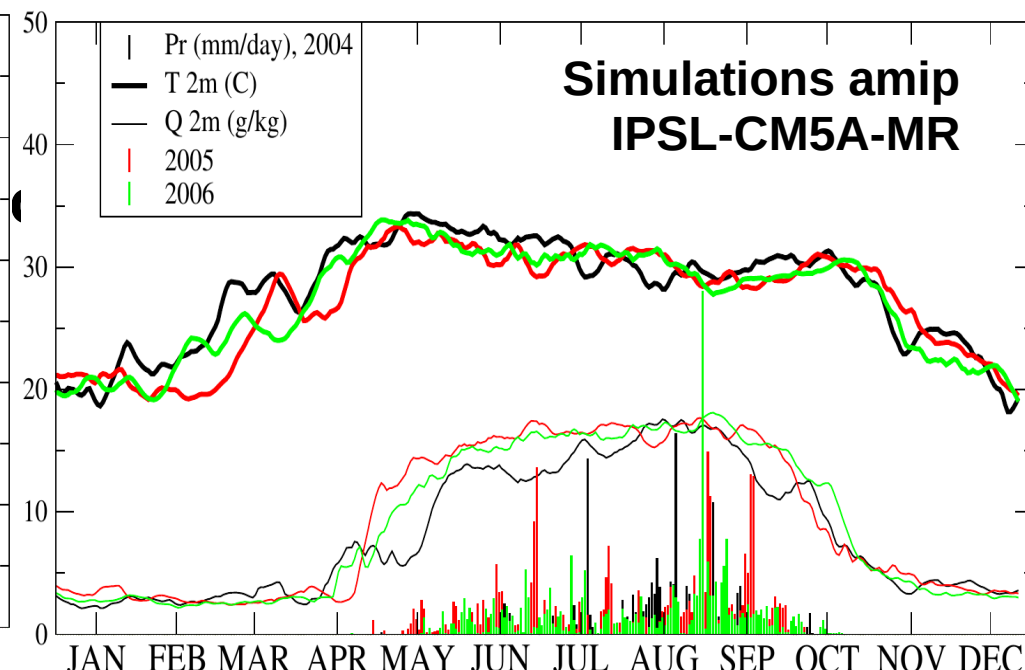
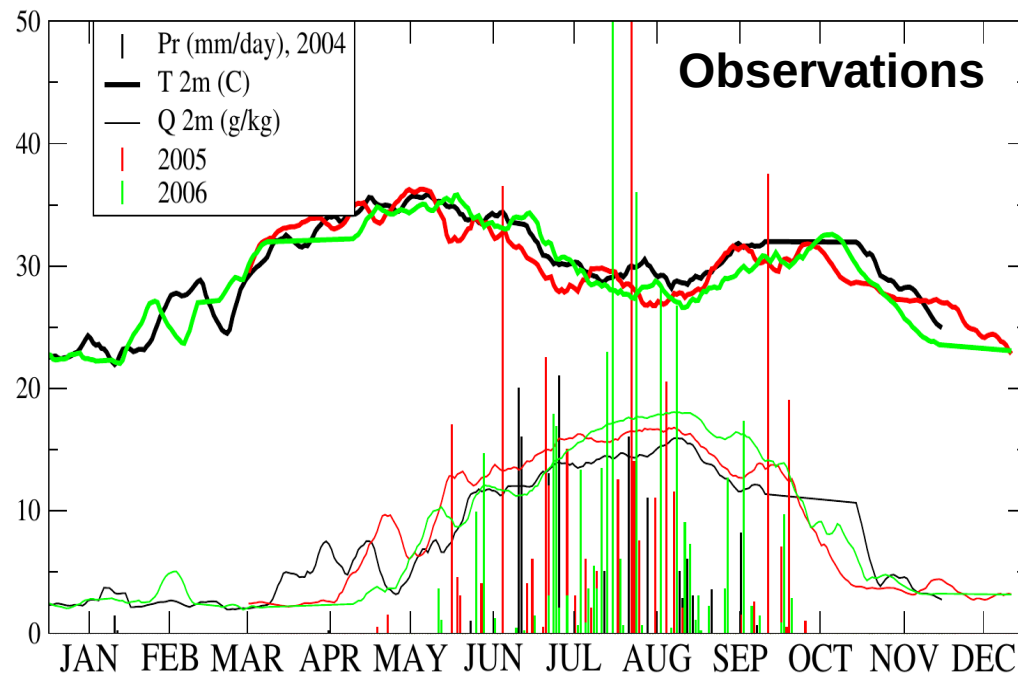


### 3. La convection profonde





### 3. La convection profonde



**Déclenchement stochastique**



# Les paramétrisations des modèles de climat

## II. Rayonnement, tuning et climat

Frédéric Hourdin

Laboratoire de Météorologie Dynamique / IPSL / UPMC

Responsable du développement du modèle global atmosphérique LMDZ

<http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/COURS/ModnumOA/2017/>

hourdin@lmd.jussieu.fr

1. Un aperçu des questions de modélisation du transfert radiatif
2. Ajustement des paramètres
3. Les modèles et leur utilisation

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

# Les paramétrisations des modèles de climat

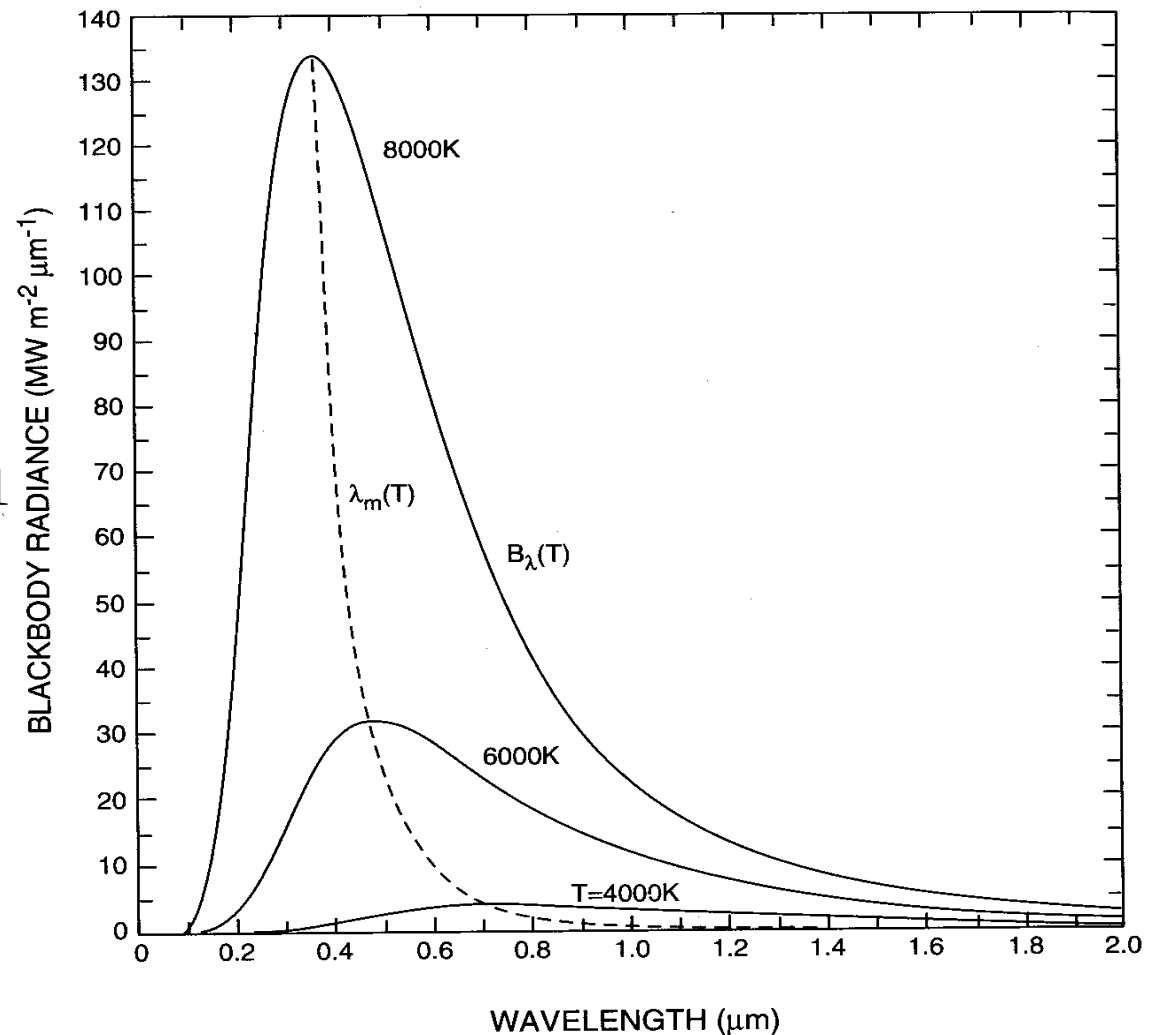
## II. Rayonnement, tuning et climat

1. Un aperçu des questions de modélisation du transfert radiatif
2. Ajustement des paramètres
3. Les modèles et leur utilisation

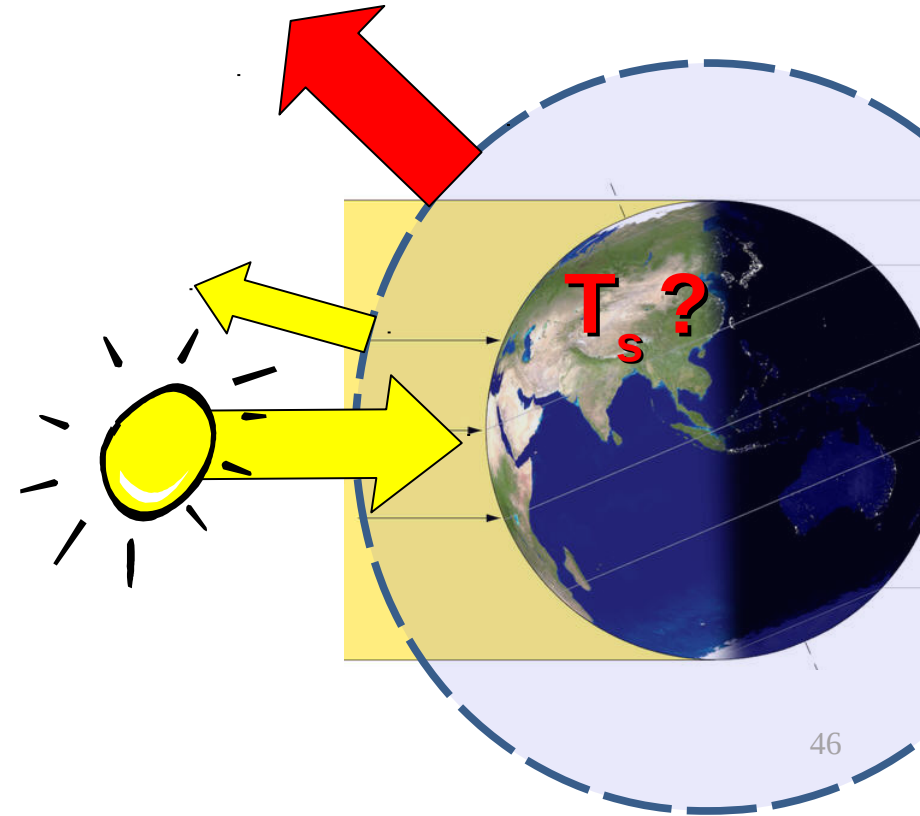
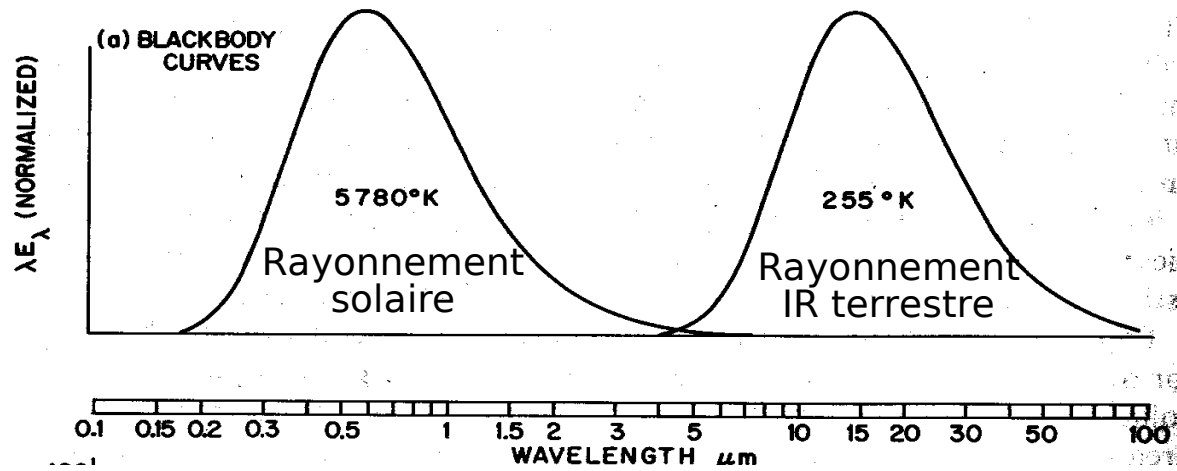
# Emission du corps noir

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

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

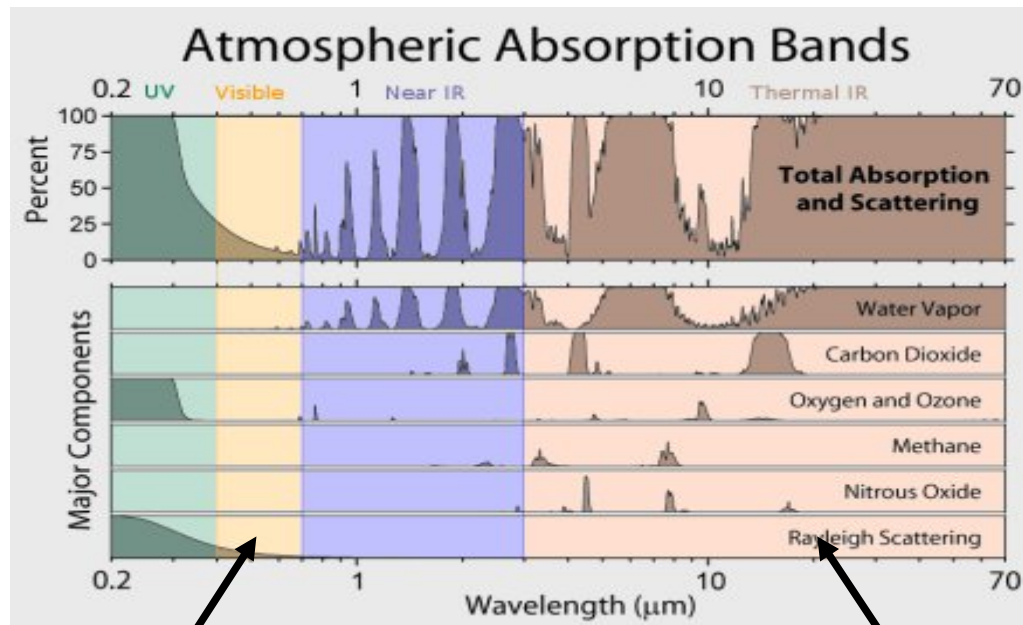
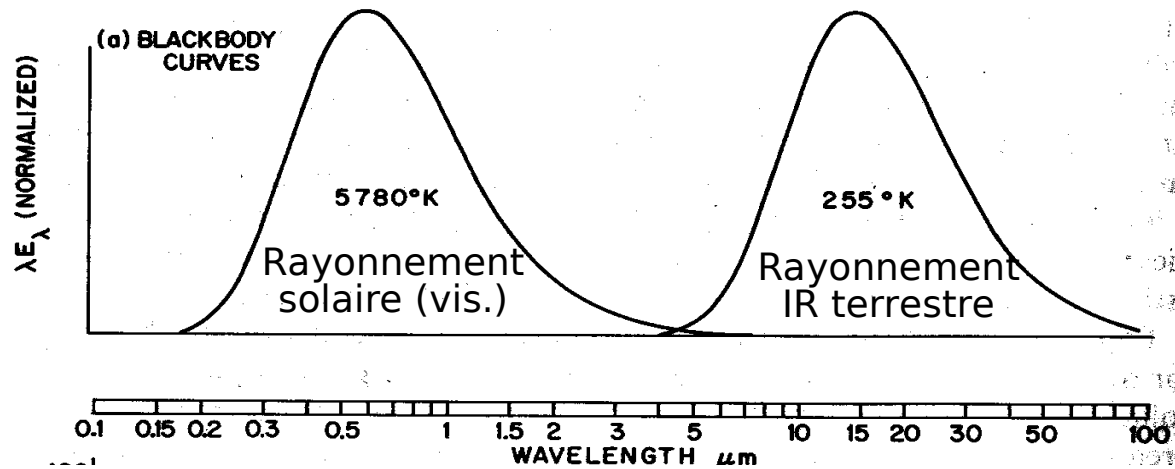


# 1. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif



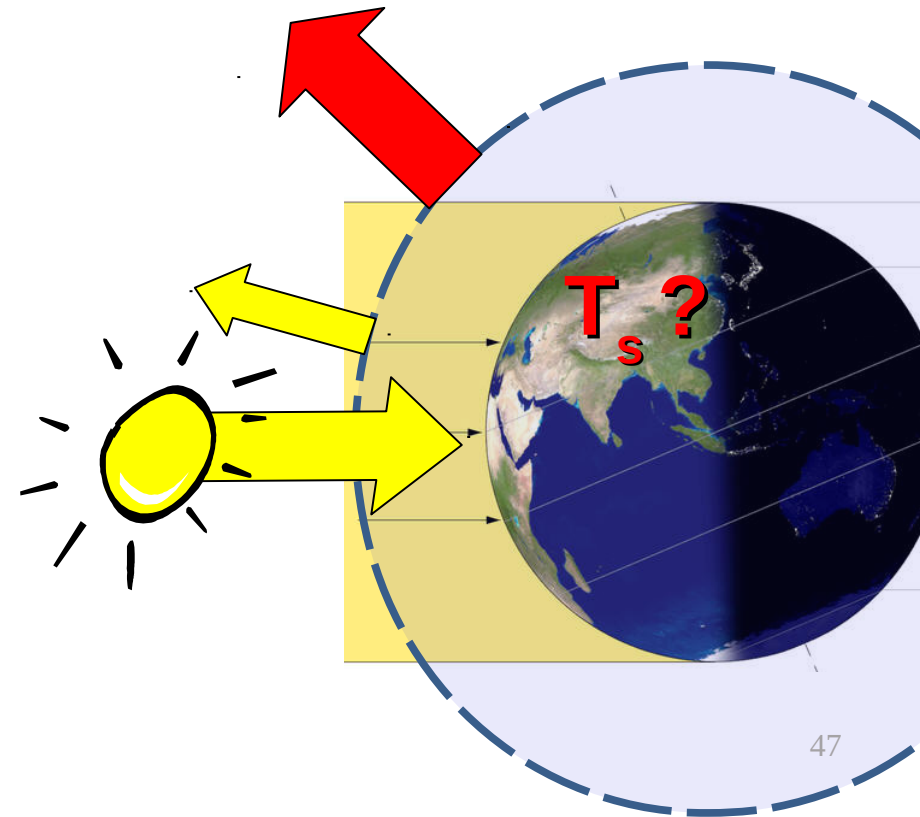


# 1. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif



~Transparent

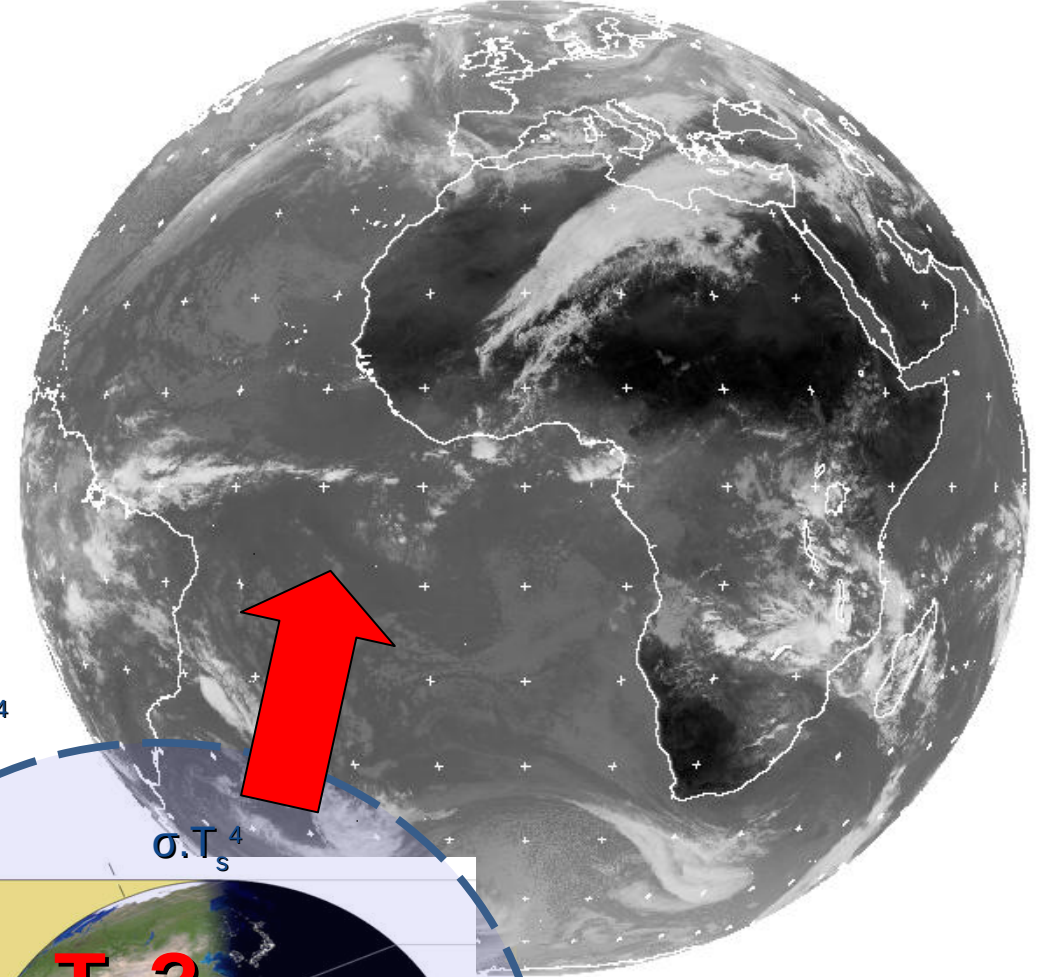
~Opaque



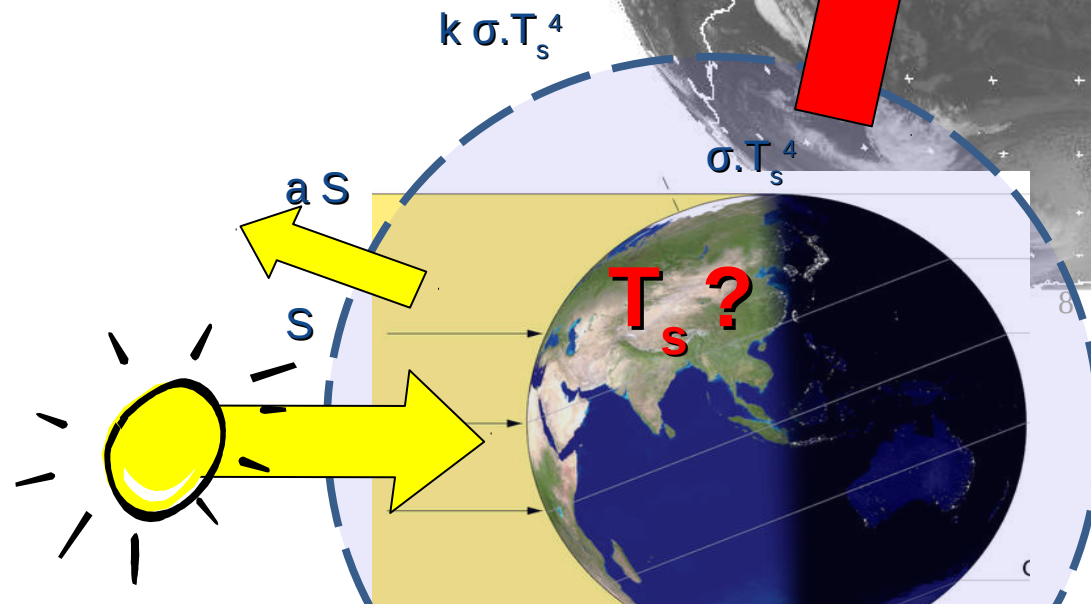
1. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif

Image visible meteosat

Image infra-rouge  
meteosat



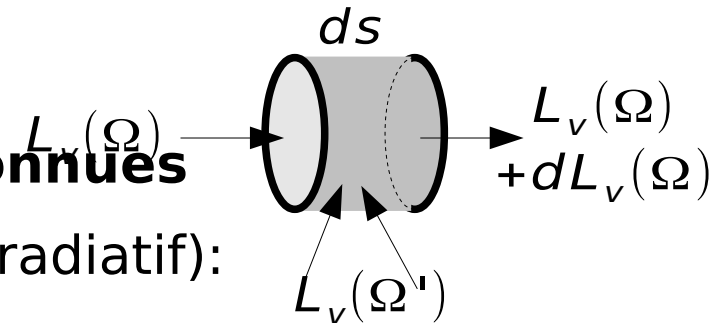
09 May 2003,  
1215 UTC



©EUMETSAT

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

### Transfert radiatif : des équations bien connues



Calcul de la luminance (équation de transfert radiatif):

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

Mais extrêmement coûteux.

- Intégration sur les fréquences ( $\nu$ )
- Intégration sur les angles (avec diffusion multiple  $P$ )
- La description des « diffuseurs » et « absorbeurs » elle-même peut être problématique (distribution de taille de gouttes, forme, aérosols ...)

Pour un calcul d'une « scène » à un instant donné, un calcul « exact » (ou complet) peut prendre des heures de calcul sur un supercalculateur.

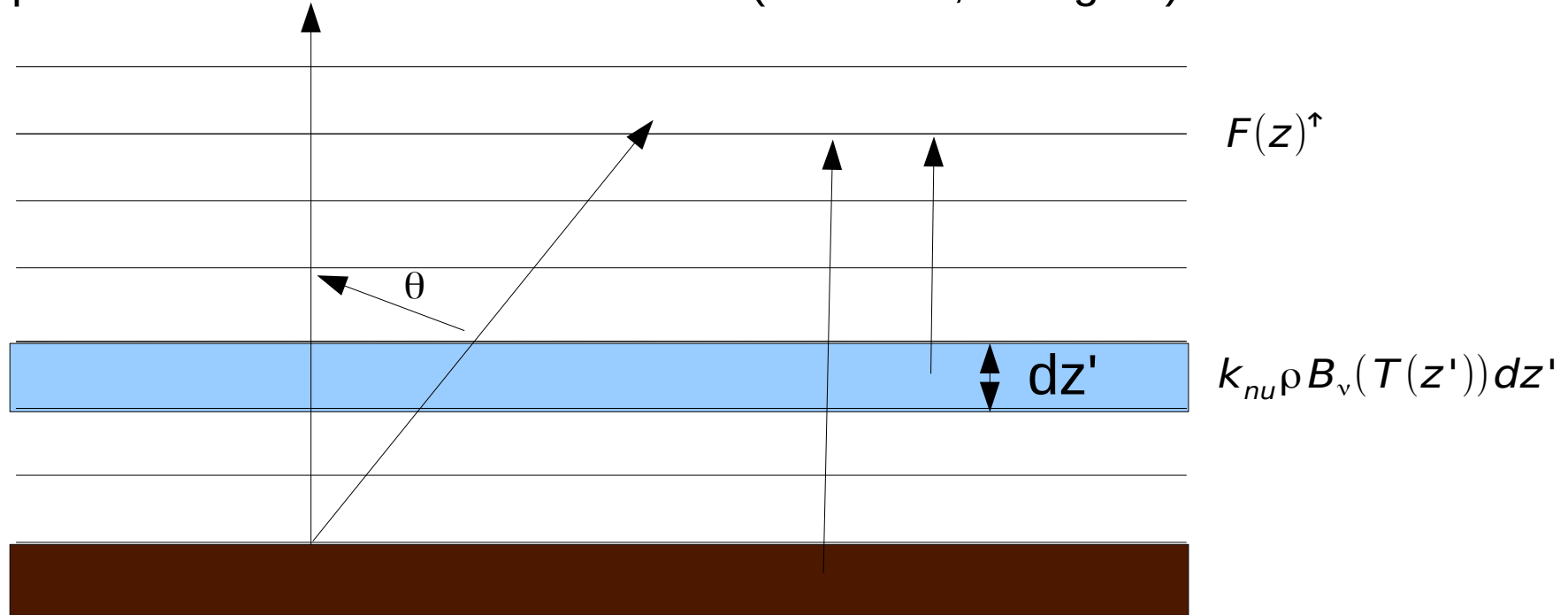
Pour suivre le cycle diurne : 1 calcul par heure et par « colonne » du modèle.

# Infrarouge, cas non diffusant

Approximation « plan parallèle » : espace semi-infini homogène

Approximation « diffuse » : un angle moyen

Séparation flux montant / descendant (2-stream, Eddington)



$$\frac{\partial F(z)^\uparrow}{\partial z} = -k_v \rho \mu F(z)^\uparrow + k_v \rho \mu B_v(T) \quad \mu = \frac{1}{\cos(\theta)}$$

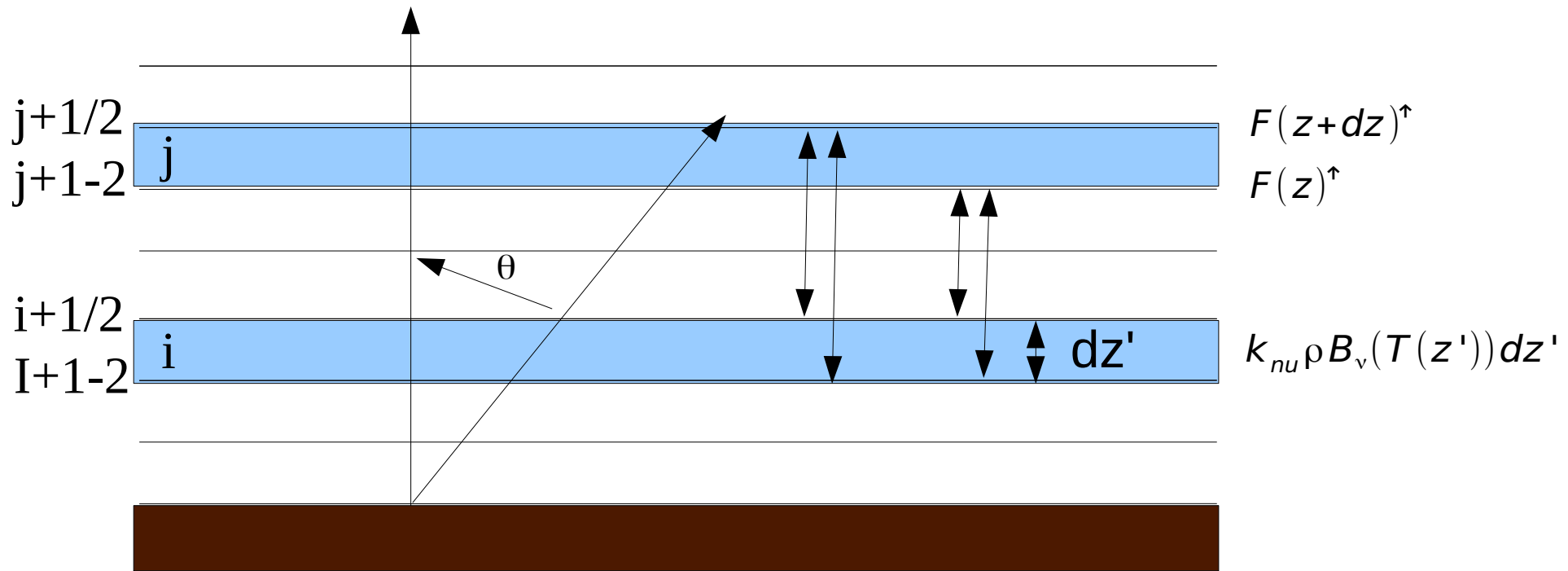
$$\epsilon_v(z_1, z_2) = \exp\left[-\mu \int_{z_1}^{z_2} k_v(P, T) \rho dz\right]$$

$$F(z)^\uparrow = B_v(T_s) \epsilon(0, z) + \int_0^z k_{nu} \rho B_v(T(z')) \epsilon(z', z) dz'$$

$$F(z)^\uparrow = B_v(T_s) \epsilon(0, z) + \int_0^z B_v(T(z')) \frac{\partial \epsilon(z', z)}{\partial z'} dz'$$

$$Q = \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial F(z)^\uparrow}{\partial z}$$





Contribution de la couche i au flux en z

$$F_{i \rightarrow z} = B_v(T_i) [\epsilon_v(z_{i+1/2}, z) - \epsilon_v(z_{i-1/2}, z)]$$

Contribution de la couche i au chauffage de la couche j

$$Q_{i \rightarrow j} = \psi_{i \rightarrow j} / (\rho C_p) \quad \text{avec}$$

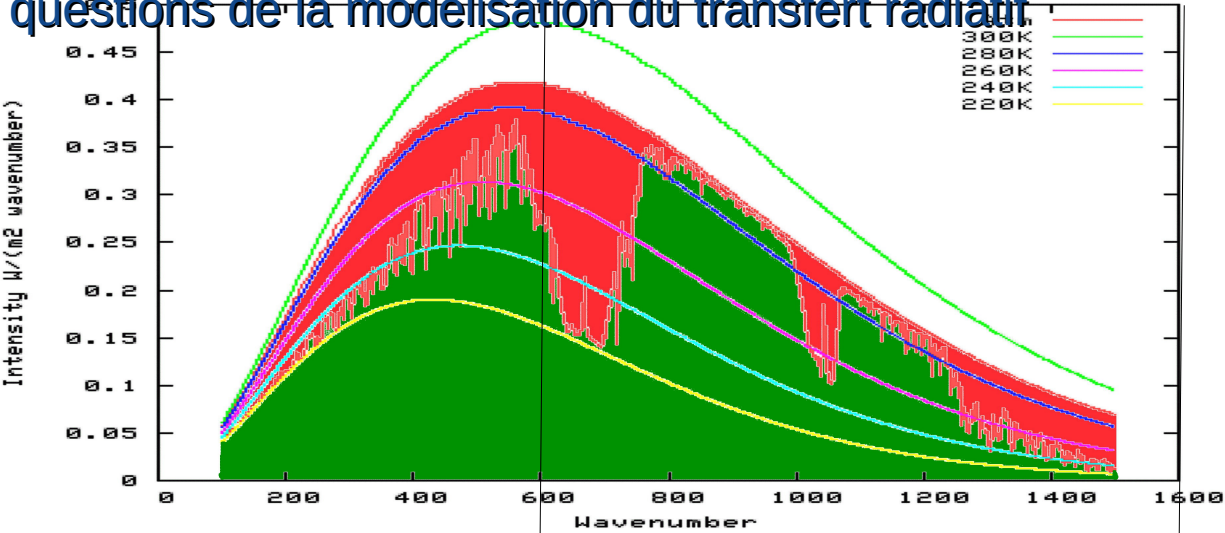
$$\psi_{i \rightarrow j} = B_v(T_i) [\epsilon_v(z_{i+1/2}, z_{j+1/2}) - \epsilon_v(z_{i-1/2}, z_{j+1/2}) - \epsilon_v(z_{i+1/2}, z_{j-1/2}) + \epsilon_v(z_{i-1/2}, z_{j-1/2})]$$

Puissance nette échangée entre les couches i et j

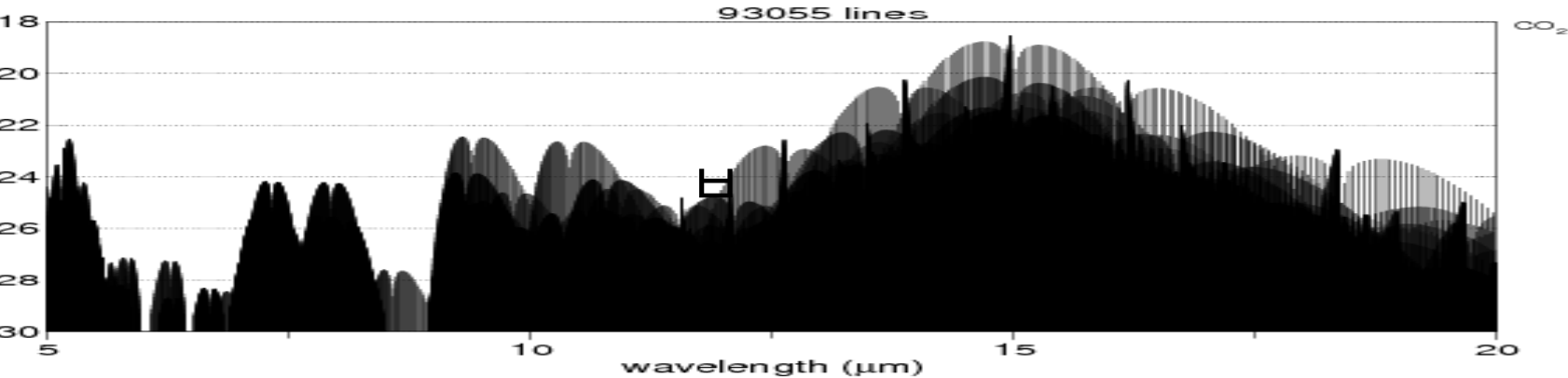
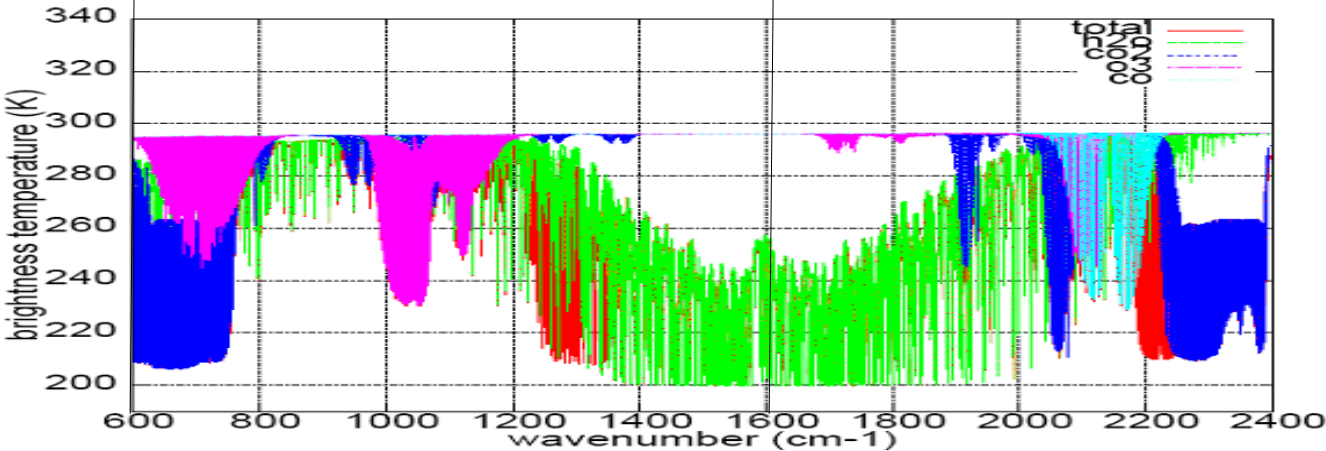
$$\psi_{i \rightarrow j}^{net} = (B_v(T_i) - B_v(T_j)) [\epsilon_v(z_{i+1/2}, z_{j+1/2}) - \epsilon_v(z_{i-1/2}, z_{j+1/2}) - \epsilon_v(z_{i+1/2}, z_{j-1/2}) + \epsilon_v(z_{i-1/2}, z_{j-1/2})]$$

Des approximations sur un calcul montant / descendant peut violer des principes de symétrie.

1. Un aperçu des questions de la modélisation du transfert radiatif



Spectres d'absorption des gaz ....



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

### Approches pour l'intégration spectrale

#### **Raie-par-raie :**

Discrétisation des fréquence. Trop coûteux par DES ordres des grandeur

#### **Modèles de bandes, en émissivité (code « Fouquart Morcrette, 1980)**

$$\epsilon_{\Delta\nu}(z_1, z_2) = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} \epsilon_\nu(z_1, z_2) d\nu$$

On perd la propriété :  $\epsilon_{\Delta\nu}(z_1, z_2) = \epsilon_{\Delta\nu}(z_1, z) \epsilon_{\Delta\nu}(z, z_2)$

Le coup passe de N en N2 sur la verticale.

#### **Modèles k-correllés (RRTM, utilisé dans LMDZ, MesoNH, ECMWF, MAR)**

On se ramène à des sommes d'exponentielles

Difficulté : k(P,T).

Les coefficients ne varient pas de la même façon selon les transitions

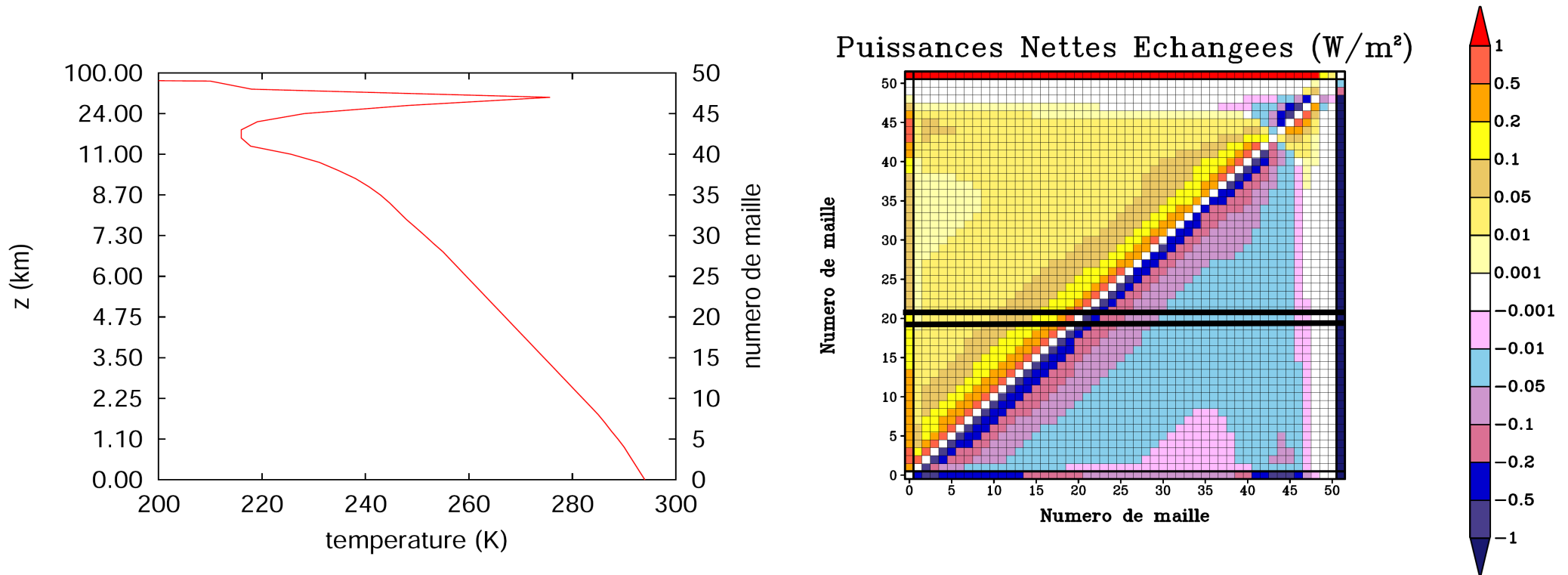
#### **Méthodes Monte-Carlo**

Echantillonnage du spectre (et des autres dimensions du problème simultanément)

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

# Analyse en Puissance Nette Échangée

Atmosphère moyenne latitude, été  
ciel clair



[Eymet et al., 2004]

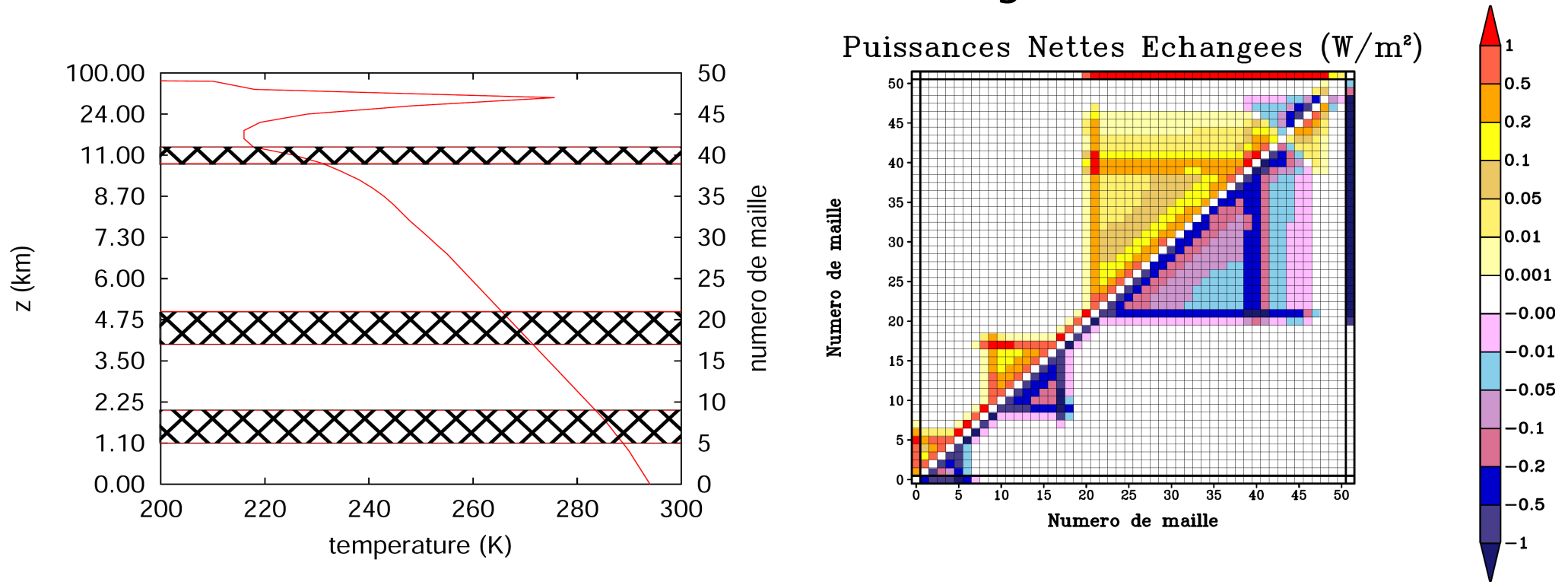
Transparents Jean-Louis  
Dufresne



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

# Analyse en Puissance Nette Échangée

Atmosphère moyenne latitude, été  
trois couches de nuages



[Eymet et al., 2004]

Transparents Jean-Louis  
Dufresne

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

## Représentation des nuages

$q$  : concentration en vapeur d'eau

$q_{\text{sat}}$  : concentration maximum à saturation

Si  $q > q_{\text{sat}}$  :

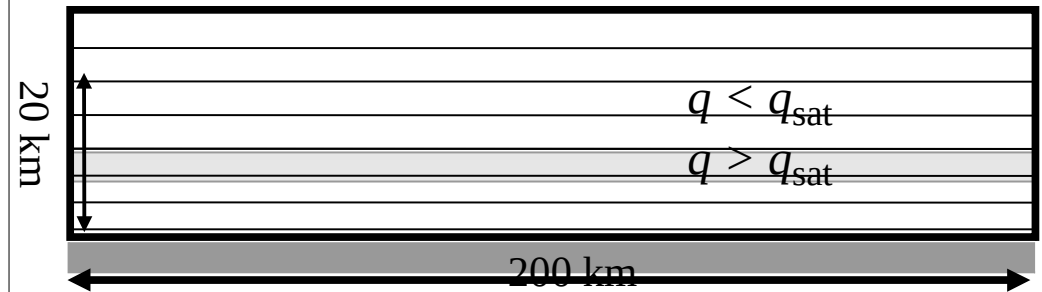
→ la vapeur d'eau condense = nuage

On connaît  $q$  et  $q_{\text{sat}}$  à l'échelle de la maille

→ Fraction de la maille couverte de nuages ?

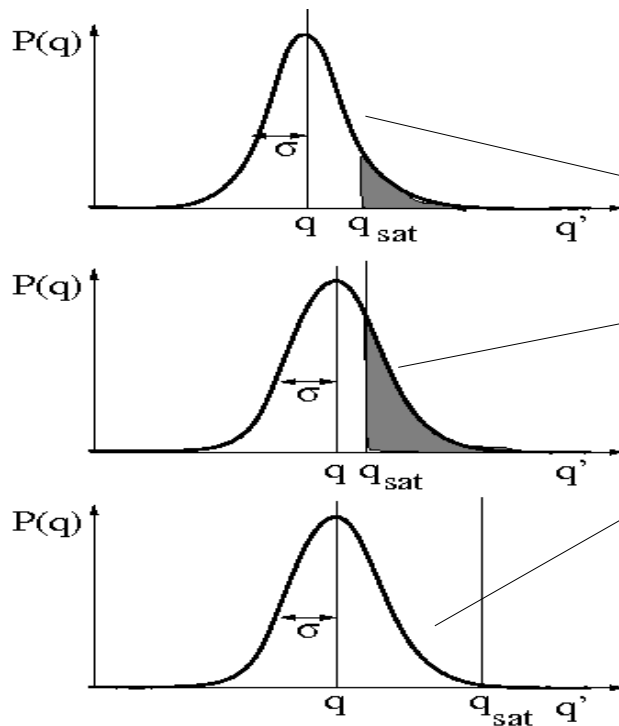
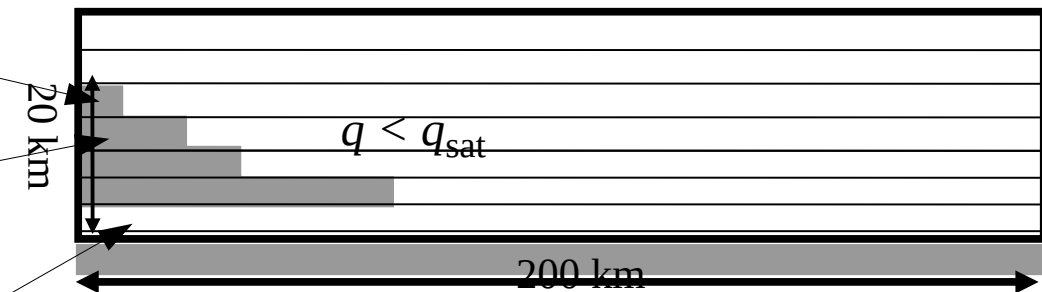
**Modèle « tout ou rien » :**

Si  $q > q_{\text{sat}}$  maille nuageuse, sinon ciel clair.

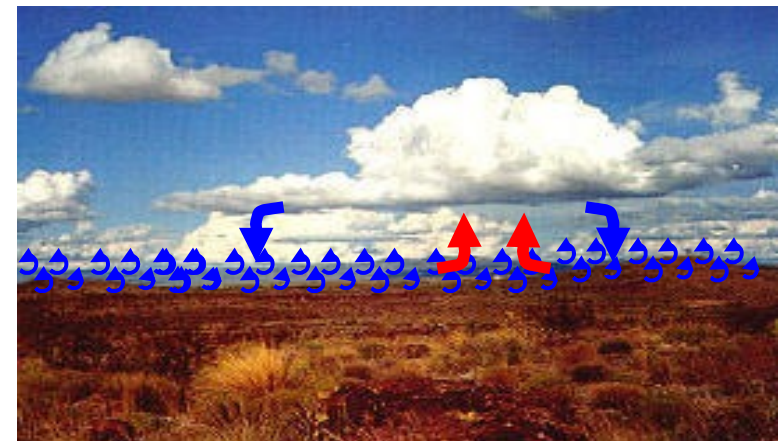


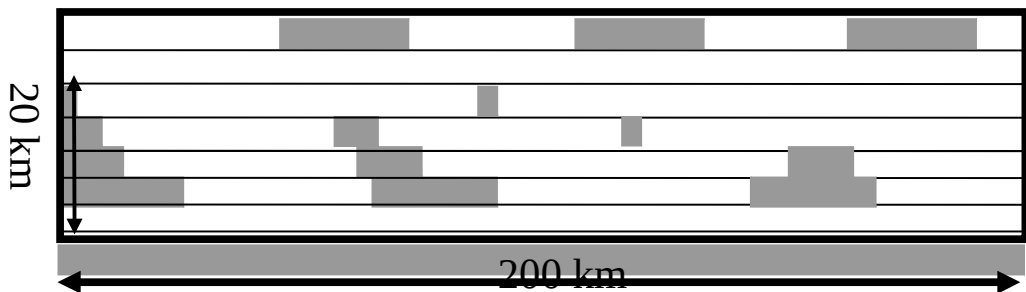
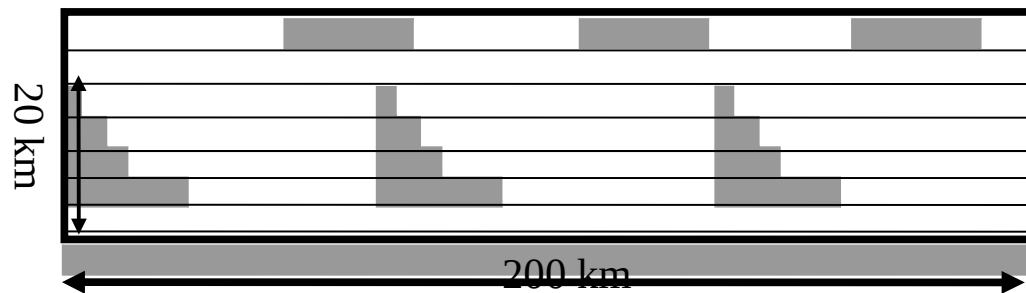
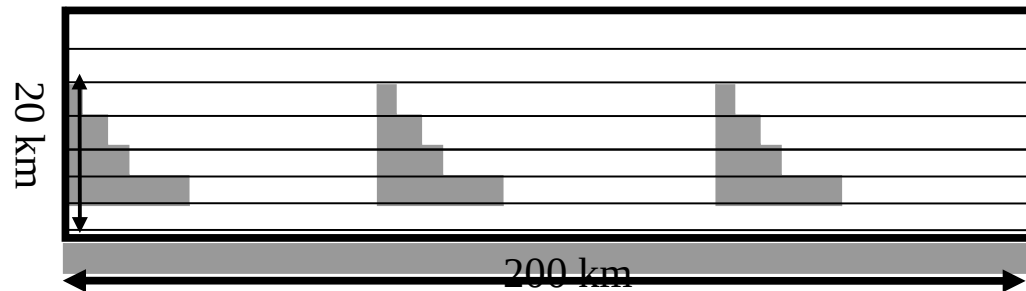
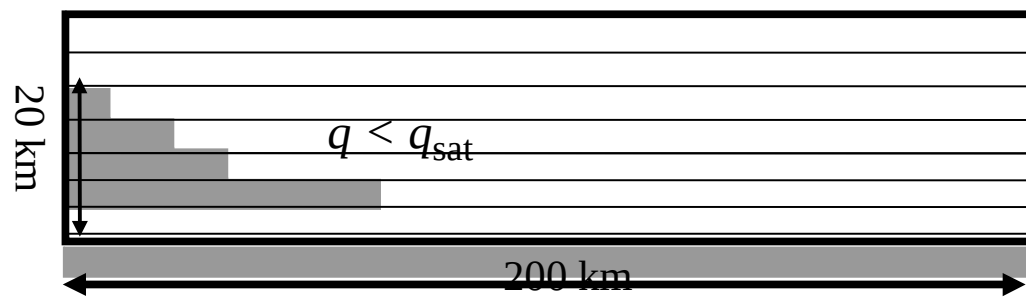
**Modèle « statistique » :**

On suppose une distribution statistique de  $q'$  dans la maille autour de  $q$



Paramétrisation simple : gaussienne  $\sigma / q = 20\%$

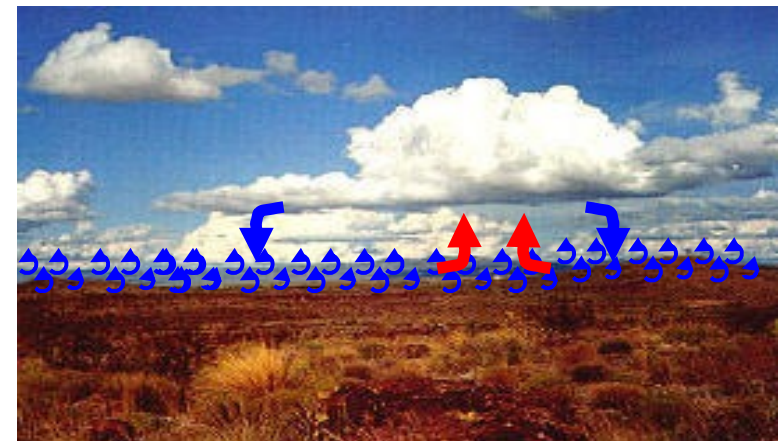




Equivalent du point de vue des codes radiatifs « actuels »

Hypothèse « maximum random »  
Quand de couches adjacentes sont superposées  
Sinon, recouvrement aléatoire

Vrais nuages plus complexes  
Calcul de diffusion dans une scène réaliste très coûteux  
Pistes : « tirages de sous-colonnes »



## 1. 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. On passe son temps dans des calculs inutiles.
- Deux grandes familles pour l'intégration spectrale : modèles de bandes où on perd la « multiplicabilité » 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 (ou des, ordonnées discrètes) 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.
- Modèles « plan parallèle » même dans des modèles explicite de nuages ( $dx=20m$ ) !



# Les paramétrisations des modèles de climat

## II. Rayonnement, tuning et climat

1. Un aperçu des questions de modélisation du transfert radiatif
2. Ajustement des paramètres / tuning
3. Les modèles et leur utilisation

### 3. Ajustement des paramètres / tuning

$$\begin{aligned} &\text{A climate model configuration} \\ &= \\ &\text{Physical content (parameterizations, equations, numerics)} \\ &+ \\ &\text{Grid configuration} \\ &+ \\ &\text{Tuning of free parameters} \end{aligned}$$

**Tuning or parameter calibration is central in many modeling fields**

Particularly true for couple climate models :

Clouds modelling uncertainty  $\sim$  tens of  $\text{W/m}^2$

Climate sensitivity  $\sim 1\text{K}/(\text{W/m}^2)$

**Whatever the sophistication of a climate model, obtaining global temperature at better than 1K can only be by chance or because of tuning**

Most probably true also for a global CRM or LES

### 3. Ajustement des paramètres / tuning

#### Tuning of free parameter : a fundamental aspect of climate modeling

Feeling that this question was not discussed enough, we organized a one-week workshop on model tuning with Torsten Mauritsen in October 2014 in Garmisch-Partenkirchen.

**The Art and Science of Climate Model Tuning**, Hourdin et al., **BAMS**, march 2017

**One particularly important aspect shared by most groups:**  
**tuning of cloud parameters to obtain a reasonable representation of radiative forcing**

**Example of tuning of a scale factor on the fall velocity of ice particles shared by several models**

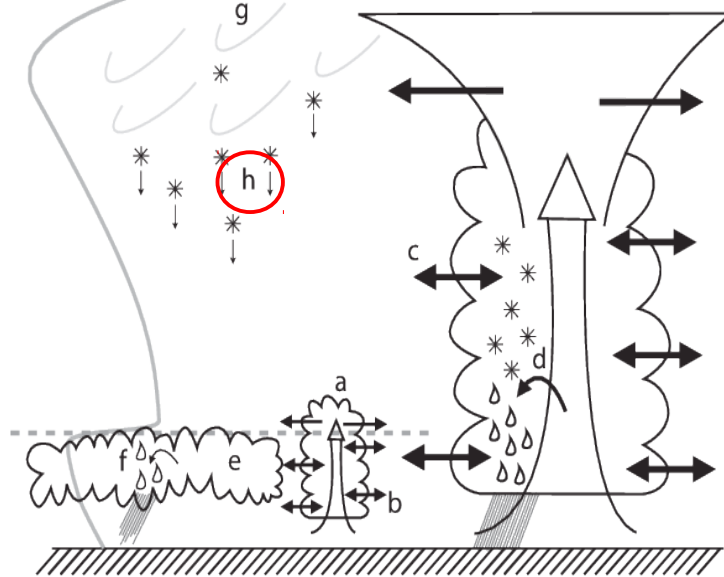
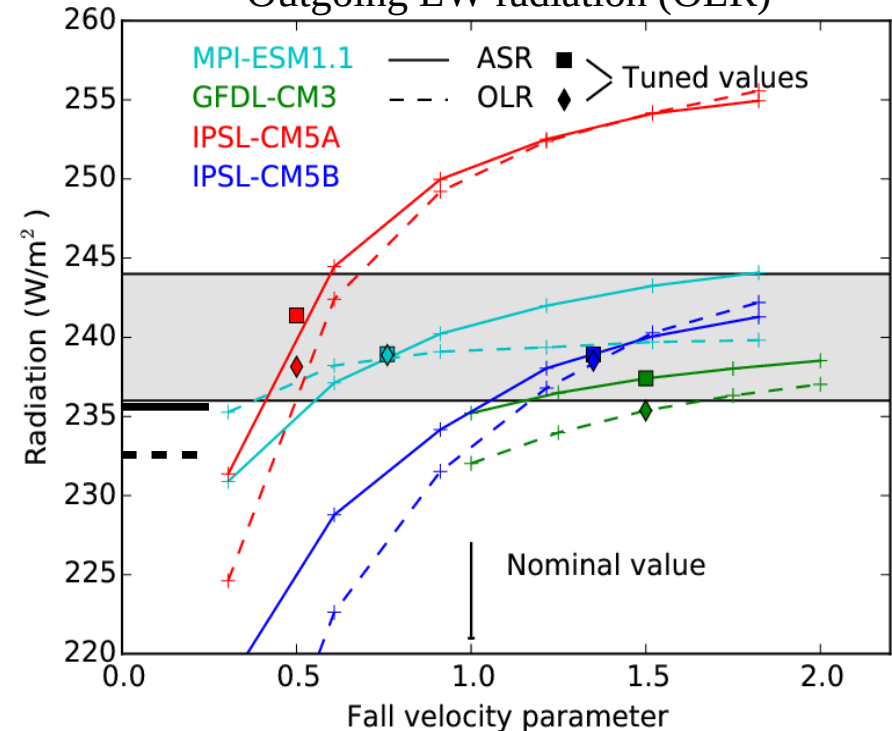


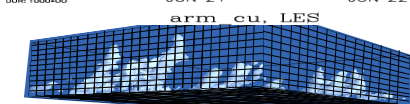
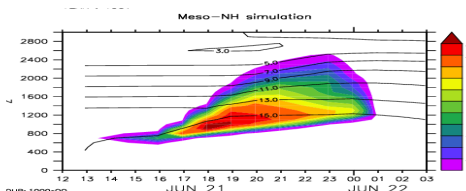
Figure from Mauritsen et al, 2013 (MPI model)

Impact on the global Top-Of-Atmosph. fluxes  
Absorbed SW radiation (ASR)  
Outgoing LW radiation (OLR)

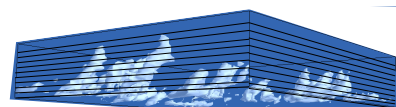


# 1/ Développement de nouvelles paramétrisations

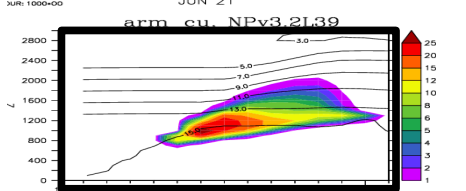
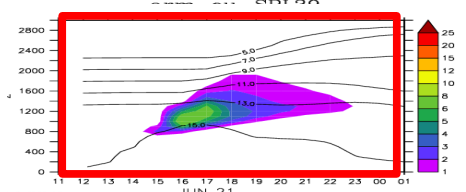
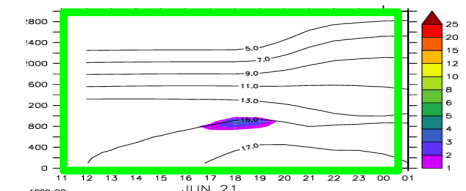
Une colonne du modèle  
Comparée à des simulations  
explicites de nuages (LES)



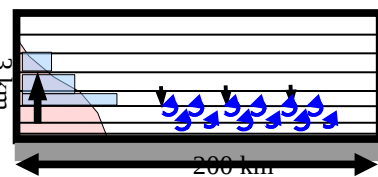
Explicit simulations,  $\Delta x \sim 20\text{-}100\text{ m}$



Climate model, parameterizations  
« single-column » mode



arm\_cu, NPv6.0.10blevL79

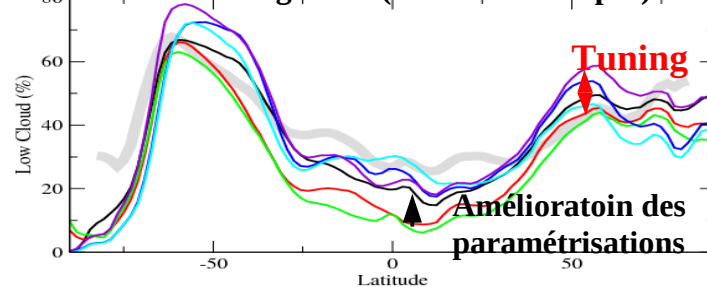


## 2/ Tuning énergétique du modèle 3D (températures océaniques prescrites)

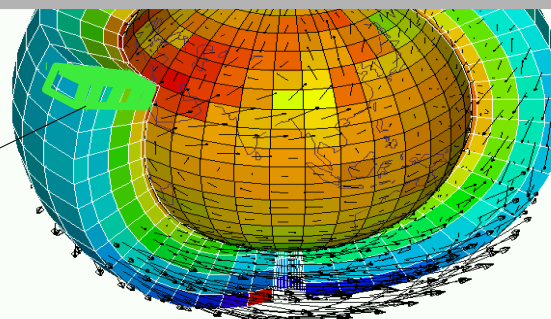
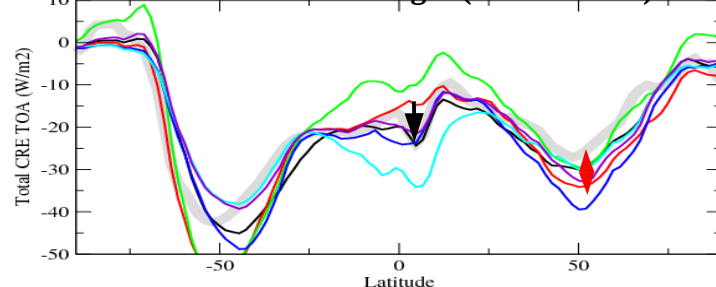
Equilibre énergétique global  
Decomposition ciel clair/nuages  
Distribution latitudinale  
Contrastes Est-Oues sur les océans



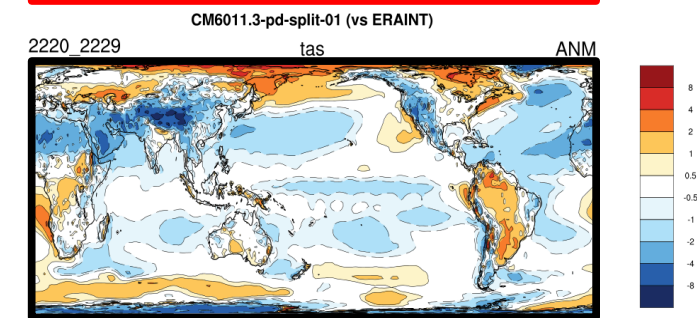
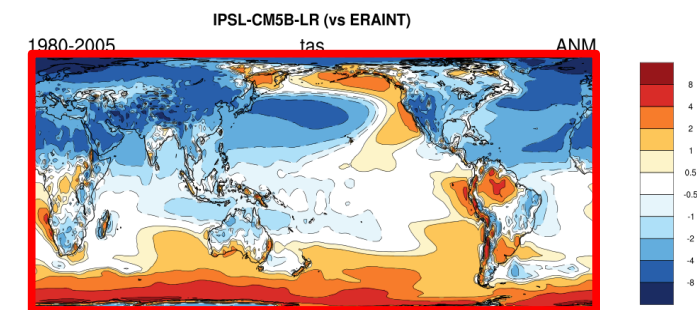
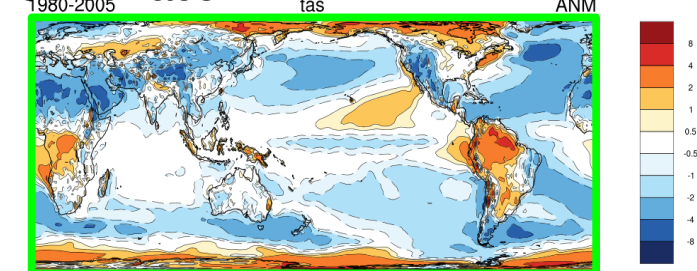
### Couverture nuages bas (simulateur calipso)



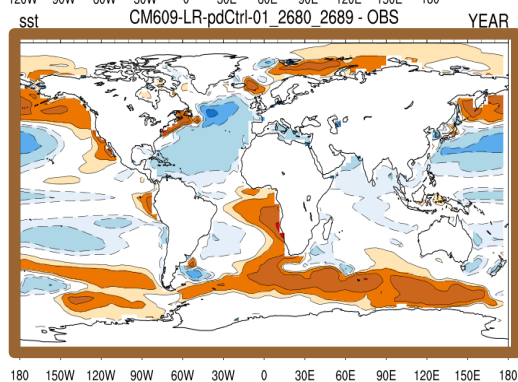
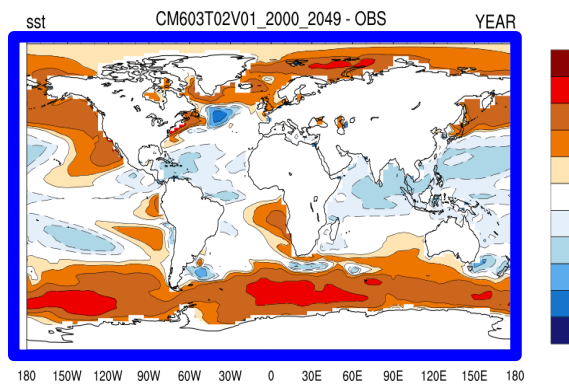
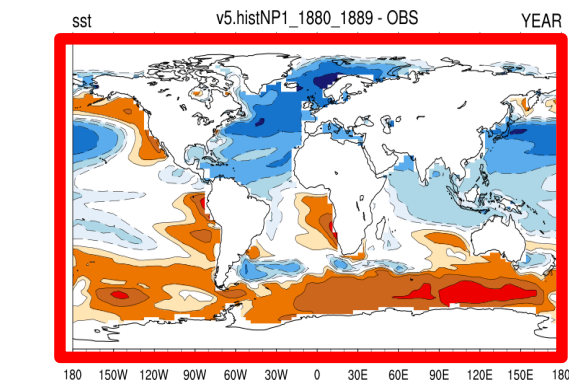
### Effet radiatif des nuages (Ceres EBAF)



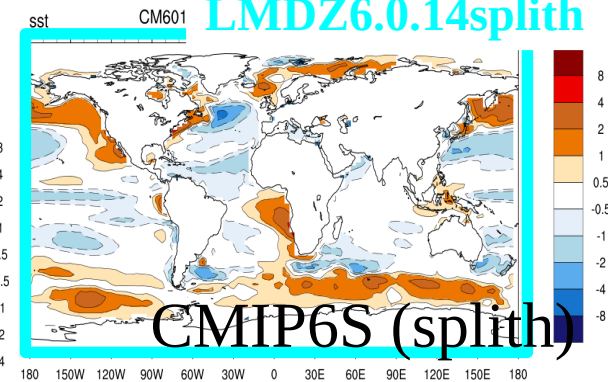
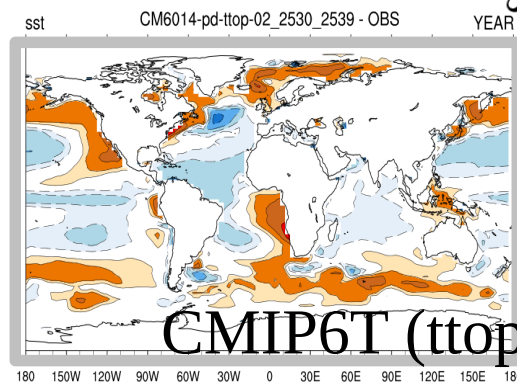
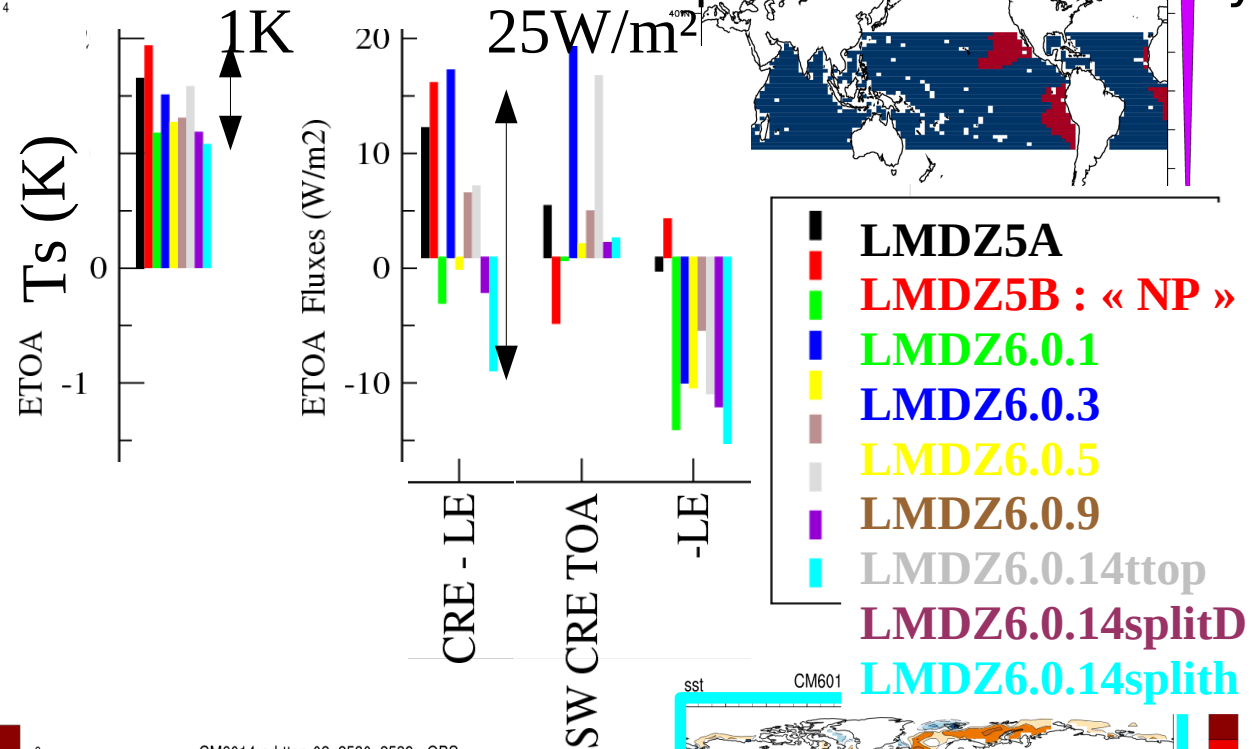
## 3/ Vérification des améliorations modèle couplé océan/atmosphère



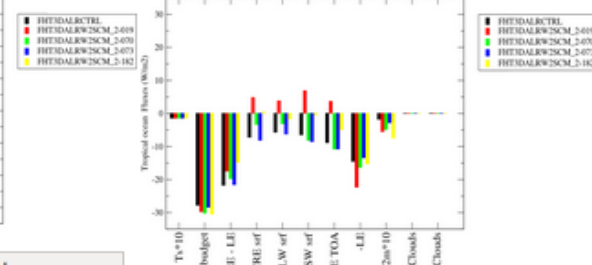
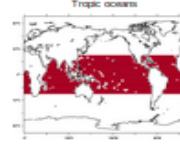
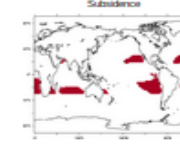
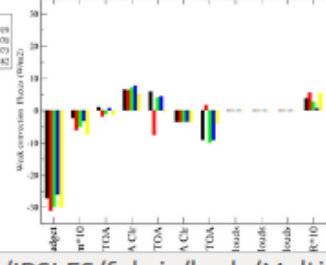
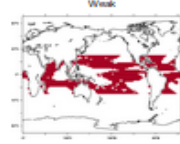
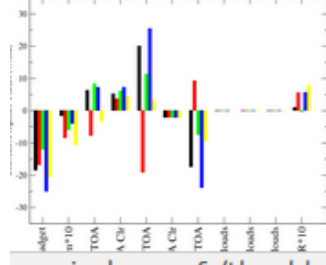
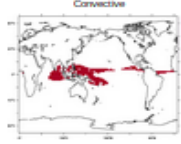
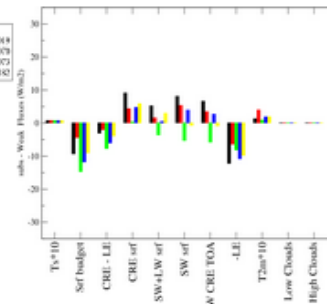
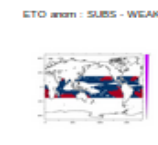
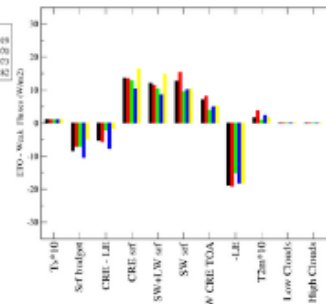
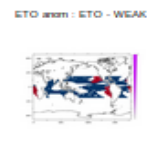
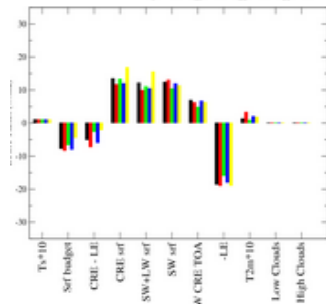
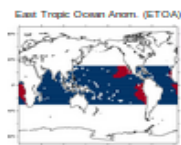
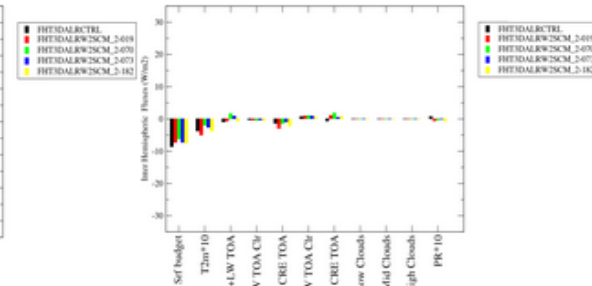
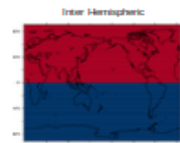
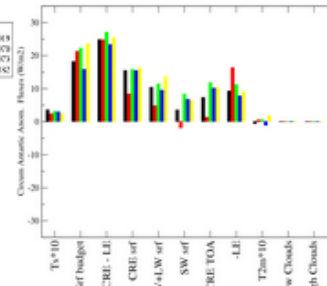
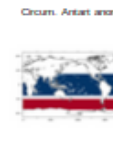
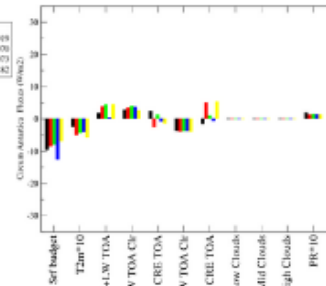
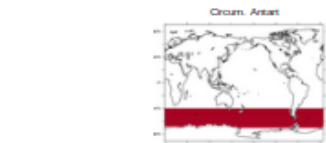
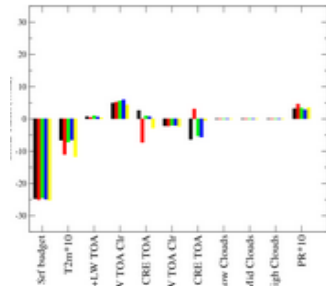




## Cibles pour la réduction des biais de températures océaniques East Tropical Ocean Anomaly



Identification de métriques en modèle forcé par les températures de surface de l'océan  
En 3 ans, 15 versions du modèle couplé. A chaque fois retuning (10 à 30 simulations)  
→ Plus jamais ça.

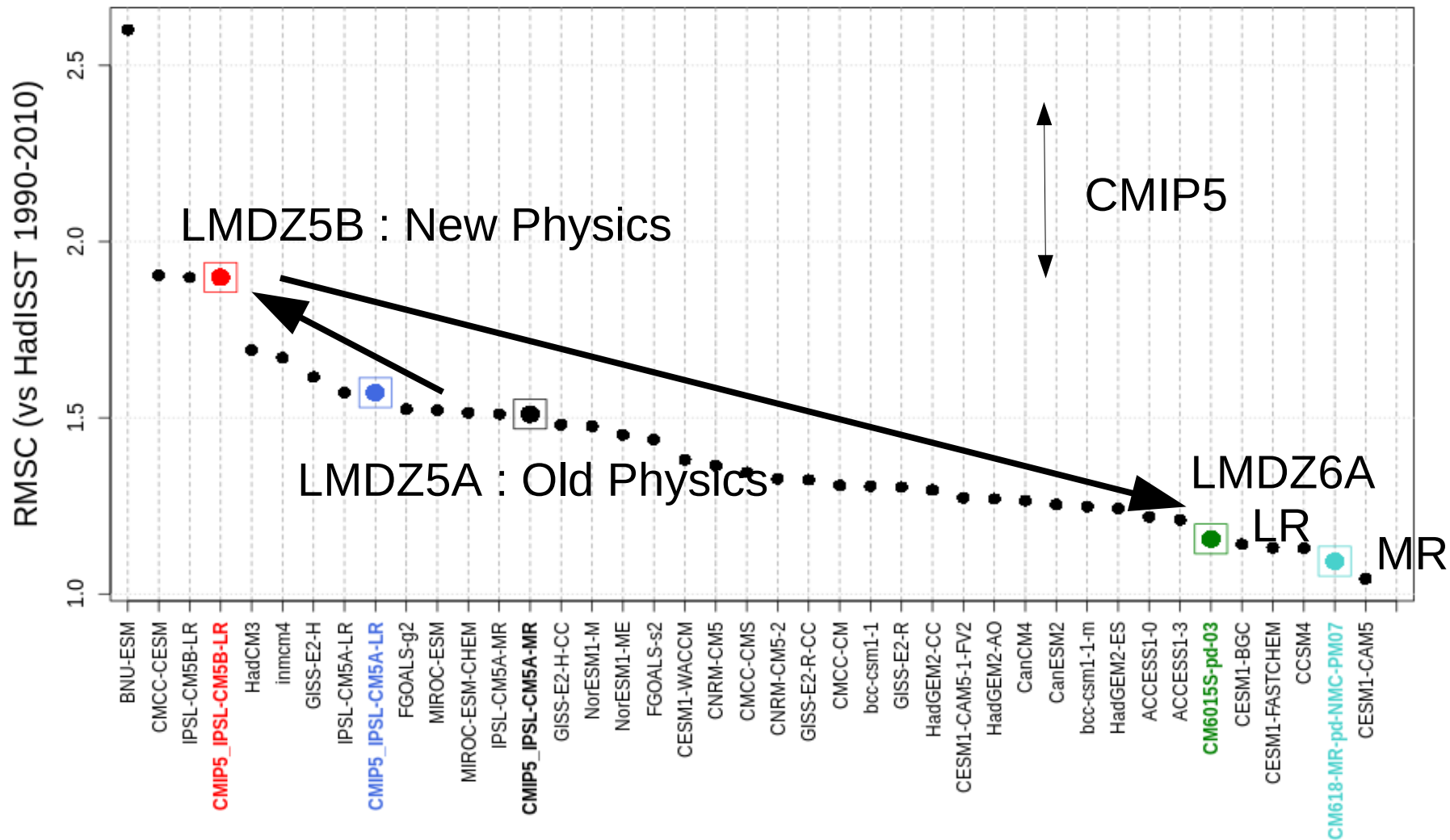


## Identification de « masques » Et métriques critiques.

# Erreur quadratique moyenne sur le cycle saisonnier des SSTs (débiaisées)

50S 50N - RMSC

annual cycle



## II. Revisit with emulators and history matching

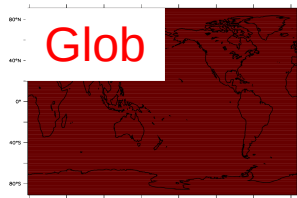
### Questions :

- Is it possible to obtain at least as good a tuning with an automatic procedure ?
- Is it possible to obtain a similar tuning of radiation with a different model

|                     |                                          |        |         |        |                                         |
|---------------------|------------------------------------------|--------|---------|--------|-----------------------------------------|
| wdens_ref_o         | 1.e-11                                   | 1.e-8  | 1.e-9   | log    | Wakes                                   |
| alp_bl_k            | 0.2                                      | 0.8    | 0.5     | linear | Convective closure                      |
| alpk 0.01           | 0.5                                      | 0.25   | linear  | -      |                                         |
| cld_lc_lsc          | 0.0001                                   | 0.001  | 0.00065 | linear | Conversion cloud → rain                 |
| ffallv_lsc          | 0.3                                      | 2.     | 0.8     | linear | Ice crystals fall velocity              |
| ratqsp0 30000       | 60000                                    | 45000  | linear  |        | Width of subgrid water distribution     |
| ratqsd0 5000        | 30000                                    | 10000  | linear  |        |                                         |
| ratqshaut           | 0.05                                     | 0.6    | 0.4     | linear | -                                       |
| bl95_b0 0.5         | 2.                                       | 1.3    | linear  |        | -                                       |
| unmepmax            | 0.0001                                   | 0.1    | 0.001   | log    | Aerosol indirect effect                 |
| sigdz 0.001         | 0.02                                     | 0.003  | linear  |        | Convective precipitation max efficiency |
| flag_wb 5           | 200                                      | 50     | linear  |        | Width of convective downdrafts          |
| fact_cldcon         | 0.5                                      | 10     | 1.      | log    | Vertical velocity at cloud base (deep)  |
| wbmax 1.5           | 6                                        | 2.8    | linear  |        | Factor on convective clouds             |
| elcrit 0.0001       | 0.002                                    | 0.0003 | linear  |        | Vertical velocity at cloud base (deep)  |
| tlcrit -65          | -35                                      | -55    | linear  |        | Conversion of convective water to rain  |
| fact_rei            | 0.5                                      | 1.3    | 1       | linear |                                         |
| fact_thermals_ed_dz |                                          | 0.05   | 0.15    | 0.07   | linear -                                |
| ~                   | Deep convection and wakes (9)            |        |         |        | Ice crystals effective radius           |
| ~                   | Boundary layer convection and clouds (2) |        |         |        | A parameter (stratocumulus)             |
| ~                   | High clouds (6)                          |        |         |        |                                         |



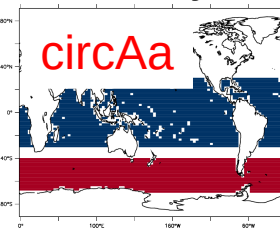
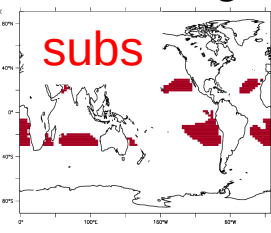
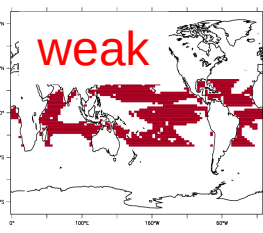
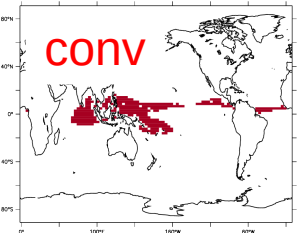
# Metrics



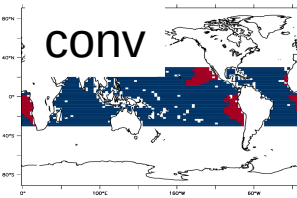
NET radiation TOA (**rt**)  
Outgoing LW radiation (**rlut**)

Circum Antact.  
anomaly

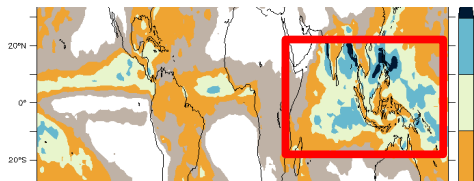
Convective, intermediate, subsiding



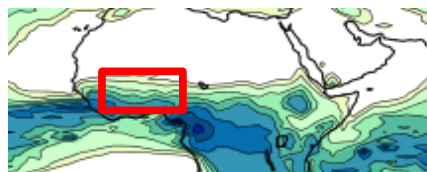
SWup TOA (**rsut**)  
LWup TOA (**rlut**)



Surface Latent heat (**hfls**), CRE SW TOA (**crest**)



« **MJO** » : rainfall variab. Between 20 and 120 day



« **AMMA** » : Mean rainfall over Sahel

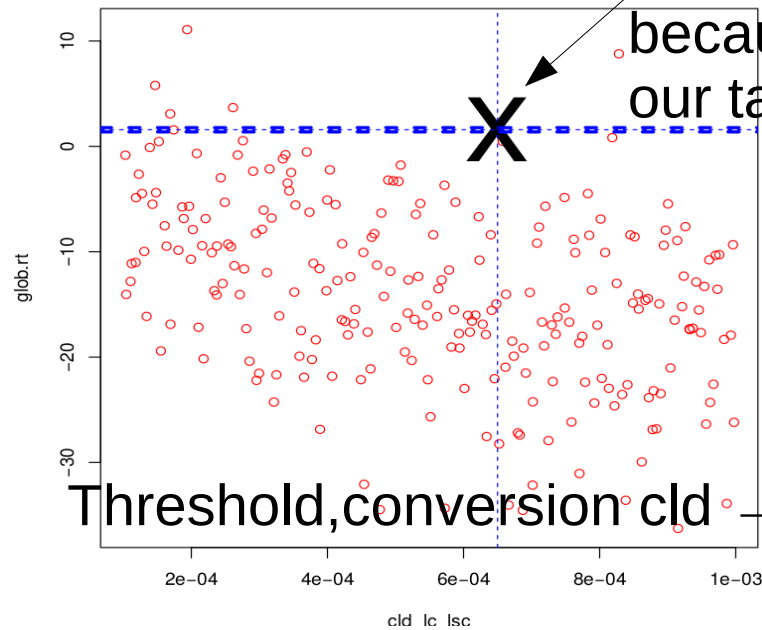
**P>50** : Occurrence of daily rainfall > 50mm

## 15 metrics

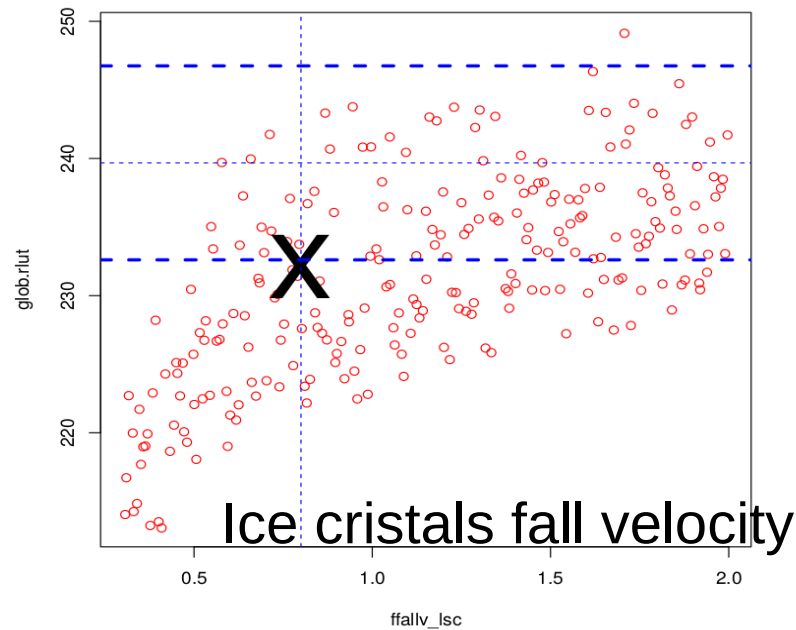
glob.rt  
glob.rlut  
circAa.rsut  
circAa.rlut  
subs.rsut  
weak.rsut  
weak.rsut  
conv.rsut  
subs.rlut  
weak.rlut  
conv.rlut  
etoa.crest  
etoa.hfls  
MJO  
Pday>50  
AMMA

Wave 1 : 250 (7 crashed) simulations of 2 years each. Metrics computed on year 2

LMDZ6A : artificially used as observation with very small error bar, because we know that this tuning to get our target  $\text{SSR}$  in coupled model

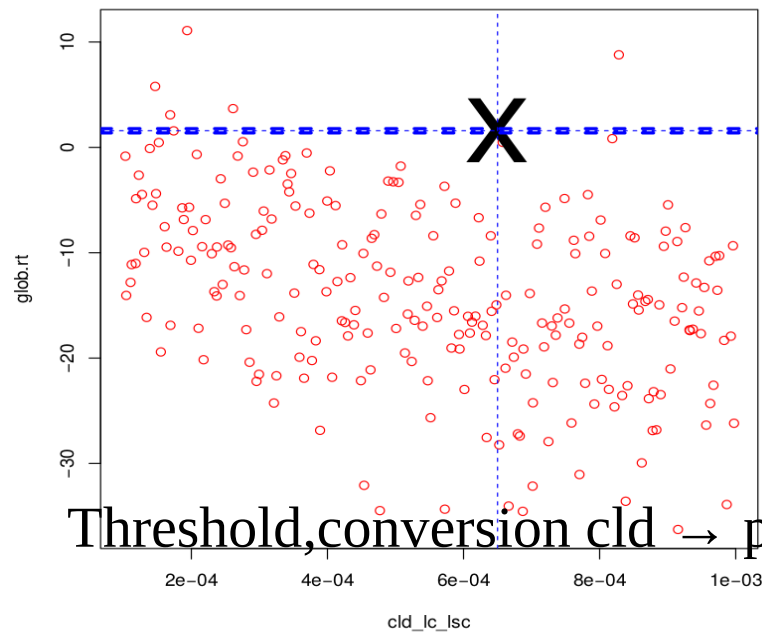


Threshold, conversion cld → precip

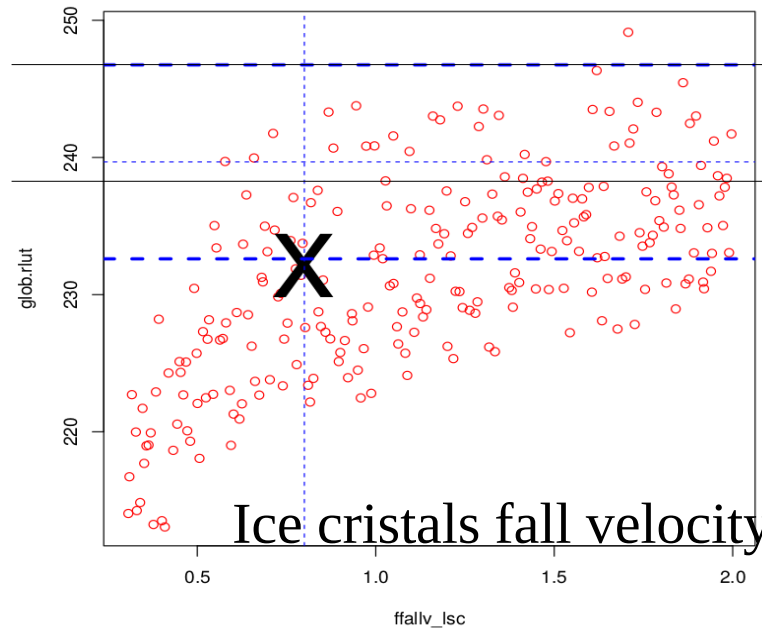


Global Outgoing LW radiation (glob.rlut,  $\text{W/m}^2$ )

Ice crystals fall velocity

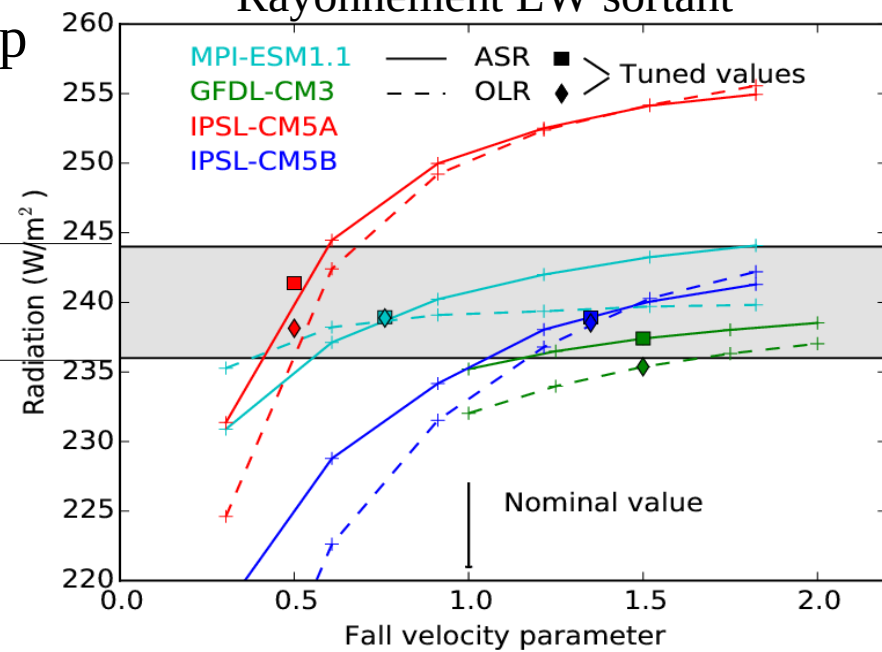


Threshold, conversion cld → precip



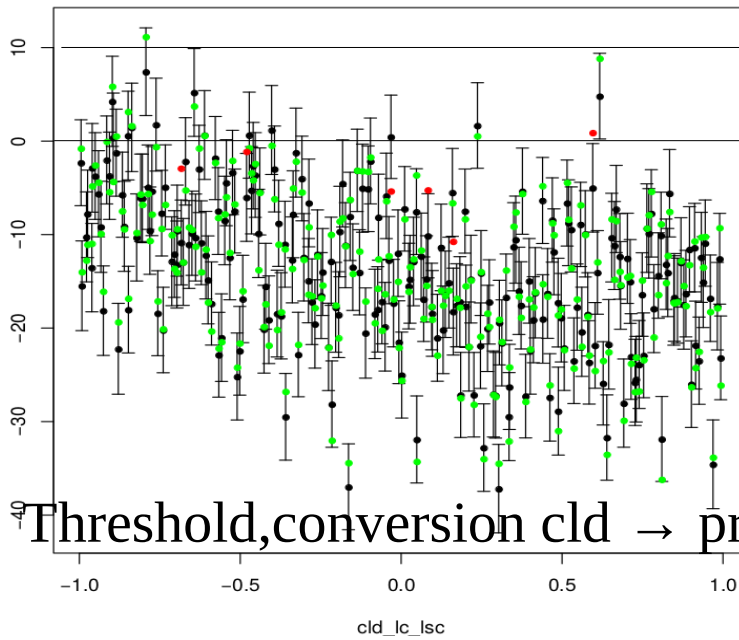
Ice crystals fall velocity

Impact sur les flux globaux au sommet  
 — Rayonnement SW absorbé  
 - - - Rayonnement LW sortant



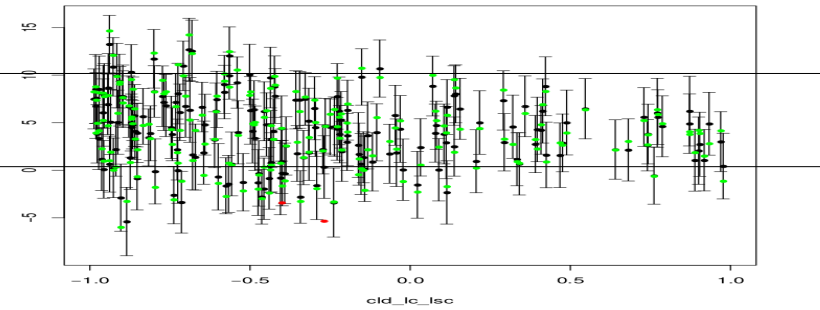
Hourdin et al., 2015, BAMS

With leave one out error bars

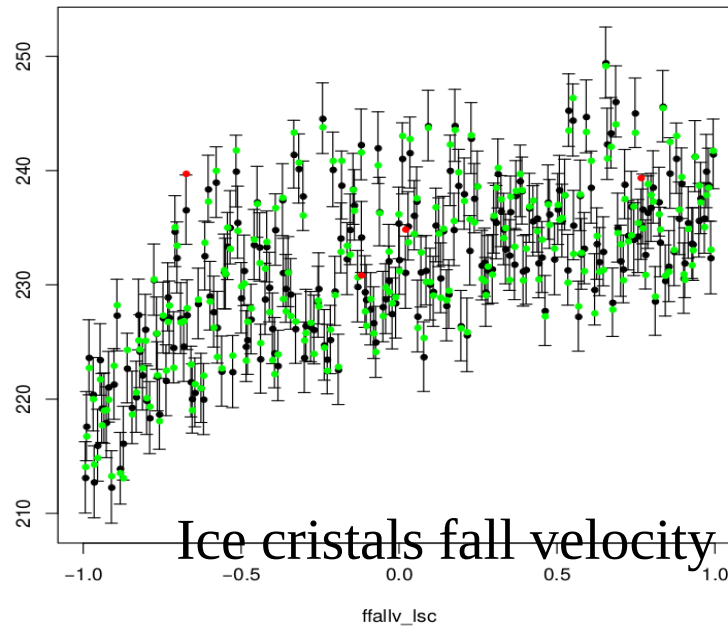


Threshold, conversion cld  $\rightarrow$  precip

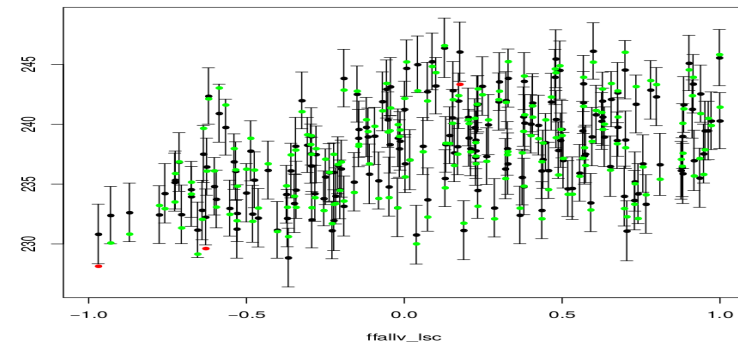
$$\sigma = 2.5 \text{ W/m}^2$$



$$\sigma = 1.6 \text{ W/m}^2$$



Ice crystals fall velocity





flag\_wb :

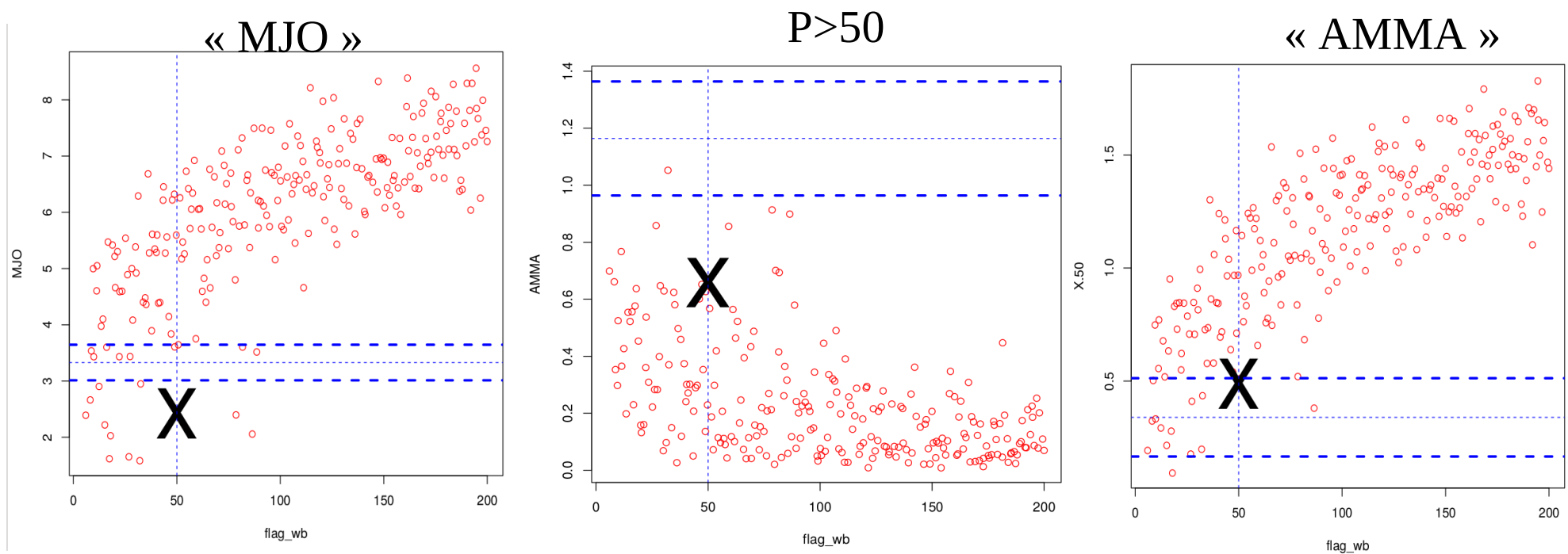
Minimum vertical velocity at cloud base in cm/s

Increasing the value makes it more difficult to trigger deep convection

A parameter that I tried several time to change during the tuning of LMDZ6A

Increasing wbmax is fine for increasing the variability in the MJO domain

But at the expense of a decrease in african mosoon and increase of « grid point storms »



Overestimated extreme rainfall  
Unestimated variability  
Unestimated african monsoon  
In the MJO region

```

lm(formula = glob.rt ~ fact_cldcon + cld_lc_lsc + I(cld_lc_lsc^2) +
lm(formula = glob.rlut ~ ffallv_lsc + I(ffallv_lsc^2) + ratqshaut +
lm(formula = circAa.rsut ~ fact_cldcon + elcrit + unmepmax +
lm(formula = circAa.rlut ~ ratqshaut + unmepmax + flag_wb + elcrit +
lm(formula = subs.rsut ~ cld_lc_lsc + I(cld_lc_lsc^2) + fact_thermals_ed_dz +
lm(formula = weak.rsut ~ fact_cldcon + cld_lc_lsc + I(cld_lc_lsc^2) +
lm(formula = weak.rsut ~ fact_cldcon + cld_lc_lsc + elcrit +
lm(formula = conv.rsut ~ fact_cldcon + elcrit + I(elcrit^2) +
lm(formula = subs.rlut ~ ffallv_lsc + I(ffallv_lsc^2) + ratqshaut +
lm(formula = weak.rlut ~ ffallv_lsc + I(ffallv_lsc^2) + I(ffallv_lsc^3) +
lm(formula = conv.rlut ~ ratqshaut + ffallv_lsc + unmepmax +
lm(formula = etoa.crest ~ fact_cldcon + elcrit + I(elcrit^2) +
lm(formula = etoa.hfls ~ flag_wb + elcrit + alp_bl_k + fact_thermals_ed_dz +
lm(formula = MJO ~ flag_wb + I(flag_wb^2) + alp_bl_k + elcrit +
lm(formula = X.50 ~ flag_wb + I(flag_wb^2) + alp_bl_k + ffallv_lsc +
lm(formula = AMMA ~ flag_wb + wbmax + elcrit + alp_k + sigdz +

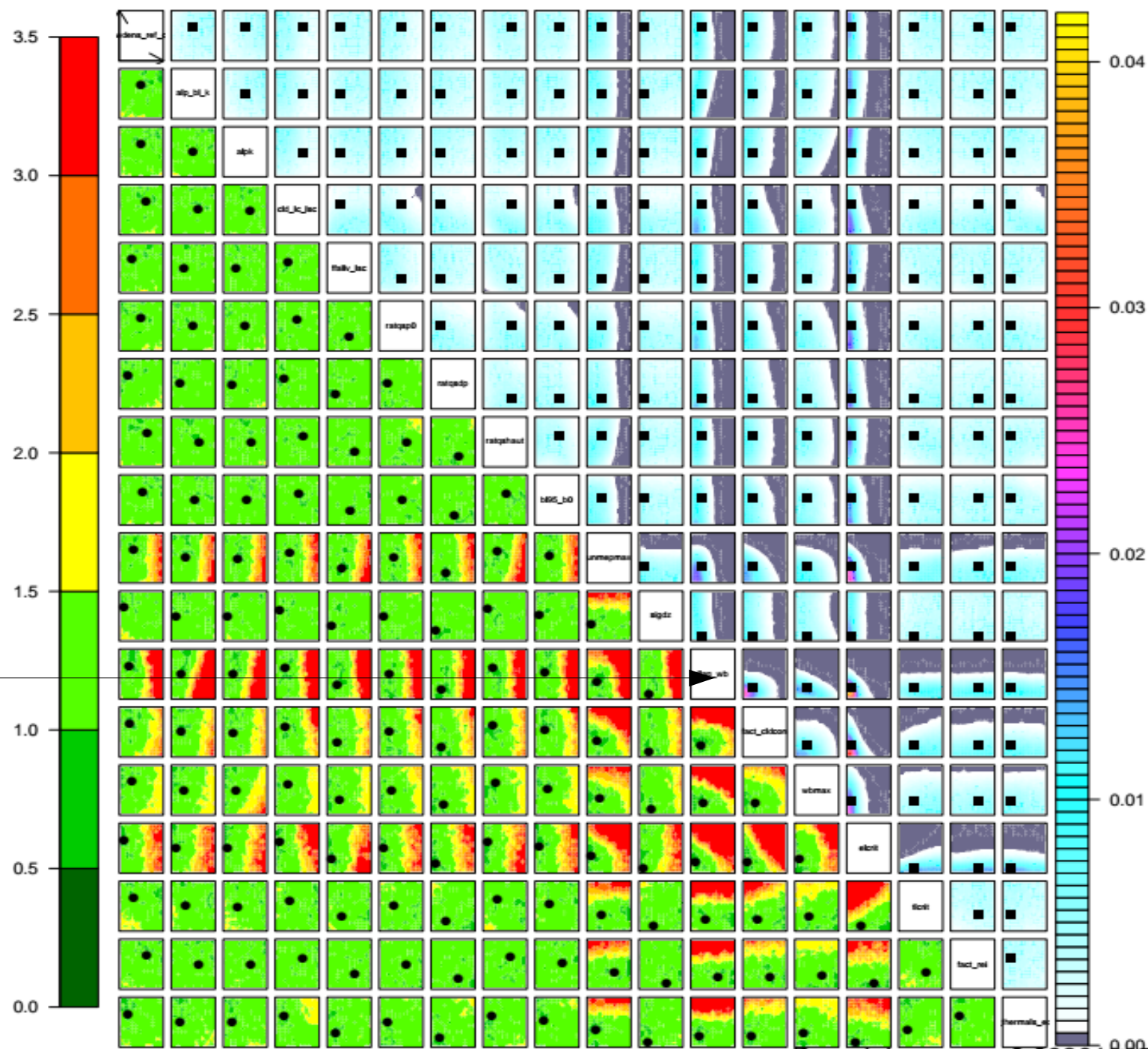
```

2 Waves (Wave2 with 200 simulations minus 2 crashes) :

[1] "Remaining space after wave1: 0.005435"

[1] "Remaining space after wave2: 0.003077"

flag\_wb

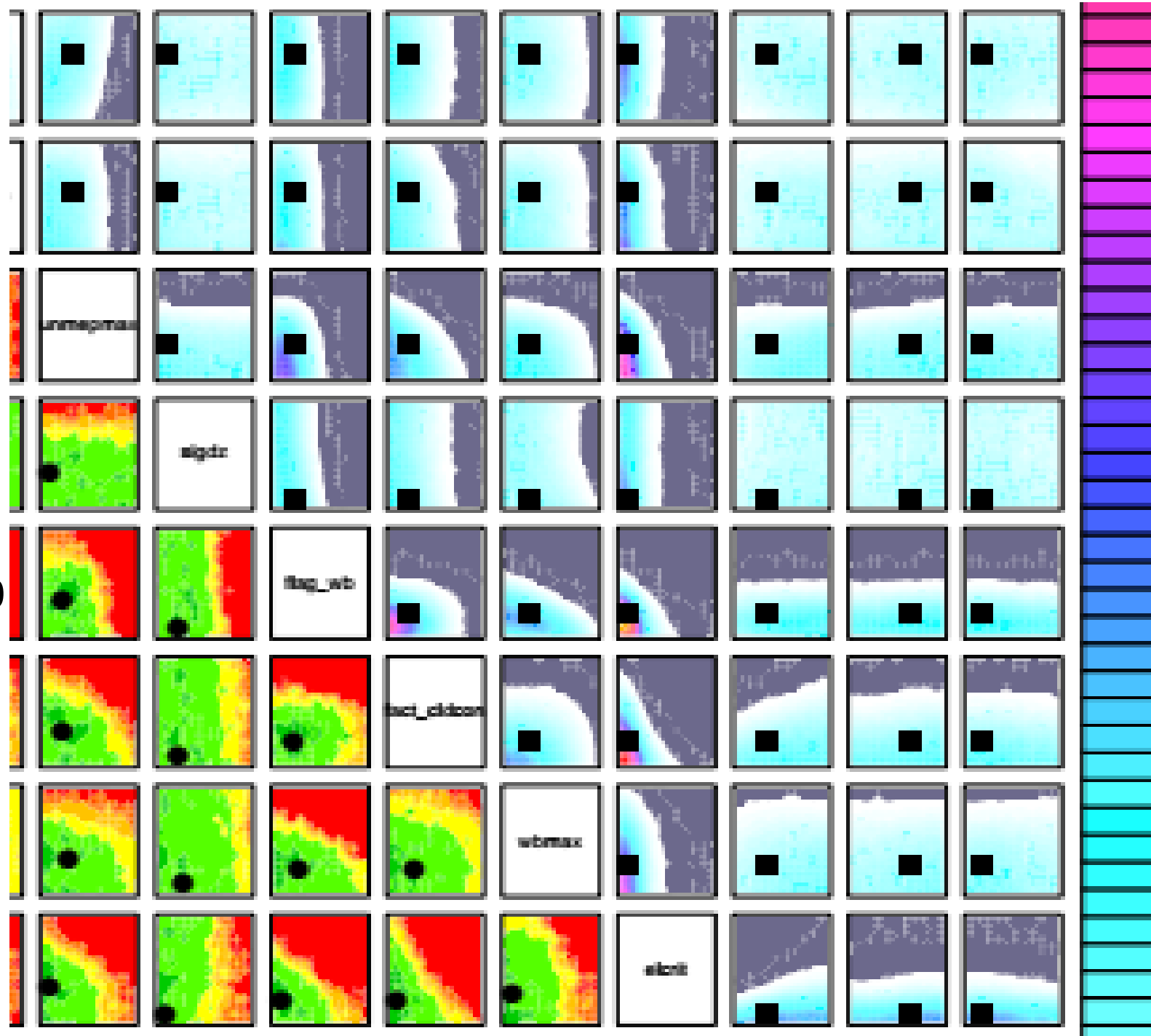


WAVEN=2

tau=0

cutoff=3

sample\_size=20000000



# Les paramétrisations des modèles de climat

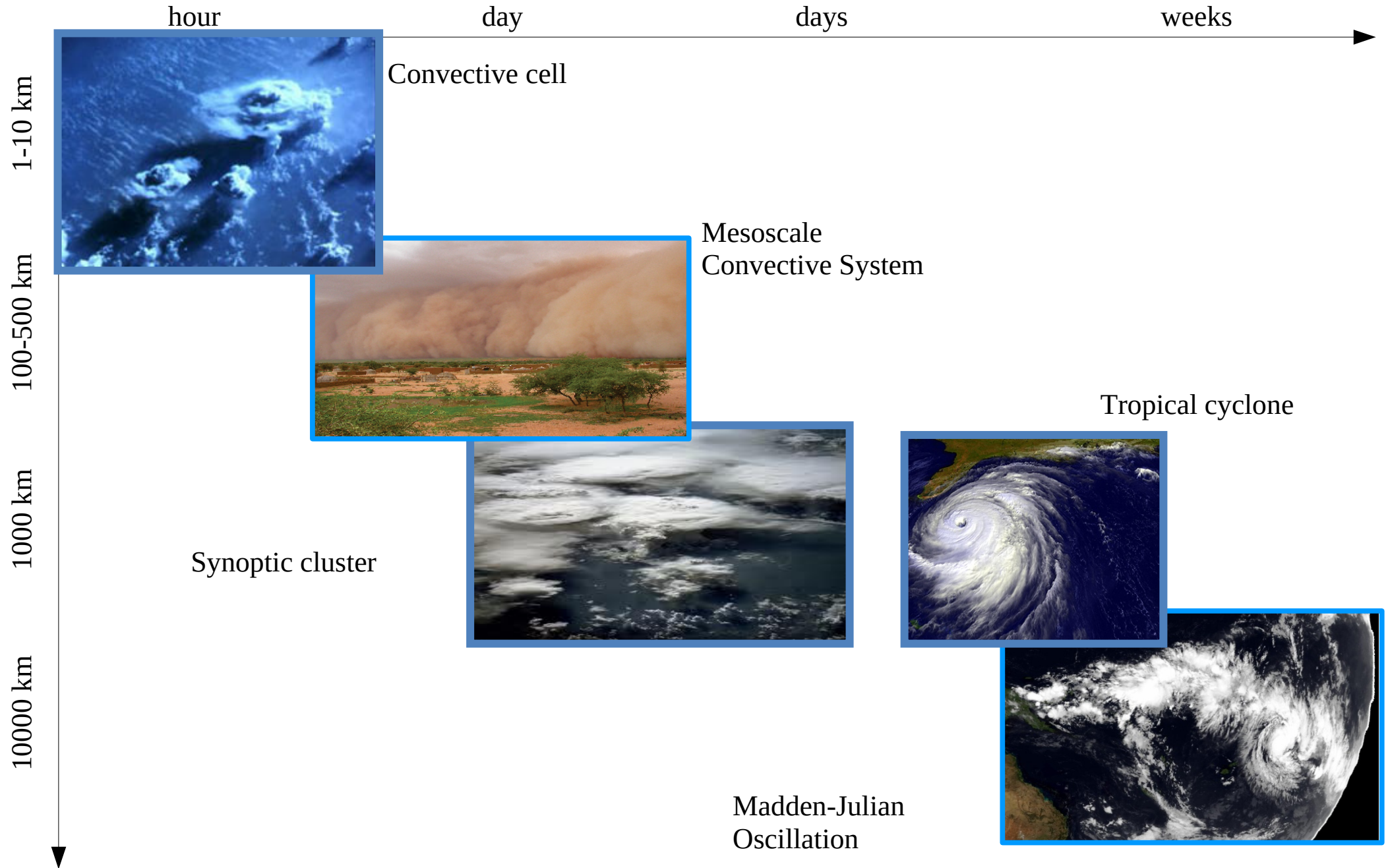
## II. Rayonnement, tuning et climat

1. Un aperçu des questions de modélisation du transfert radiatif
2. Ajustement des paramètres
3. Les modèles et leurs utilisations

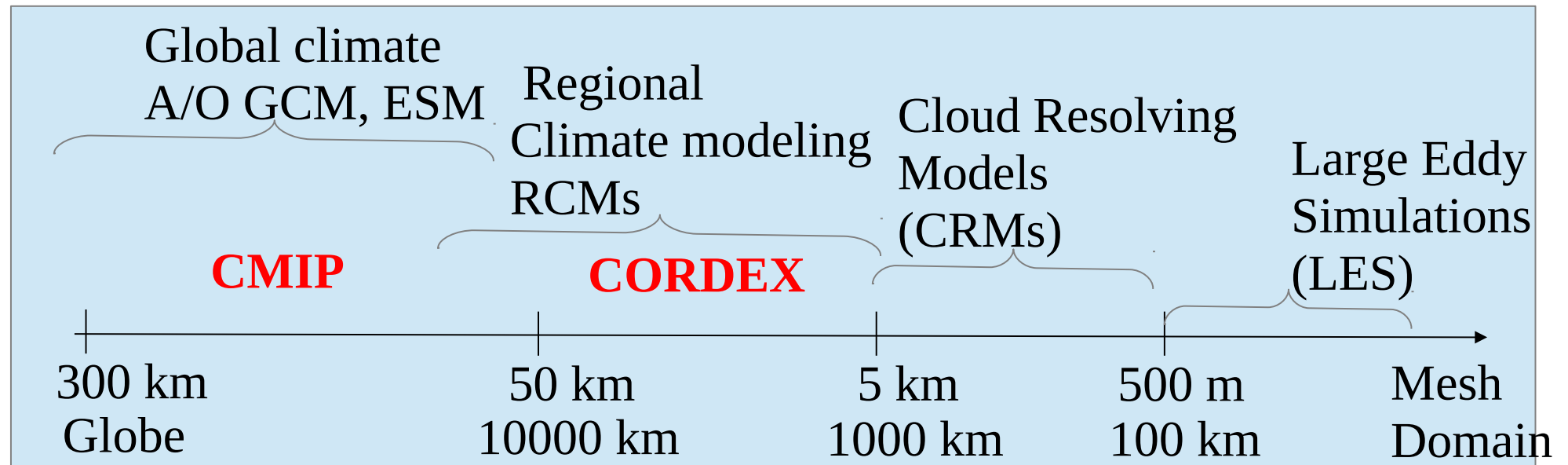


### 3. Les modèles et leurs utilisations

Spatial and temporal scales of convection: a challenge for models



### 3. Les modèles et leurs utilisations



**Parameterized convection**  
Subrid scale clouds, poor microphysics  
Climate studies (CMIP)

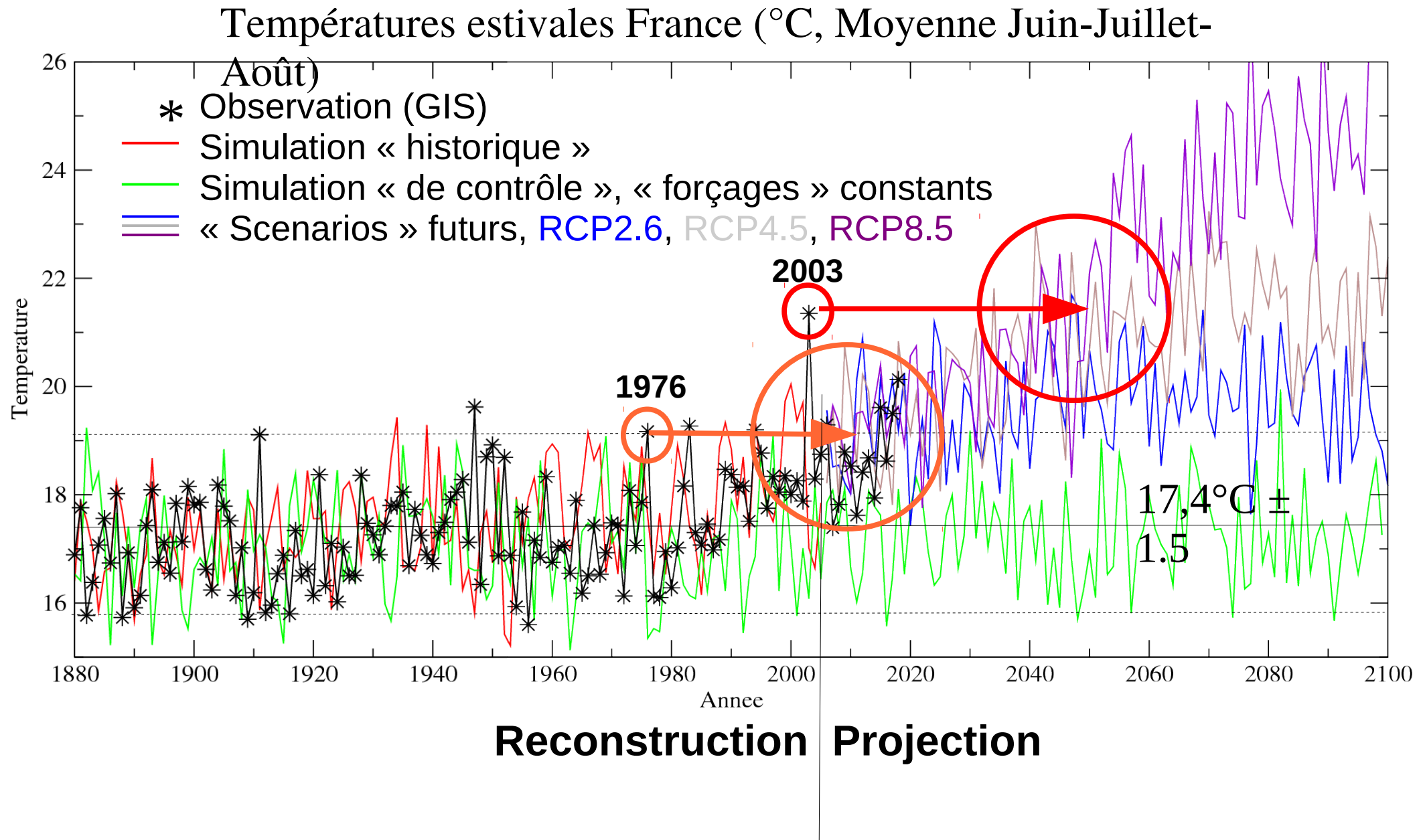
**Explicit convection**  
1/0 clouds, sophisticated microphysics  
Process studies (GASS)

←→  
Zone grise convection

←→  
Zone grise couche limite

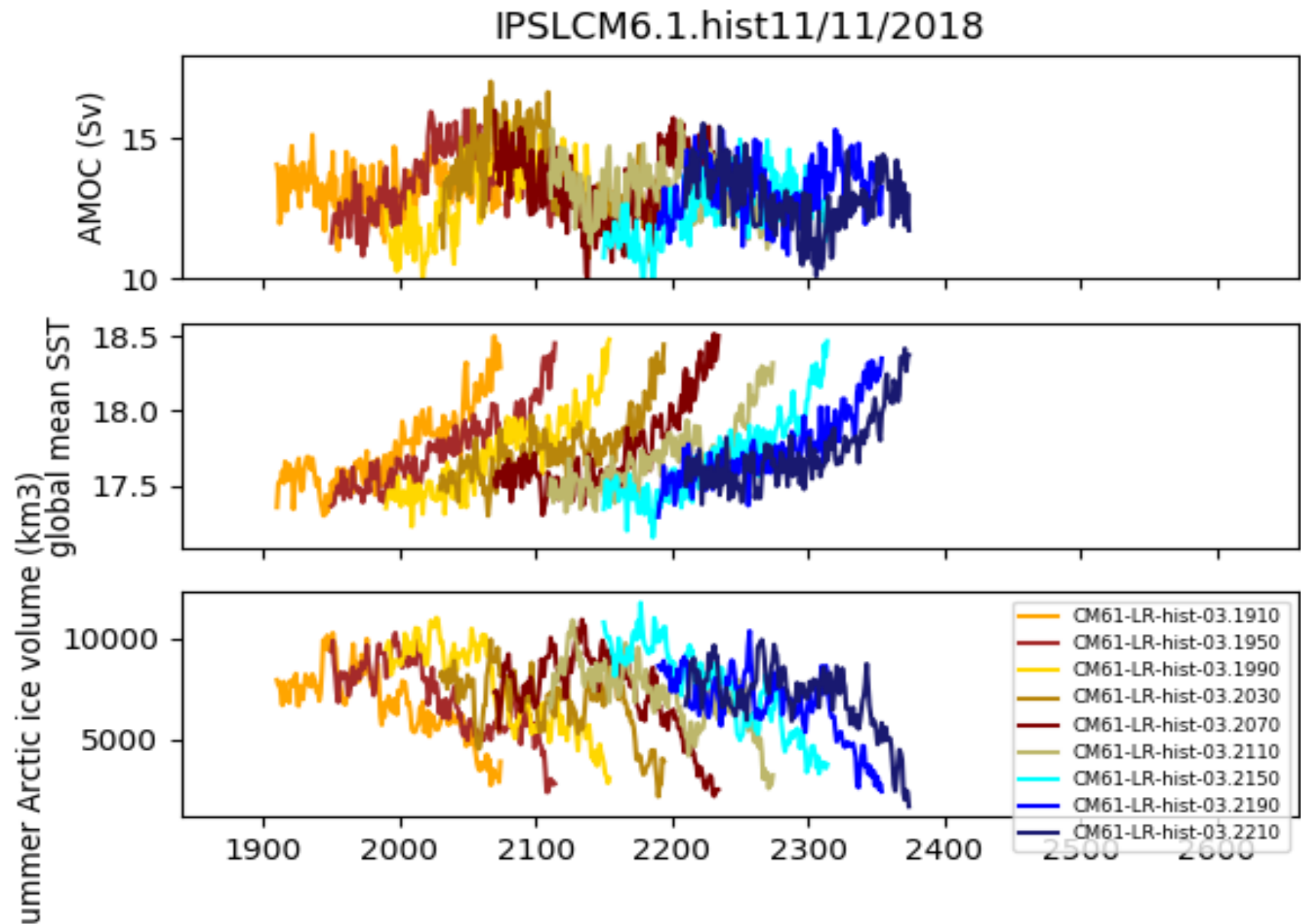
### 3. Les modèles et leurs utilisations

## Exemple d'utilisation de simulations climatiques (modèle IPSL-CM5A)



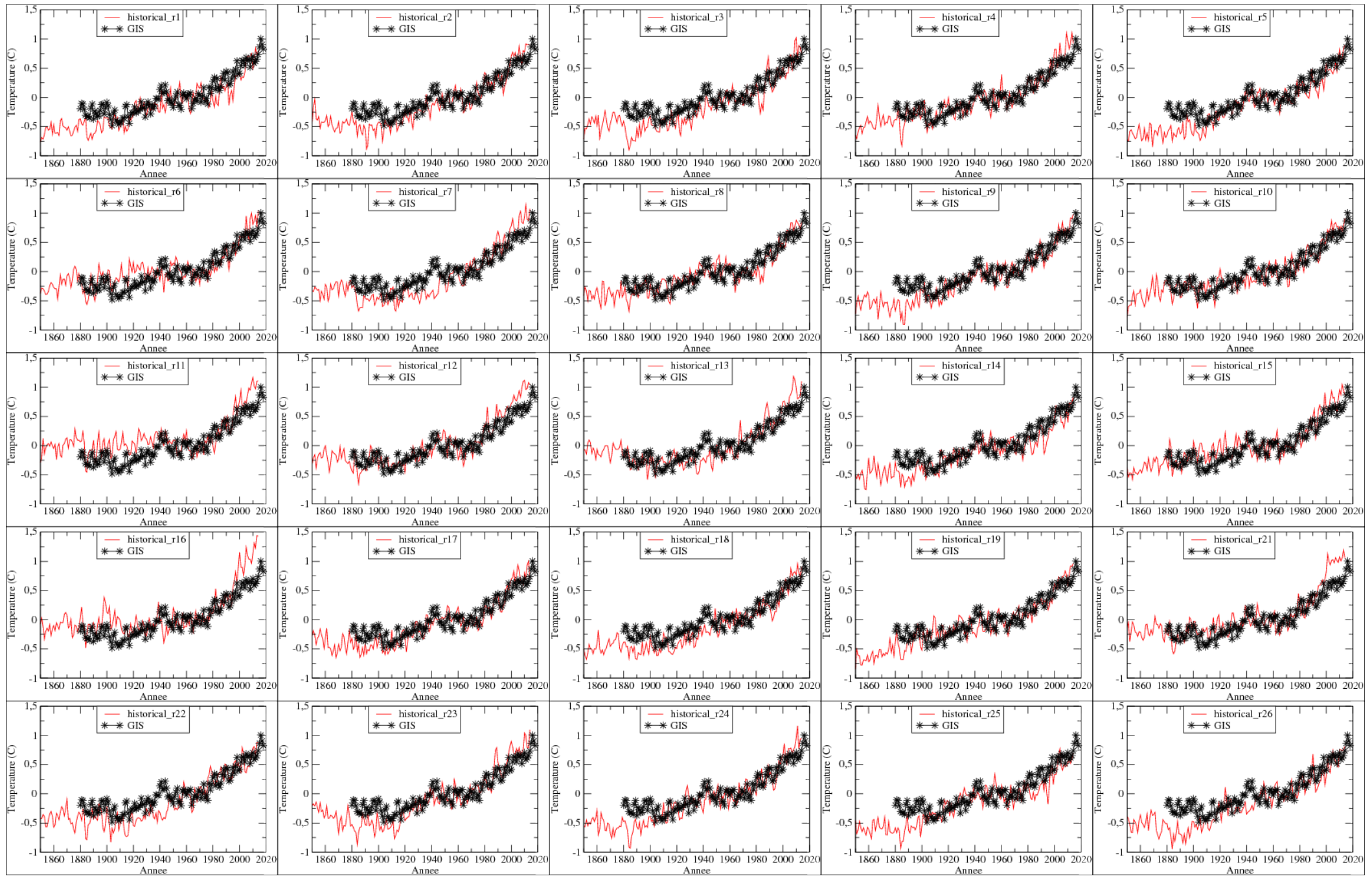
### 3. Les modèles et leurs utilisations

1890 r26  
1910 r3  
1930 r4  
1950 r1  
1970 r14  
1990 r5  
2010 r15  
2030 r6  
2050 r16  
2070 r7  
2090 r17  
2110 r8  
2130 r18  
2150 r9  
2170 r19  
2190 r10  
2210 r20





### 3. Les modèles et leurs utilisations

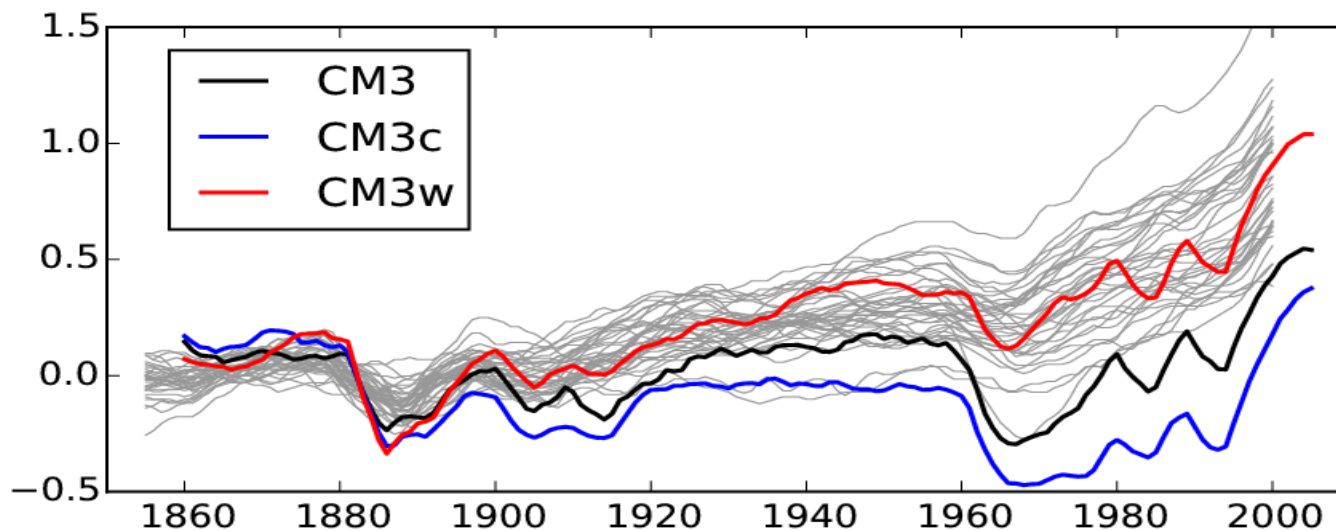
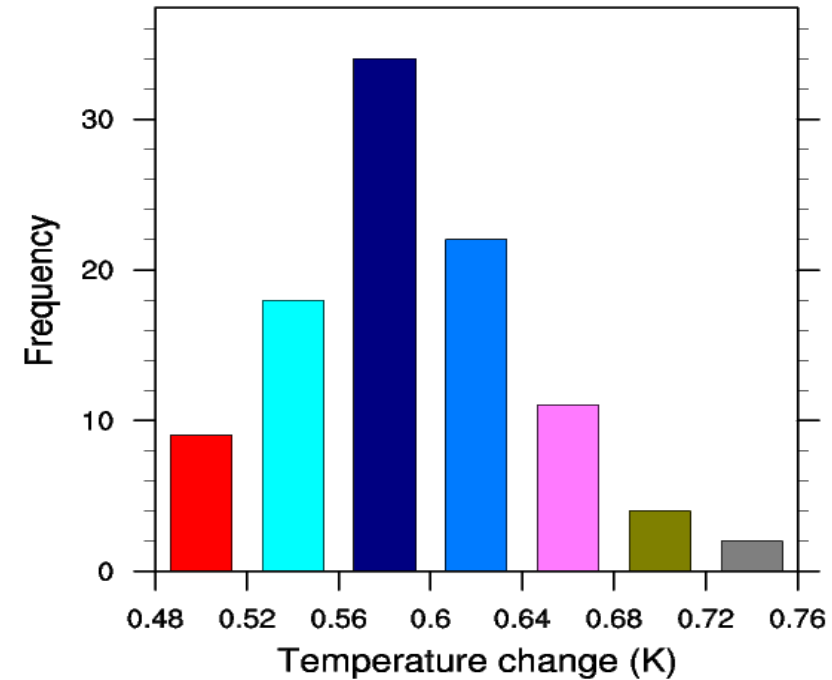
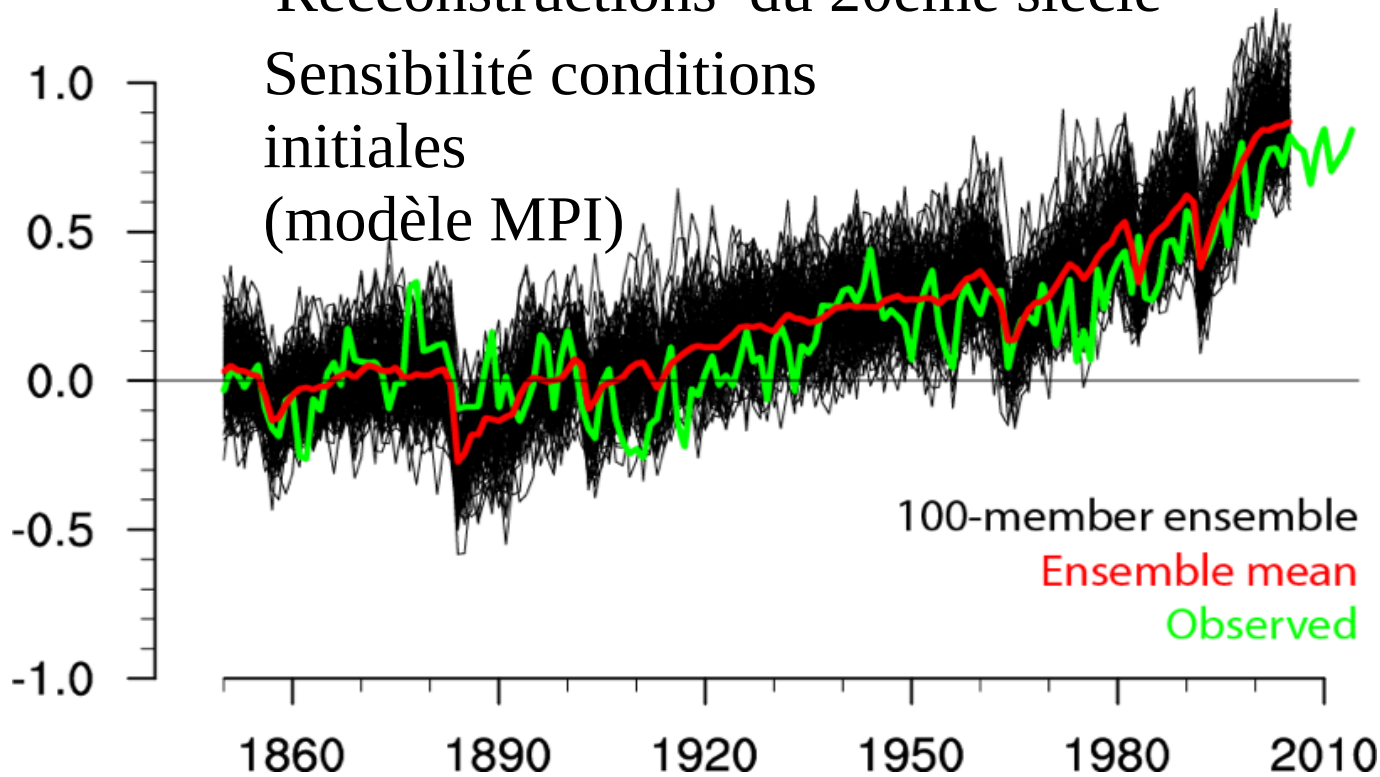




### 3. Les modèles et leurs utilisations

Reconstructions du 20ème siècle

Sensibilité conditions  
initiales  
(modèle MPI)



Effet du tuning  
Modèle du GFDL

### 3. Les modèles et leurs utilisations

#### **Approche classique pour l'amélioration des modèles de climat :**

On effectue des simulations longues ou ensembles de simulations

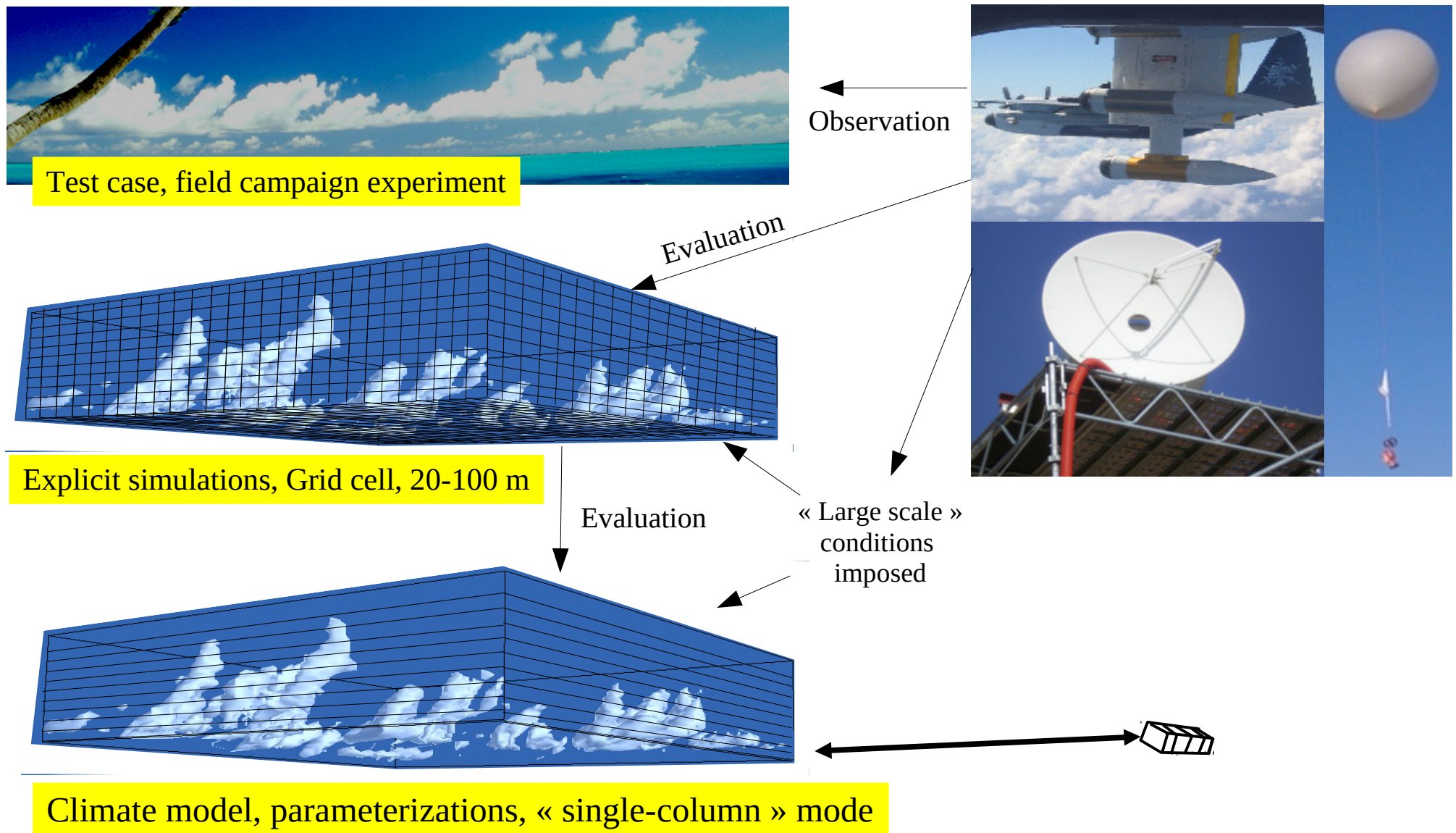
- statistiques robustes pour le modèle
- On compare ces statistiques aux observations (pour lesquelles on ne dispose que d'une seule réalisation).
- On peut résumer la différence aux observations à un ensemble de métriques (qui peuvent dépendre du but assigné au modèle).
- On effectue des simulations de sensibilité à des paramètres incertains.
- On choisit des jeux de paramètres plus favorables.
- Emergence de méthodes automatiques et « objectives » (mais le choix des objectifs est toujours subjectif)

Mais système couplé, chaotique, variable à toutes les échelles de temps et d'espace.

Nécessite des jeux d'observations très complets (spatial et temporel)

### 3. Les modèles et leurs utilisations

#### 1.2 Cloud process studies and the use of high resolution explicit models



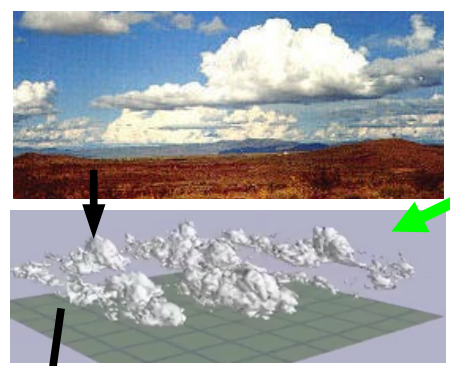
- **Parameterizations are evaluated against other models**
- **Can be done for realistic test cases but also with more idealized forcing (check the response of the parameterization to perturbations)**



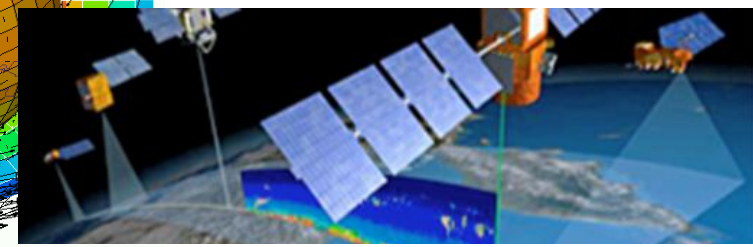
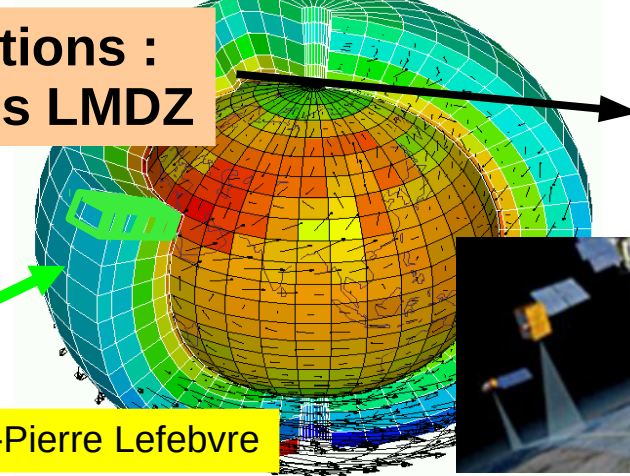
# Amélioration/évaluation des paramétrisations : apport du « modèle du thermique » dans LMDZ

1/ en mode uni-  
colonne (SCM)  
vs simulations  
explicites (LES)

2/ dans le modèle  
climatique 3D vs  
satellites



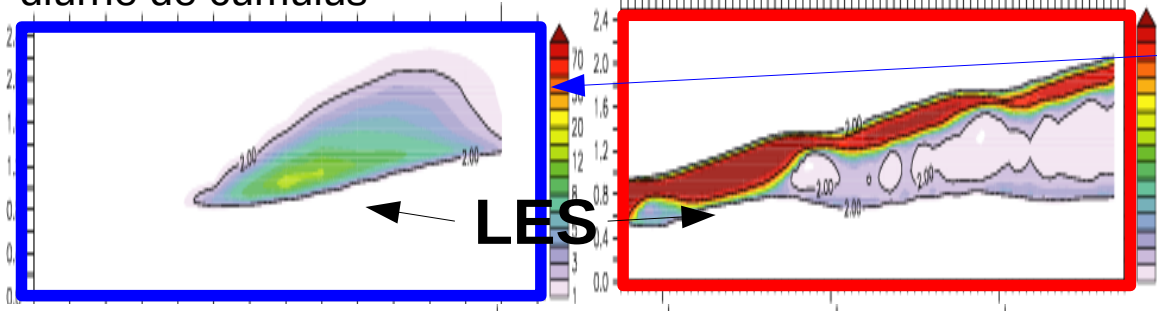
Marie-Pierre Lefebvre



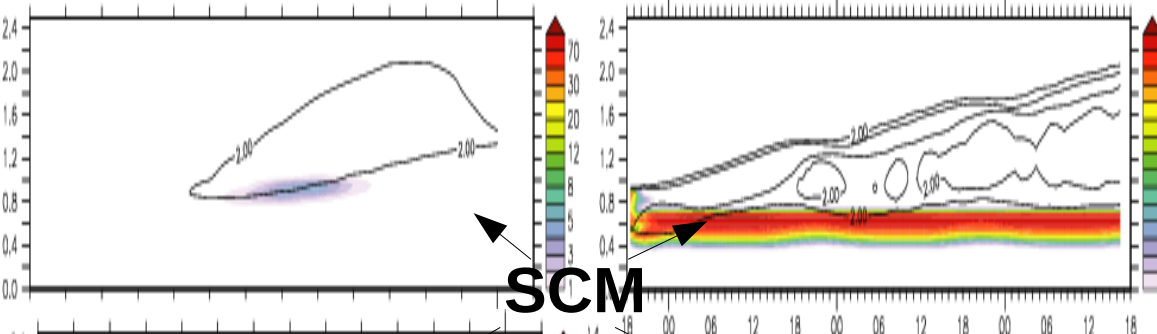
Cas ARM  
(Oklahoma) de cycle  
diurne de cumulus

Cas « sandu »  
Transition strato  
cumulus → cumulus

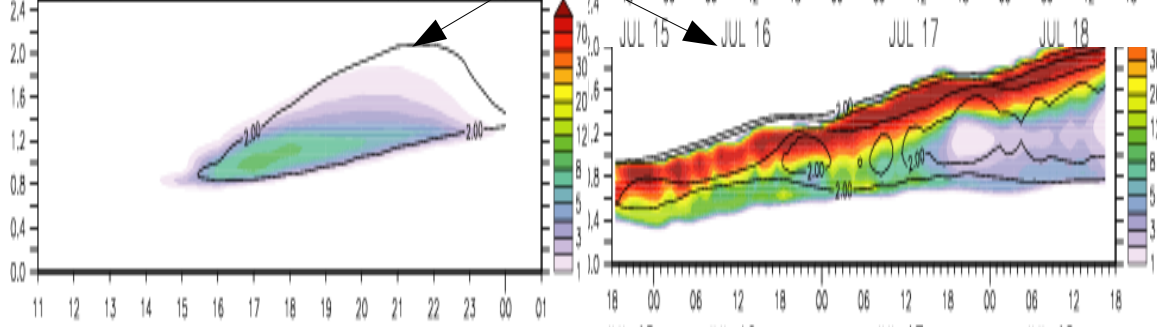
Reference



CMIP3

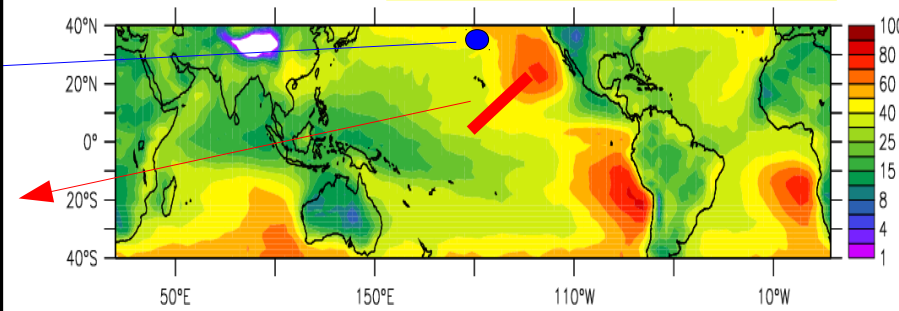


CMIP6

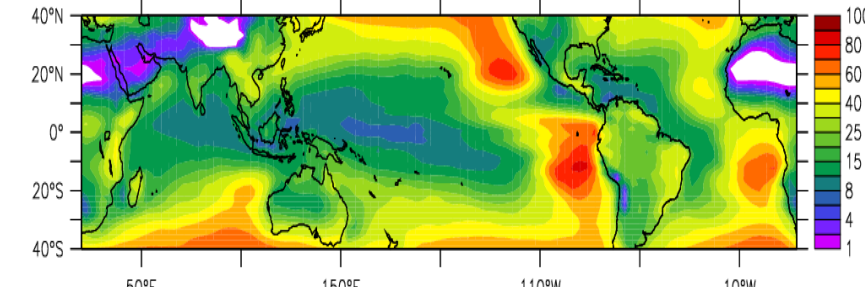
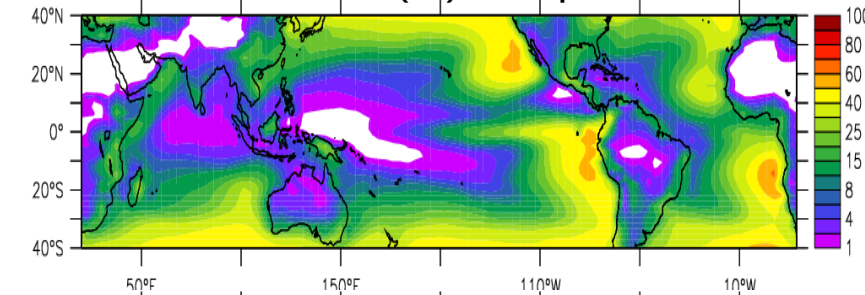


Low clod cover (%), annual mean  
Calipso lidar

Abderrhamane Idelkadi



3D climate simulation (annual mean)  
Low clod cover (%), Calipso simulator



### 3. Les modèles et leurs utilisations

## Utilisation de simulations guidées ou initialisées

On élimine le chaos en forçant la trajectoire météo à suivre la trajectoire observée. Permet de travailler sur les paramétrisations physique à situation synoptique connue, et de comparer au jour le jour a des données insitu.

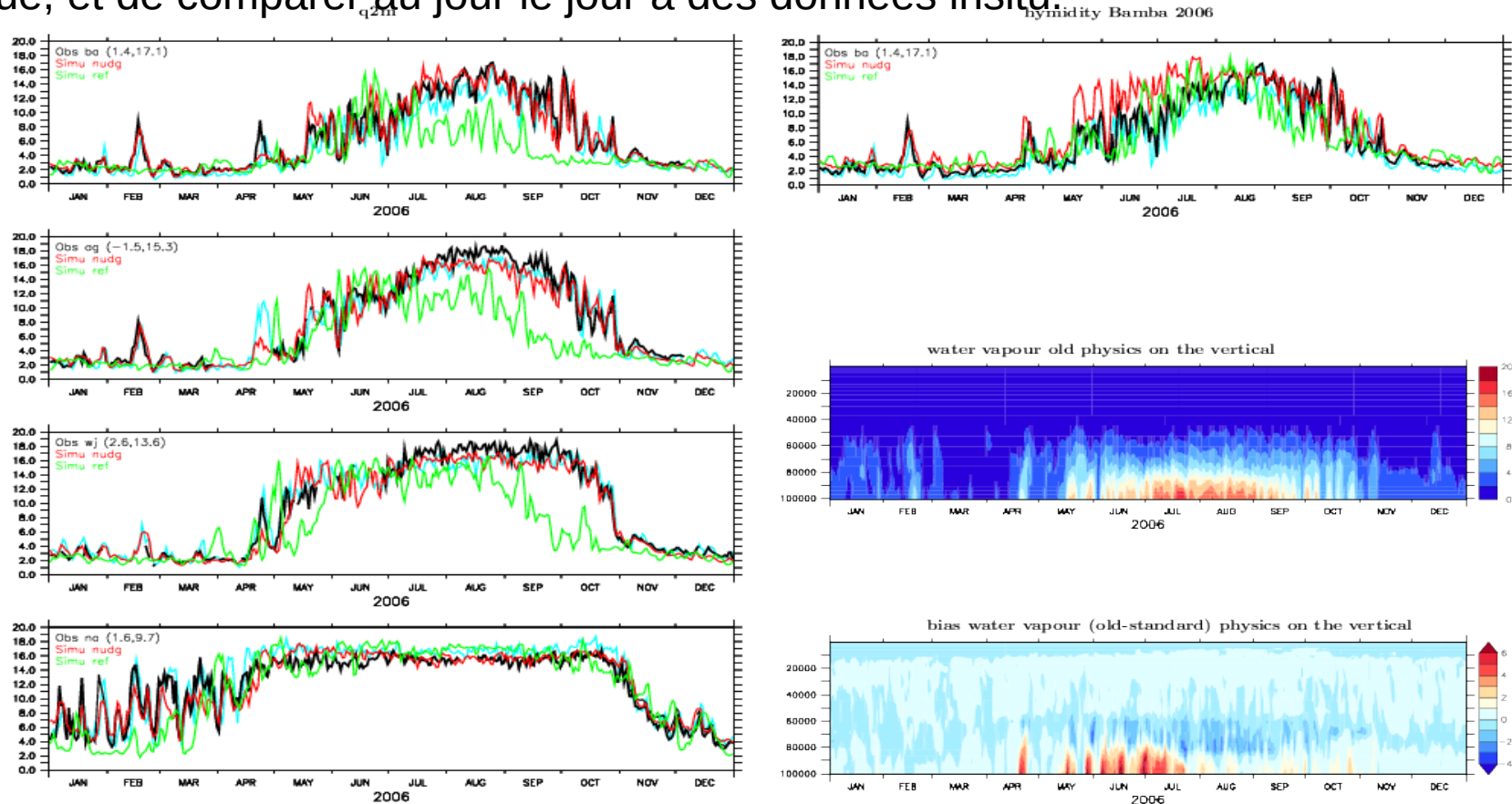


Figure 3: 1<sup>st</sup> column 1 top-down : evolution of specific humidity at 2 meters in 2006, Top-down: Bamba, Agoufou (1.5 W, 15.3N), Wankama (2.6E, 13.6N) Bira (1.7E, 9.8N) and Nahohoulou (1.6E, 9.7N) with addition Bira (1.7E, 9.8N) local Observations (black), ERAI (blue bright) nudged simulation (red), reference simulations (green). column 2, top-down : evolution of specific humidity at 2 meters and precipitable water, old physics and difference between old and standard in Bamba (1.4E, 17.1N) in 2006 . 2<sup>nd</sup>



# 1. Introduction et principes des paramétrisations



- Calcul de l'**état 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**       $\underline{E}$ ,  $\underline{Q}$ ,  $Sq$        $\underline{U}$ ,  $\theta$ ,  $q$  à  $t+\delta t$

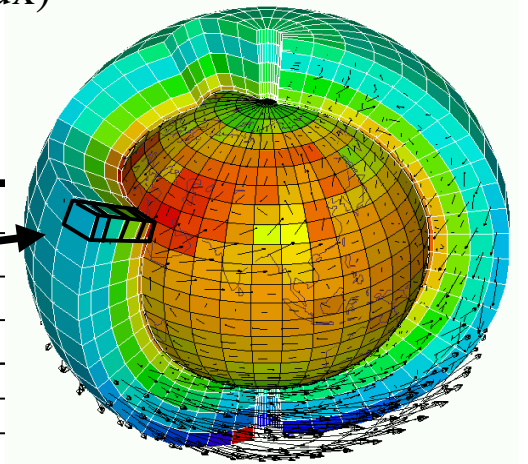
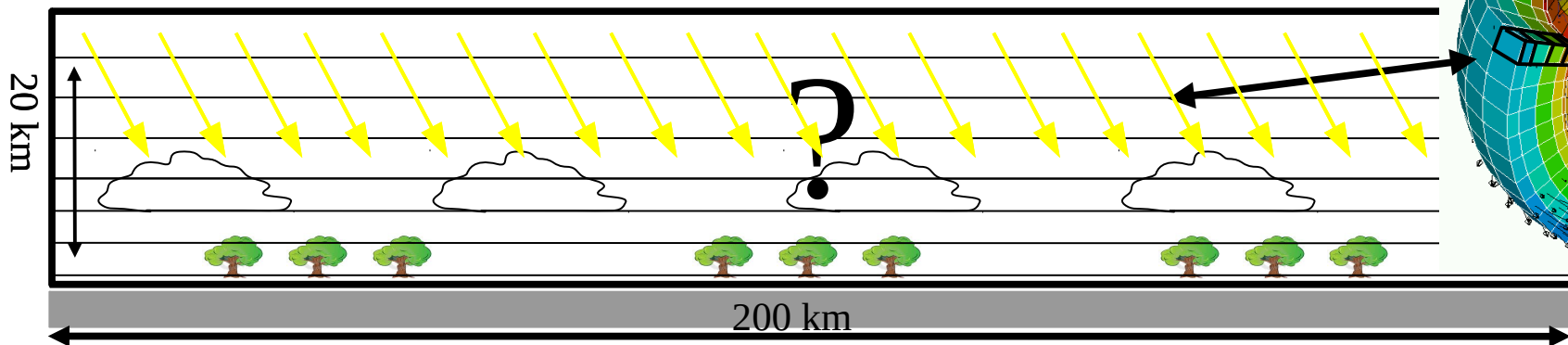


- **hypothèses d'homogénéité** (statistique) horizontale des processus représentés (comme dans l'hypothèse plan parallèle du transfert radiatif)

Equations uni-dimensionnelles en  $z$  (échanges verticaux)

Colonnes atmosphériques indépendantes

Dans une colonne du modèle ...



## Conclusions 1/3 :

### Nouvelles paramétrisations :

- Développées sur un mélange de « phénoménologie » des processus en jeu et de principes fondamentaux (conservation masse, énergie, humidité).
- Couche limite convective sèche et nuageuse TKE + flux de masse (de plus en plus répandu)
- Poche froides : très peu répandu jusque là.
- Recherche au long cours, mais passionnante (et publiable).
- Enjeux sur le couplage entre les différents processus
- Des paramétrisations de plus en plus complexes. Où s'arrêter ?

### Les paramétrisations : pas seulement un pis aller.

- un modèle avec sa vocation d'analyse.
- Découpage : effet des nuages sur le climat ?
- Paramétrisations avec de plus en plus de physique et de paramètres internes « observables ».

### Aspects numériques :

- Moins « balisé » que sur les coeurs dynamiques
- schémas implicites pour la diffusion verticale (y compris couplage à la surface)
- Utilisation de schémas amonts dans les paramétrisations en flux de masse
- importance donnée aux lois de conservation ...
- ou au respect d'autres principes fondamentaux comme la réciprocité pour le rayonnement.
- conservation de l'énergie pas évidente du tout, notamment avec changements de phase

### Informatique :

Colonnes indépendantes. Parallélisation naturelle.

## Conclusions 2/3 :

### Changement de paradigme I

Utilisation systématique de la comparaisons aux simulations LES pour le développement, l'ajustement et l'évaluation des paramétrisations.

### Changement de paradigme II :

Classiquement :  $\underline{U}, q, q$  à l'instant  $t \rightarrow$  **variables internes**  $\rightarrow E, Q, Sq \rightarrow \underline{U}, q, q$  à  $t+dt$

De plus en plus : variables d'états internes (pronostiques plutôt que diagnostiques) aux paramétrisations avec un couplage entre elles de ces paramétrisations.

### Changement de paradigme III

#### Zone grise

Avec la convection, les augmentations de résolution ne vont pas d'elle même.

A partir de 20-50 km : « orages points de grilles »

Convection explicite à partir de 1-2 km mais encore malmenée.

Couche limite convective 200m-20m

**Irruption du stochastique :** en lien en pratique avec la nature « événementielle » de la convection

## Conclusion 3/3 : Stratégie de développement / évaluation

### Observations à disposition :

Satellites : Modèles → simulateurs d'obs / obs

Souvent préférable à

Obs → Inversion variables modèles / modèle

Réanalyses : champs 3D directement comparables. Mais pas des obs !

Un bon modèle peu faire mieux

Observations de surface : souvent locales (attention aux climatologies « grillées » !)

Ou reconstituées à partir d'observations satellites (attention au côté indirect)

Observations in situ : de surface sur site ou campagnes de terrain.

### Méthodologie de comparaisons :

**Simulations en mode climatique** (sensible aux conditions initiales) : la comparaison ne peut être que statistique. Besoin de simulations d'ensemble ou longue.

**Simulations guidées ou prévision à court terme** : permet de la comparaison au jour le jour et sur site (l'impossibilité de comparé un modèle même global à des simulations de surface est souvent « survendu »).

## Configuration de modèle =

Grille , contenu physique + **choix/ajustement de paramètres libres**

**Nouvelle stratégie : LES/1D → Simulations guidées → Simulations climatiques  
+ outils d'exploration de l'espace des paramètres (emulateurs, méta modèles)**