Feedback and Sensitivity in Climate

Frédéric Hourdin

June 18, 2009

Outline

1. Boundary layer processes in climate
   - Boundary layer as a boundary condition
   - Boundary layer and clouds
   - Boundary layer in the "Earth Systemp"
2. Approaches to the parametrization of the boundary layer
   - Scale decomposition
   - Diffusive approaches and their limitations
   - Alternatives to diffusive approaches
3. Boundary layer, clouds and convection
   - Could schemes in climate models
   - Cumulus clouds and mass flux parametrisations
   - Boundary layer and deep convection

Outline

1. Boundary layer processes in climate
   - Boundary layer as a boundary condition
   - Boundary layer and clouds
   - Boundary layer in the "Earth Systemp"
2. Approaches to the parametrization of the boundary layer
   - Scale decomposition
   - Diffusive approaches and their limitations
   - Alternatives to diffusive approaches
3. Boundary layer, clouds and convection
   - Could schemes in climate models
   - Cumulus clouds and mass flux parametrisations
   - Boundary layer and deep convection

ps2pdf OK.

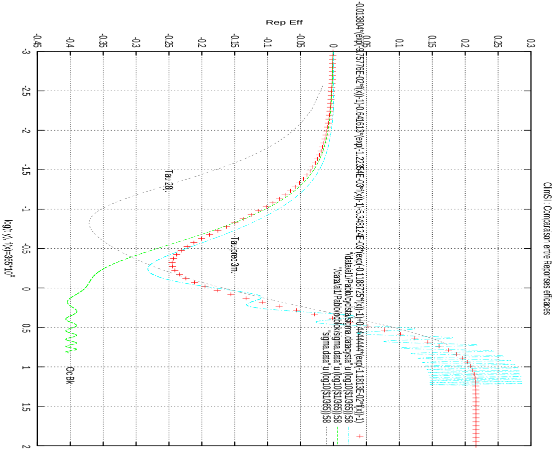


Figure: ClimSI WV feedback model responses.

Outline

1. Boundary layer processes in climate
   - Boundary layer as a boundary condition
   - Boundary layer and clouds
   - Boundary layer in the "Earth Systemp"
2. Approaches to the parametrization of the boundary layer
   - Scale decomposition
   - Diffusive approaches and their limitations
   - Alternatives to diffusive approaches
3. Boundary layer, clouds and convection
   - Could schemes in climate models
   - Cumulus clouds and mass flux parametrisations
   - Boundary layer and deep convection

Outline

1. Boundary layer processes in climate
   - Boundary layer as a boundary condition
   - Boundary layer and clouds
   - Boundary layer in the "Earth Systemp"
2. Approaches to the parametrization of the boundary layer
   - Scale decomposition
   - Diffusive approaches and their limitations
   - Alternatives to diffusive approaches
3. Boundary layer, clouds and convection
   - Could schemes in climate models
   - Cumulus clouds and mass flux parametrisations
   - Boundary layer and deep convection

Outline

Scale decomposition of the conservation equation

Conservation equation

$\mathbf{v}$: wind field

c : conserved quantity ($dc/dt = 0$),

$$\textbf{Advective form :} \quad \frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{vgrad} c = 0 \tag{1}$$

$$\textbf{Flux form :} \quad \frac{\partial \rho c}{\partial t} + \mathrm{div}\left(\rho \mathbf{v} c\right) = 0 \tag{2}$$

Scale decomposition

$\overline{X}$: "average" or "large scale" variable

$X' = X - \overline{X}$: turbulent fluctuation

$\overline{\mathbf{v}c} = \overline{\mathbf{v}}\overline{c} + \overline{\mathbf{v}'c'}$

$$\frac{\partial \overline{q}}{\partial t} + \overline{V}.\mathbf{grad}\ \overline{q} + \frac{1}{\rho}\mathrm{div}\left(\overline{\rho \mathbf{v}'c'}\right) = 0 \tag{3}$$

Under boundary layer approximations $(\partial/\partial x << \partial/\partial z)$:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{v}.\mathbf{grad}\ c + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial z}\overline{w'c'} = 0 \tag{4}$$

Turbulent closure :
Construct a model relating $\overline{w'c'}$ to the large scale variables.

Outline

Diffusive or local formulations for the PBL

$$\overline{w'c'} = -K_z \frac{\partial c}{\partial z} \qquad \longrightarrow \qquad \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) \tag{5}$$

- Analogy with molecular viscosity.
- Down-gradient fluxes.
- Turbulence acts as a "mixing"

Turbulent diffusivity K_z

- Prandlt (1925) mixing length : $K_z = l\overline{|w'|}$ or $K_z = l^2 \frac{\partial ||\mathbf{v}||}{\partial z}$
- Accounting for static stability (Ex. Louis 1979)

$$K_z = f(Ri) l^2 \left| \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \right|, \qquad \text{with } Ri = \frac{g}{\theta} \frac{\frac{\partial \theta}{\partial z}}{\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z}\right)^2} \tag{6}$$

- Turbulent kinetic energy $\overline{w'}^2 \simeq e = \frac{1}{2}\left[\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}\right]$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\overline{w'u'}\frac{\partial u}{\partial z} - \overline{w'v'}\frac{\partial v}{\partial z} - -\frac{g}{\theta}\overline{w'\theta'} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{w'p'}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{w'e}}{\partial z} - \epsilon \tag{7}$$

Ex : Mellor and Yamada $\overline{w'\phi'} = -K_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}$ with $K_\phi = l\sqrt{2e} S_\phi(Ri)$

Note : Imposing $\frac{\partial e}{\partial t}$ gives a coefficient of the form Eq. 6

Outline

Outline

1. Boundary layer processes in climate
   - Boundary layer as a boundary condition
   - Boundary layer and clouds
   - Boundary layer in the "Earth Systemp"
2. Approaches to the parametrization of the boundary layer
   - Scale decomposition
   - Diffusive approaches and their limitations
   - Alternatives to diffusive approaches
3. Boundary layer, clouds and convection
   - Could schemes in climate models
   - Cumulus clouds and mass flux parametrisations
   - Boundary layer and deep convection

Outline

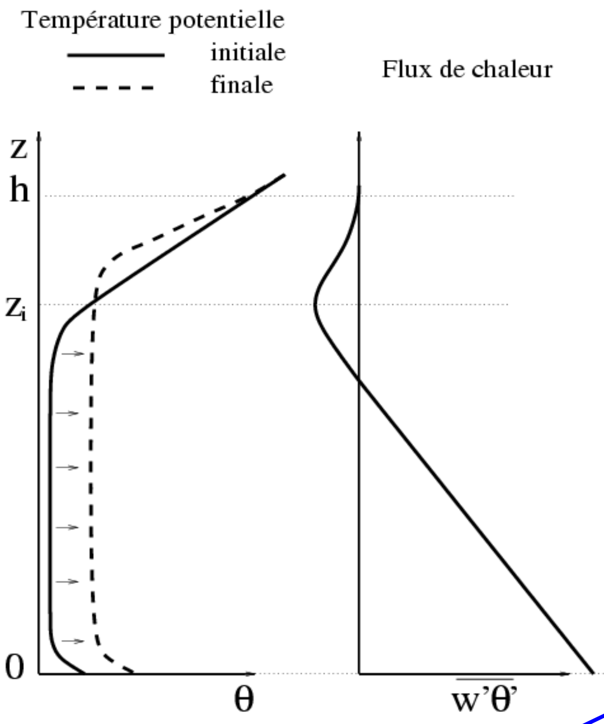
Outline

Développements en cours et futurs autour du modèle du thermique

Frédéric Hourdin, Anne Mathieu, Alain Lahellec, Fleur Couvreux, Laurent Menut,
Camille Risi, Abderrahmane Idelkadi, Catherine Rio, Olivia Coindrau

I. Le modèle du thermique. Validation 1D avec des résultats LES.
II. Les traceurs. Simulations radon 3D. -> Cas LES avec traceurs.
III. Couplage avec les nuages. Etudes locales (au SIRTA) avec le modèle 3D.
IV. Cycle diurne de la convection et AMMA

Motivations :
- Couche limite du modèle LMDZ obsolète.
- Prise en compte du transport par les structures organisées de la couche limite (convective).
- Modélisation intégrée du climat et changement climatique
  -> contraintes suplémentaires sur les modèles comme la bonne représentation du transport des espèces traces.
  -> paramétrisations plus "physiques" et moins adhoc.



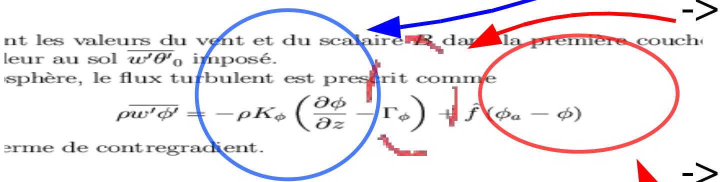
La couche limite convective

chauffage par le bas -> couche bien mélangée (q=cste)
-> chauffage réparti uniformément
-> W' q' décroit linéairement avec z

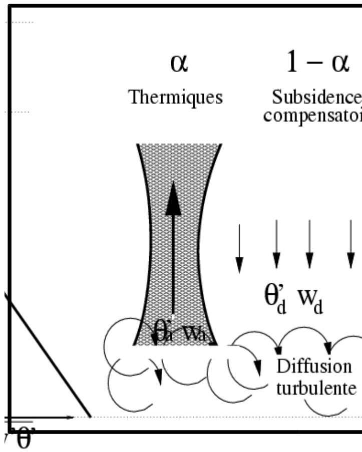
Th

Structures organisées (thermiques, panaches, rouleaux ...)
-> MiseS en défautS des paramétrisations en diffusion turbulente

Diffusion turbulente :
Kz(Ri) ex: Louis 1979, et schéma LMD (Laval et al., 1981)
Mellor et Yamada (MY) Kz=l e de/dt = ..., TKE



Schémas non locaux
-> Contregradient (Deardorf, 1966). LMD : contregradient imposé
similarité étendue à la couche limite convective (Troen & Mart, 1986,
Holtzlag & Boville, 1993= HB)
-> Longueurs de mélange non locales (Bougeault)
-> Flux de masses
* Modèles de couche mélangée (Betts, Albrecht, Wang, Suarez et al....)
* au sens des paramétrisations de la convection profonde
(Chatfield & Brost, 1987, TH : Hourdin et. al., JAS, 59:1105-1123)
-> Matrices de transiliance (Stull, 1984, Pleim & Chang, 1992)
-> Schémas d'ordre plus élevé
(Abdella & Mc Farlane, 1997, Randall et al., 1992, Lapen & Ransall, 2002)



LMD+TH
MY+TH

Exemple classique de rues de nuages créées au sommets de rouleaux convectifs lors d'arrivé d'air polair froid sur des masses océaniques plus chaudes.

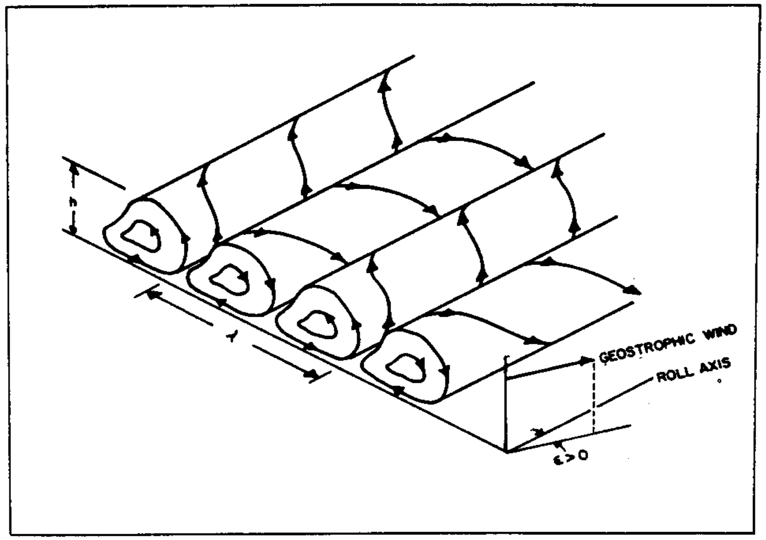
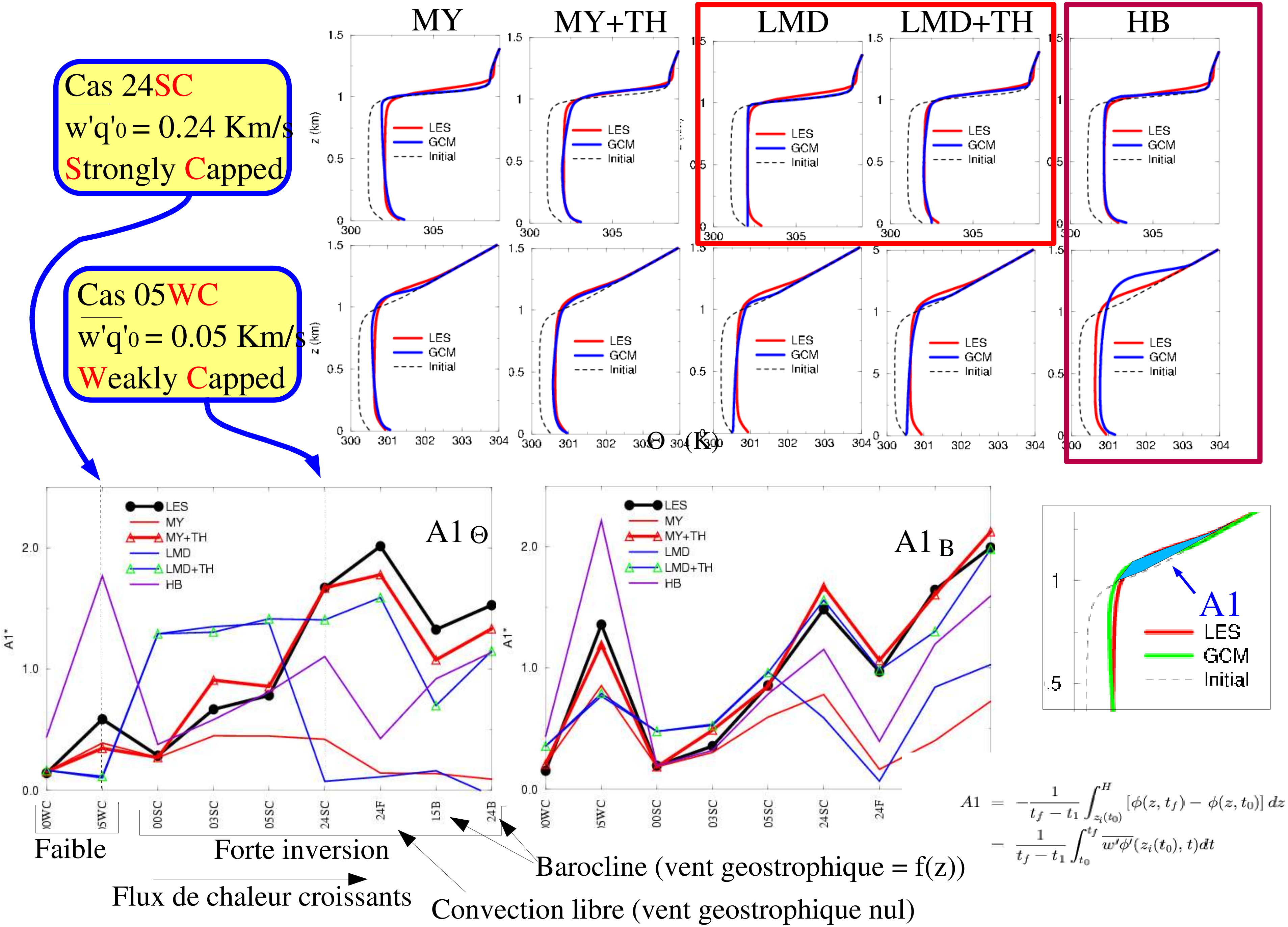


FIG. 1. Schematic diagram of horizontal convective rolls (Brown 1980; Kelly 1982).



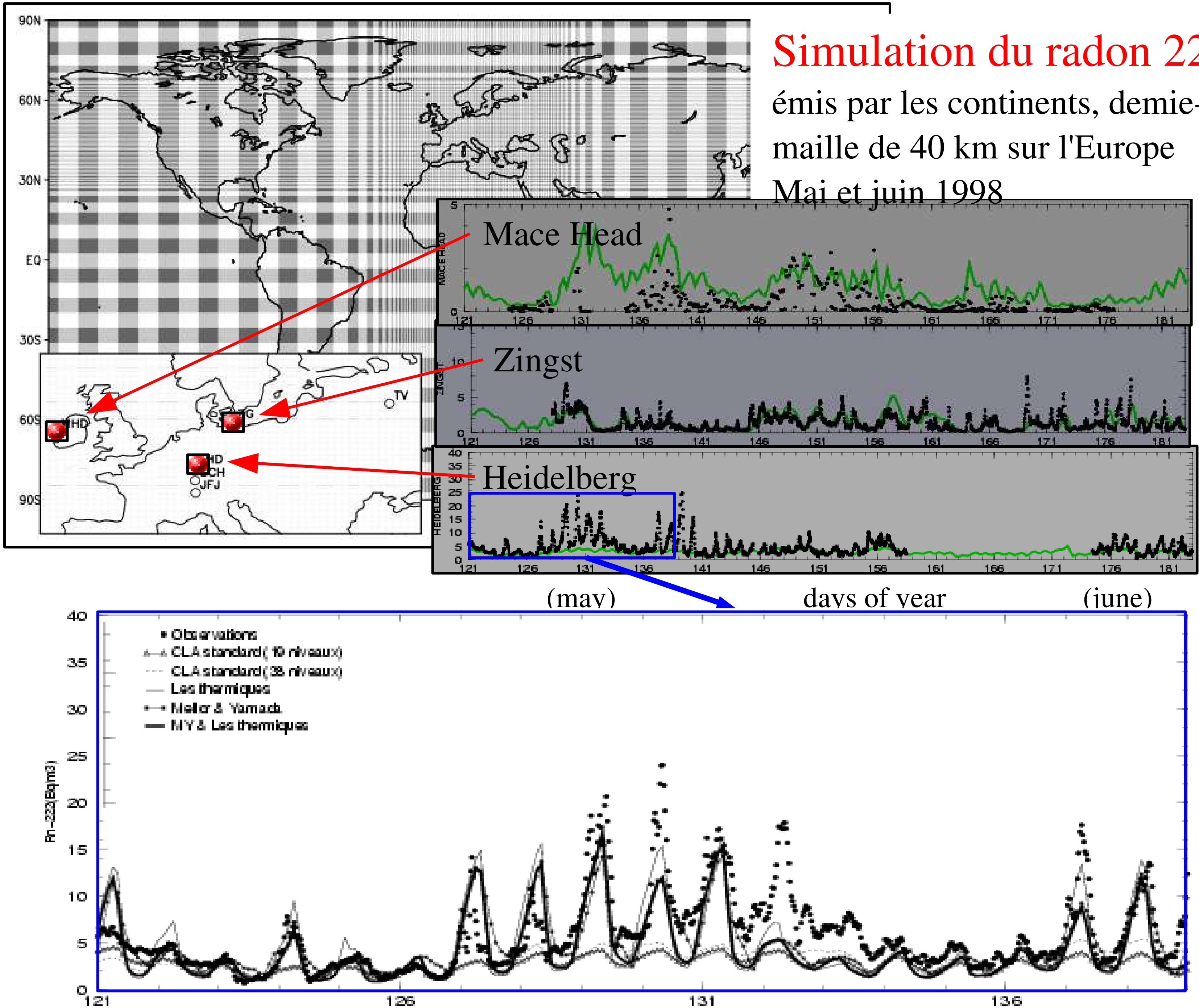
$$A1 = -\frac{1}{t_f - t_1}\int_{z_i(t_0)}^{H} [\phi(z,t_f) - \phi(z,t_0)]\,dz = \frac{1}{t_f - t_1}\int_{t_0}^{t_f} \overline{w'\phi'}(z_i(t_0),t)\,dt$$

Simulation du radon 222

émis par les continents, demie-vie 3,5 jours

maille de 40 km sur l'Europe

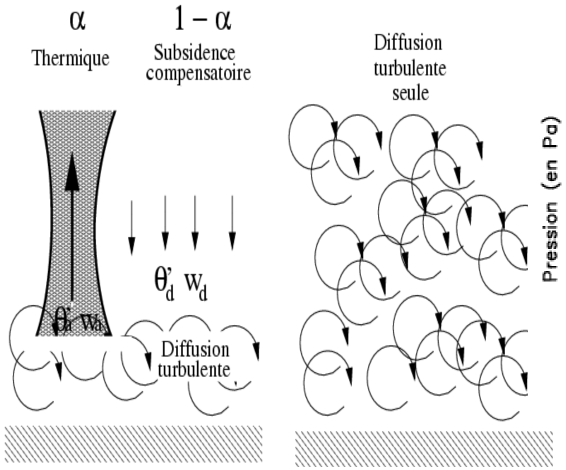
Mai et juin 1998



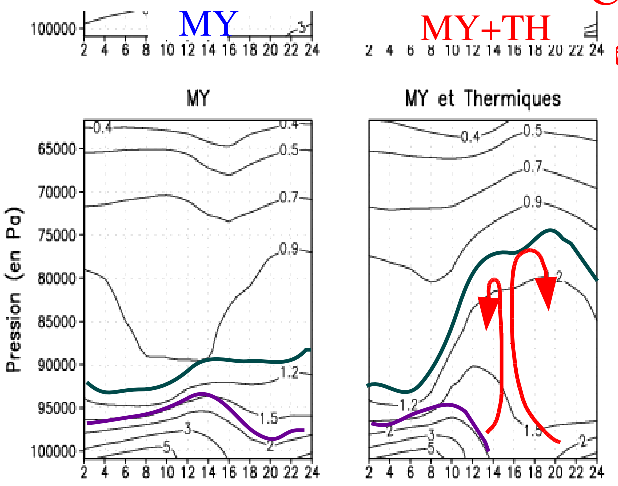
Couche limite convective : Le modèle du thermique

LMD+TH
MY+TH

LMD
MY

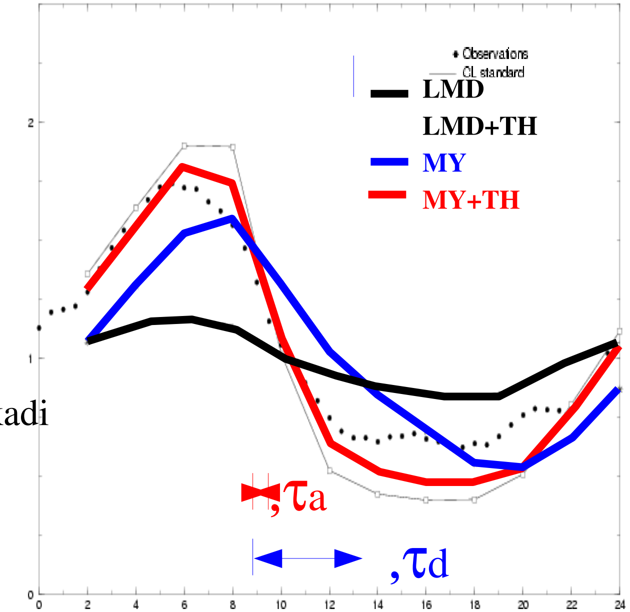


MY
MY+TH

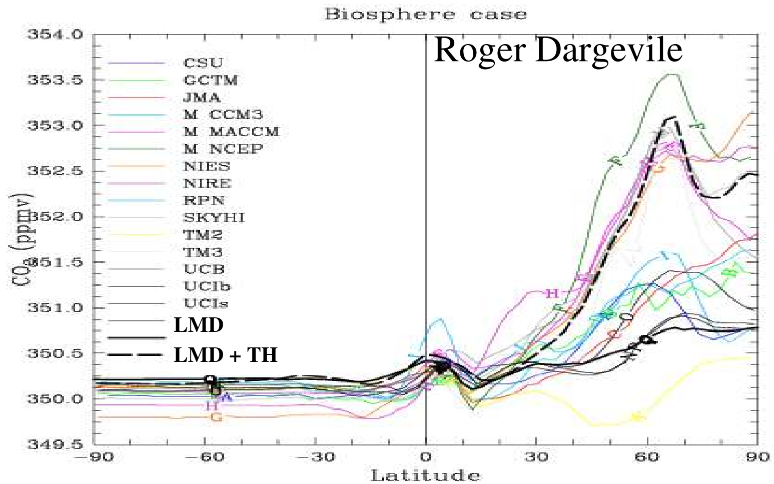


Abderrahmane Idelkadi

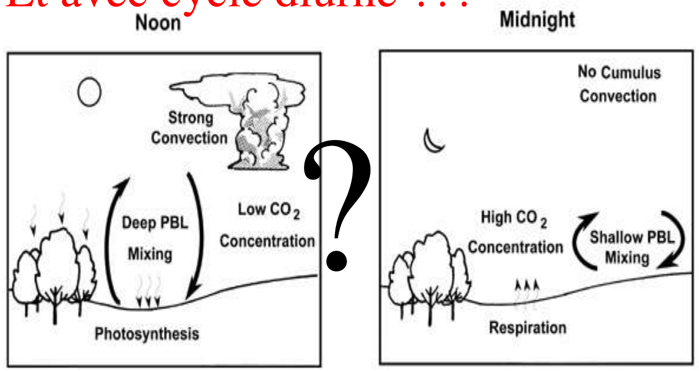
Cycle diurne moyen normalisé
de la concentration de radon en surface



Contrastes hémisphériques de CO2
biosphérique (sans cycle diurne des sources)

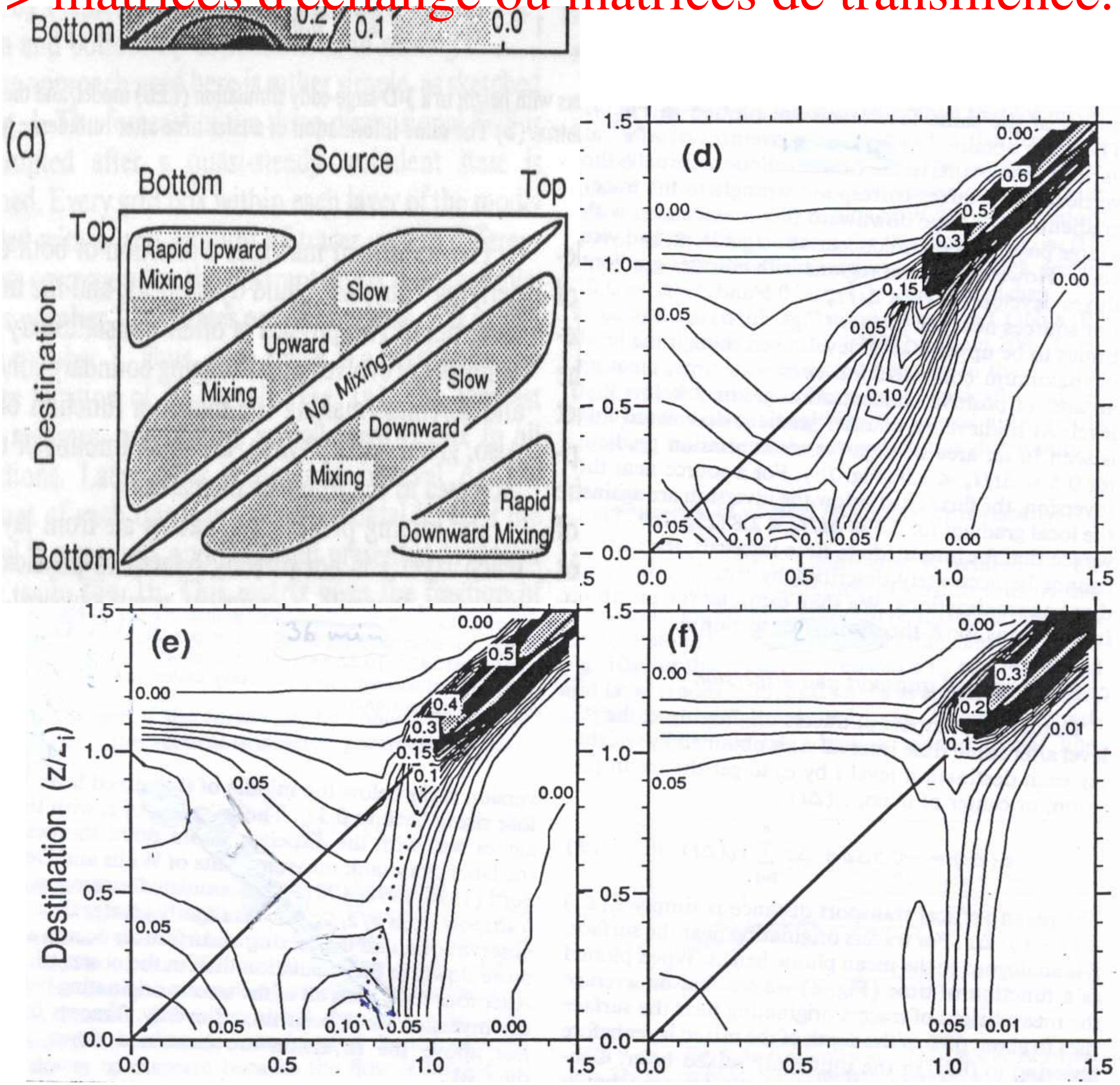


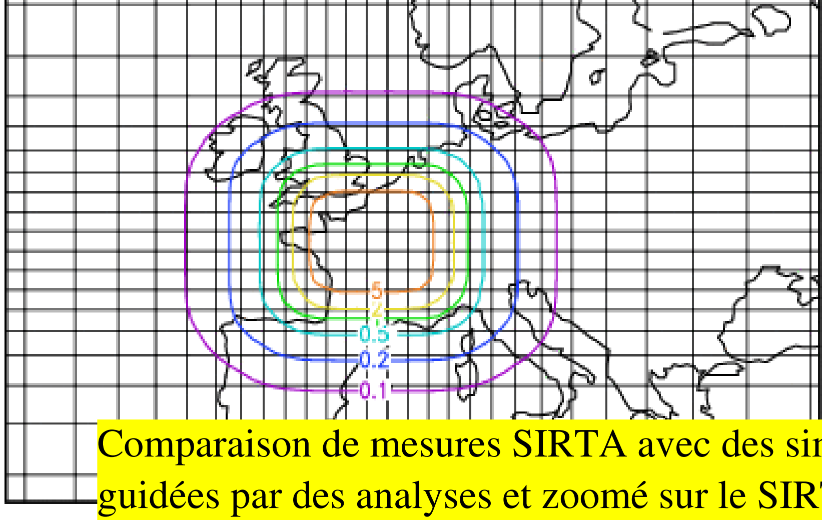
Et avec cycle diurne ???



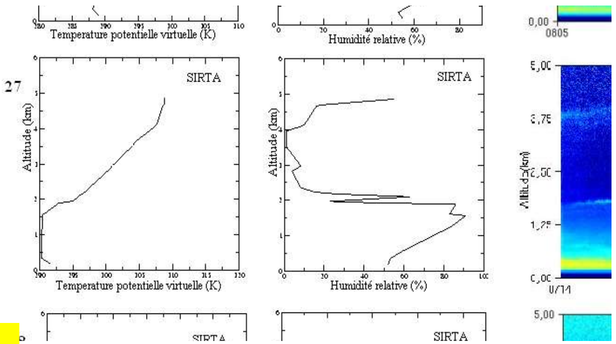
Simulations LES avec traceurs émis par couche

-> matrices d'échange ou matrices de transilience.

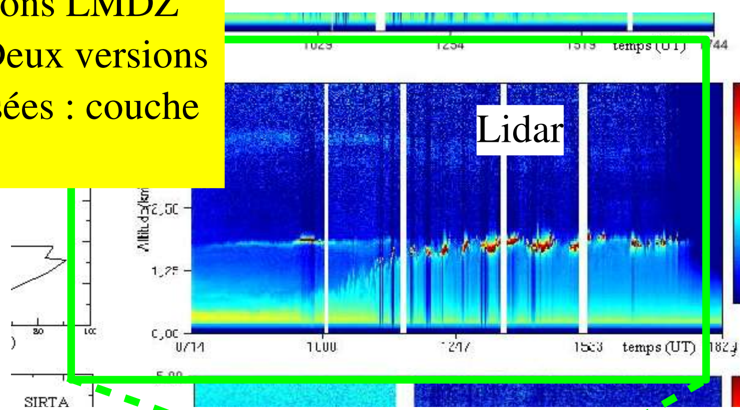


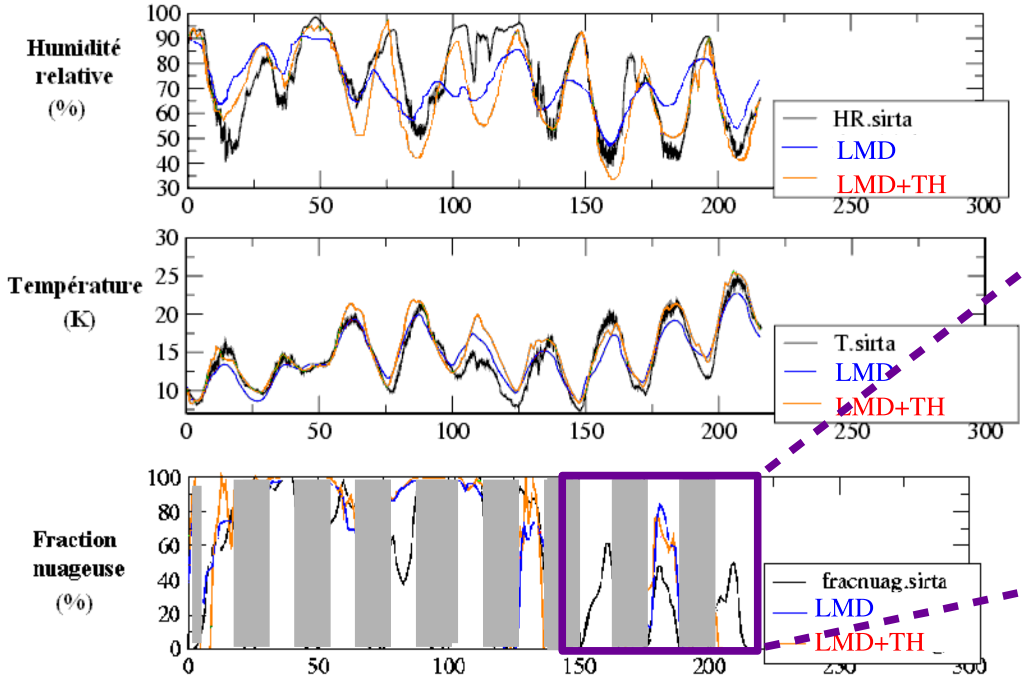


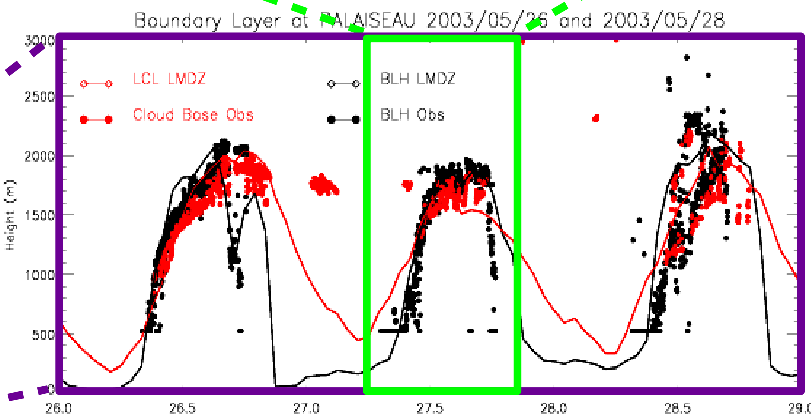
Sondages
de Trappes



Comparaison de mesures SIRTA avec des simulations LMDZ guidées par des analyses et zoomé sur le SIRTA. Deux versions de la paramétrisation de la couche limite sont utilisées : couche limite du LMD avec ou sans thermiques (TH).

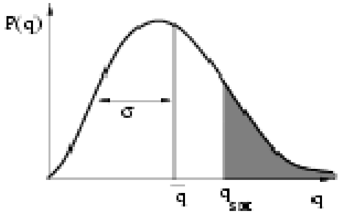






Hauteurs de couche limite et niveau de condensation libre
Diagnostics effectués par Anne Mathieu

Statistical cloud scheme
P(q), PDF of subgrid scale total water

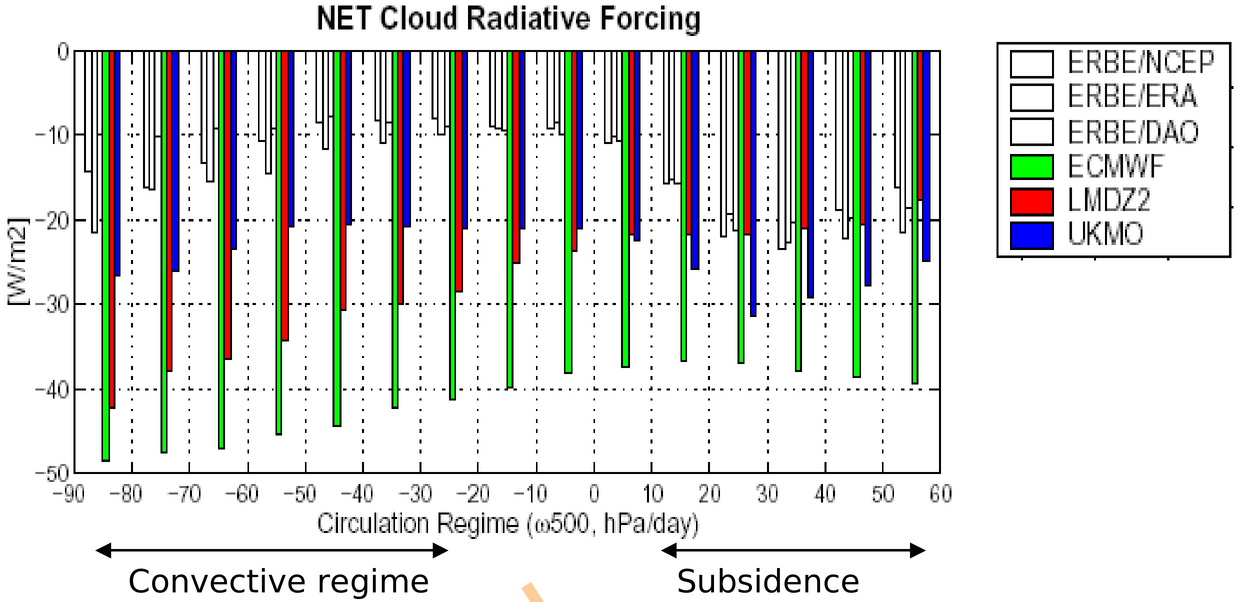


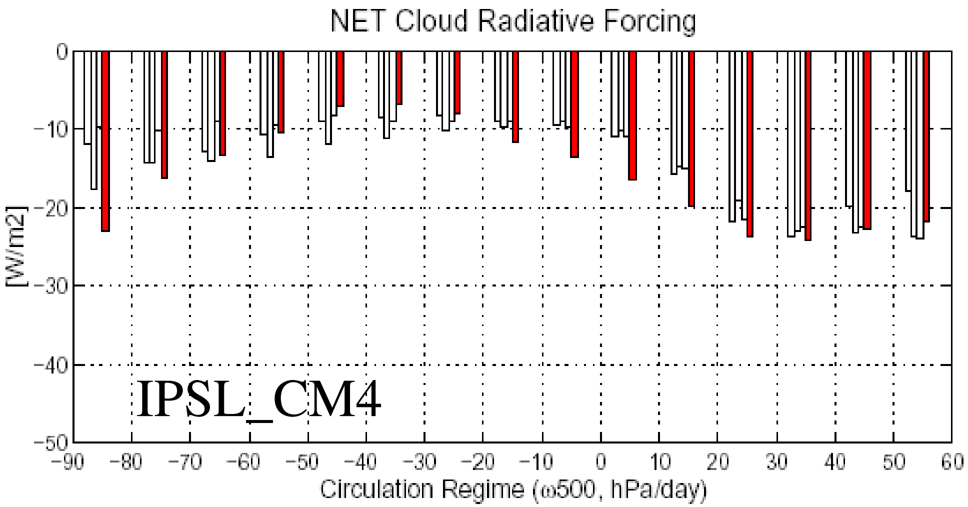
Mean : $\bar{q}$
Width : σ

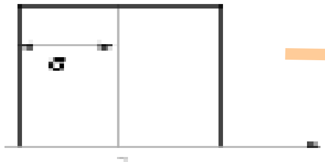
$$\int P(q)dq = 1$$

$$f = \int_{q_{sat}}^{\infty} P(q)dq, \qquad q_c = \int_{q_{sat}}^{\infty} (q - q_{sat})P(q)dq$$

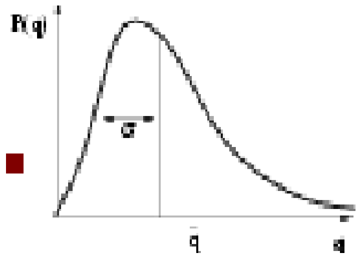
Model parameter r=σ / q
small r : stratiform clouds, weak vertical motions.
Large r : cumuliform clouds, strong vertical motions







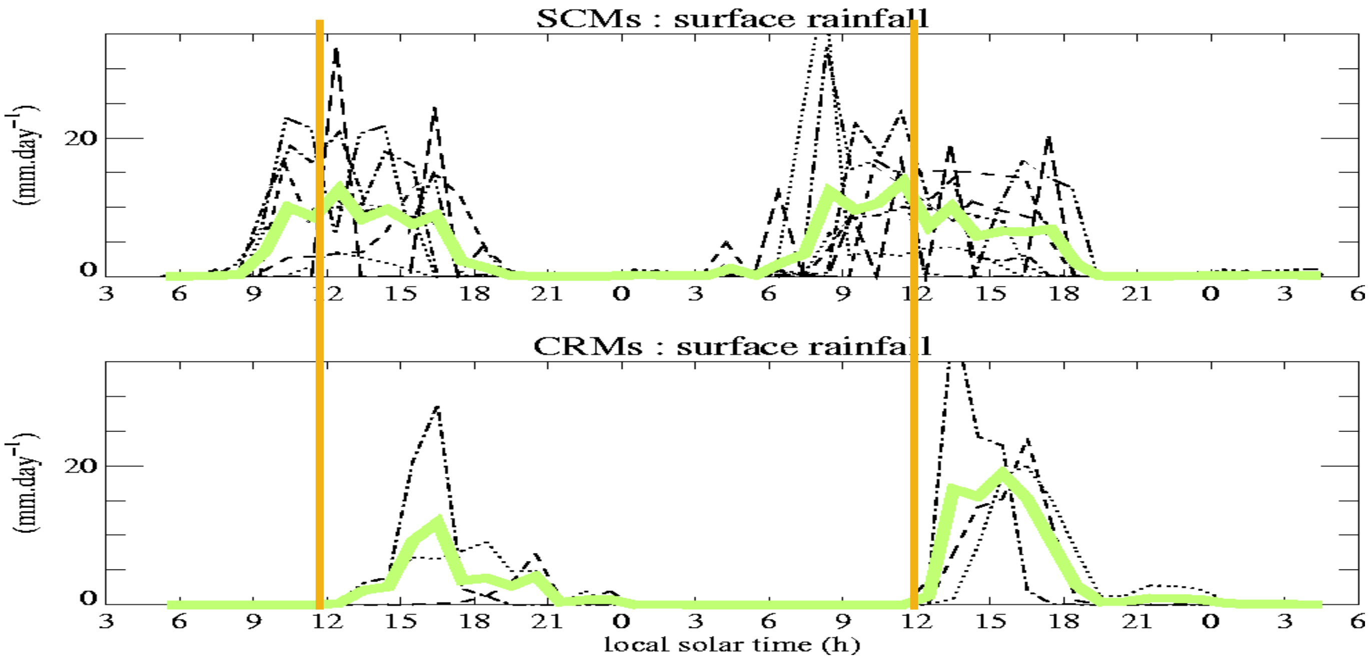
Rectangular
Le Treut and Li, clim dyn 1991



Generelized Log normal with P(0)=0)
Bony and Emanuel, JAS, 2001

cycle diurne de la convection précipitante continentale

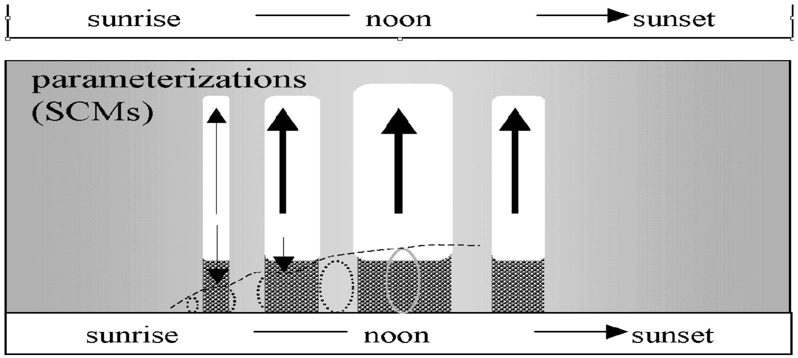
Guichard et al. (2004)

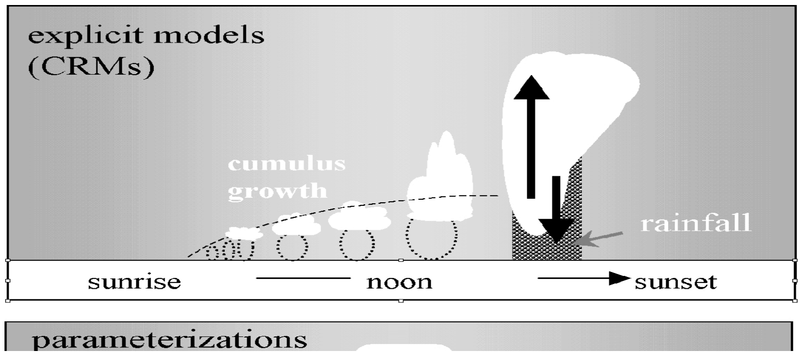


définition d'un cas d'étude (1D)

à partir de données ARM-SGP (SCM-IOP: bilans T & q)

dispersion importante des quantités de précip, mais…
le défaut GCM se retrouve en mode SCM
La convection est plus tardive dans les CRMs





Objectifs et approches

I. Cycle diurne de la couche limite convective.

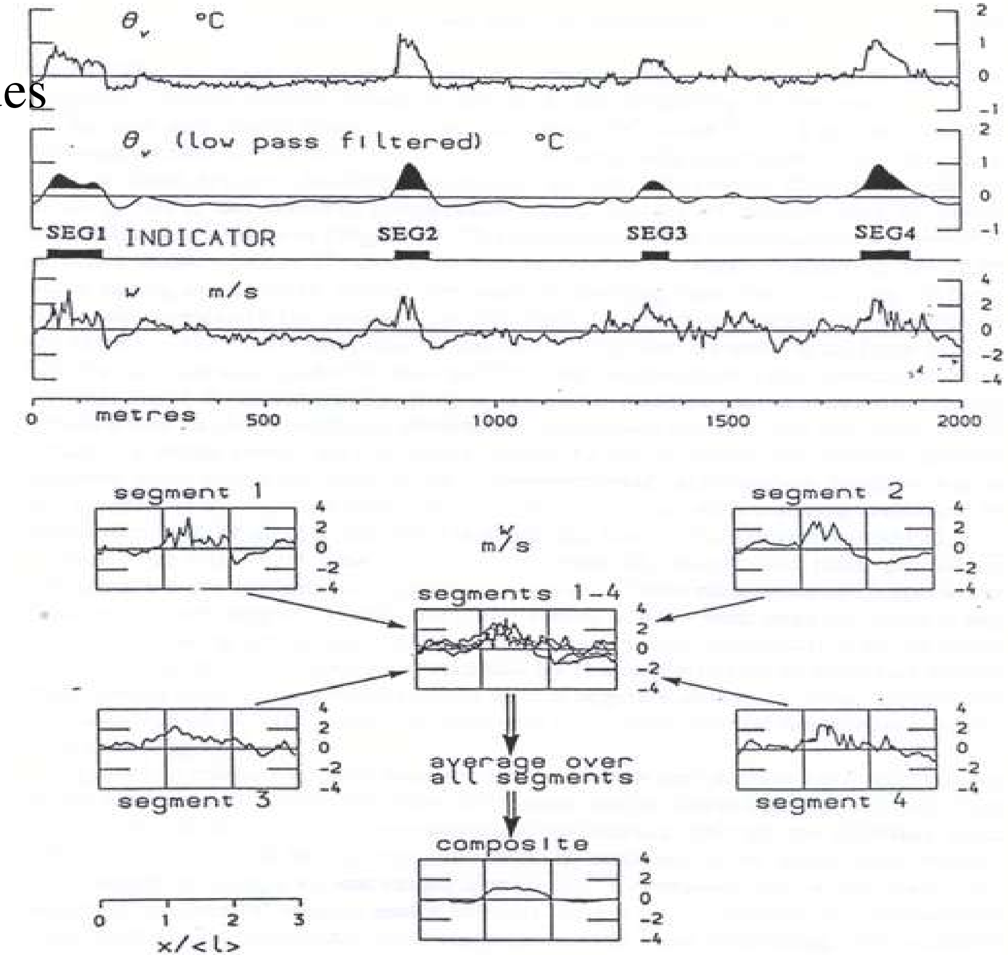
en termes de température, vapeur d'eau, nuages et traceurs (CO_2).
Validation fine des paramètres internes.

SIRTA
-> Etude systématique des nuages aux moyennes latitudes.
-> test dans une configuration réaliste (y compris couplage au schéma de surface).
-> nécessite de sélectionner des cas.
-> outils de validation : simulateurs lidar, w par lidar Dopler, couverture des ascendances ...

LES
-> Nouveaux cas de couche limites convectives sèches et de cas avec petits cumulus.
-> Construction de cas pour les modèles ARPEGE/CLIMAT et LMDZ avec une interface commune en mode uni-colonne (Marie-Pierre Lefebvre). Comparaison et percolation des approches.
-> Permet de tester la réponse aux paramètres de forçage.
-> Ajouter les traceurs -> matrices d'échange.
-> Comparaison en termes de composites (à la Williams).

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

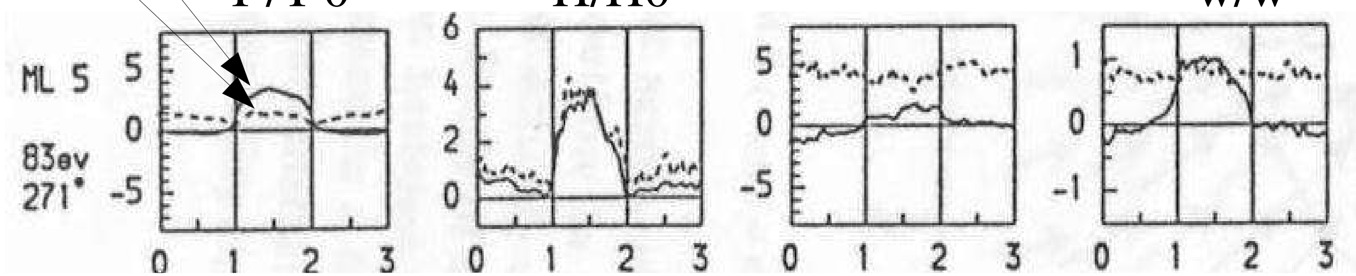
Williams et Hacker 1992



Moyenne

Ecart-type

T'/T'0 H/H0 w/w*



Objectifs et approches

II. Cycle diurne de la convection

-> CAPE humide pour le flux de masse ascendant ?
-> Couplage avec le schéma d'Emanuel.
-> Modification de l'entrainement dans Emanuel
-> Poches froides.

Simulations CRMs ARM.
Ajouts de traceurs.
Simulations ARM en LES ?

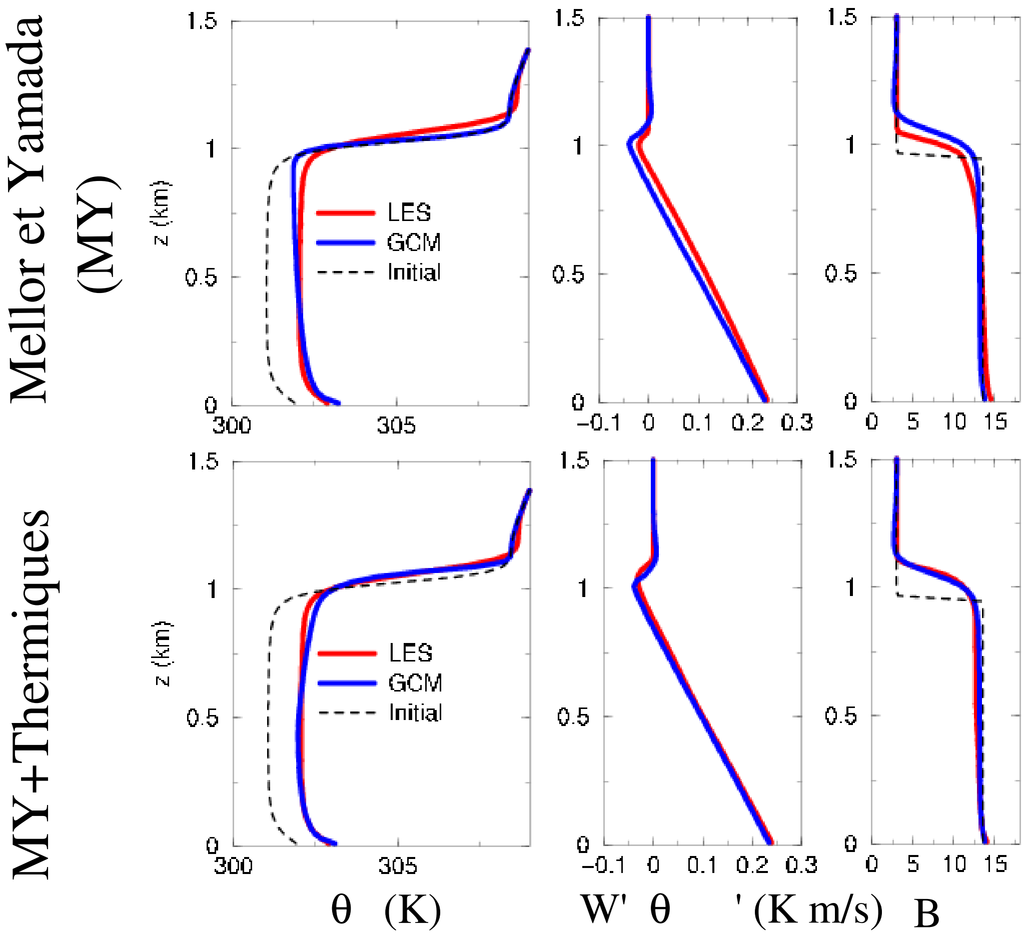
III. Autres

-> Strato-cumulus/cumulus. Instabilité d'entrainement et descentes organisées.
-> Soulèvement des poussières.
-> Tensions de vent de surface.
-> Couplage avec le schéma de diffusion.

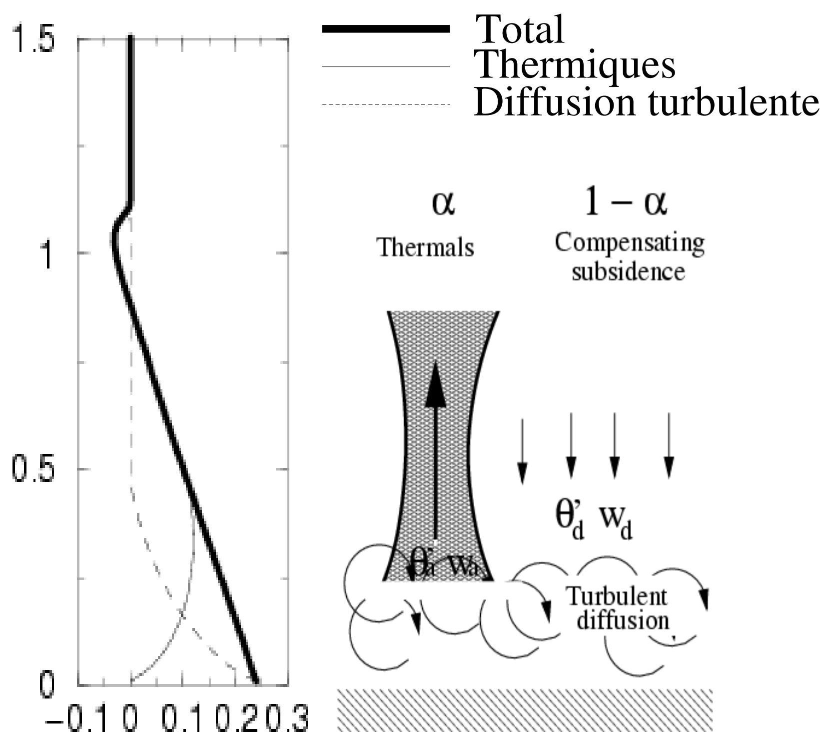
Françoise Guichard et Laurent Kergoat

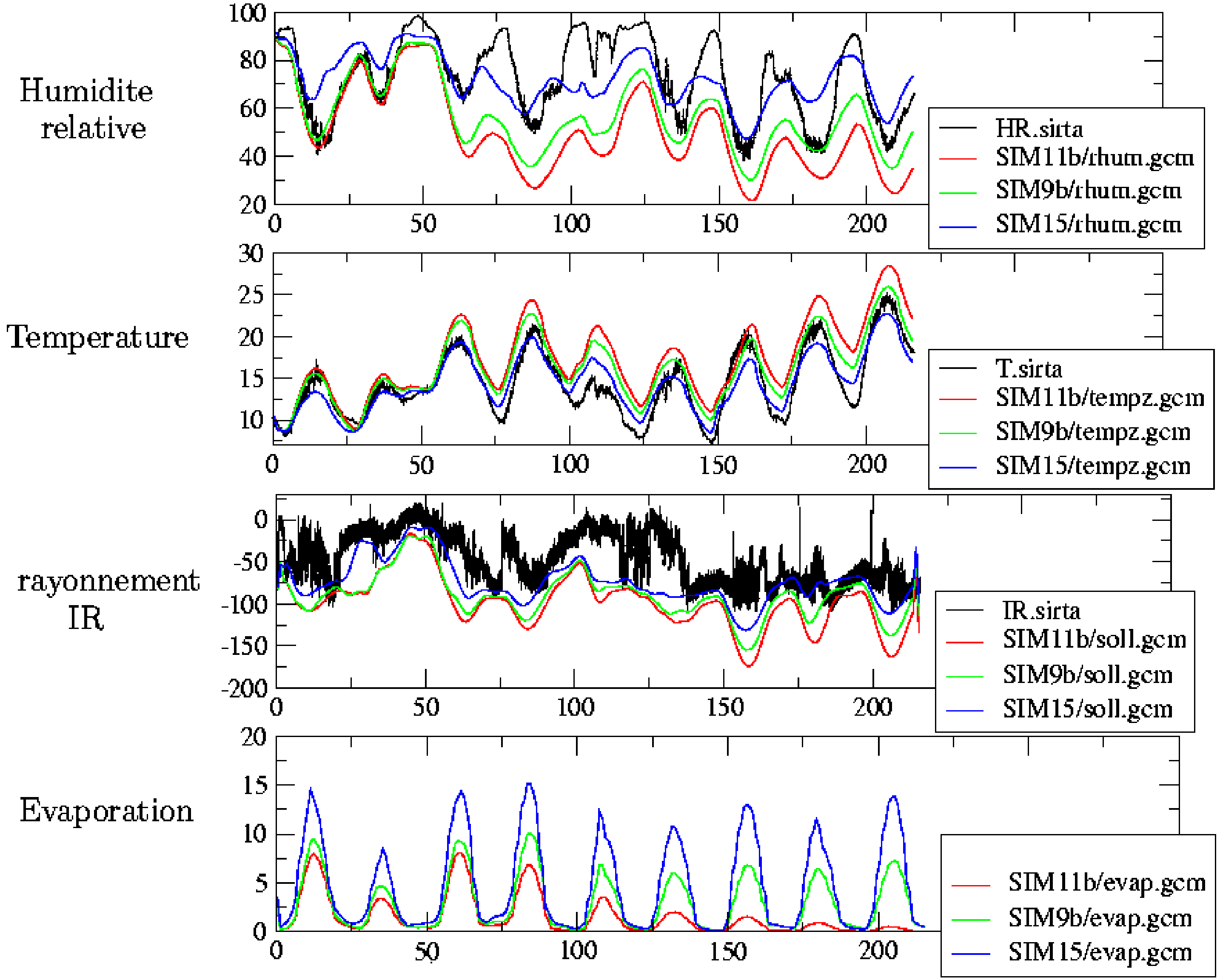
Exemple de comparaison avec les LES (modèle du NCAR, Moeng et al.) pour la température potentielle et un traceur B, atmosphère sèche.

Forçage : flux de chaleur au sol $\overline{w'\theta'}_0=0.24$ Km/s
vent géostrophique u=10m/s



Décomposition du flux de chaleur dans le cas MY+thermiques





Humidite relative
100
80
60
40
20
0
50
100
150
200
HR.sirta
SIM11b/rhum.gcm
SIM9b/rhum.gcm
SIM15/rhum.gcm
Temperature
30
25
20
15
10
T.sirta
SIM11b/tempz.gcm
SIM9b/tempz.gcm
SIM15/tempz.gcm
rayonnement IR
0
-50
-100
-150
-200
IR.sirta
SIM11b/soll.gcm
SIM9b/soll.gcm
SIM15/soll.gcm
Evaporation
20
15
10
5
0
SIM11b/evap.gcm
SIM9b/evap.gcm
SIM15/evap.gcm

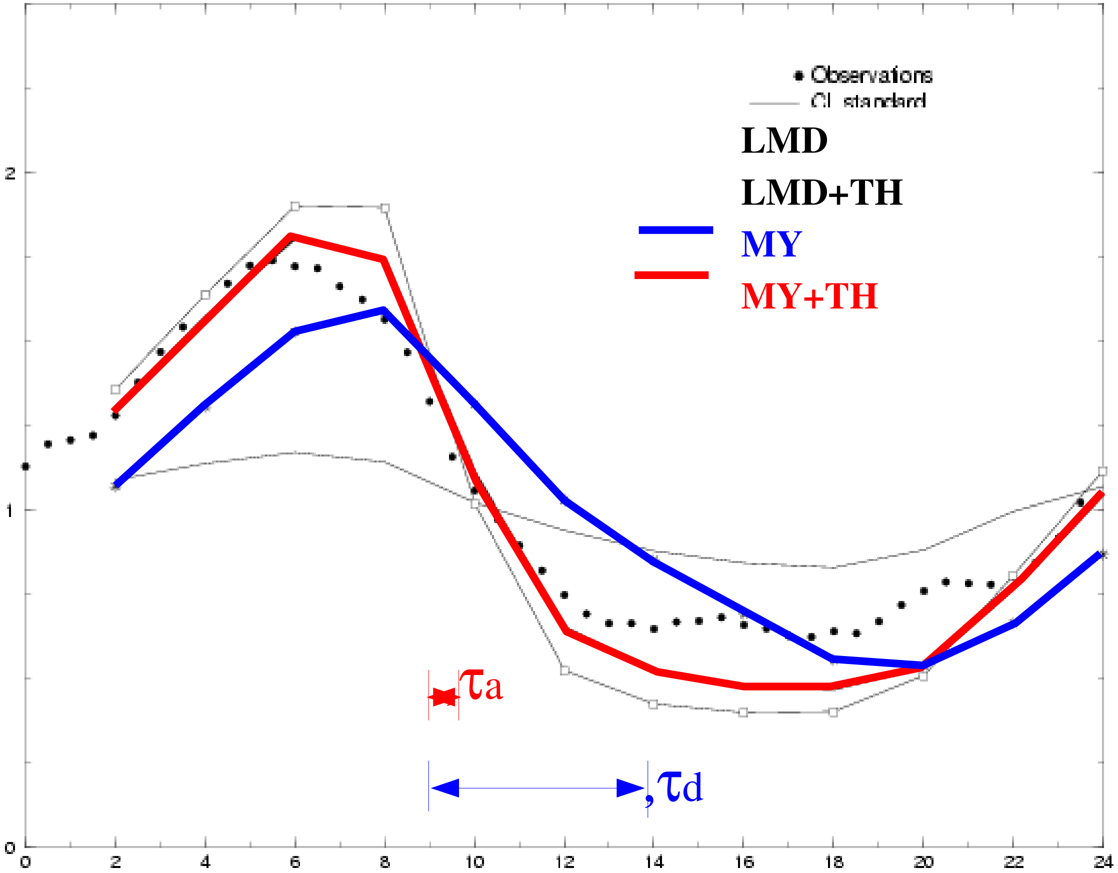
Cycle diurne moyen normalisé de la concentration de radon en surface

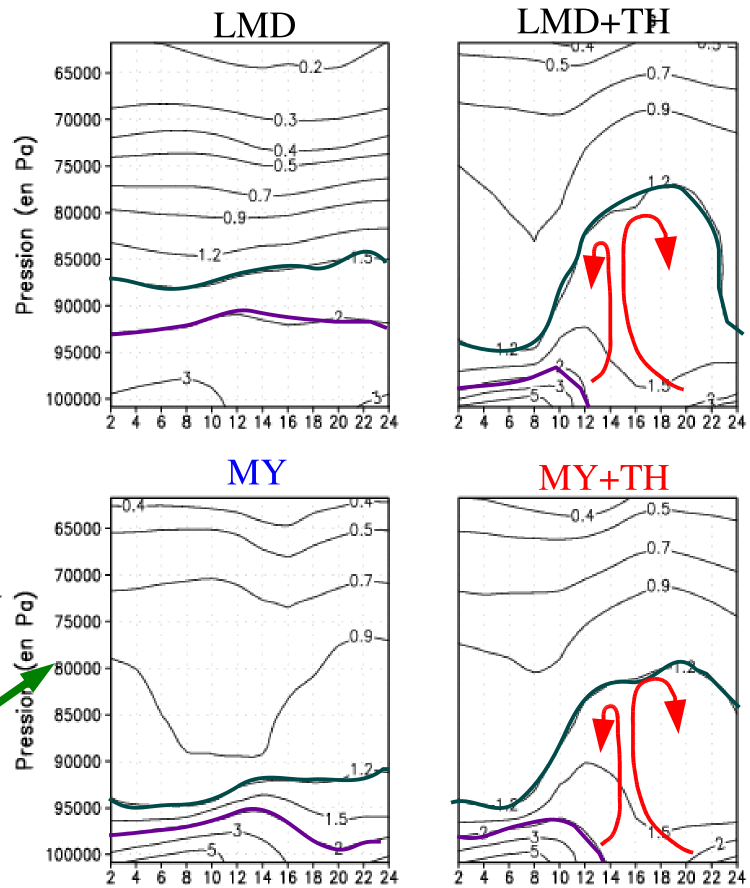
Vitesse turbulente : $w \simeq 1 \text{ m s}^{-1}$
Longueur de mélange : $l \simeq 200$ m
Hauteur de la couche limite : $h \simeq 2$ km

Constante de temps du transport vertical :

$$\text{diffusive} : \tau_d = \frac{h^2}{wl} \simeq 5 \text{ heures} \qquad (1)$$

$$\text{advective} : \tau_a = \frac{h}{w} \simeq 1/2 \text{ heures} \qquad (2)$$

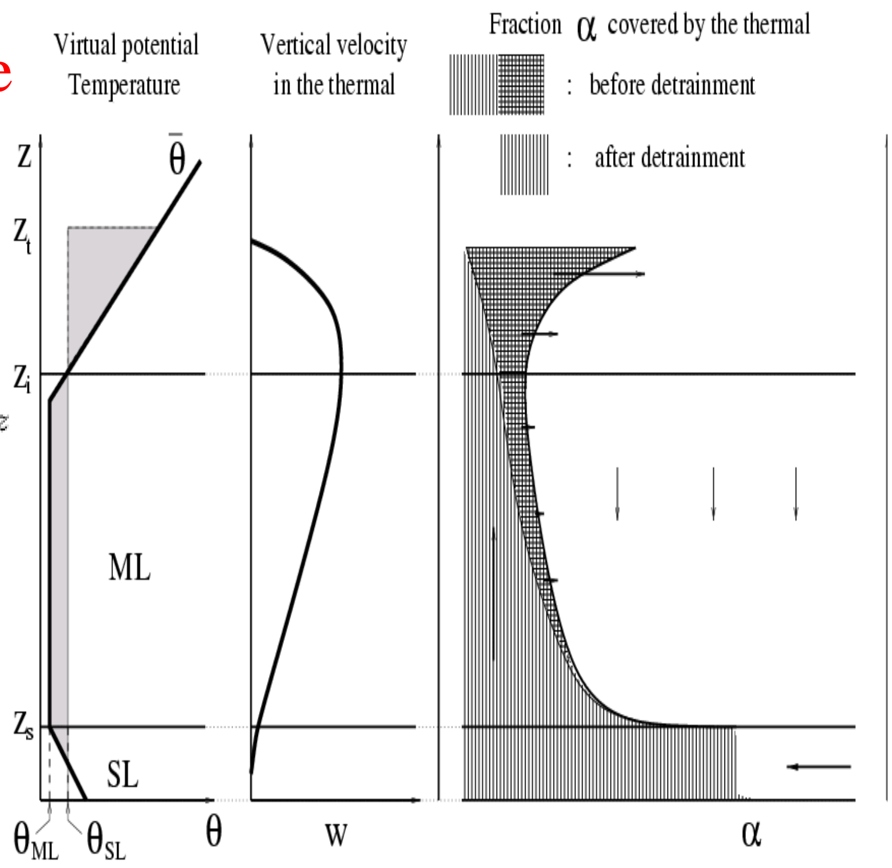




Concentrations de surface

Evolution sur la verticale

Fermeture pour le modèle du thermique



Vision idéalisée d'un panache thermique

$$v_{\max} \simeq w_{\max} \simeq \sqrt{2CAPE} \quad \text{avec} \quad \mathrm{CAPE} = \int_0^{z_i} g \frac{\theta_{\mathrm{SL}} - \theta_{\mathrm{ML}}}{\theta_{\mathrm{ML}}} dz$$

D'où on tire un flux de masse $f = \dfrac{\rho(z_s/2) z_s \sqrt{2\mathrm{CAPE}}}{r z_t}$

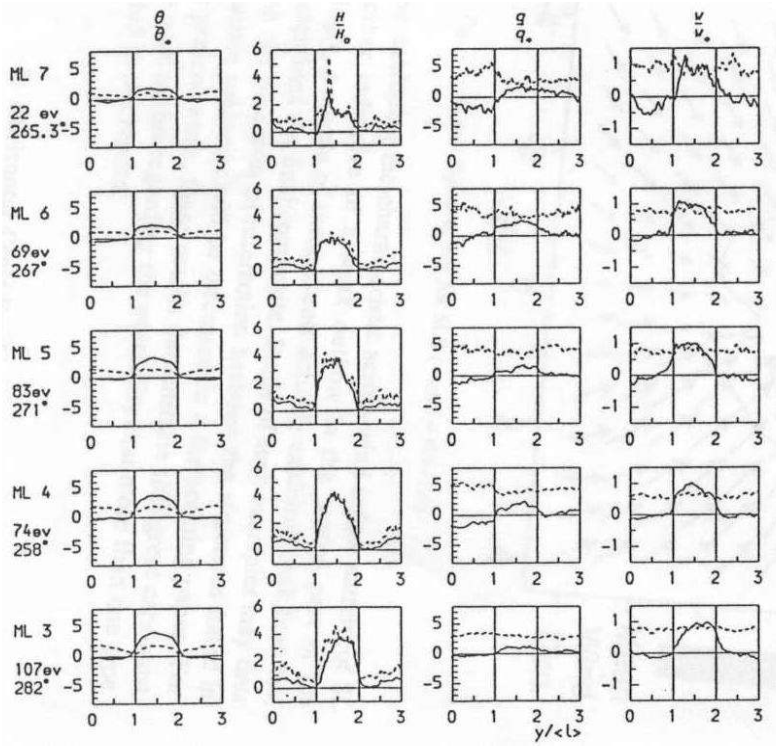
$r \simeq 2$ rapport d'aspect des rouleaux convectifs.

Les équations du modèle du thermique

$$\frac{\partial \hat{f}}{\partial z} = \hat{e} - \hat{d} \quad \text{et} \quad \frac{\partial \hat{f} \phi_a}{\partial z} = \hat{e}\phi - \hat{d}\phi_a$$

$$\hat{e}(z) = \frac{\rho(z)}{r z_t} \left[\int_z^{hi(z)} g \frac{\theta(z) - \theta(z'')}{\theta(z'')} dz'' \right]^{1/2}$$

$$\hat{d}(z) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \hat{w} \sqrt{\lambda z}/(r z_t) \right) \text{si} \quad z < z_i \quad \text{et} \quad \hat{d}(z) = -\frac{\partial}{\partial z} \left[\rho \hat{w} \hat{\alpha}(z_i) \left(\frac{z_t - z}{z_t - z_i} \right)^{\mu} \right] \text{sinon}$$



ML 7
22 ev
265.3°
ML 6
69ev
267°
ML 5
83ev
271°
ML 4
74ev
258°
ML 3
107ev
282°
y/<l>

Etude de la couche limite au SIRTA

Modèle guidé (par NCEP) et zoomé (100km, en 48x32)

Exemple de simulation:

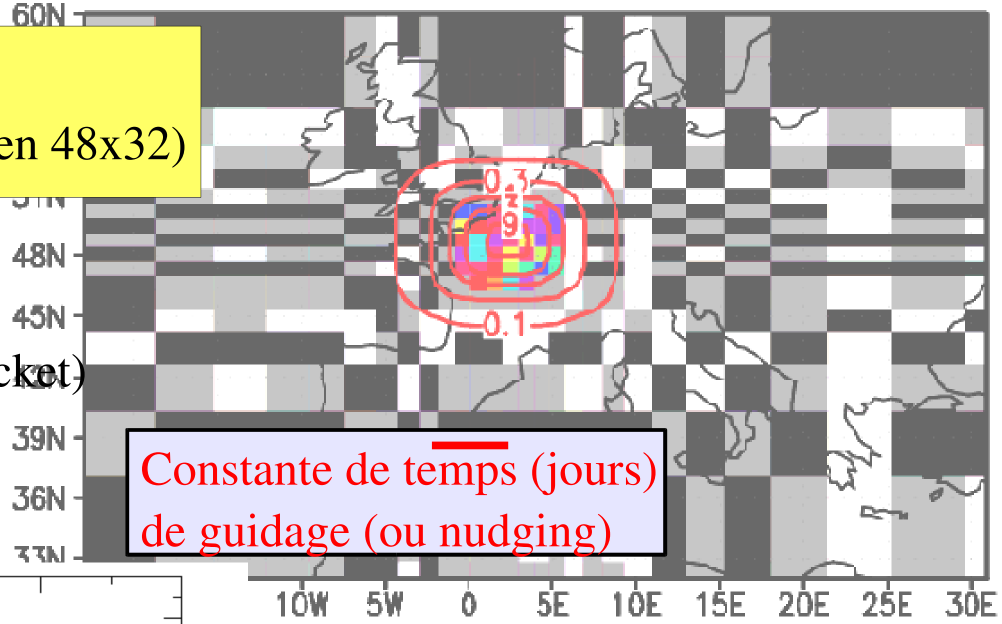
Simulation de 10 jours en mai 2003

Test de la sensibilité au schéma de surface (bucket)

SIM1 : très sèche

SIM2 : moins sèche

SIM3 : pas mal



Constante de temps (jours) de guidage (ou nudging)

Grille utilisée pour les simulations SIRTA