

2. Couche limite convective

Schémas « en flux de masse »
EDdy Mass-flux (EDMF) approach

2. Couche limite convective

Développement des « paramétrisations » des nuages

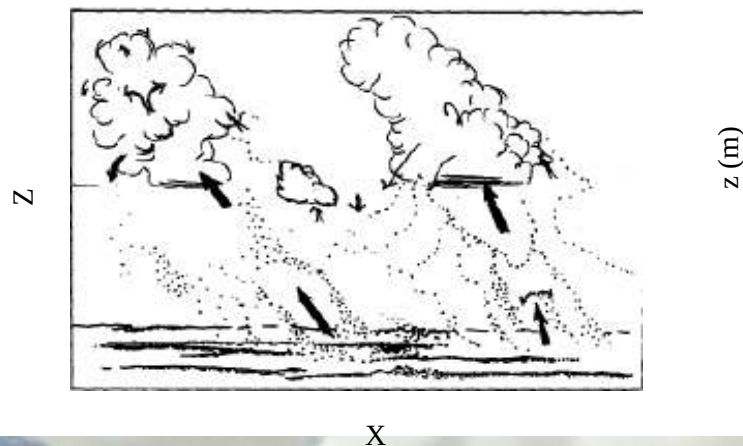
On s'appuie sur des simulations à beaucoup plus fine résolution (maille de 8m)

Film entièrement physique : simulation des nuages + calcul de l'image

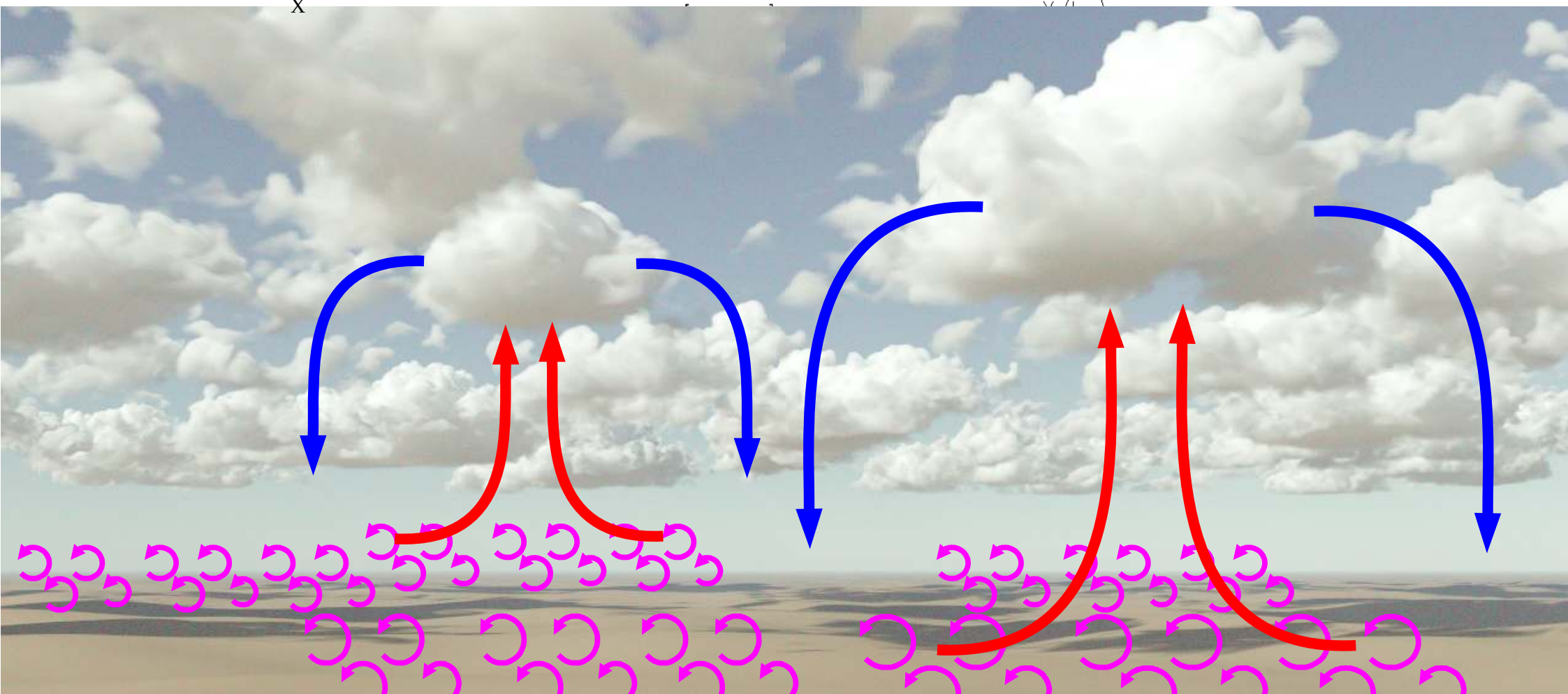
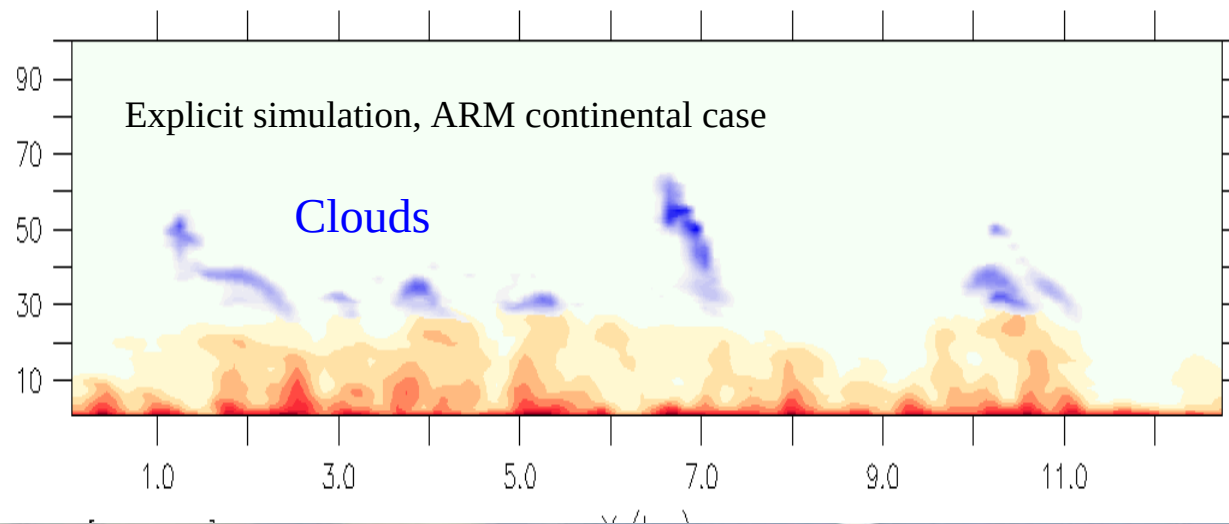
Rendu possible (entre autres) par une thèse soutenue en 2019 (N. Villefranque)

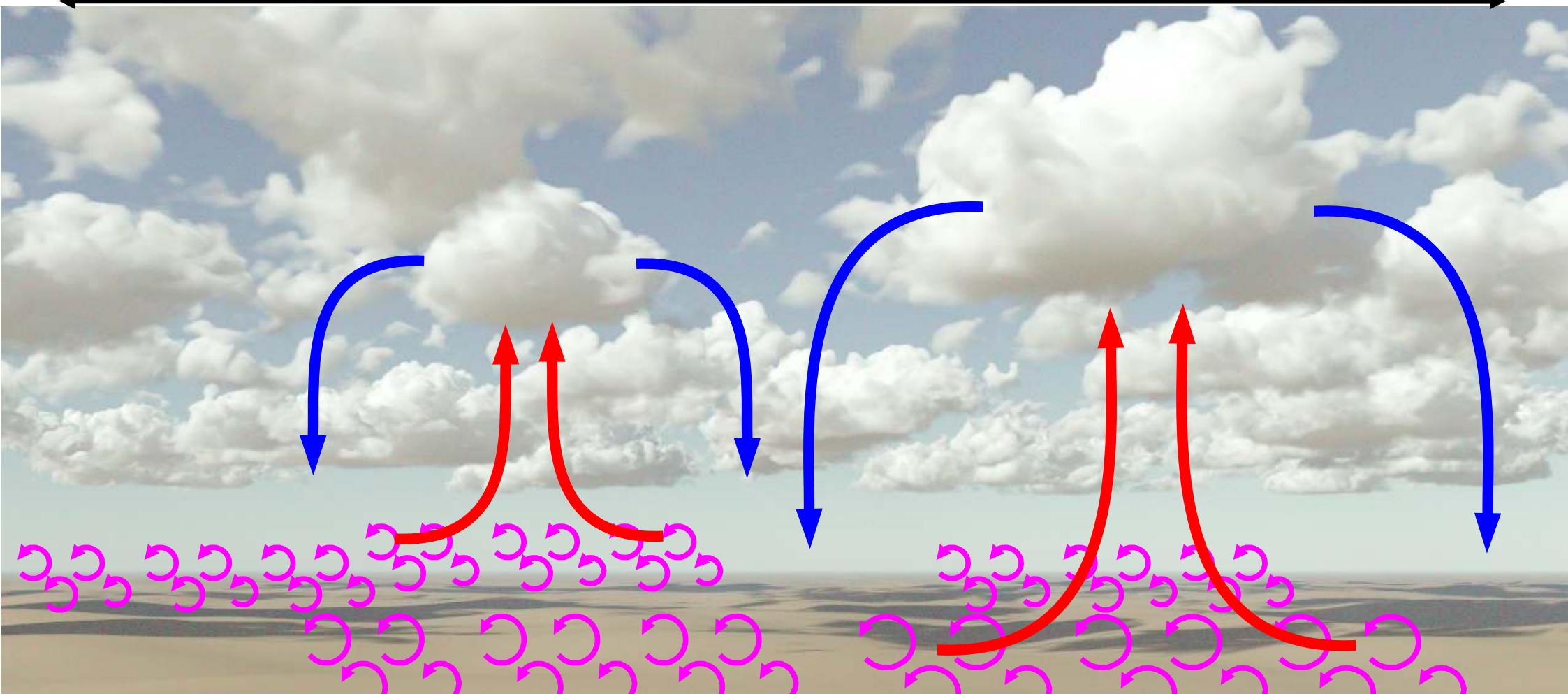
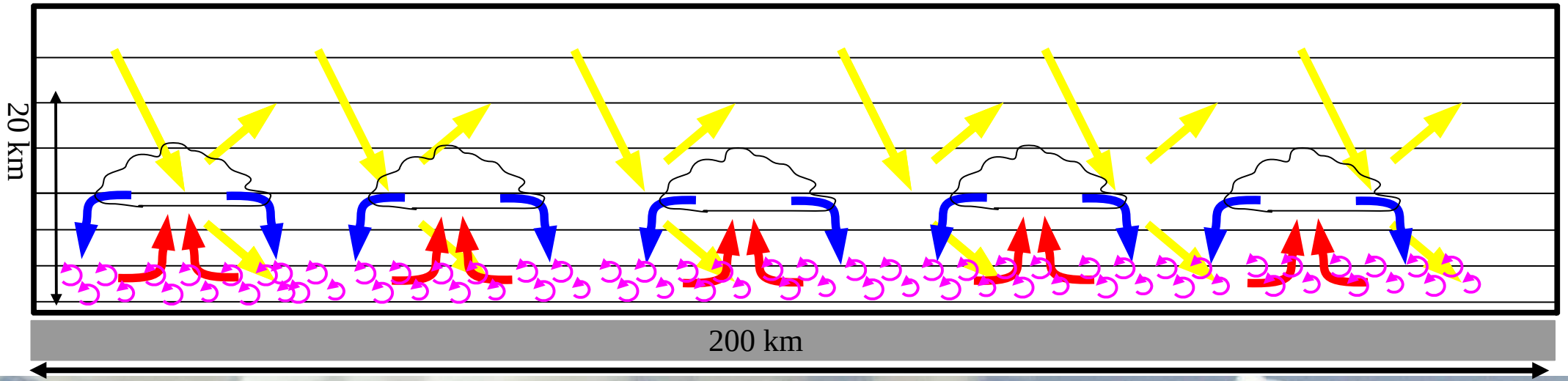


LeMone and Pennell, MWR, 1976

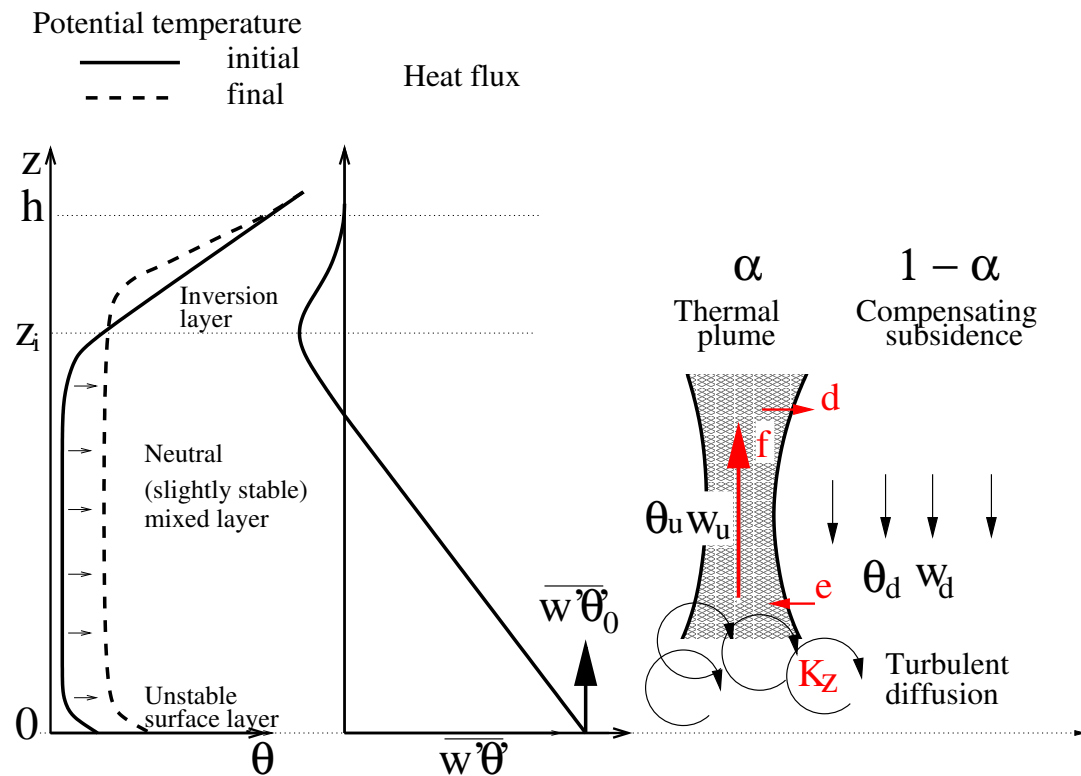


Meso-NH simulation





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

$$f = \alpha \rho w_u$$

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

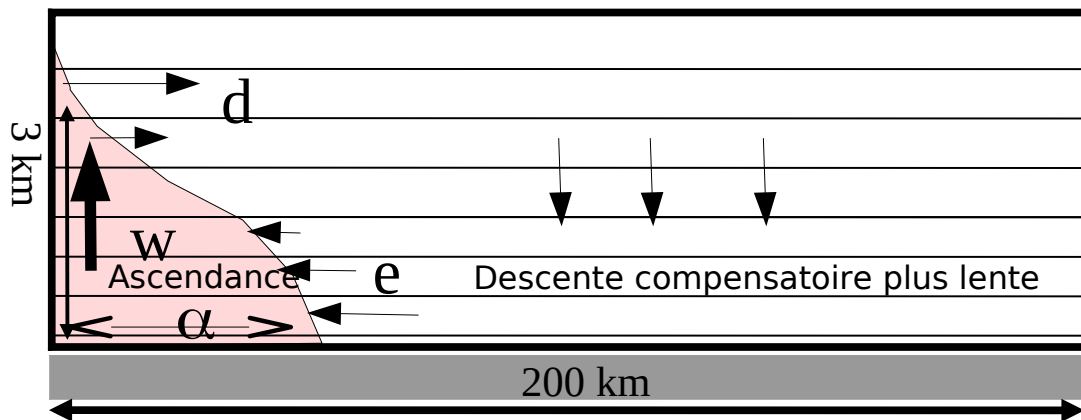
$$\frac{\partial f c_u}{\partial z} = e c_d - d c_u$$

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

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

2. Couche limite convective

Le modèle du thermique



Variables internes de la paramétrisation :

w : vitesse moyenne des panaches ascendants

α : 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 (déentraînement)

q_a : concentration du composant q dans l'ascendance

Terme source pour les équations explicites

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

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

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

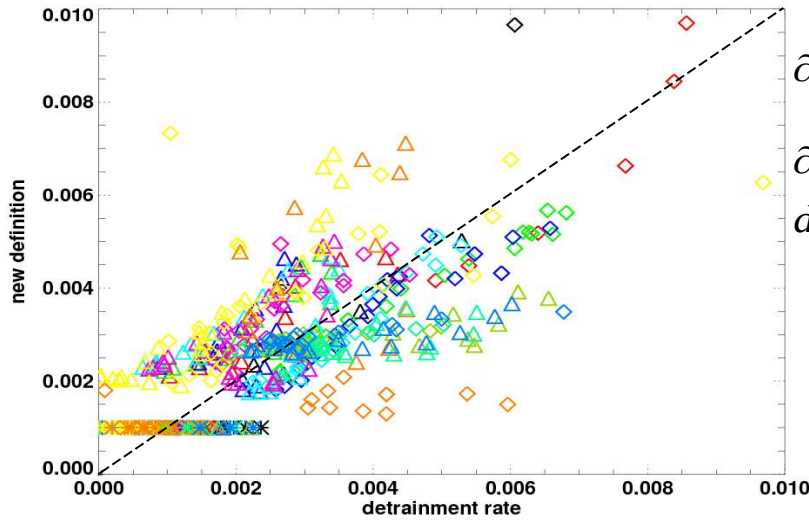
$$e = f \max\left(0, \frac{\beta_1}{1 + \beta_1} \left(a_1 \frac{B}{w^2} - b\right)\right)$$

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

Etc ...

Towards a more physical definition for ε / δ : LES

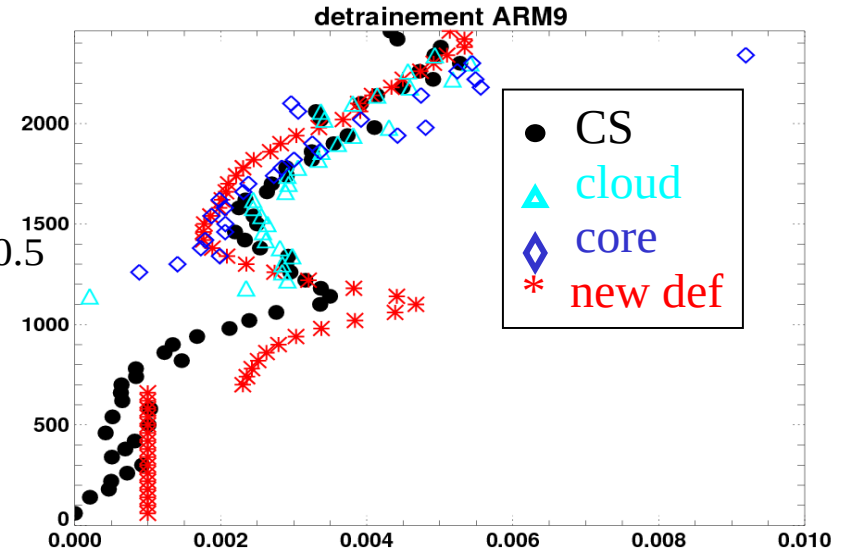
(Couvreur and Rio to be submitted)



$$\delta = \max(\delta_1, d_1 - d_2 \frac{\gamma}{w_u^2})$$

$$\delta_1 = 0.001 \text{ ou } 0.003$$

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



(Yves Bouteloup)

Schéma des thermiques

Équation de la vitesse verticale :

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

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

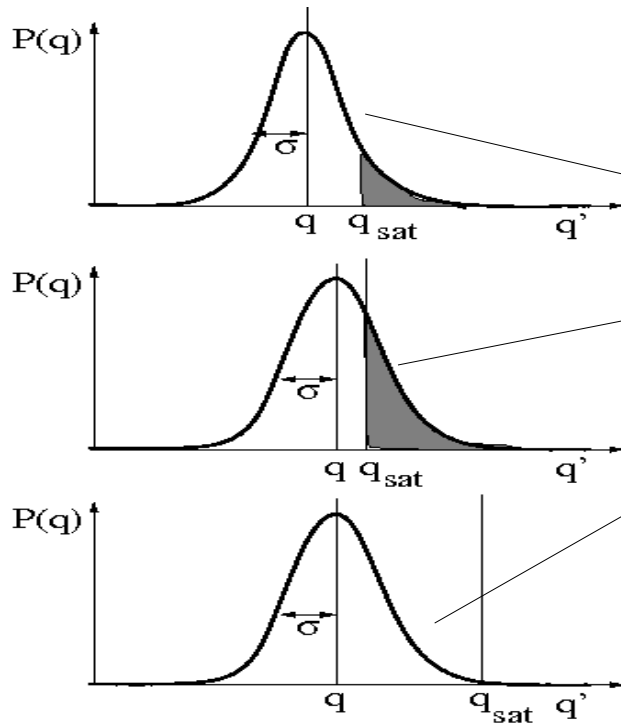
q_{sat} : concentration maximum à saturation

Si $q > q_{sat}$:

→ la vapeur d'eau condense = nuage

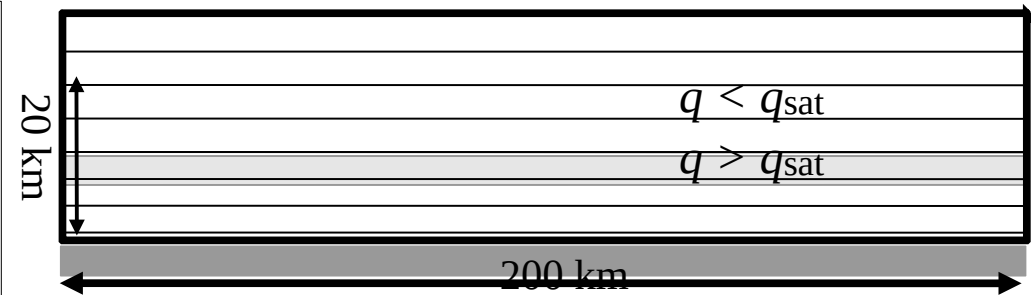
On connaît q et q_{sat} à l'échelle de la maille

→ Fraction de la maille couverte de nuages ?



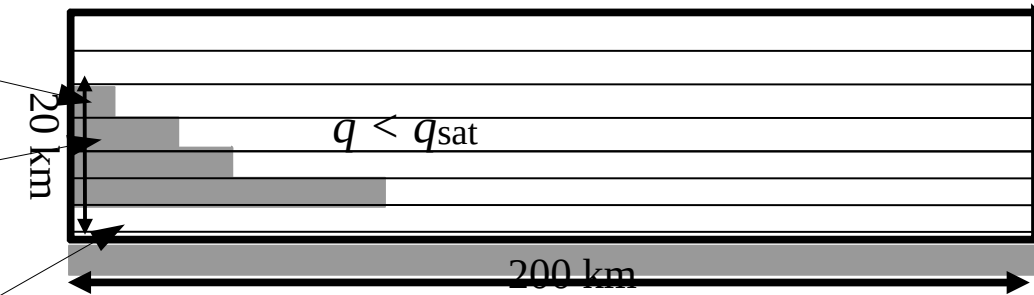
Modèle « tout ou rien » :

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



Modèle « statistique » :

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



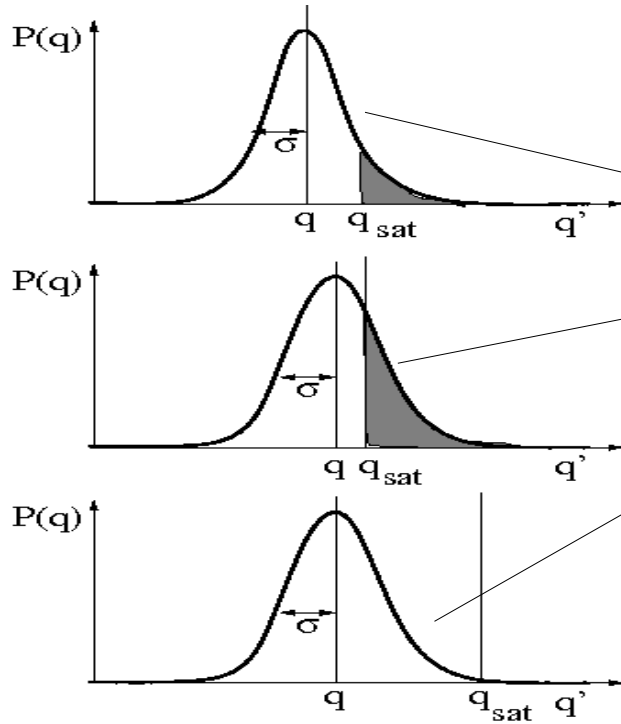
Intervient dans **Q**

→ condensation

→ prise en compte des nuages dans le code radiatifs

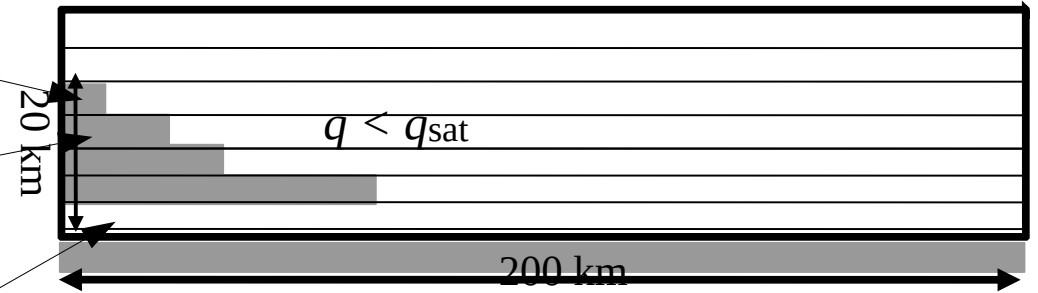
Paramétrisation simple : gaussienne $\sigma / q = 20\%$

2. Couche limite convective

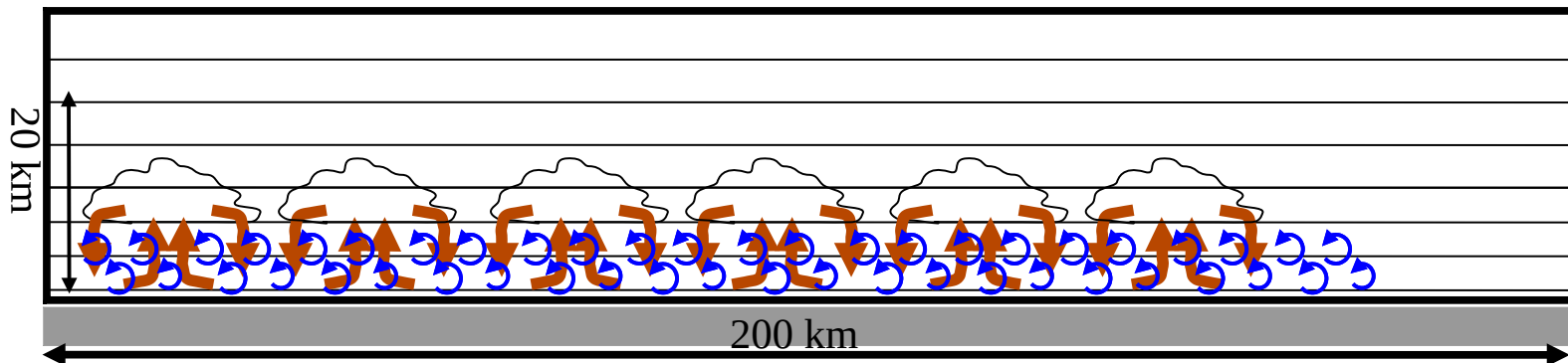


Modèle « statistique » :

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



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



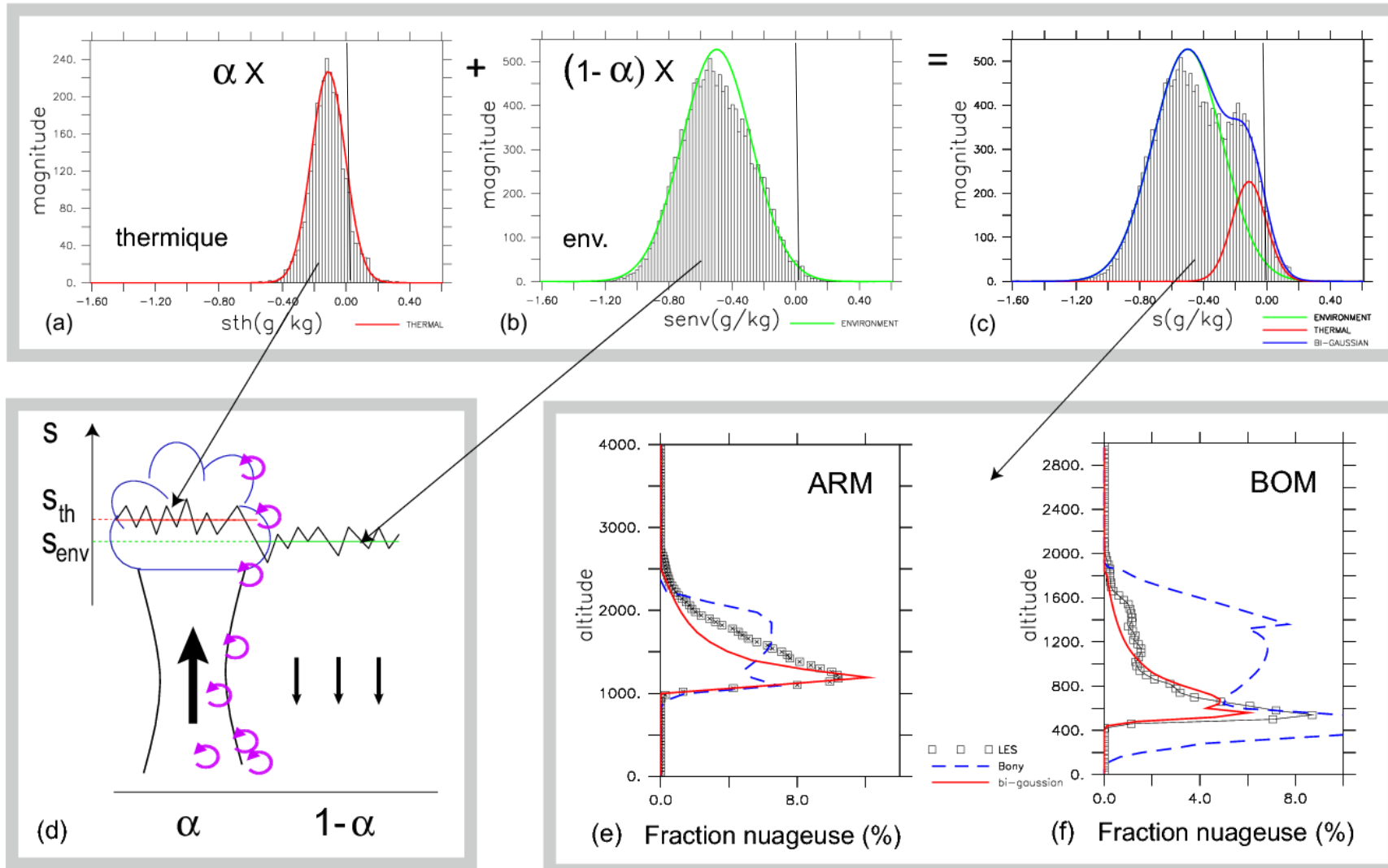
2. Couche limite convective

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

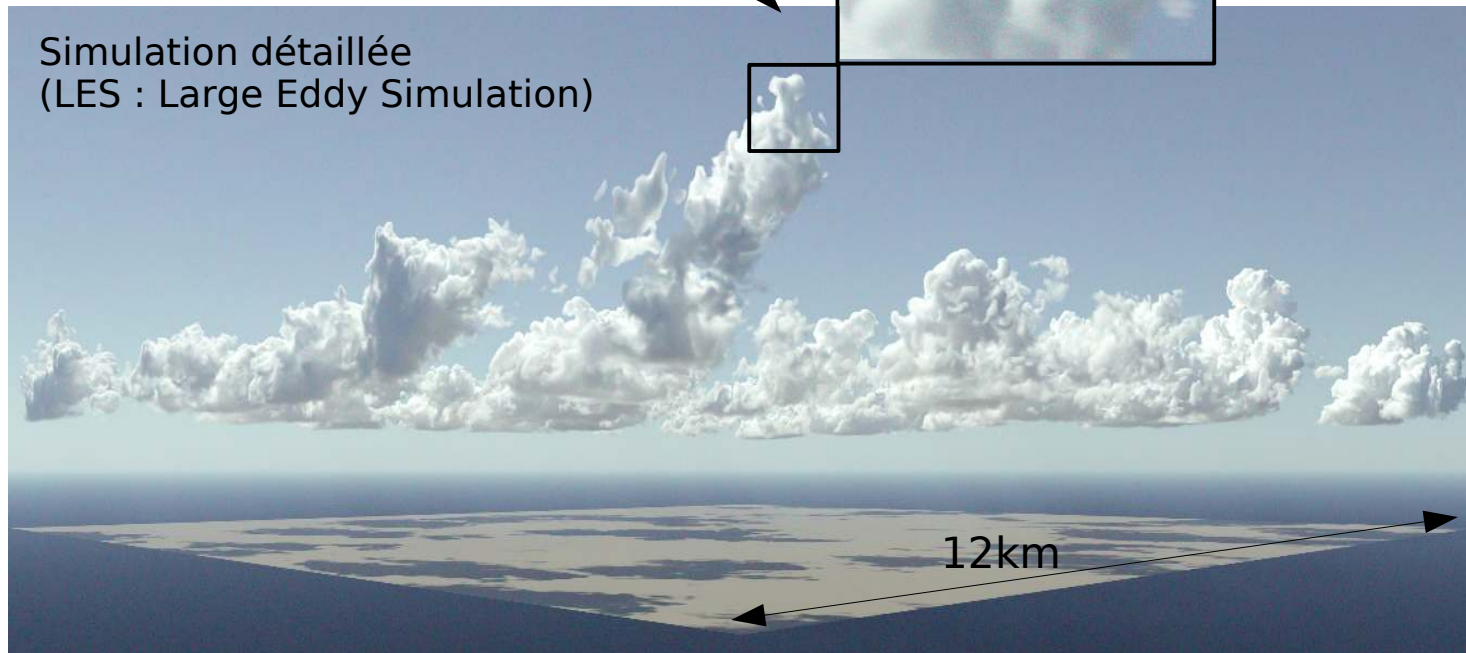
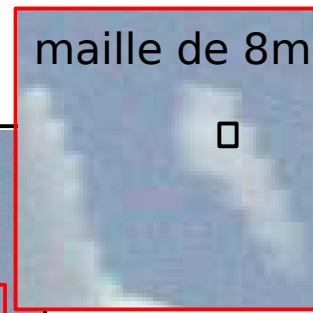
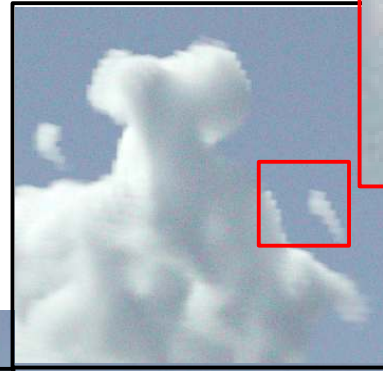
Comparaison des distributions prédites par ce schéma avec les distributions des LES



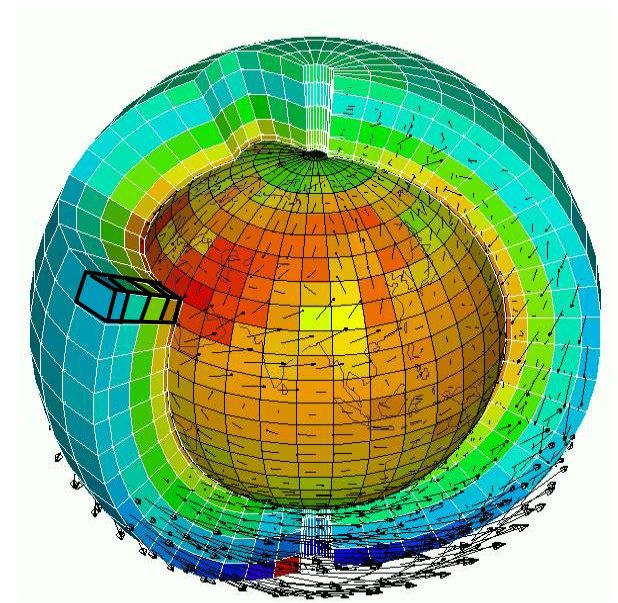


Campagne d'observation

Evaluation



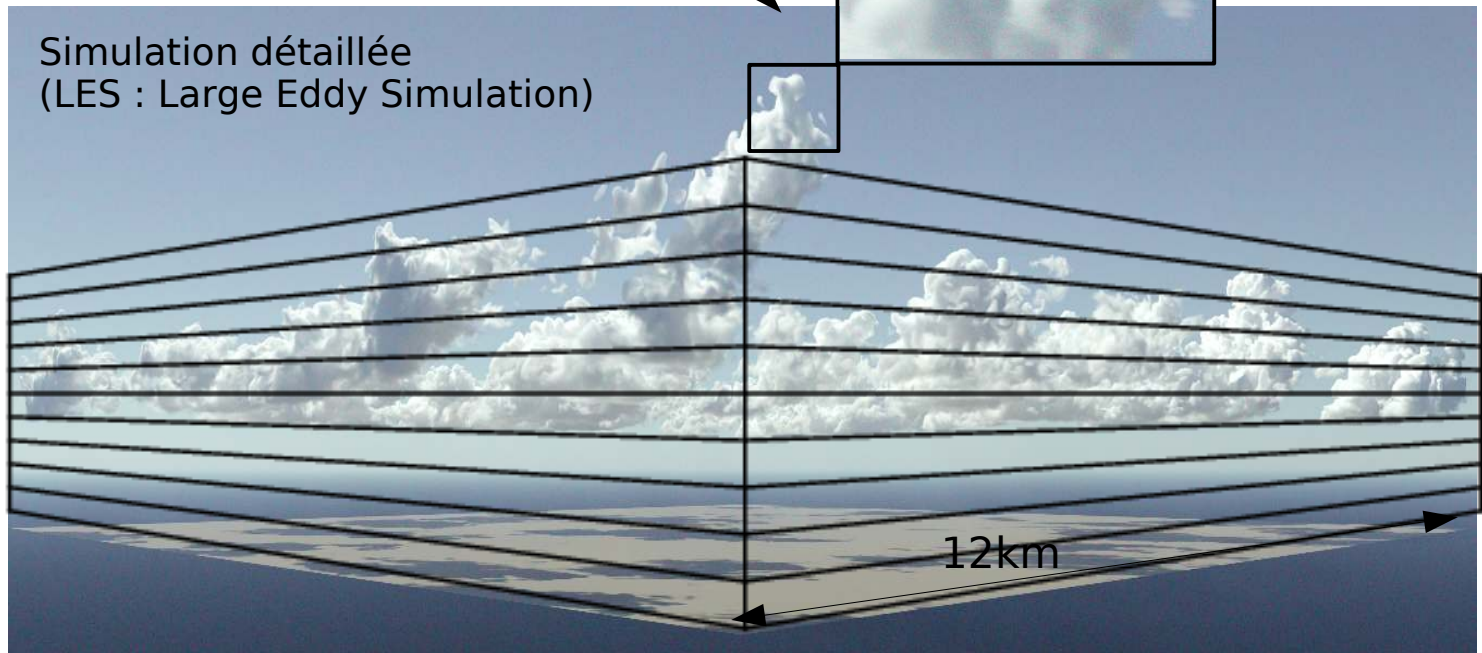
Simulation détaillée
(LES : Large Eddy Simulation)





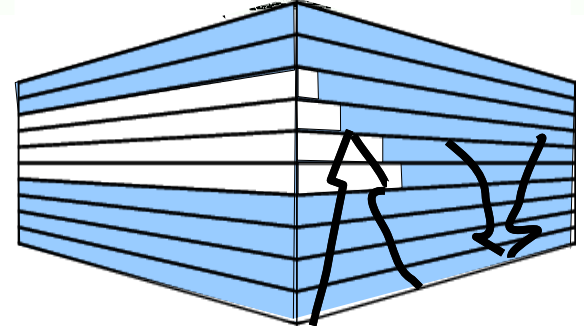
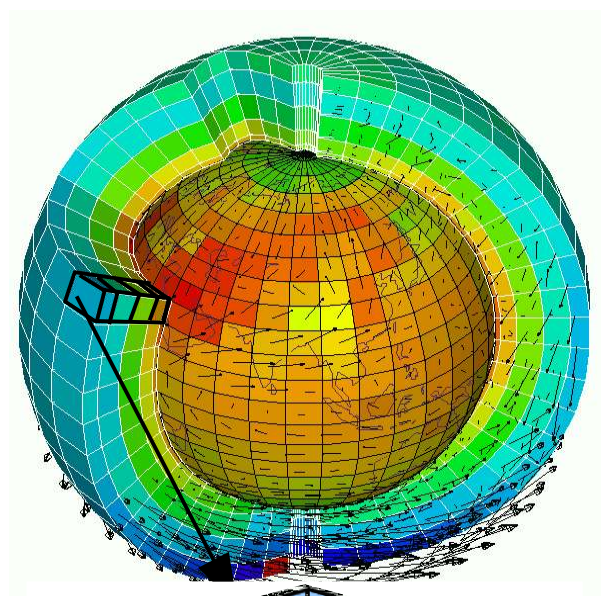
Campagne d'observation

Evaluation



Simulation détaillée
(LES : Large Eddy Simulation)

12km

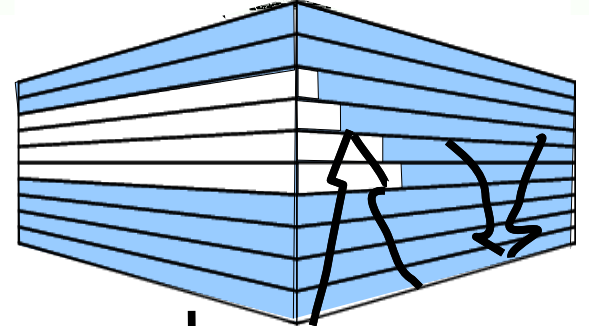
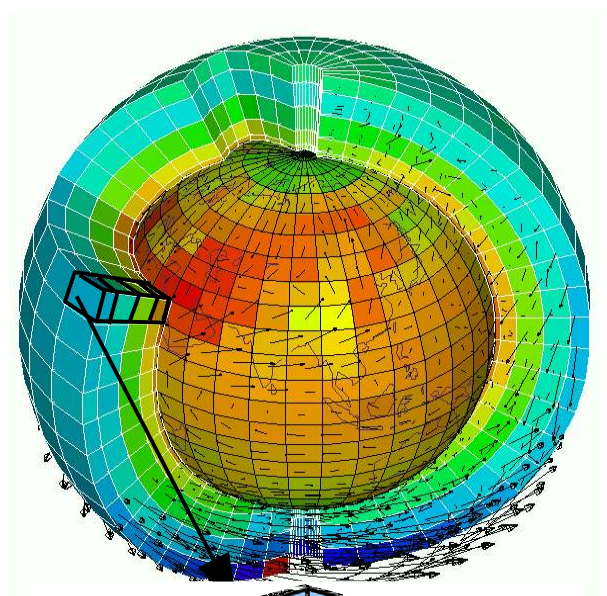
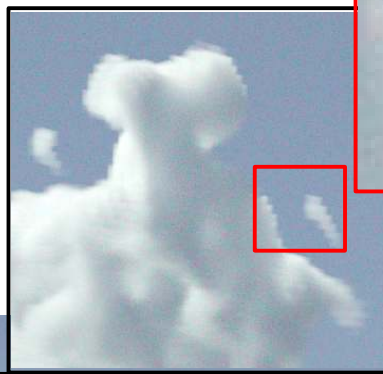


**Construction d'un modèle
de panaches convectifs et
de nuages associés.
On essaie de représenter
un nuage moyen très
idéalisé.**

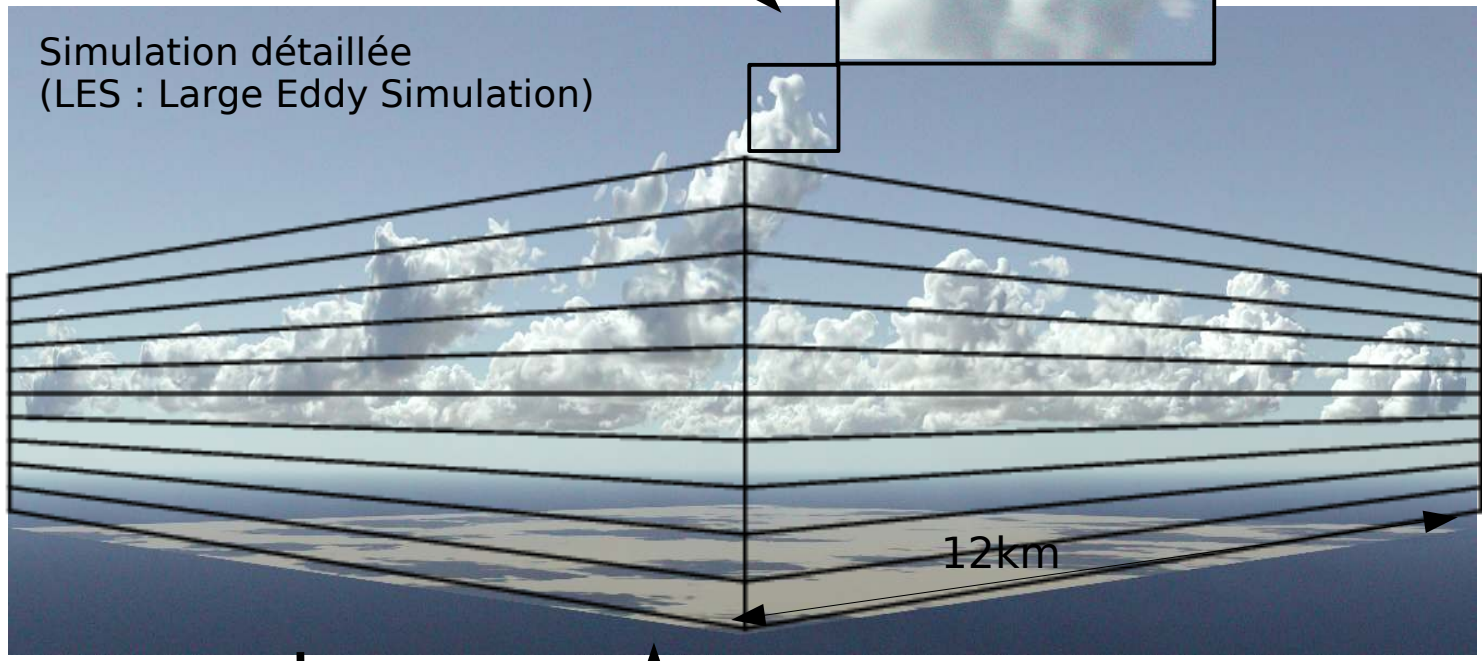


Campagne d'observation

Evaluation

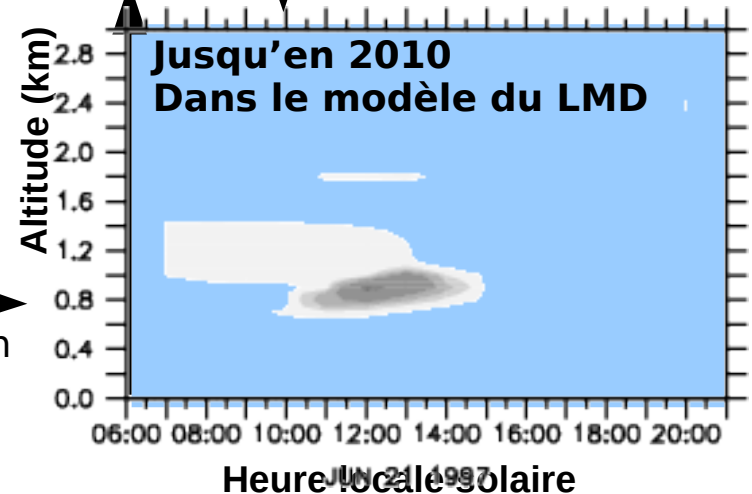
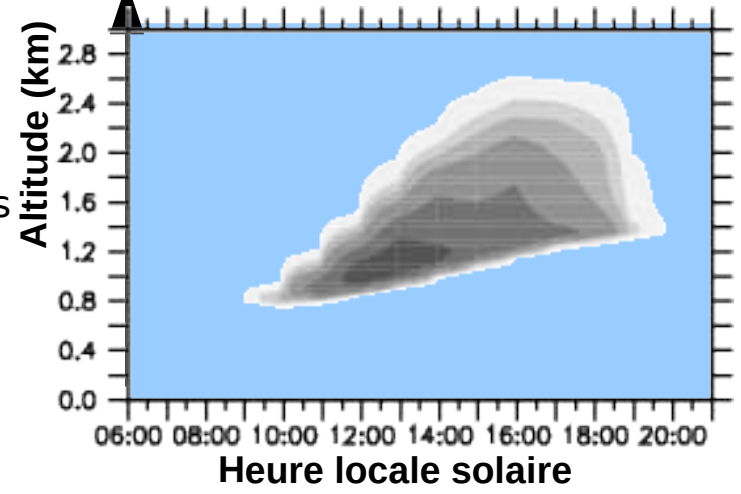


On calcule la fraction nuageuse pour chaque maille d'une colonne d'un modèle de climat



Simulation détaillée (LES : Large Eddy Simulation)

On calcule à chaque instant et pour toutes les altitudes du maillage la fraction de du domaine horizontal couverte par les nuages, appelée fraction nuageuse.



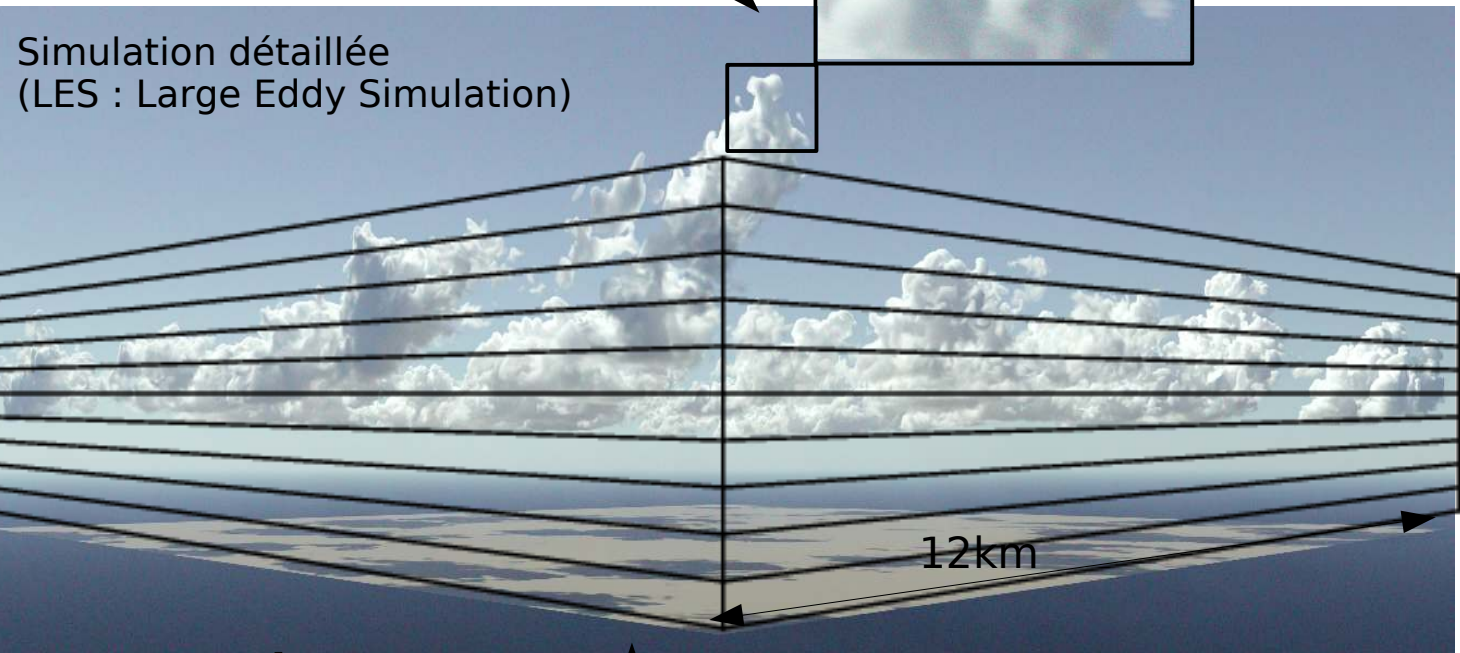
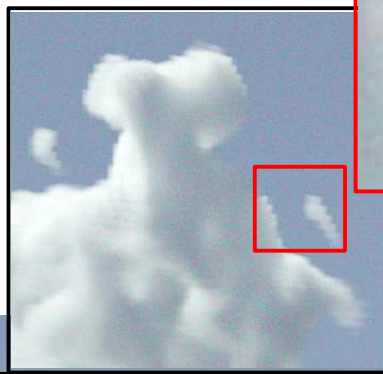
Evaluation

JUN 21 1997



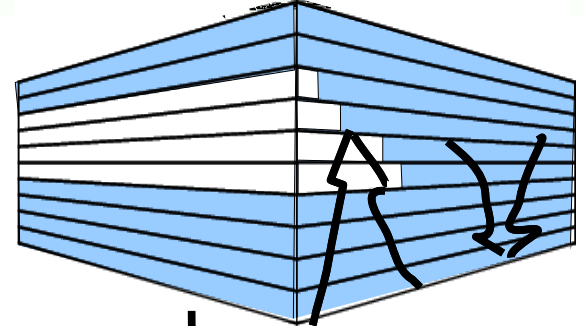
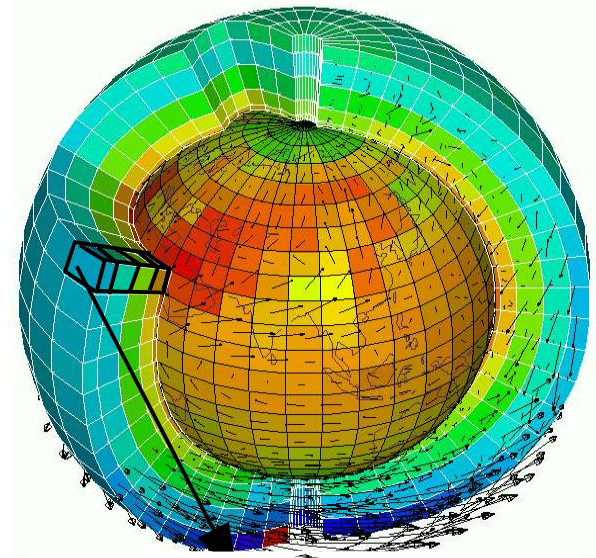
Campagne d'observation

Evaluation



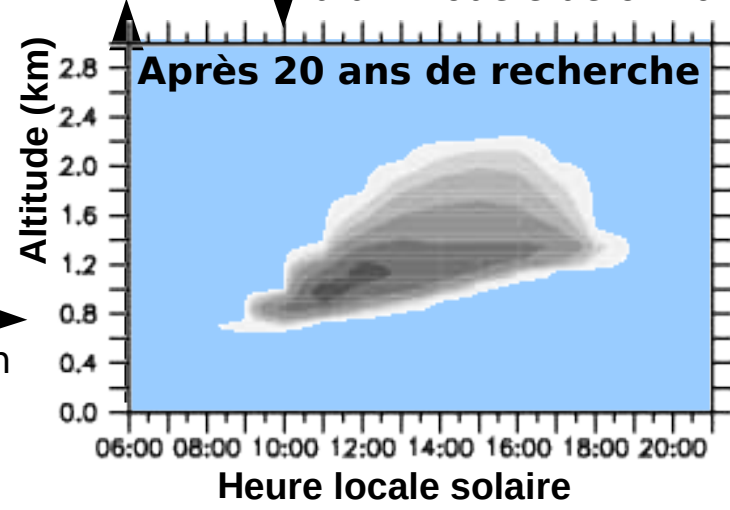
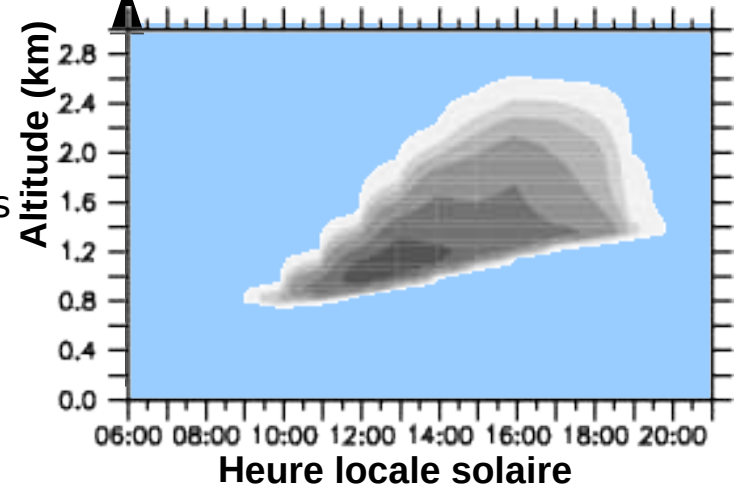
Simulation détaillée (LES : Large Eddy Simulation)

12km



On calcule la fraction nuageuse pour chaque maille d'une colonne d'un modèle de climat

On calcule à chaque instant et pour toutes les altitudes du maillage la fraction de du domaine horizontal couverte par les nuages, appelée fraction nuageuse.



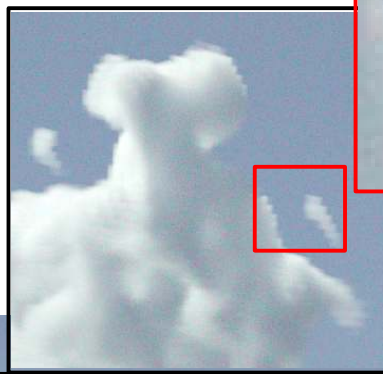
Evaluation

Après 20 ans de recherche

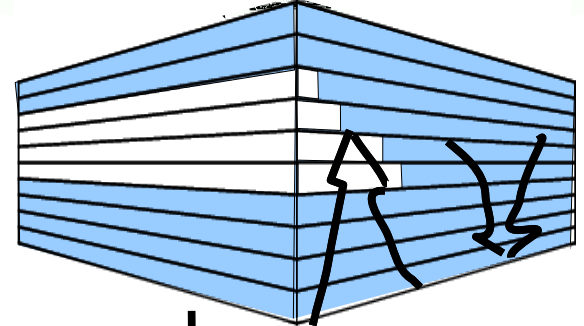
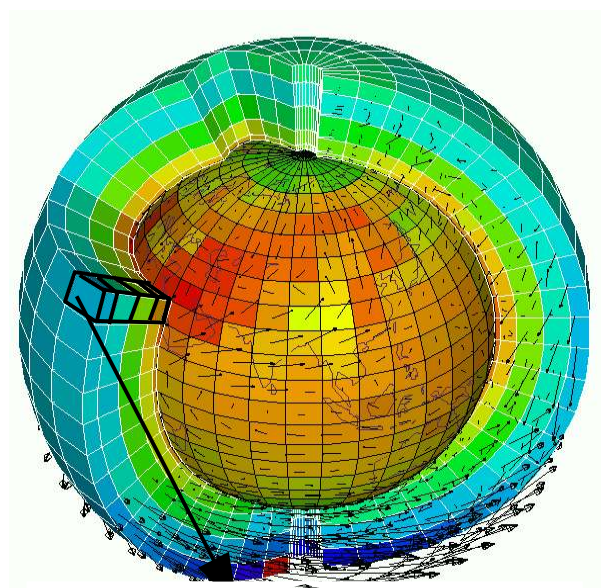
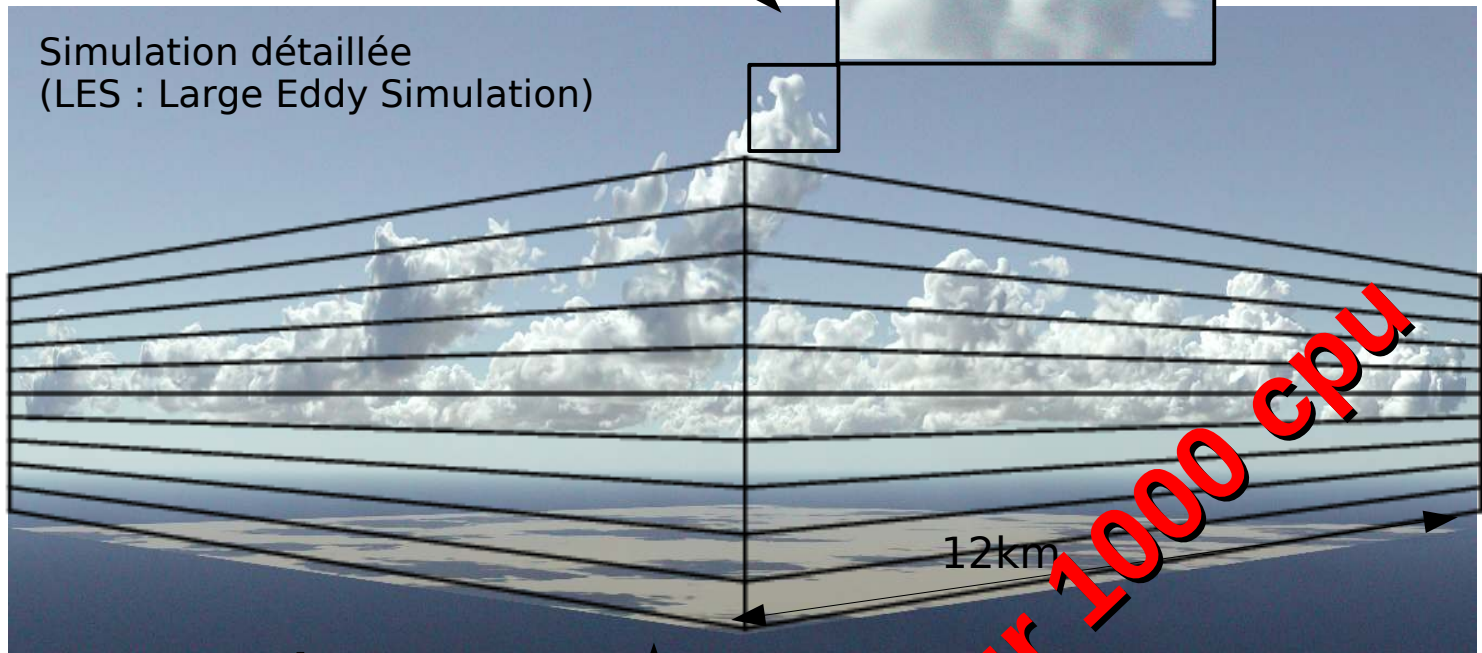


Campagne d'observation

Evaluation



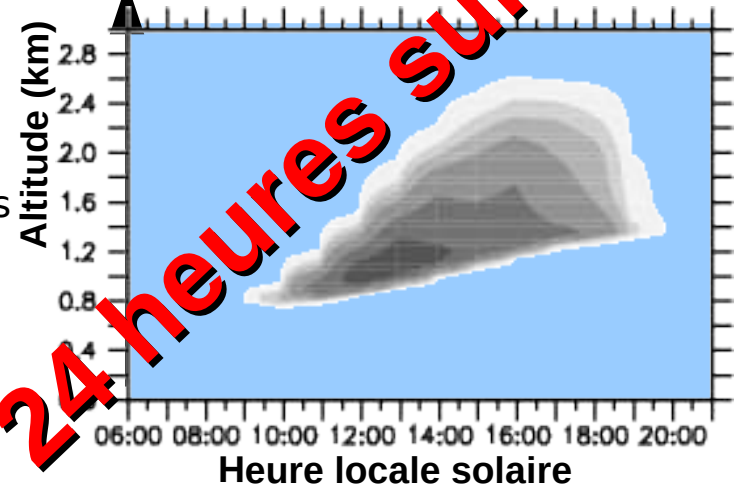
Simulation détaillée (LES : Large Eddy Simulation)



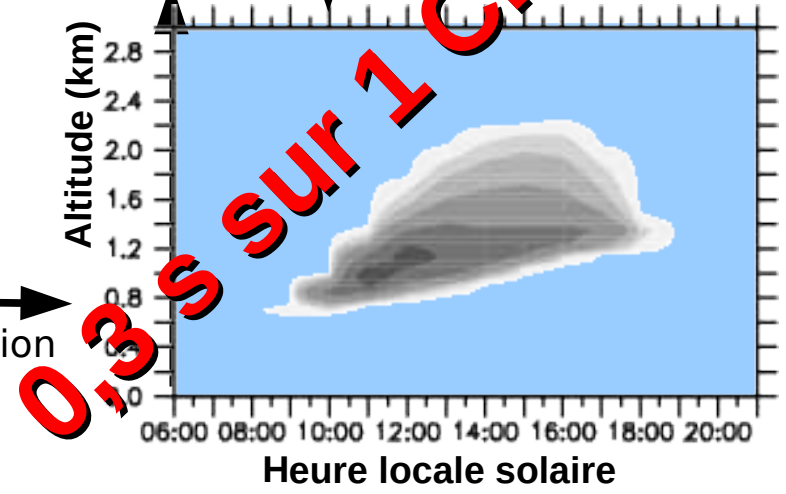
On calcule la fraction nuageuse pour chaque maille d'une colonne d'un modèle de climat

On calcule à chaque instant et pour toutes les altitudes du maillage la fraction de du domaine horizontal couverte par les nuages, appelée fraction nuageuse.

24 heures sur 1000 CPU



Evaluation

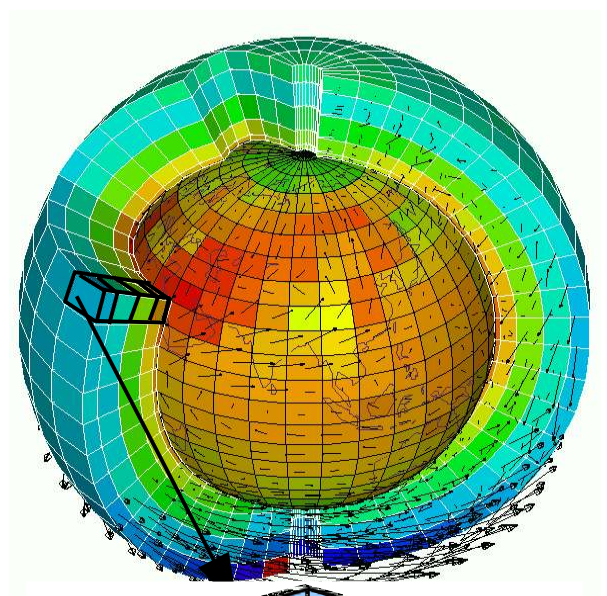
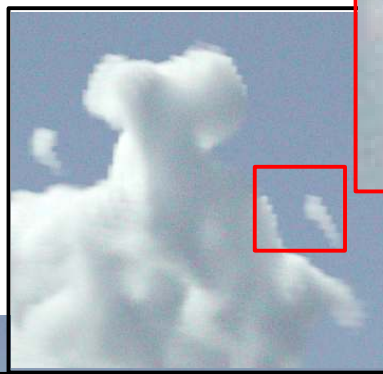


0,3 s sur 1 CPU

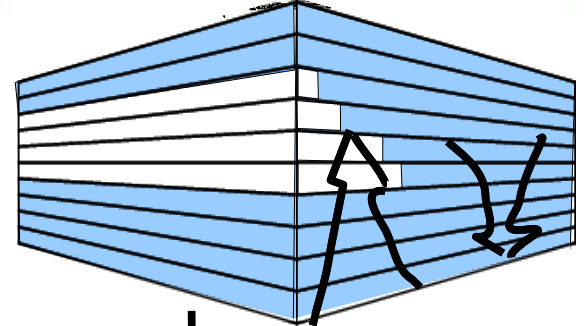
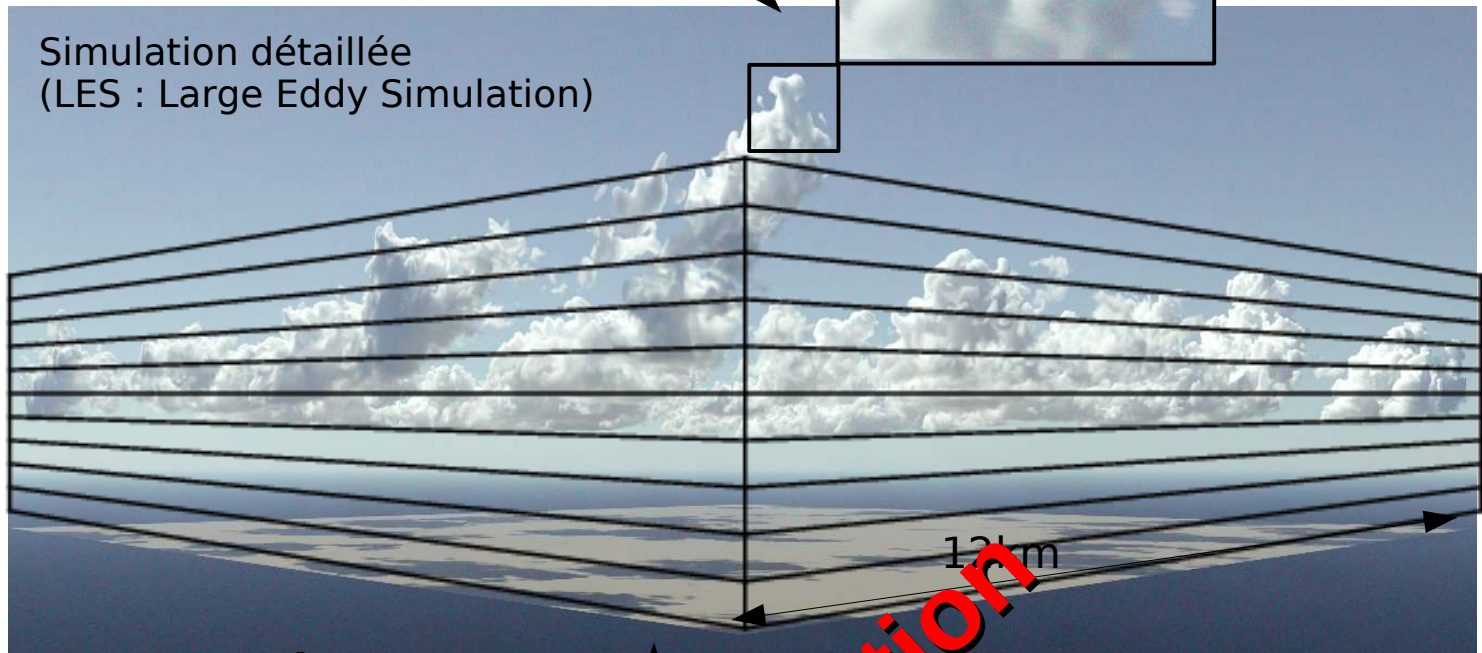


Campagne d'observation

Evaluation

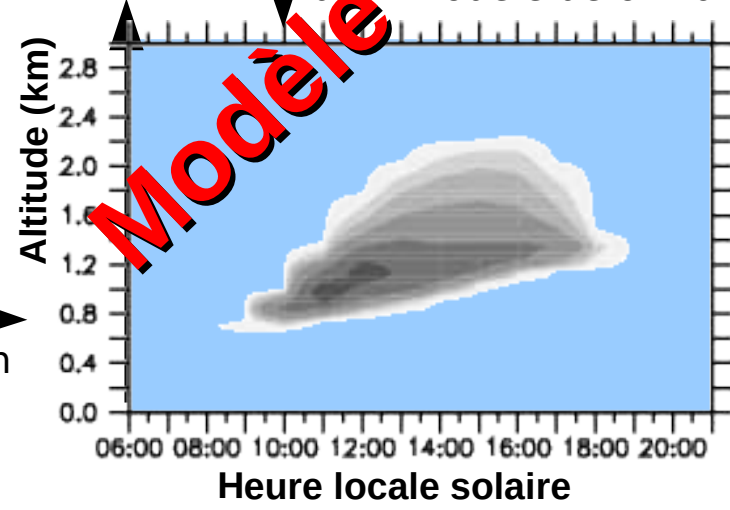
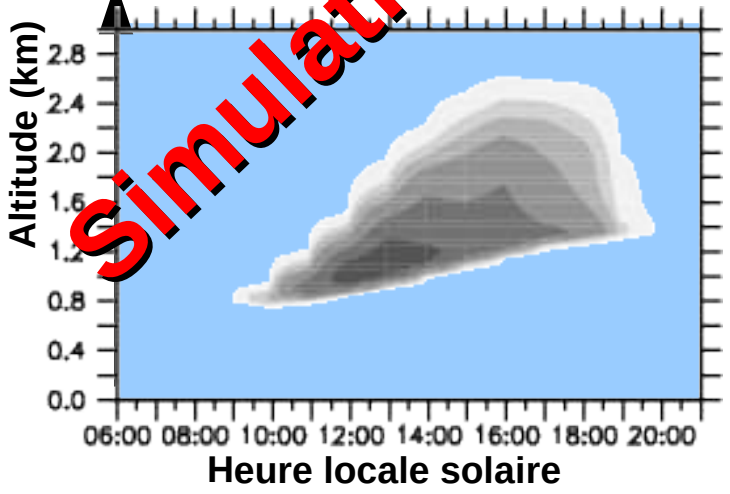


Simulation détaillée (LES : Large Eddy Simulation)

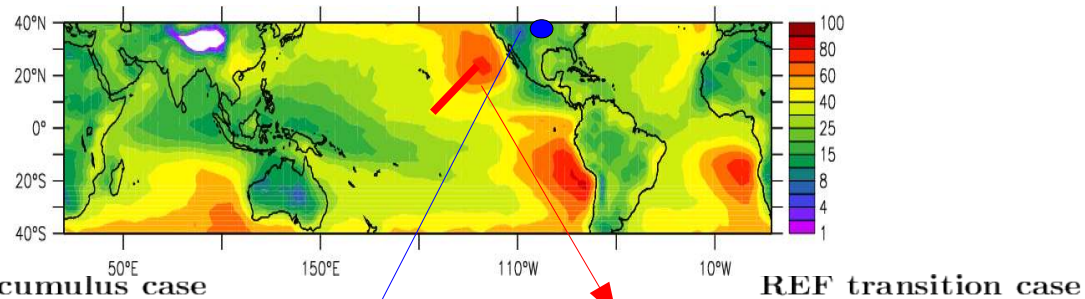


On calcule la fraction nuageuse pour chaque maille d'une colonne d'un modèle de climat

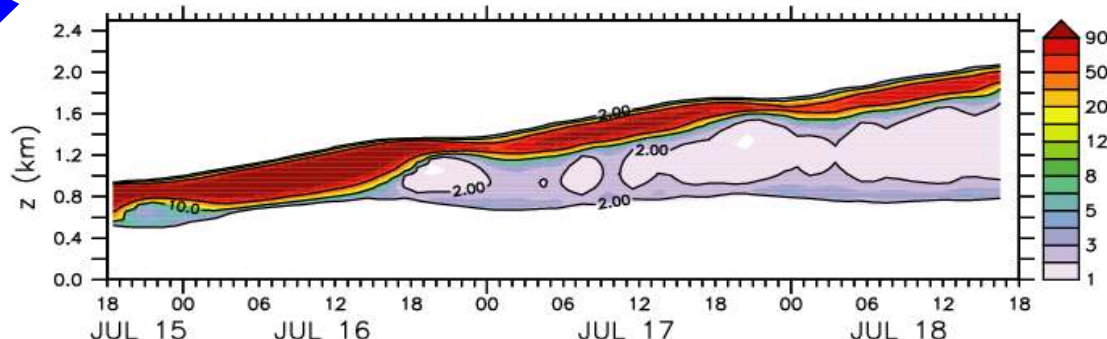
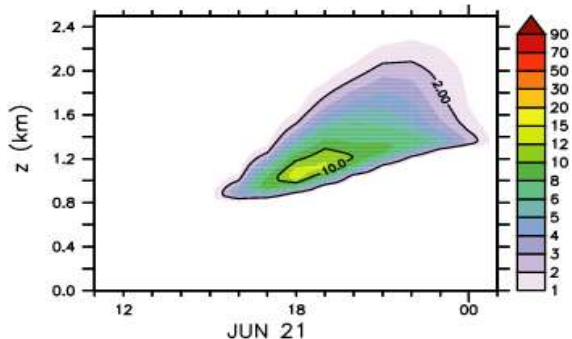
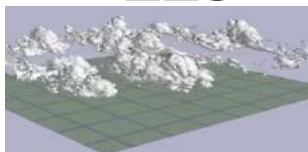
On calcule à chaque instant et pour toutes les altitudes du maillage la fraction de du domaine horizontal couverte par les nuages, appelée fraction nuageuse.



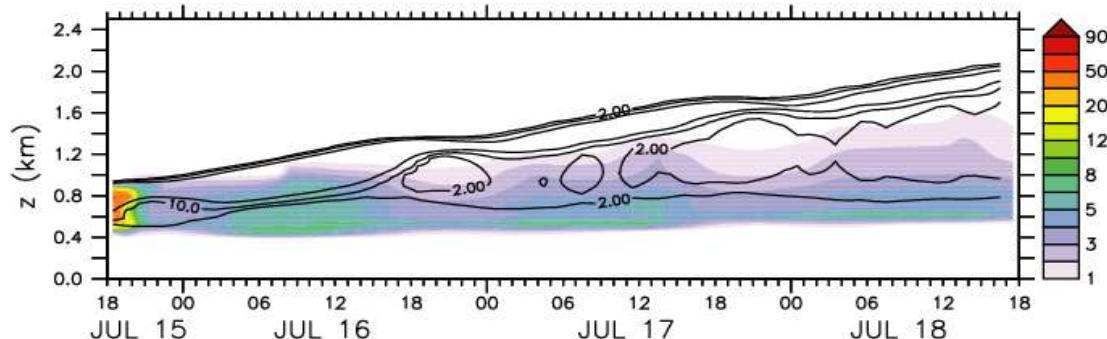
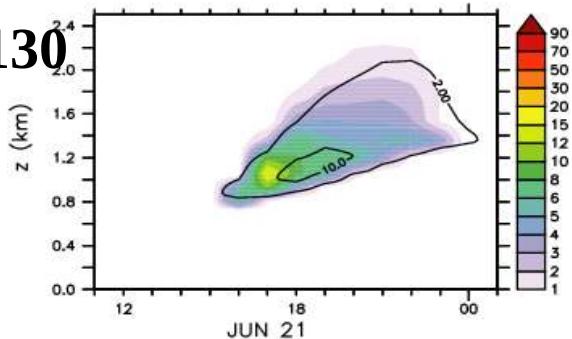
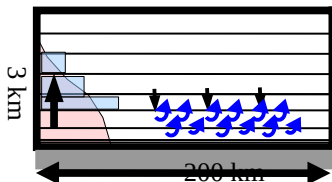
Evaluation



LES



LMDZ5B/L130



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

Mixing in Shallow Cumulus Clouds Studied by Lagrangian Particle Tracking Heus et al, Jas, 2017

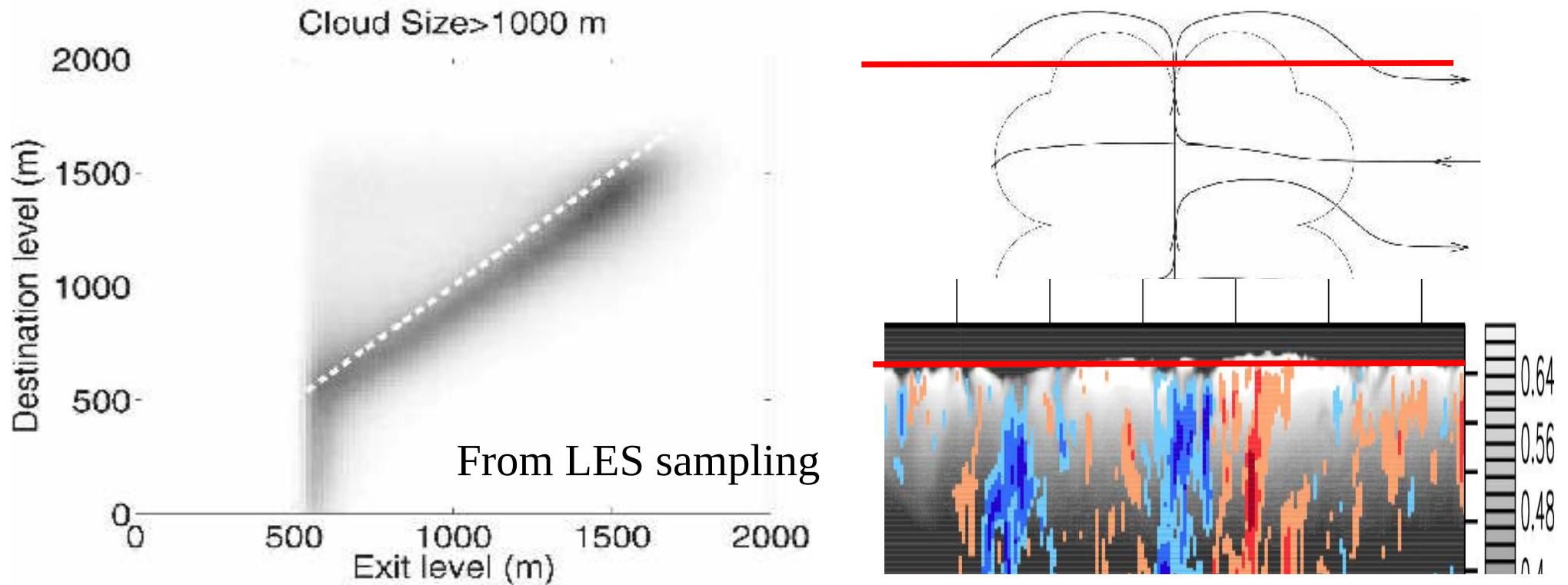
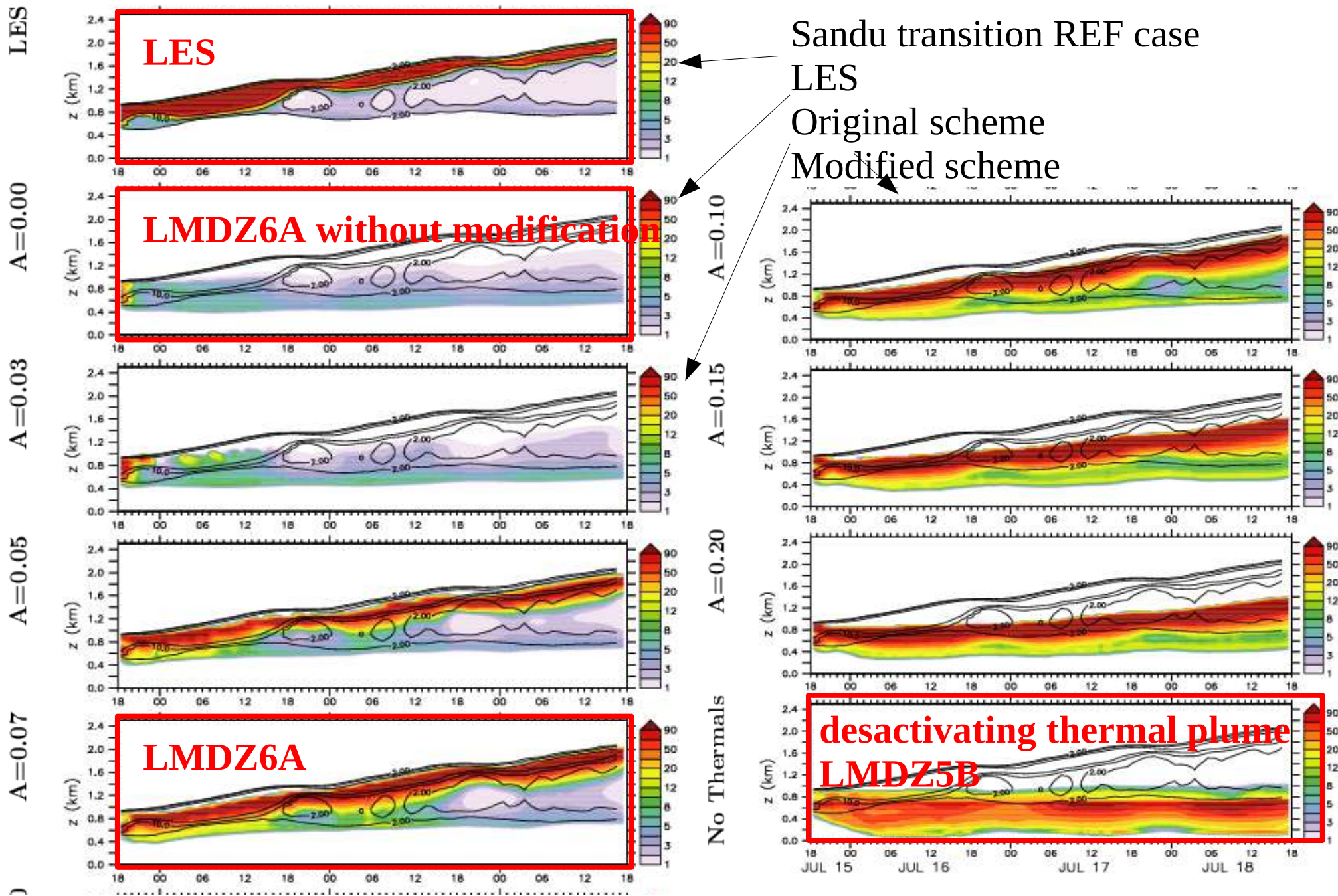


Fig 14c : Destination level versus exit level

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

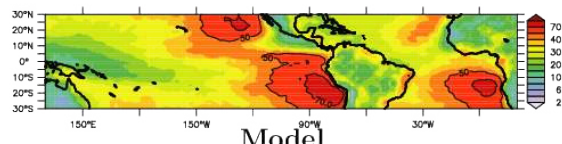
$$B^*(z) = g \frac{\theta_{v,th}(z) - \theta_{v,env}(z+h)}{\theta_v(z)}$$

Destination level : z
Exit level : z+h with $h = A z$



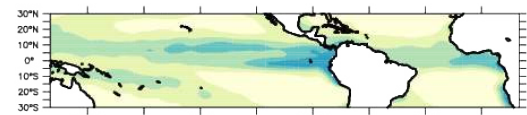
Does not affect too much the cumulus cases

Low cloud cover (%)
Calipso



Obs Calipso
Nuages bas

Climato DaSilva
RH 2m

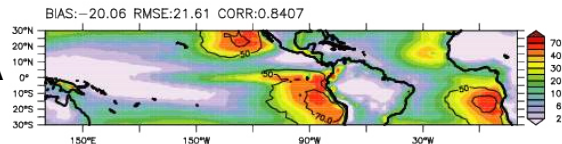


Model value

Model bias

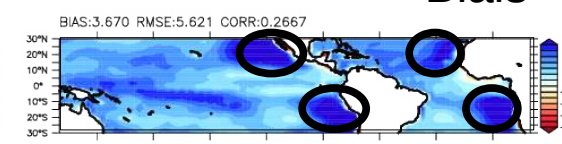
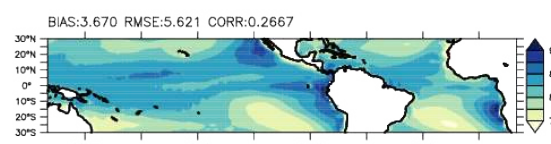
Biais

5A

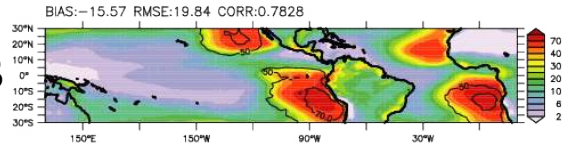


Diffusion turbulente

5A

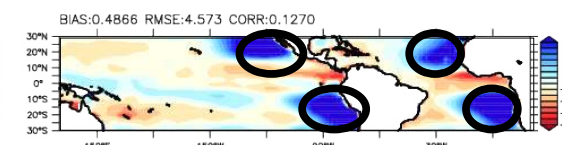
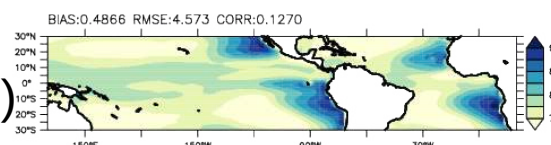


5B

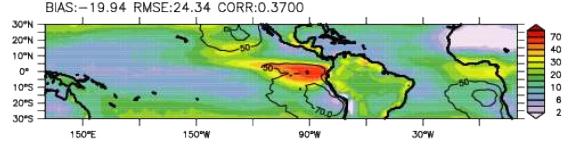


+ Thermiques
(sauf forte inversion)

5B

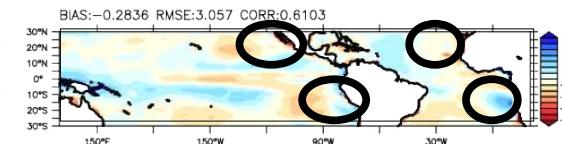
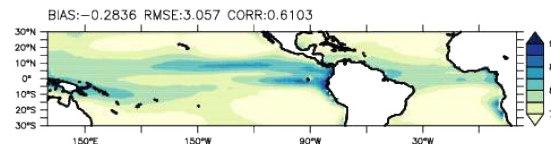


D00

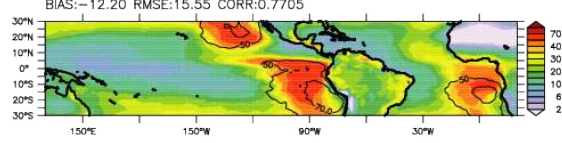


+ Thermiques
partout D=0

D00

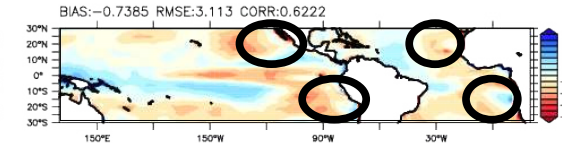
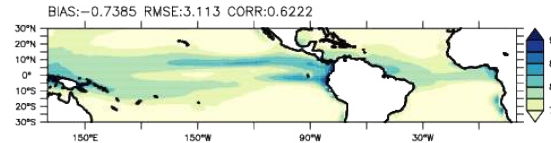


D05

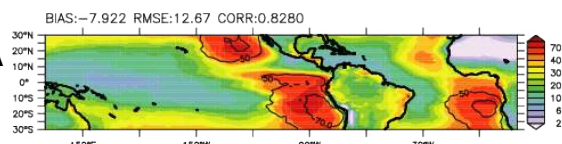


D=0.05

D05

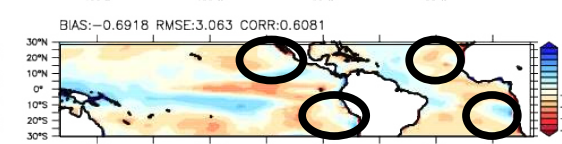
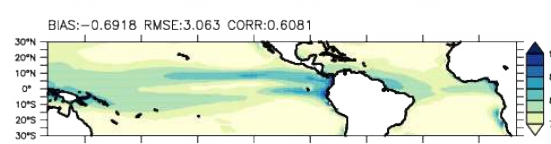


6A/D07

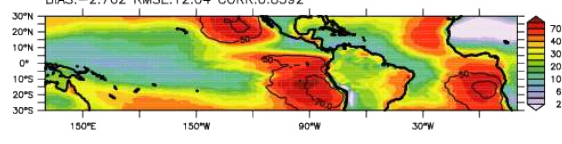


D=0.07

6A/D07

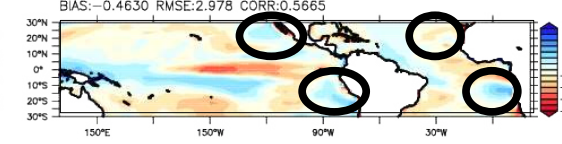
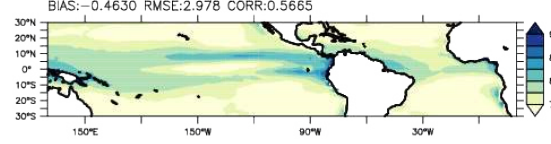


D10

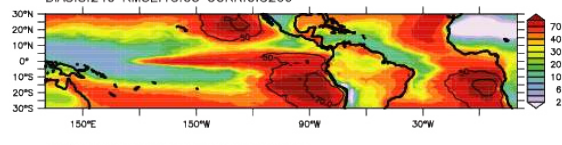


D=0.10

D10

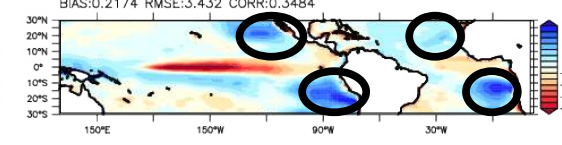
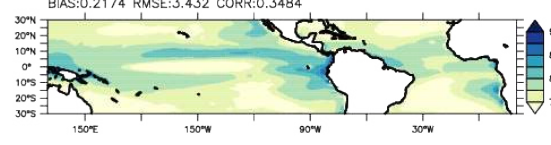


D20

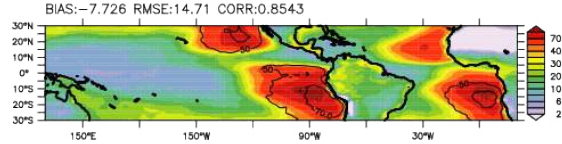


D=0.20

D20

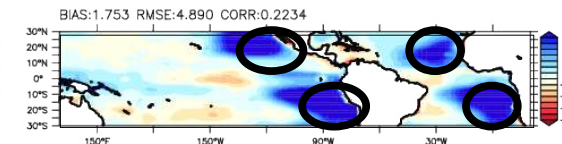
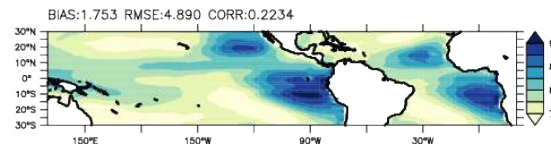


SWITCH

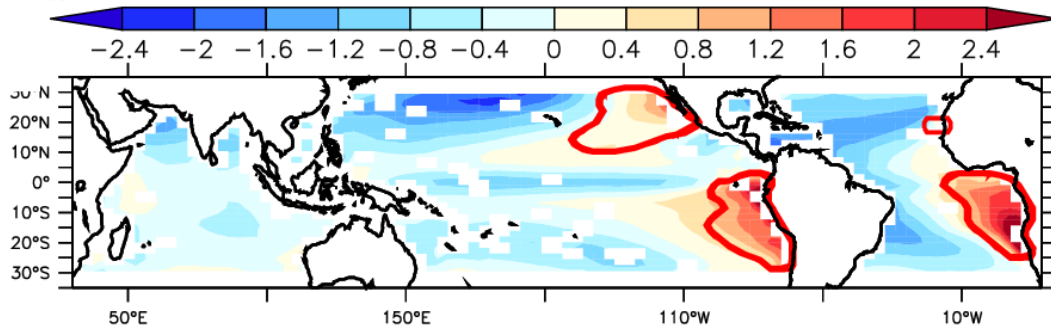


Thermiques
desactivés si
Forte inversion
(come 5B)

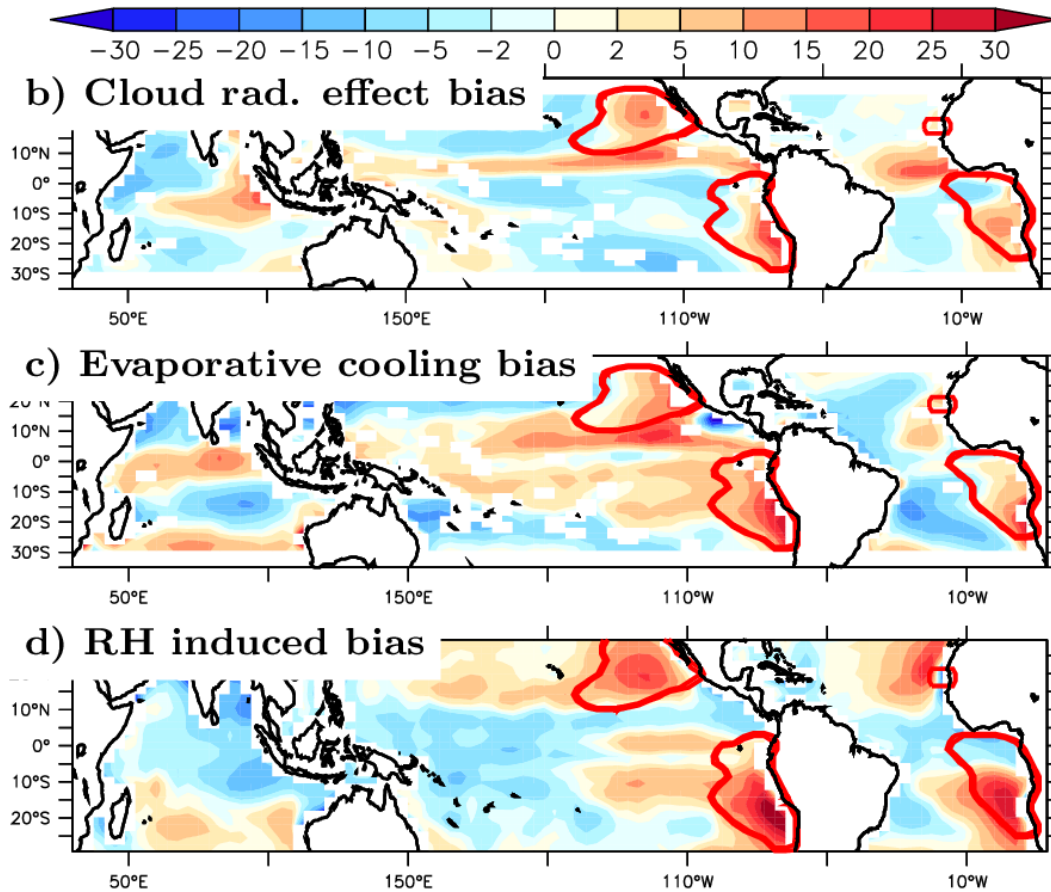
SWITCH



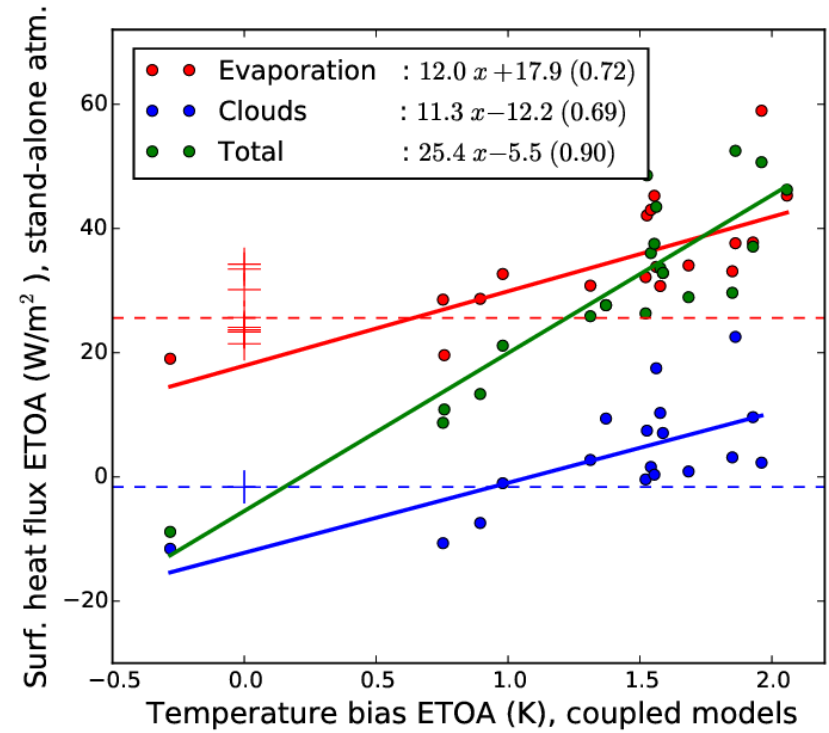
a) Surface temperature bias pattern (K),
coupled simulations:



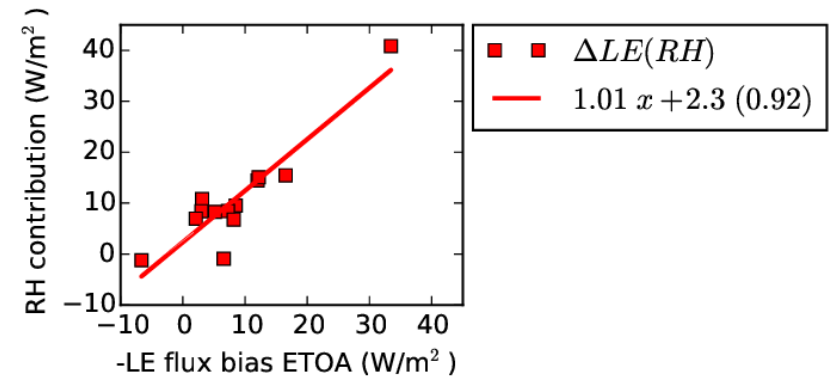
Heat flux bias pattern (W/m^2), atmosphere-alone:



e) Heat flux/temperature ETOA relationship



f) $-LE$ ETOA bias explained by RH



2. Couche limite convective

Modèle	LMDZ5NP / 6 Et Mars	ARPEGE-Climat (AR5)	ARPEGE-Climat (pre-AR6)	ARPEGE-PNT	AROME/MesoNh	MAR
Diffusion turbulente / TKE						
Général	TKE pronostiq. Yamada 83	TKE d'eq. Ricard-Royer 93	TKE pronostiq. Cuxart 2000	TKE pronostiq. Cuxart 2000	TKE pronostiq. Cuxart 2000	Duynderke 88
Stabilité	dt=10min	dt= 30 mn	dt=15 mn	dt=10min	dt=60s	dt=6min
CL surface	classique	Louis	Louis/continent Coare ou Ecume /océans	Louis/continent Ecume/océans	Louis/continent Ecume/océans + Canopy	
TKE humide	Non	Oui	Oui+coupl conv	Oui	Oui	Oui
Spécifique CL stables	Holtlag Boville +Kz min		TKE _{min} =10 ⁻⁵ m ² /s ² futur avec TPE ?	TKE _{min} =10 ⁻⁵ m ² /s ² futur avec TPE ?	TKE _{min} =10 ⁻⁵ m ² /s ² futur avec TPE ?	Duynderke 88
Autre			L non locale			
Traitements spécifiques couche limite convective / Convection peu profonde						
Général	Modèle du thermique Hourdin, Rio ...	Non	PCMT (Piriou, Gueremy)	Bechtold 2000 + TKE_in trigger Futur : PMMC09	PMMC09	
Stabilité	Adv amont Implicite dt=10m		dt =15 mn	dt=10min	dt=60s	
Couplage avec la TKE	Indirect via la modification des profils		Non	Prod. Thermique pour TKE + mod Lm	Prod thermique pour TKE	
Couplage nuages	Bi-gaussienne couplée (Jam)		Pdf mixte Bougeault Nébul convect = f(frac convect)	Pdf Smith	Pdf mixte Bougeault	
Autre	Couplé convec : (ALE/ALP)			Conv. Prof. Mod 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 > 200m**

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



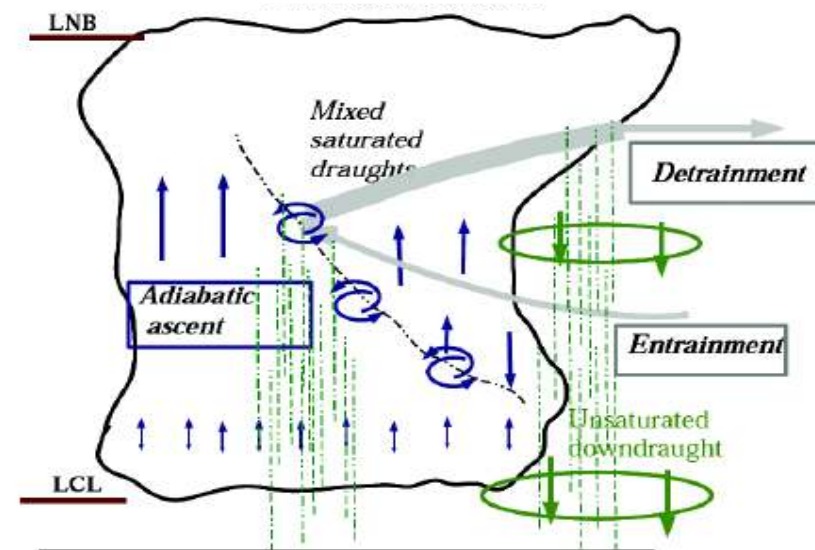
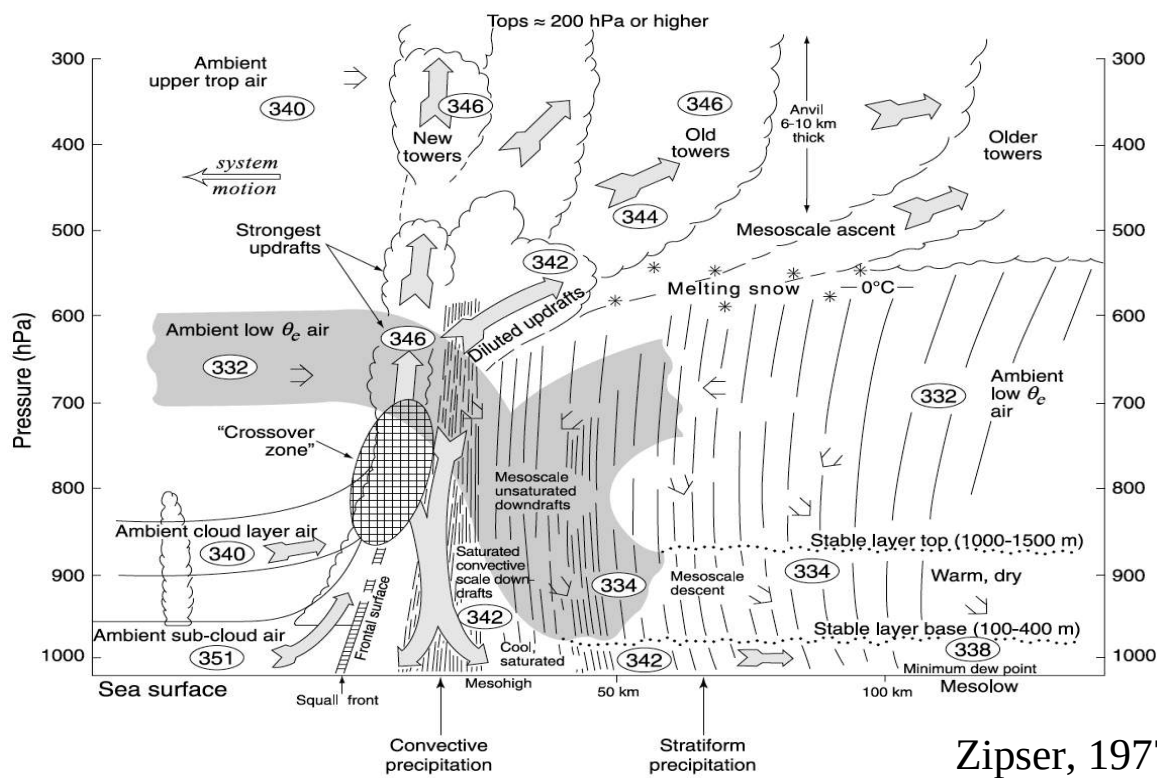
3. La convection profonde

Spécificités de la convection profonde

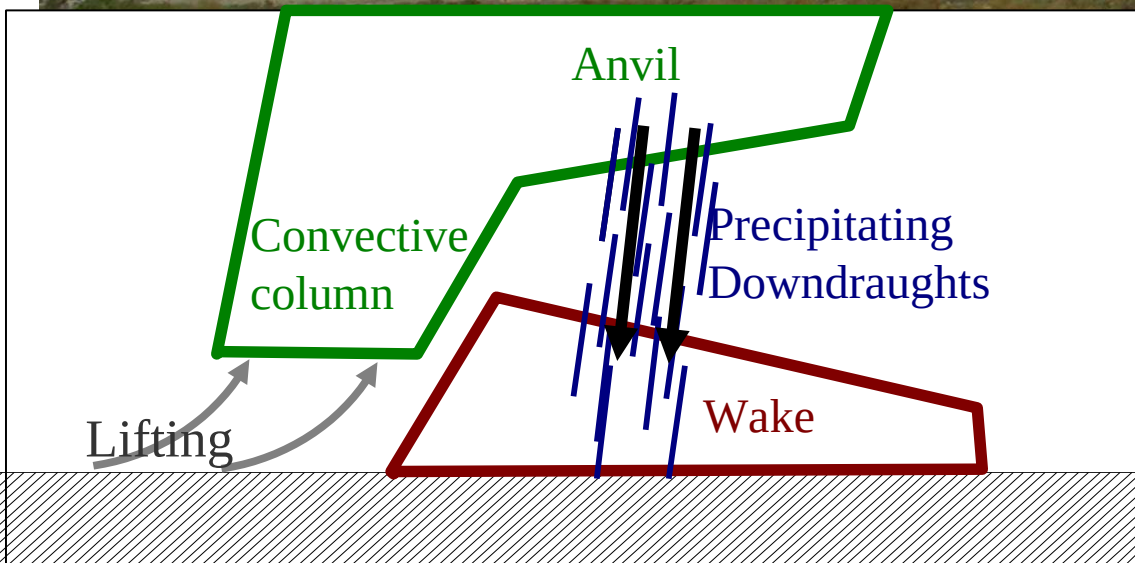
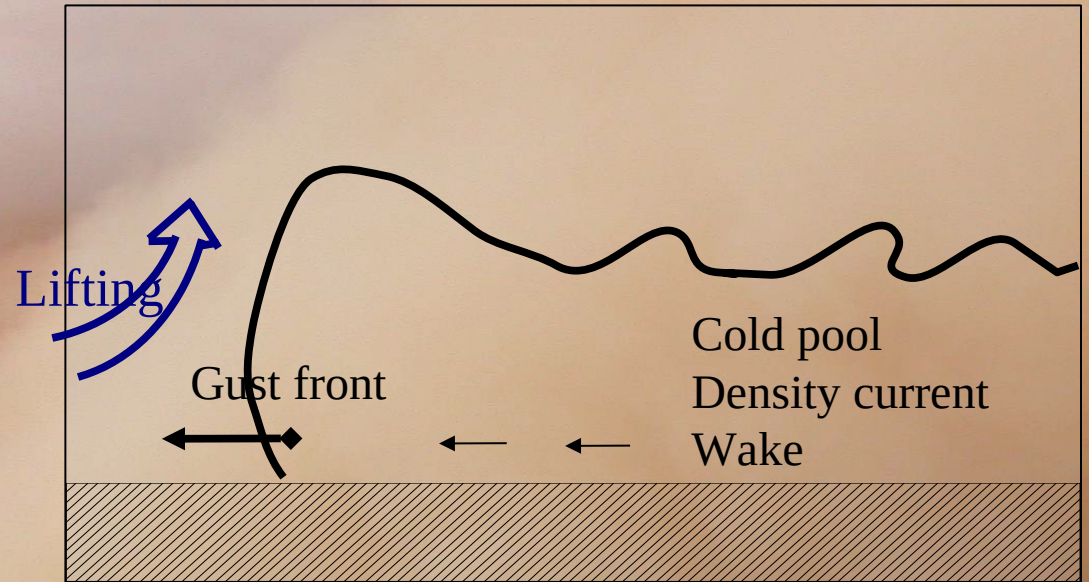
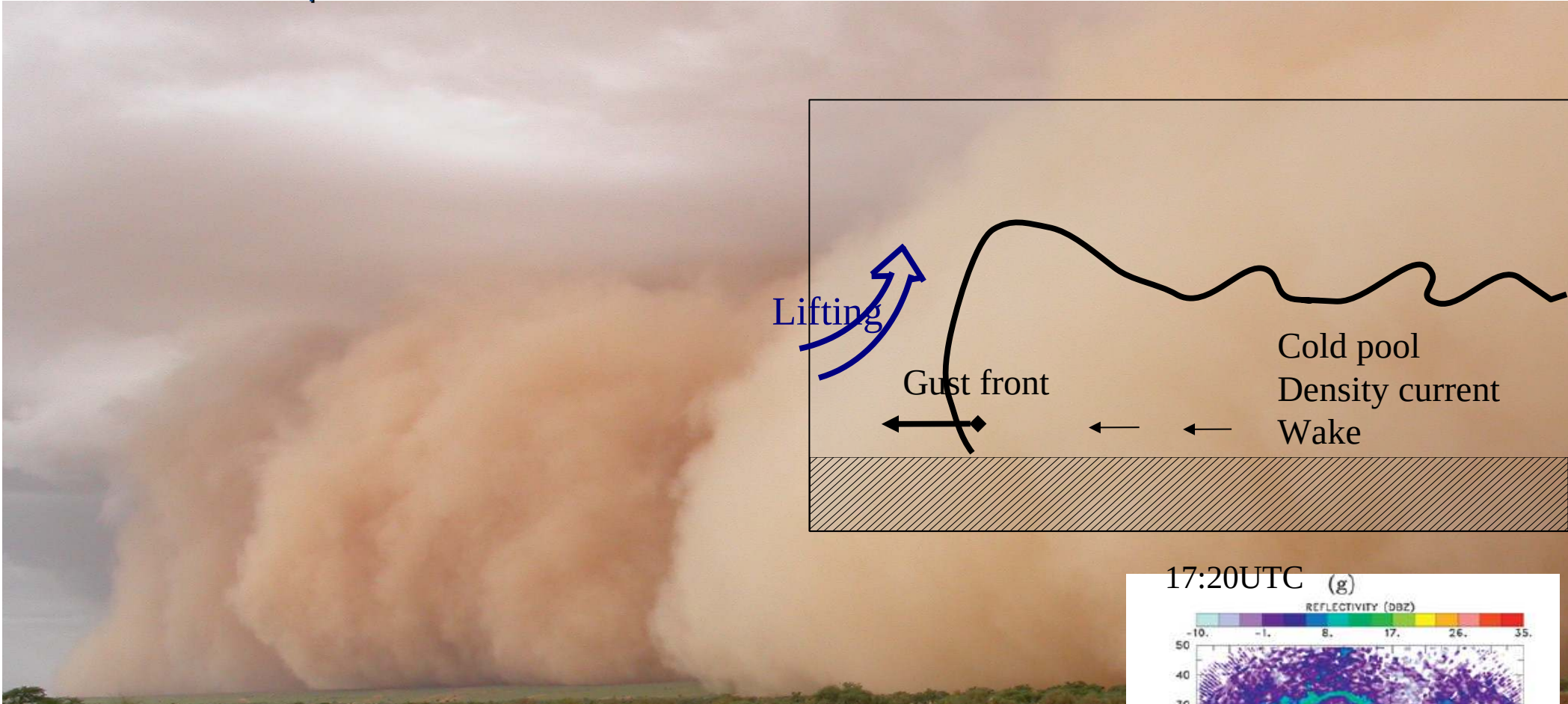
- Profonde (typiquement jusqu'à la tropopause)
- Instabilité conditionnelle → Processus de déclenchement (triggering)
- Importance de la microphysique. La pluie joue un rôle déterminant.
- Importance de l'organisation méso-échelle (formes variées)



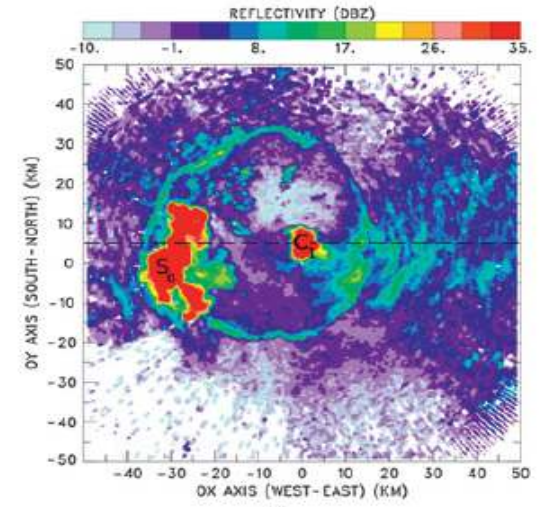
Conceptual model of convection highlighted by field campaigns



3. La convection profonde



17:20UTC (g)



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

Mali, August 2004

F. Guichard, L. Kergoat

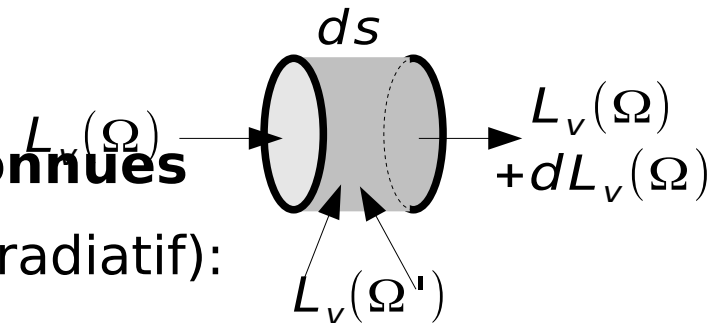
Les paramétrisations des modèles de climat

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

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):

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

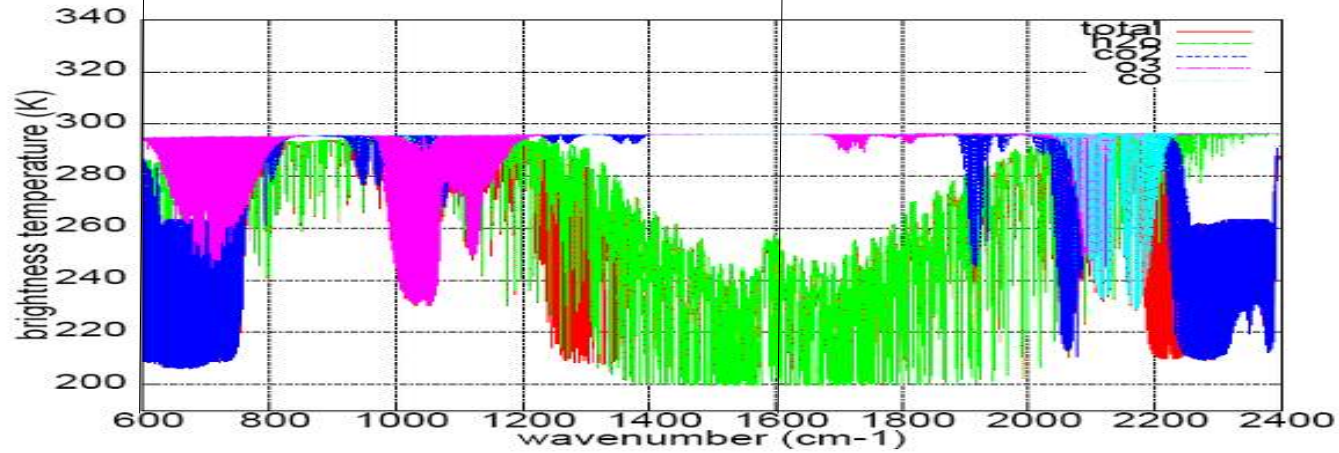
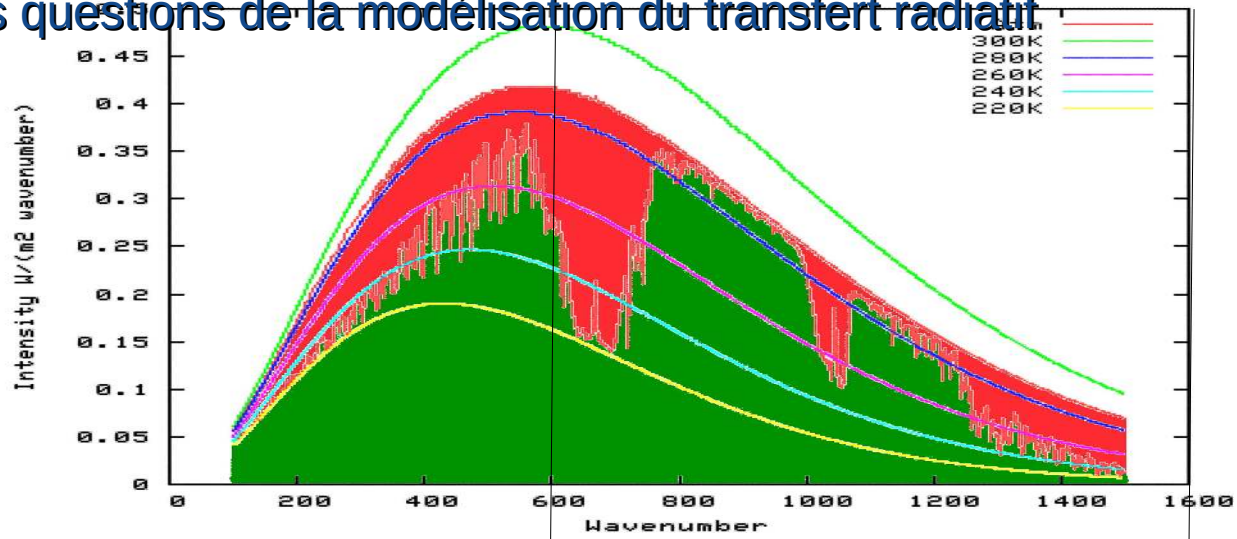
Mais extrêmement coûteux.

- Intégration sur les fréquences (ν)
- 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 ...)

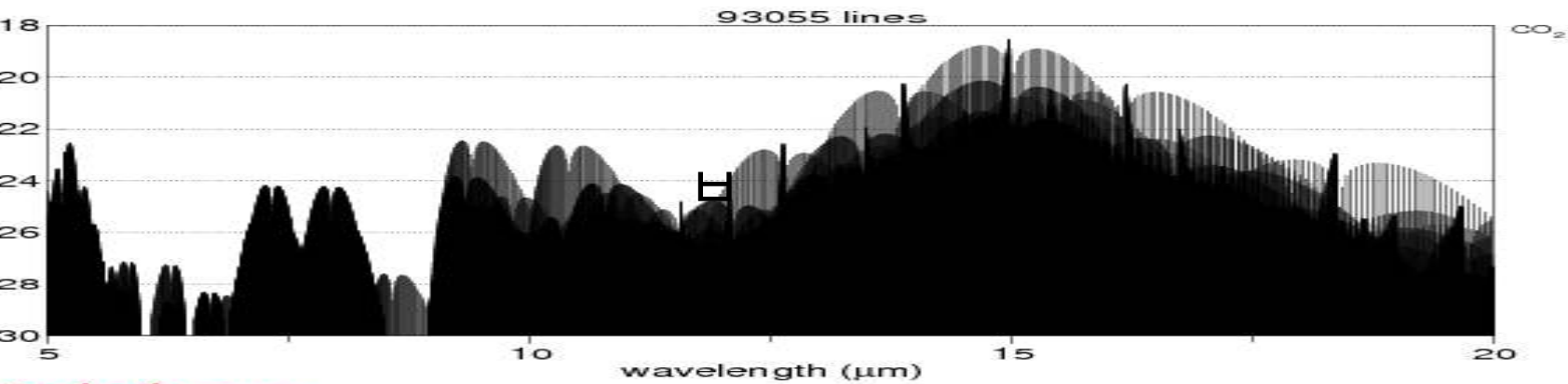
Pour un calcul d'une « scène » à un instant donné, un calcul « exact » (ou complet) peut prendre des heures de calcul sur un supercalculateur.

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

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

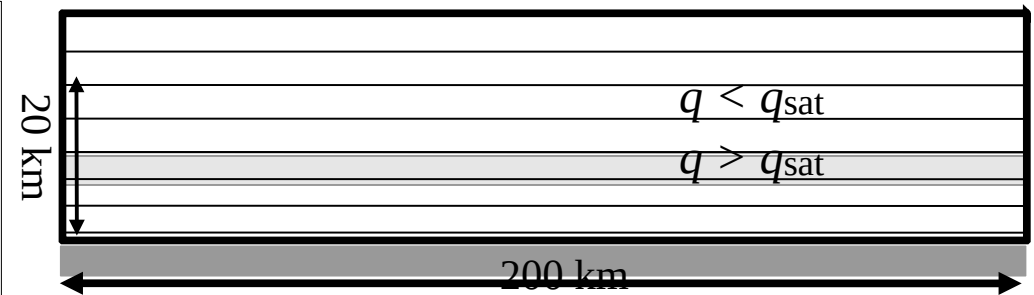
Représentation des nuages

q : concentration en vapeur d'eau
 q_{sat} : concentration maximum à saturation
Si $q > q_{sat}$:
→ la vapeur d'eau condense = nuage

On connaît q et q_{sat} à l'échelle de la maille
→ Fraction de la maille couverte de nuages ?

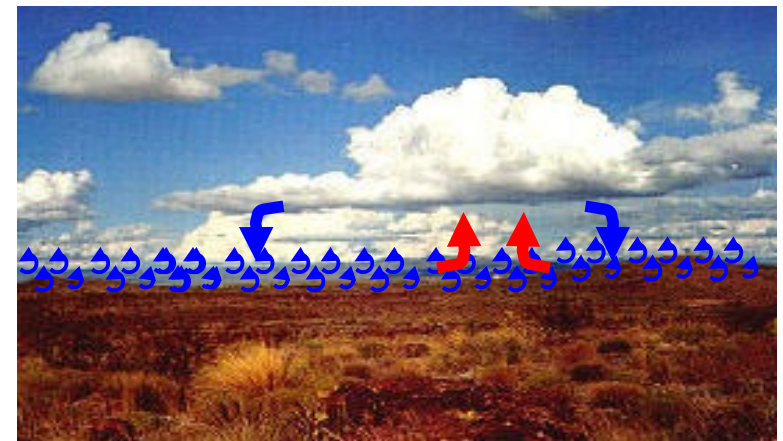
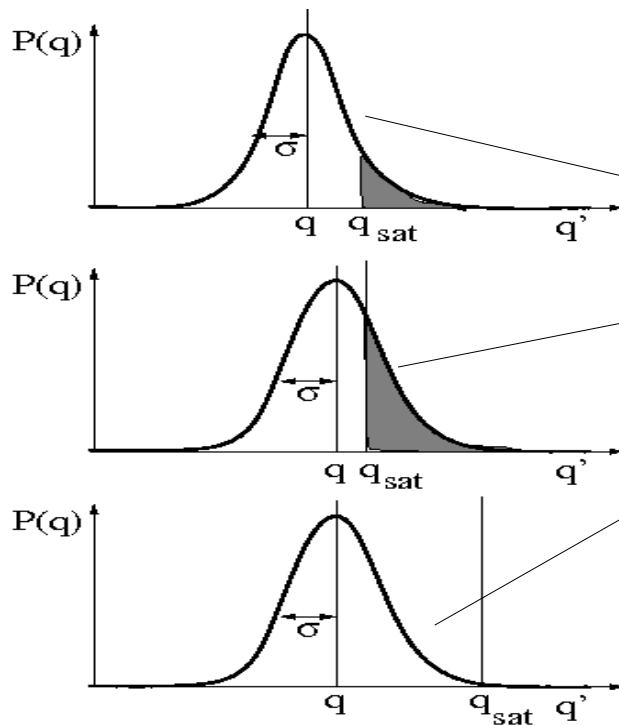
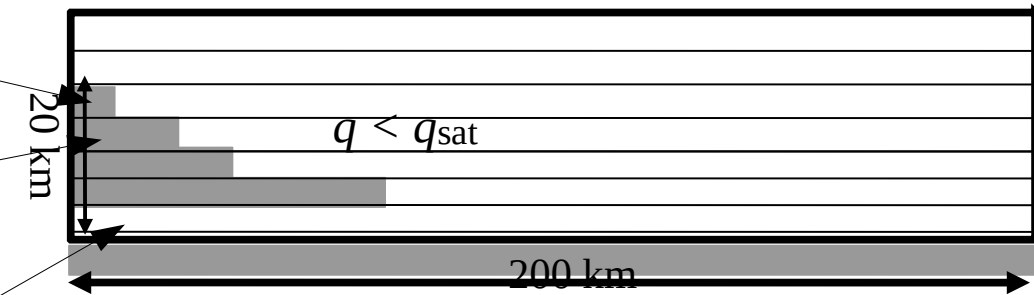
Modèle « tout ou rien » :

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

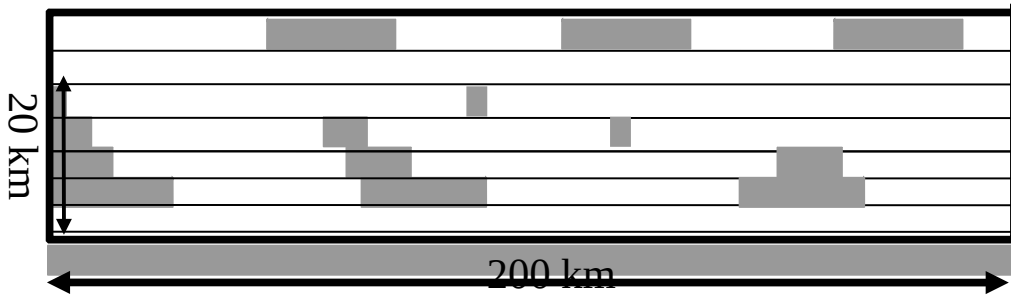
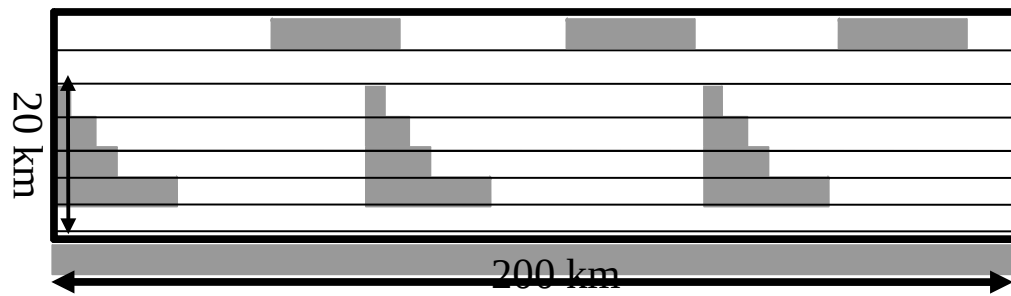
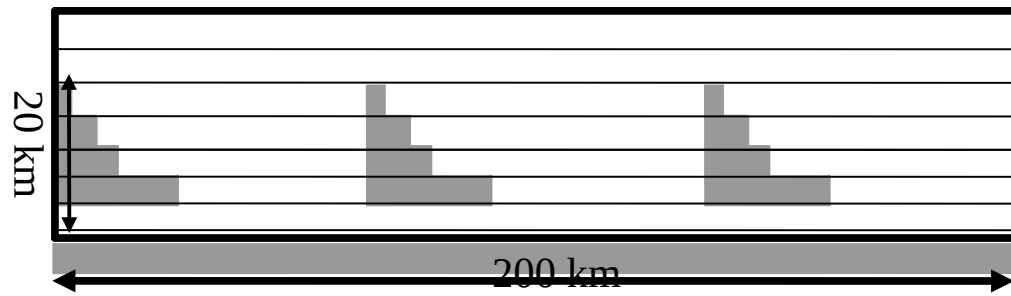
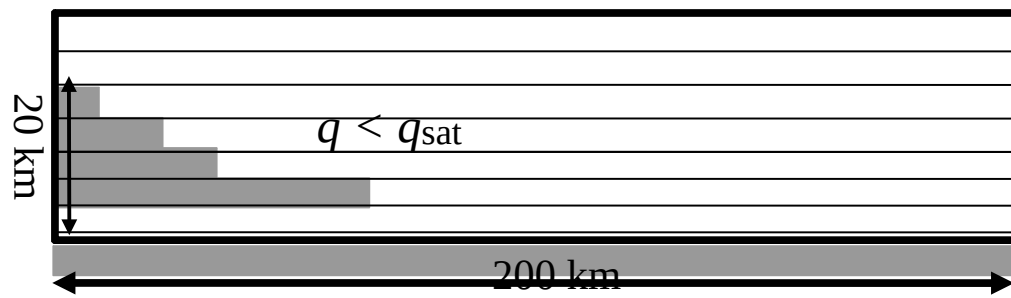


Modèle « statistique » :

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



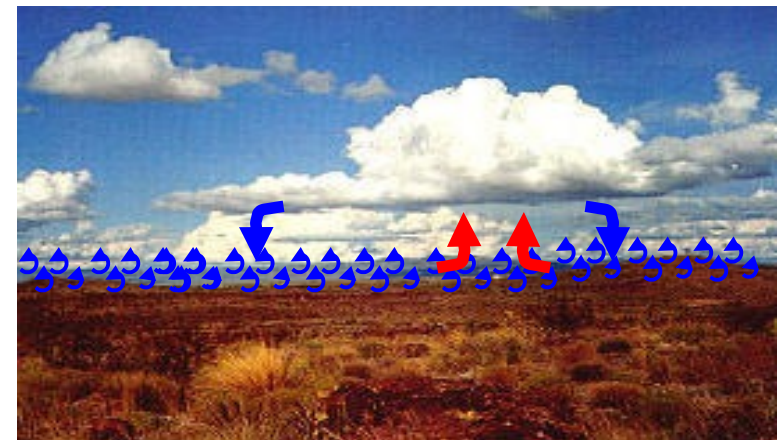
Paramétrisation simple : gaussienne $\sigma / q = 20\%$



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 »



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

A climate model configuration
=
Physical content (parameterizations, equations, numerics)
+
Grid configuration
+
Tuning of free parameters

Tuning or parameter calibration is central in many modeling fields

Particularly true for couple climate models :

Clouds modelling uncertainty ~ tens of W/m²

Climate sensitivity ~ 1K/(W/m²)

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

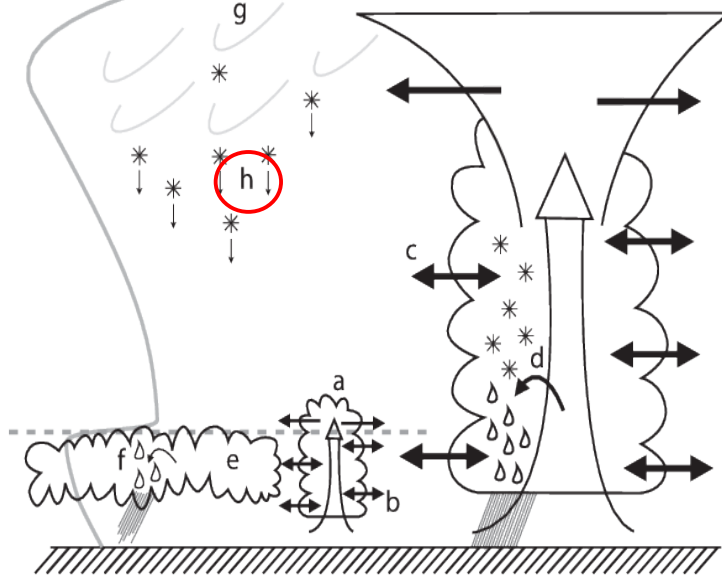
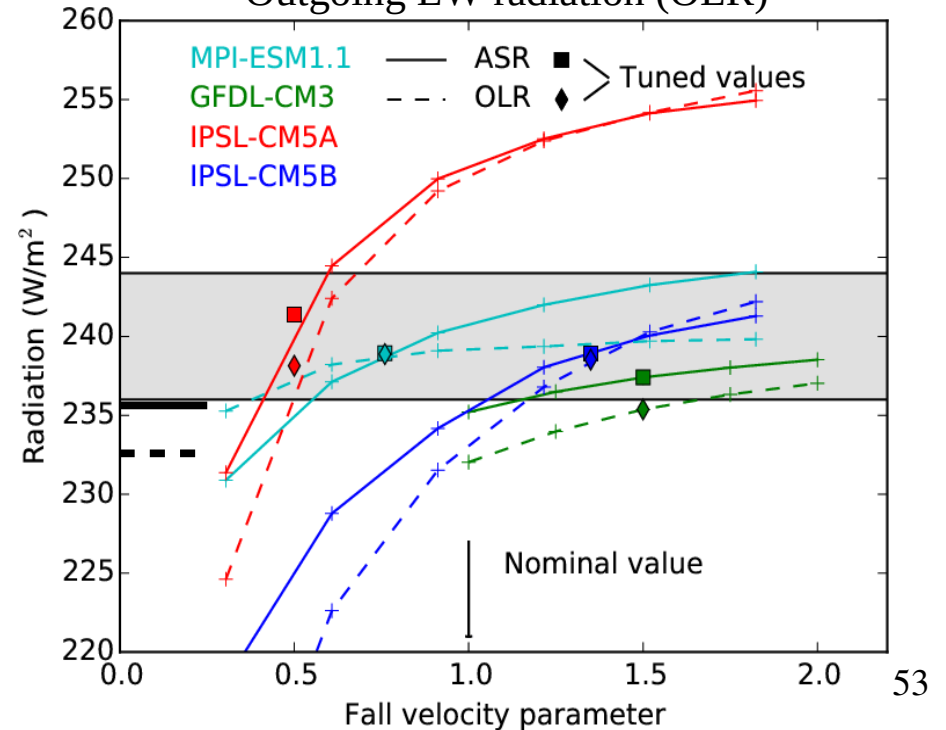


Figure from Mauritsen et al, 2013 (MPI model)

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



II. Revisit with emulators and history matching

Etant donnés :

P paramètres à ajuster dans l'hypercube $[p_{1,\min}, p_{1,\max}] \times \dots \times [p_{P,\min}, p_{P,\max}]$

M métriques scalaires pour lesquelles ont dispose d'une cible (o_j , obs)

1) Trouver le minimum d'une fonction coût $F(p) = \sum (m_j - o_j) / w_j$ où w_j est une

2) Déterminer le sous espace de l'hypercube dans lequel les $(m_j - o_j) / w_j < c$, où w_j est une « tolérance à l'erreur »

History matching :

Réalisation de N simulations, typiquement $10 * P$

Calcul des $M * P$ métriques

Création d'un métamodèle/émulateurs (hyper rapide) pour estimer (interpoler) la métrique dans tout l'hypercube.

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
ratqsdp 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	-

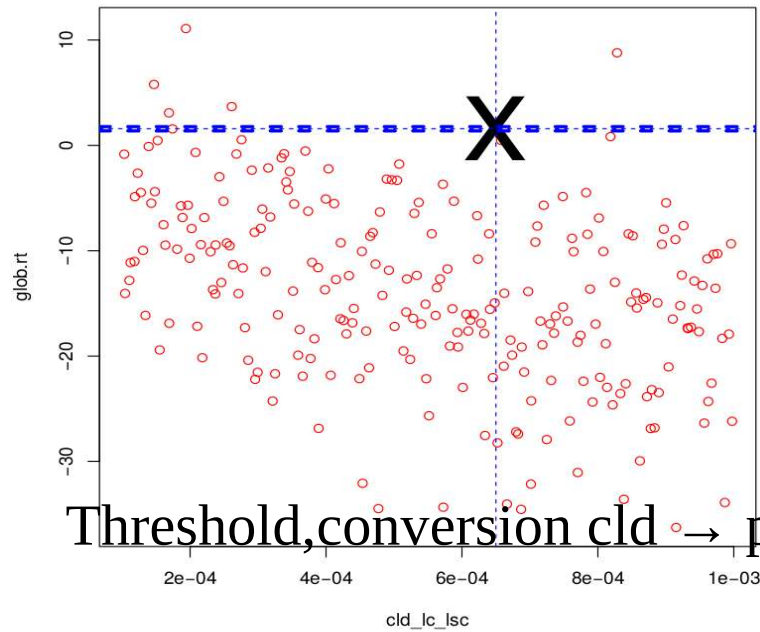
~ Deep convection and wakes (9)

~ Boundary layer convection and clouds (2)

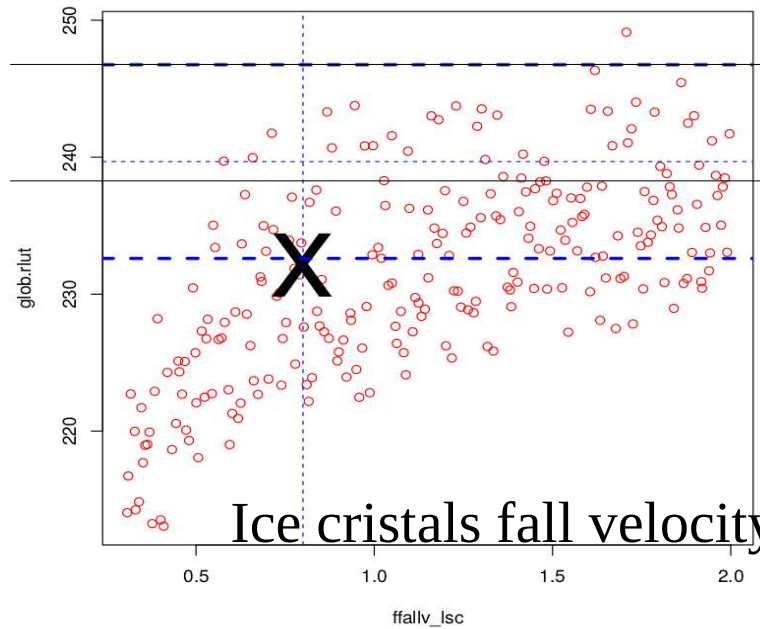
~ High clouds (6)

Ice crystals effective radius

A parameter (straocumulus)



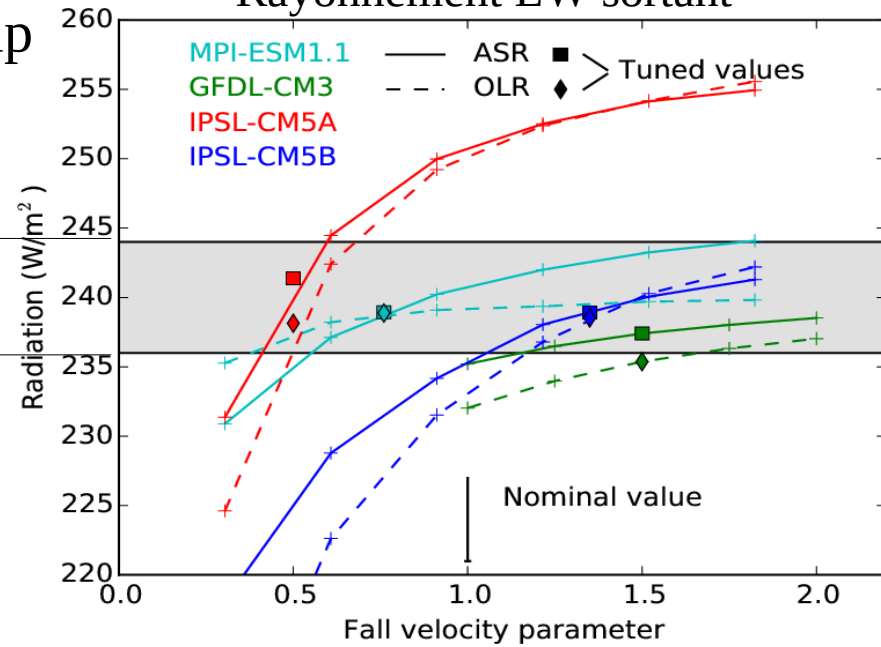
Threshold, conversion cld → precip



Ice crystals fall velocity

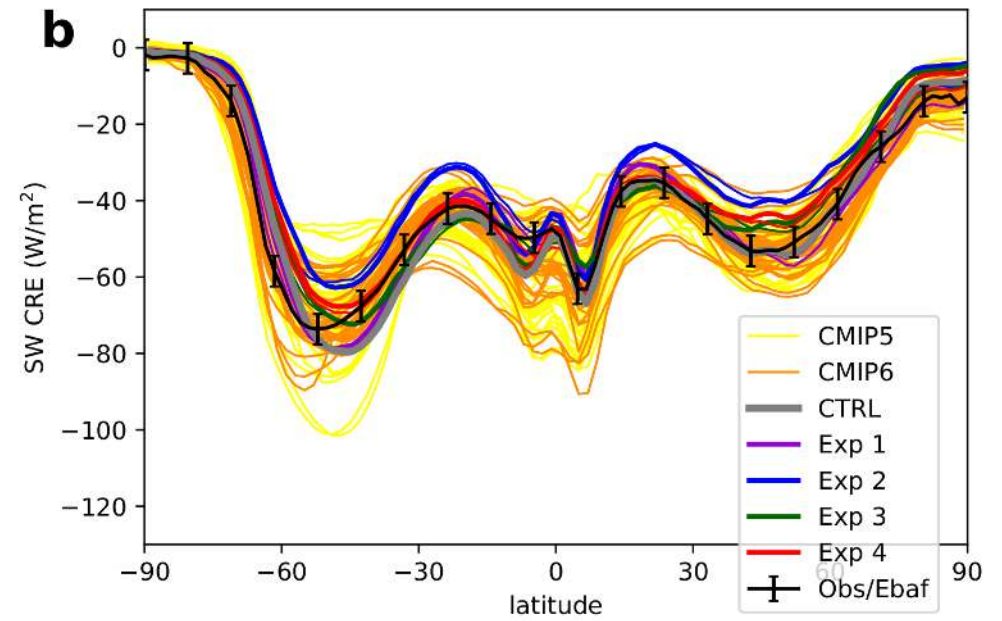
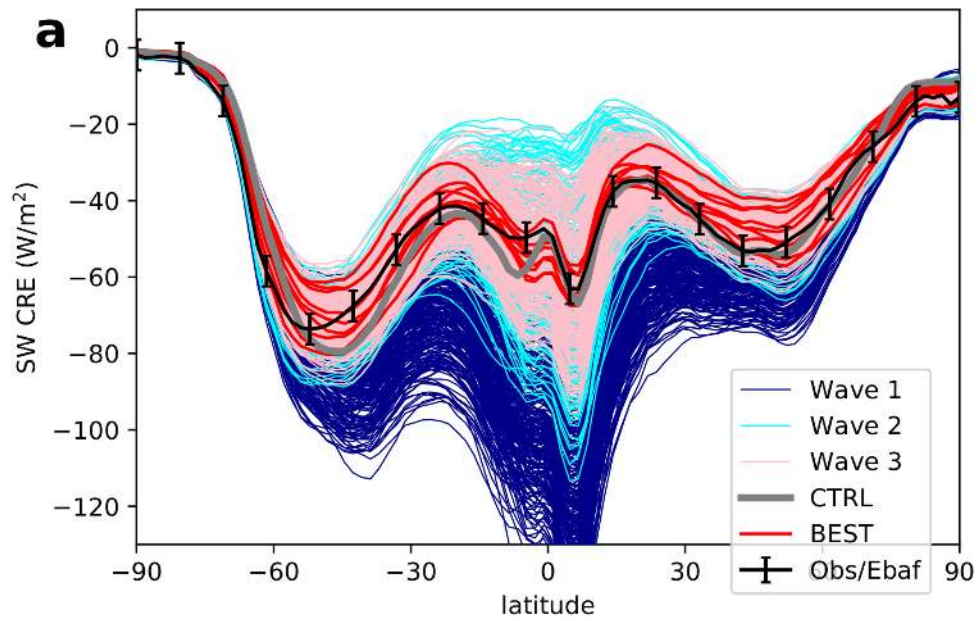
Impact sur les flux globaux au sommet

- Rayonnement SW absorbé
- - - Rayonnement LW sortant



Hourdin et al., 2015, BAMS

Résultat d'un tuning semi-automatique



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 peut 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 comparer 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 (émulateurs, apprentissage machine, méta modèles)