

De l'importance de la paramétrisation de la convection de couche limite pour simuler le transport des aérosols et le soulèvement des poussières

Frédéric Hourdin, Catherine Rio, Moussa Gueye, Binta Dialo, Adriana Sima
Laboratoire de Météorologie dynamique, CNRS/IPSL/UPMC, paris, france

- 1. Contexte et modèle**
- 2 . Le « modèle du thermique » sec et nuageux**
- 3. Importance pour le transport vertical des traceurs ...**
- 4. ... et pour le cycle diurne du vent et le soulèvement des poussières**

De l'importance de la paramétrisation de la convection de couche limite pour simuler le transport des aérosols et le soulèvement des poussières

Frédéric Hourdin, Catherine Rio, Moussa Gueye, Binta Dialo, Adriana Sima
Laboratoire de Météorologie dynamique, CNRS/IPSL/UPMC, paris, france

1. Contexte et modèle

2 . Le « modèle du thermique » sec et nuageux

3. Importance pour le transport vertical des traceurs ...

4. ... et pour le cycle diurne du vent et le soulèvement des poussières

Contexte de l'étude

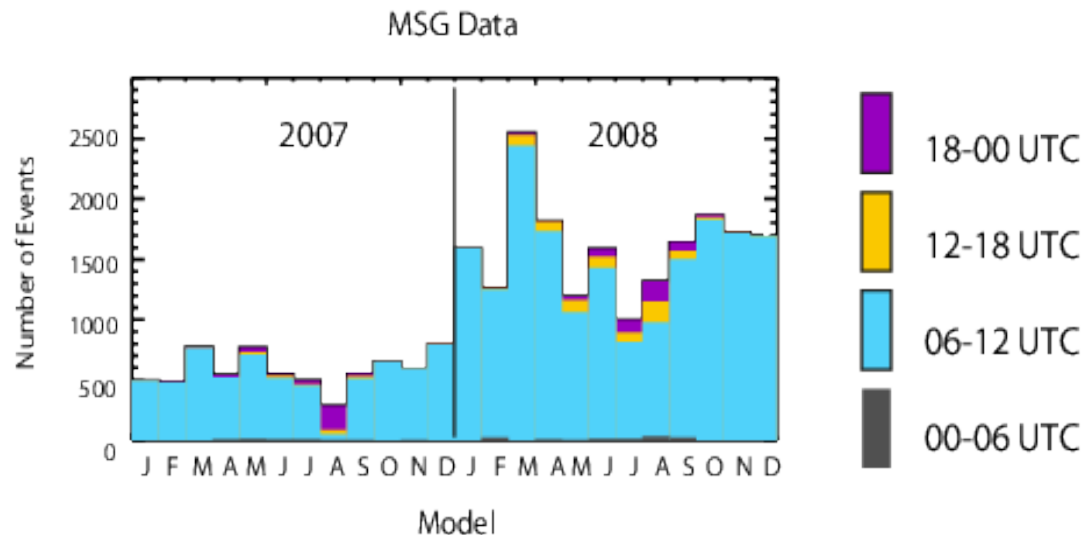
Motivation du travail : Prise en compte des poussières Sahélo-sahariennes dans un modèle de climat

- Couplage entre système de Mousson et poussières
- Contribution aux vagues de chaleur ?
- Utilisation des données de flux de surface pour l'évaluation des modèles
- Formation à la modélisation d'étudiant Ouest-Africains

Caractéristique des émissions de poussières dans la régions Sahélo-saharienne

Les émissions de poussières ont lieu majoritairement le matin.
En lien avec un maximum de vent le matin

Les émissions associées aux poches froides pourraient contribuer à 30-50 % des émissions.



La configuration de modèle utilisée pour l'étude

- Modèle global de climat LMDZ, zoomé sur l'Afrique
~ 100 km de résolution dans le zoom
- Versions Standard (SP) et Nouvelle (NP) Physique
- Guidage par les réanalyses ERA-Interim

$$\frac{\partial X}{\partial t} = M(X) + \frac{X^a - X}{\tau} \quad X = u \text{ et } v, \tau = \text{qq heures}$$

- Branchement des émissions de Chimere-dust (Marticorena, Bergametti et al., fourni par Laurent Menut).

- émissions très non linéaires en vent.

$$F_h = \frac{K \rho_a}{g} U^{*3} \left(1 - \frac{U^{*Th}}{U^*}\right) \left(1 + \frac{U^{*Th}}{U^*}\right)^2$$

- Couplage à partir de U10m. Utilisation d'une distribution de Weibull $P(U)$, $0 < U < 2 * U_{10m}$

- Poussières transportées : 12 bins en taille.

- On tient compte du dépôt sec et du lessivage mais pas de la rétroaction radiative sur le climat.

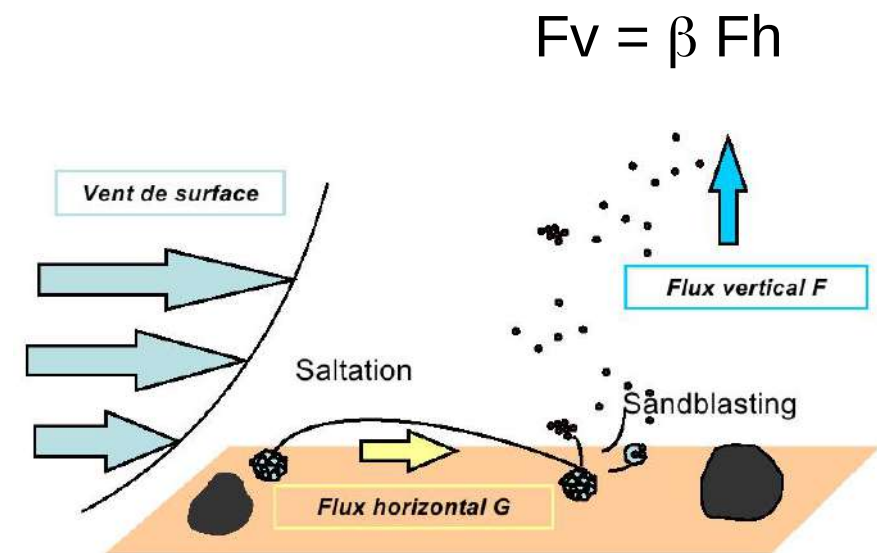
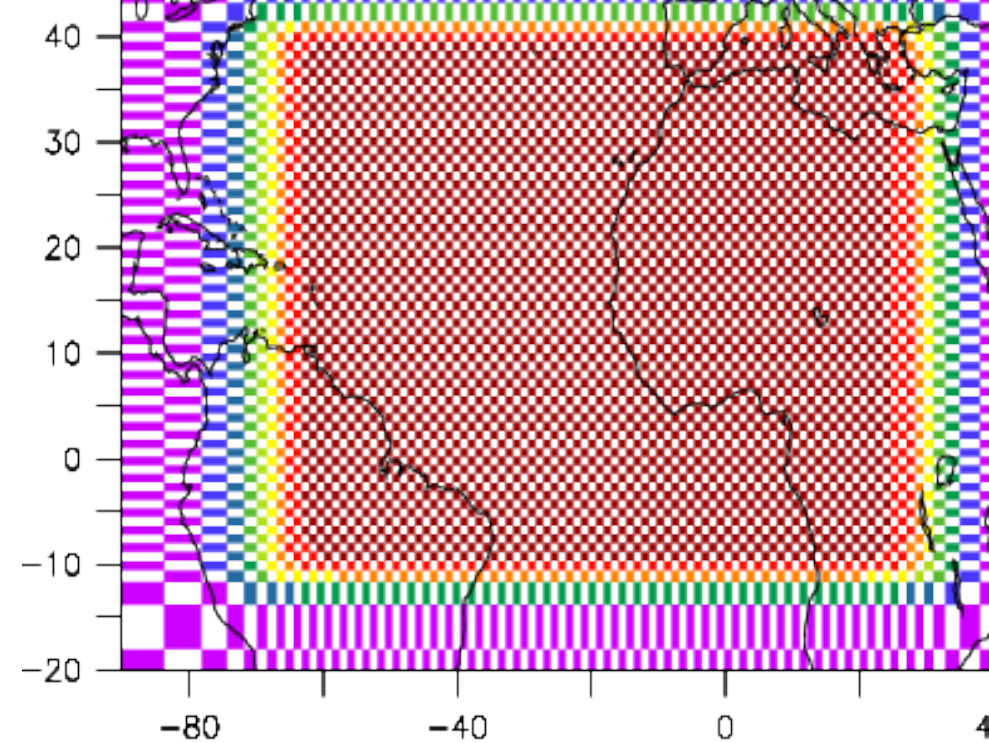


Figure4: Schéma du principe d'émission des aérosols désertiques
(extrait de la thèse de BENOIT Laurent)

De l'importance de la paramétrisation de la convection de couche limite pour simuler le transport des aérosols et le soulèvement des poussières

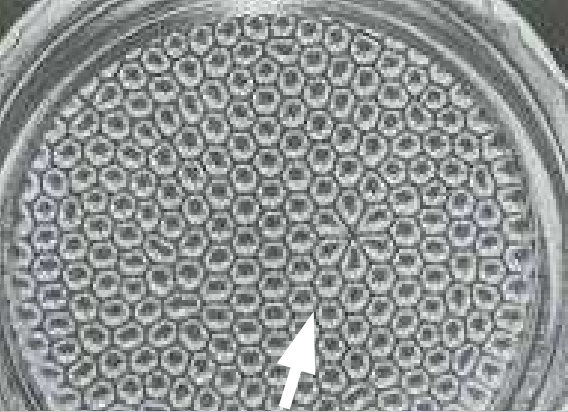
Frédéric Hourdin, Catherine Rio, Moussa Gueye, Binta Dialo, Adriana Sima
Laboratoire de Météorologie dynamique, CNRS/IPSL/UPMC, paris, france

1. Contexte et modèle

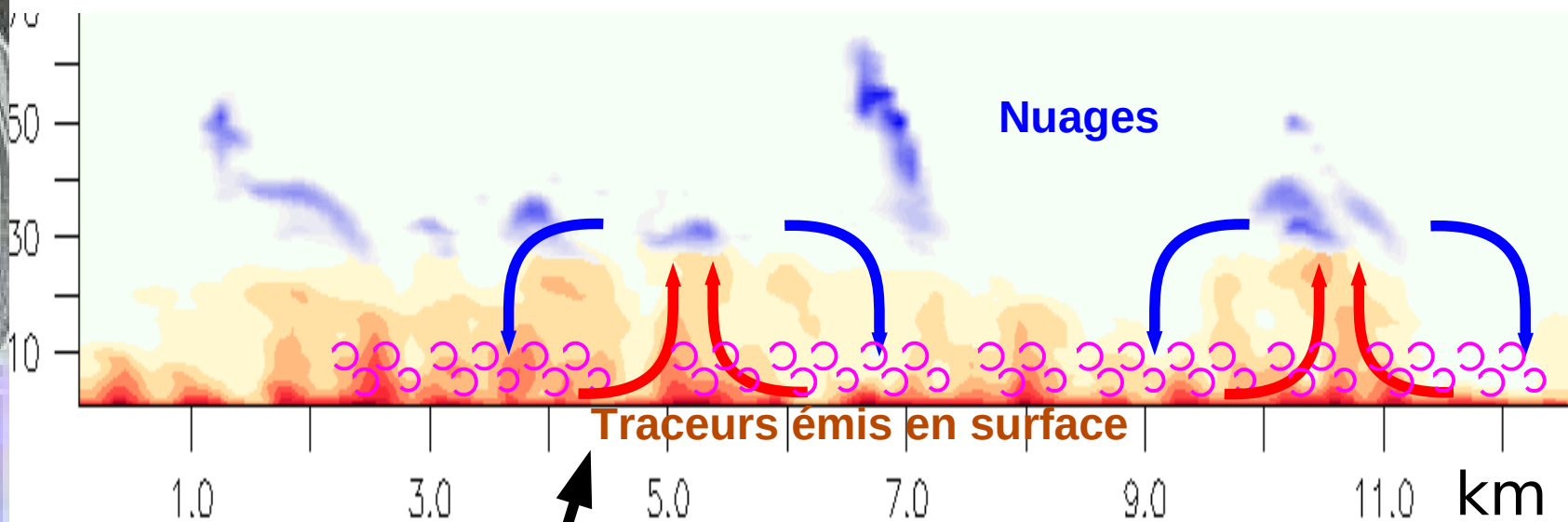
2 . Le « modèle du thermique » sec et nuageux

3. Importance pour le transport vertical des traceurs ...

4. ... et pour le cycle diurne du vent et le soulèvement des poussières

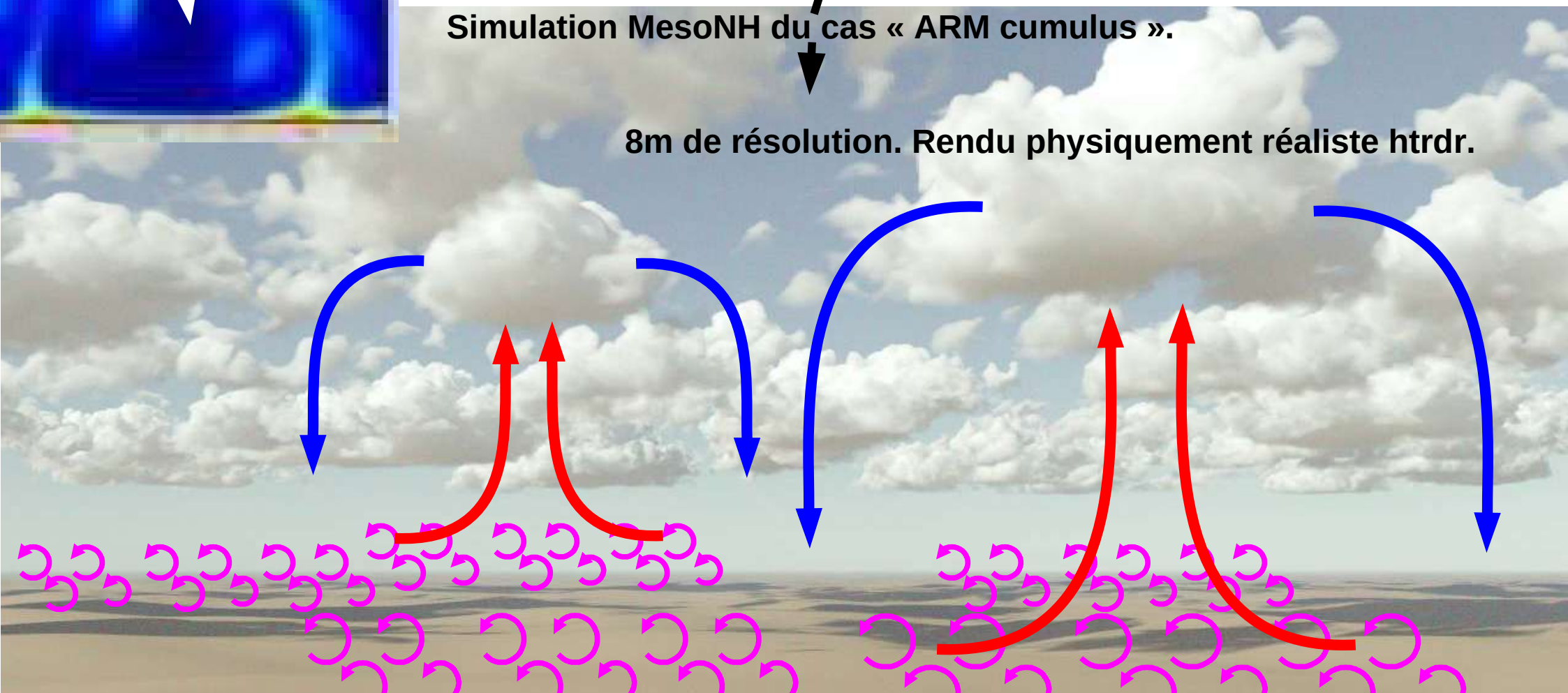


Convection de
Rayleigh Bénard



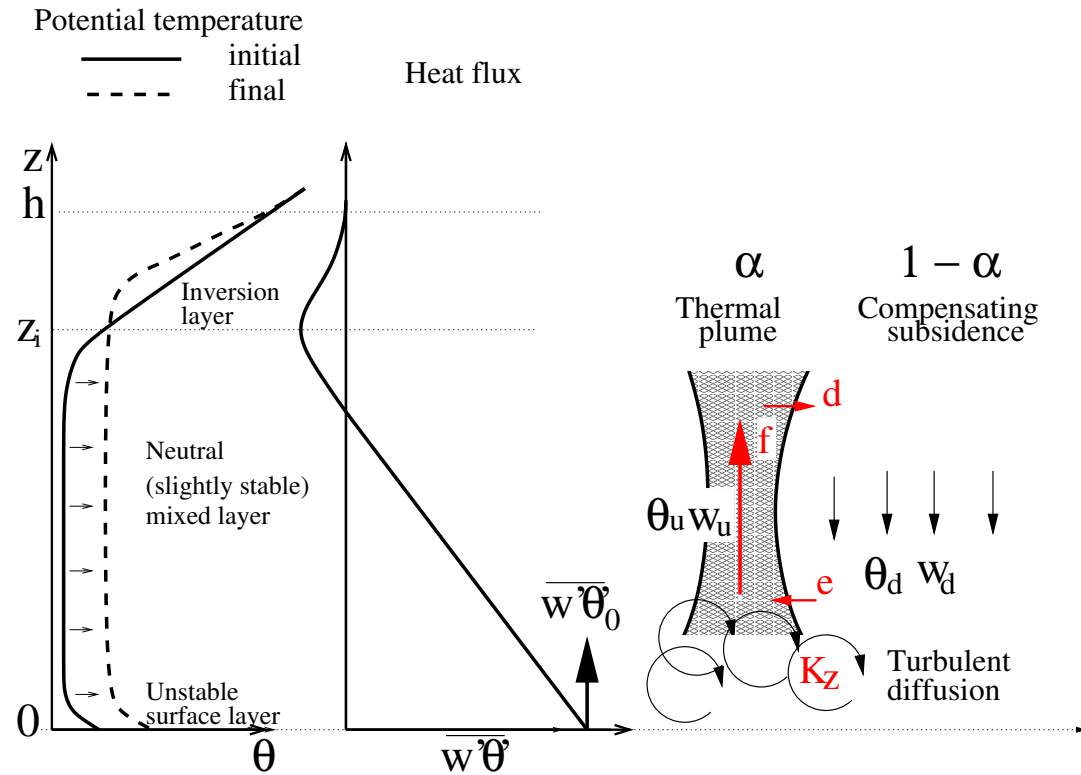
Simulation MesoNH du cas « ARM cumulus ».

8m de résolution. Rendu physiquement réaliste htrdr.



Le « modèle du thermique »

Un modèle EDMF, juxtaposant diffusion turbulente et flux de masse



Separation into 2 sub-columns :

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

ascending plume of mass flux

$$f = \alpha \rho w_u$$

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

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

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

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

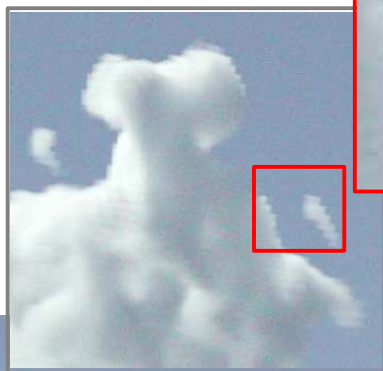
Chatfield, R. B., et Brost, R. A. (1987). A two-stream model of the vertical transport of trace species in the convective boundary layer. *Journal of Geophysical Research*, 92, 13,263-13,276.

Hourdin, F., Couvreux, F., & Menut, L. (2002). Paramétrage de la couche limite de convection sèche basé sur une représentation du flux de masse des thermiques. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59, 1105-1123



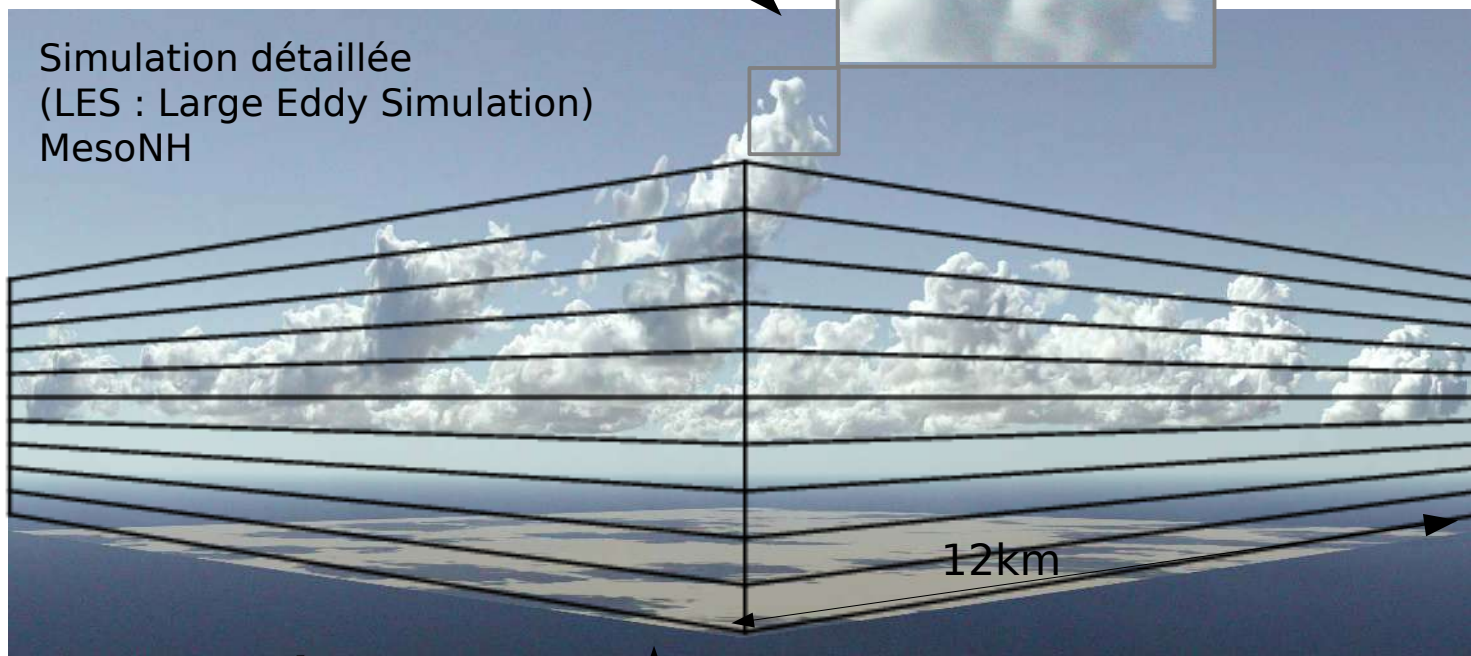
Campagne d'observation

Evaluation



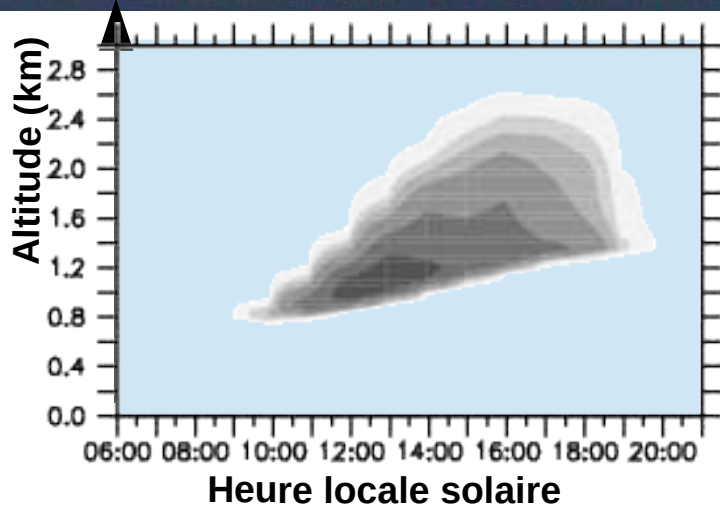
maille de 8m

Simulation détaillée
(LES : Large Eddy Simulation)
MesoNH



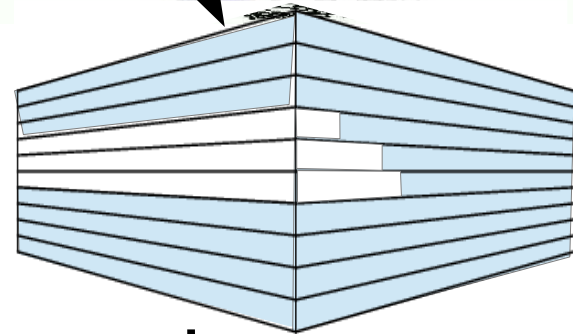
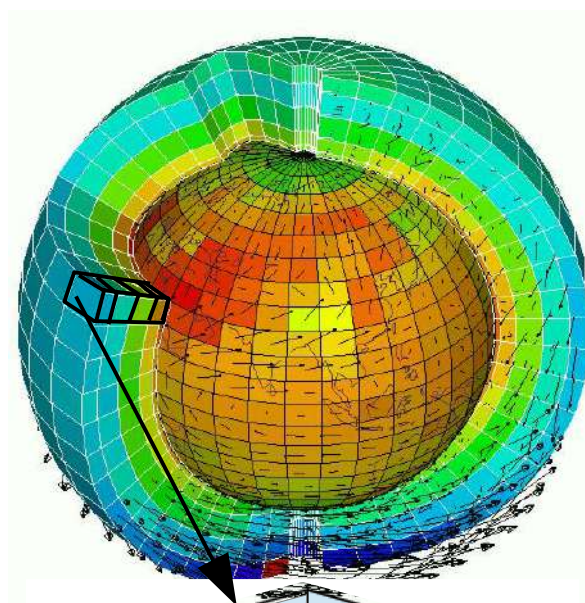
12km

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.



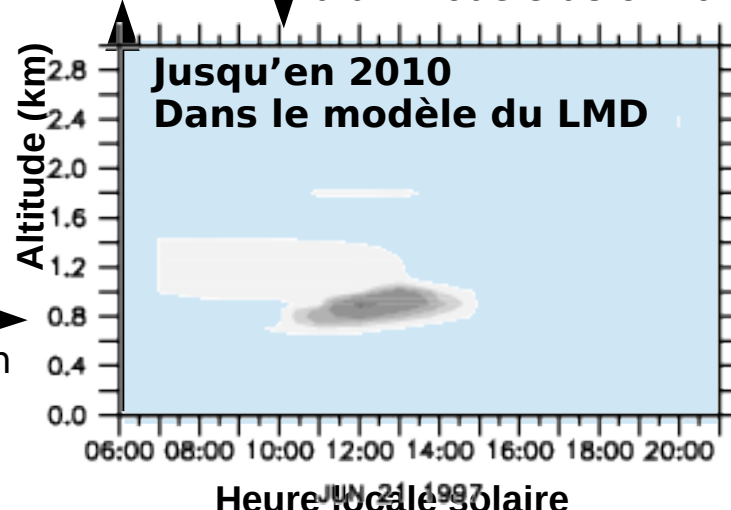
Heure locale solaire

Evaluation



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

**Jusqu'en 2010
Dans le modèle du LMD**

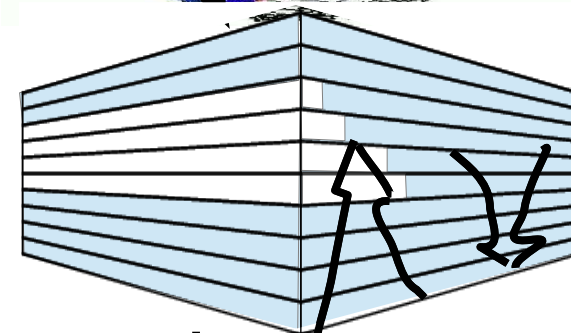
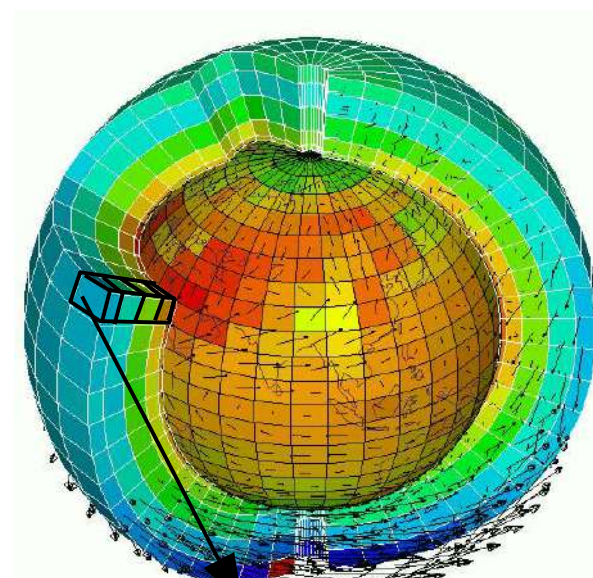


Heure locale solaire

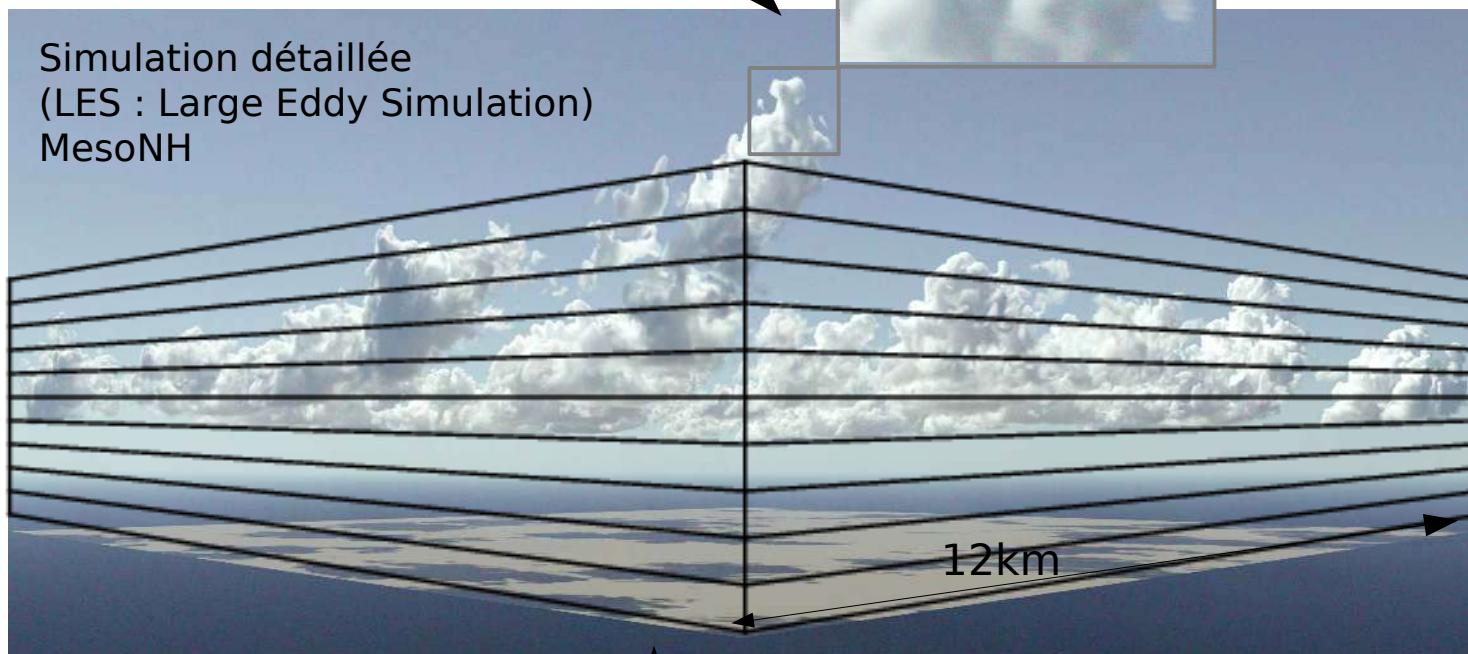


Campagne d'observation

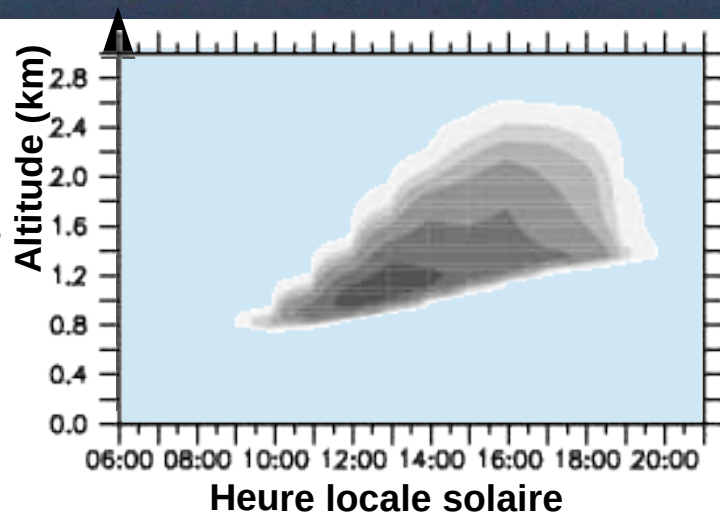
Evaluation



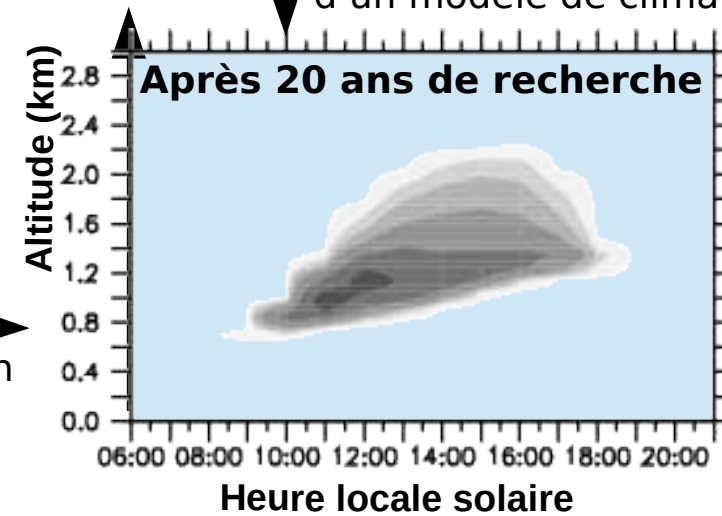
On calcule la fraction nuageuse pour chaque maille d'une colonne d'un modèle de climat



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

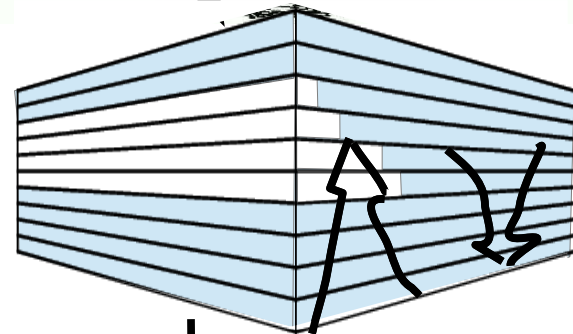
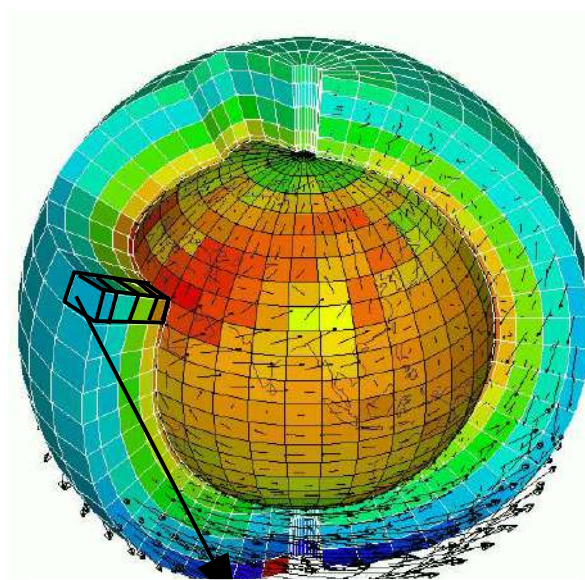


Campagne d'observation

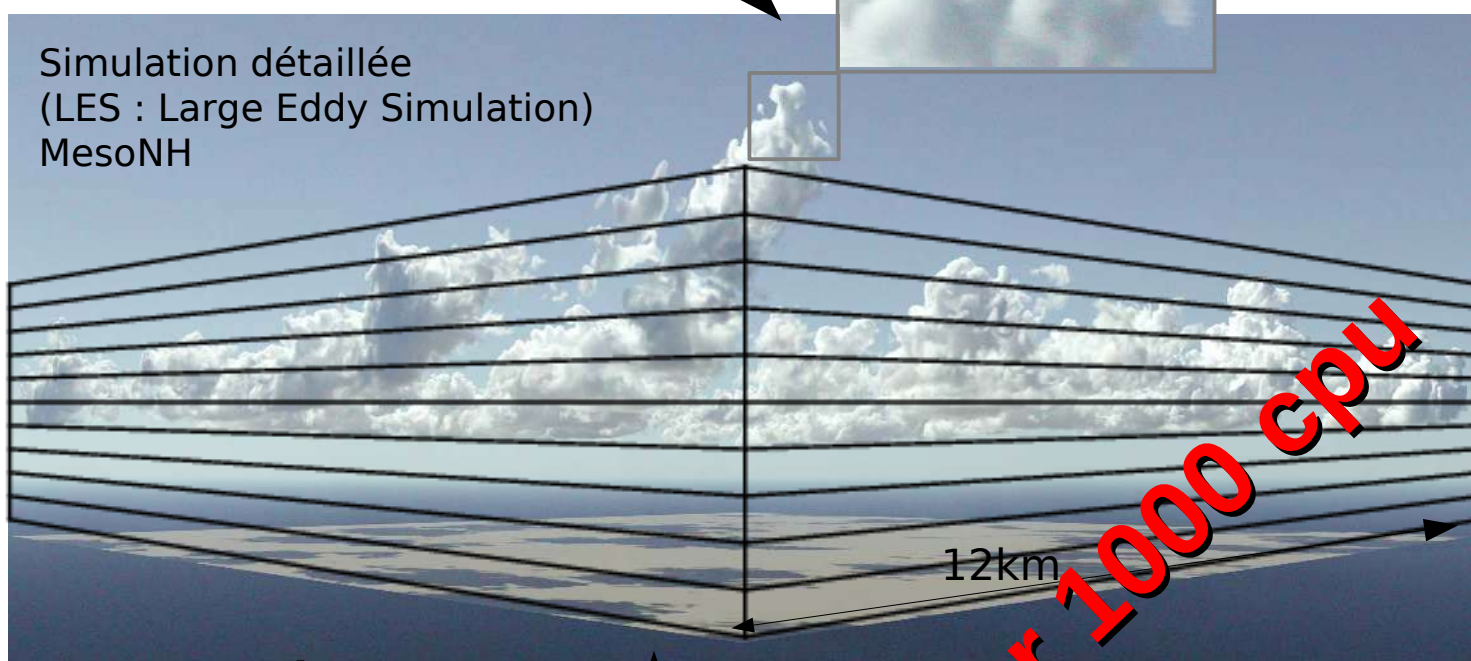
Evaluation



maille de 8m

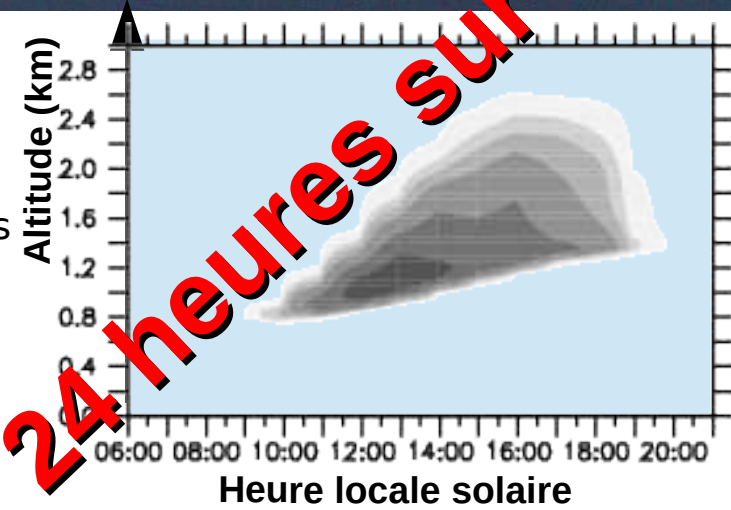


On calcule la fraction nuageuse pour chaque maille d'une colonne d'un modèle de climat

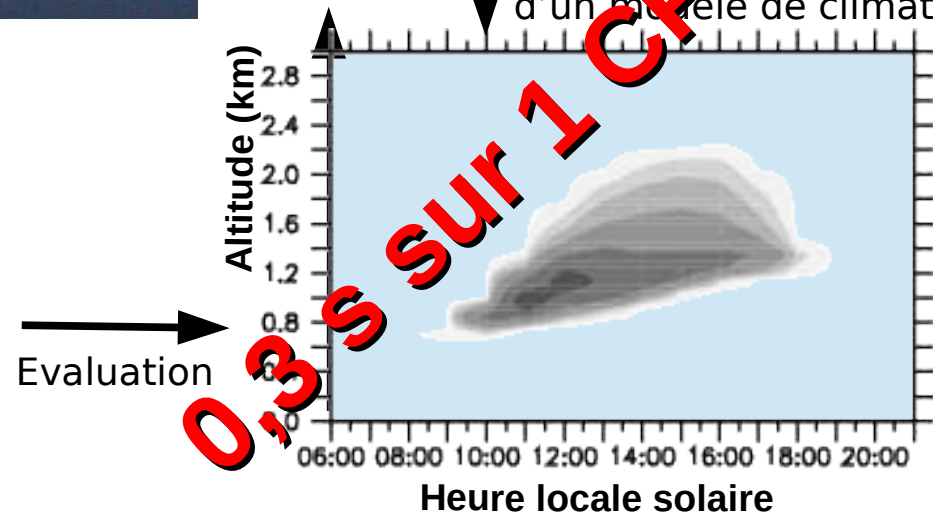


Simulation détaillée
(LES : Large Eddy Simulation)
MesoNH

12km



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

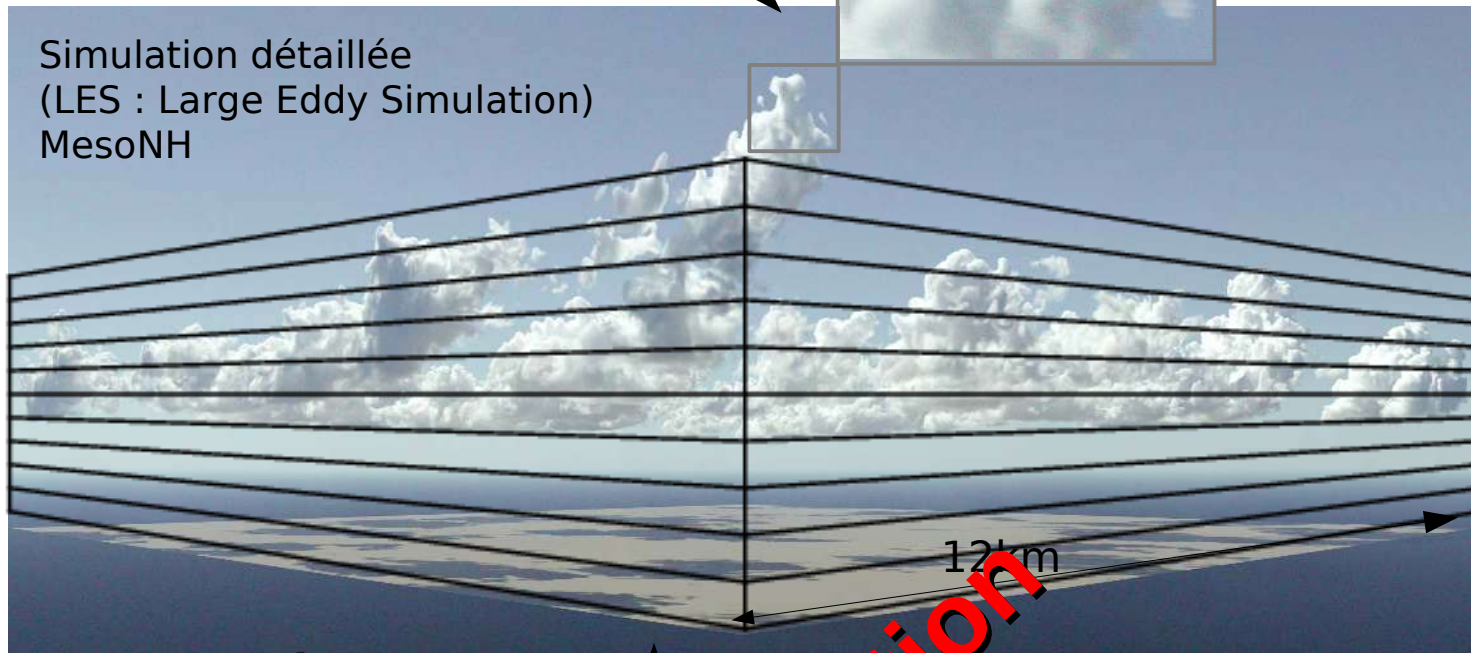


Campagne d'observation

Evaluation

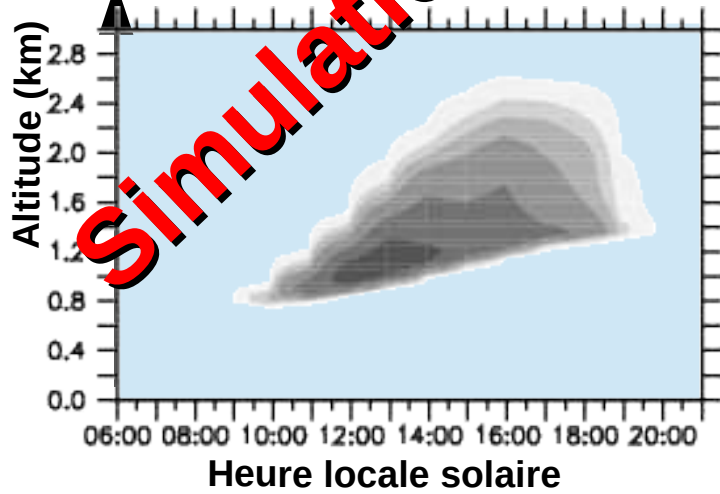


Simulation détaillée
(LES : Large Eddy Simulation)
MesoNH

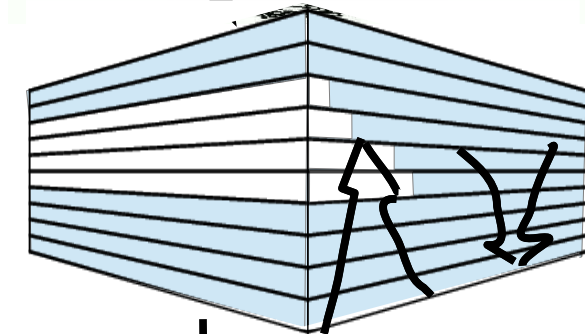
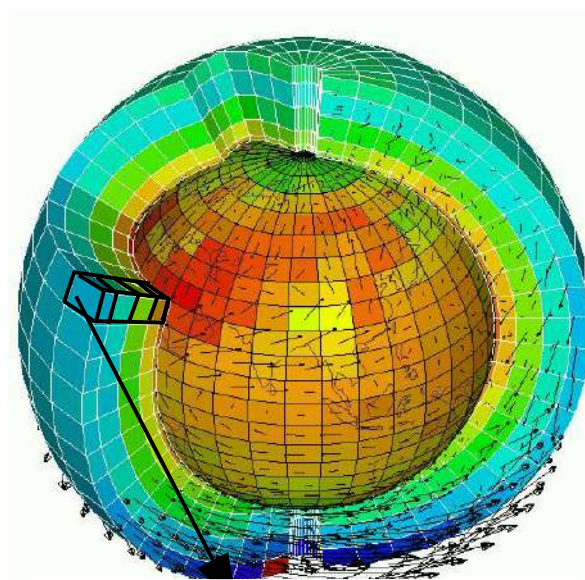


↓

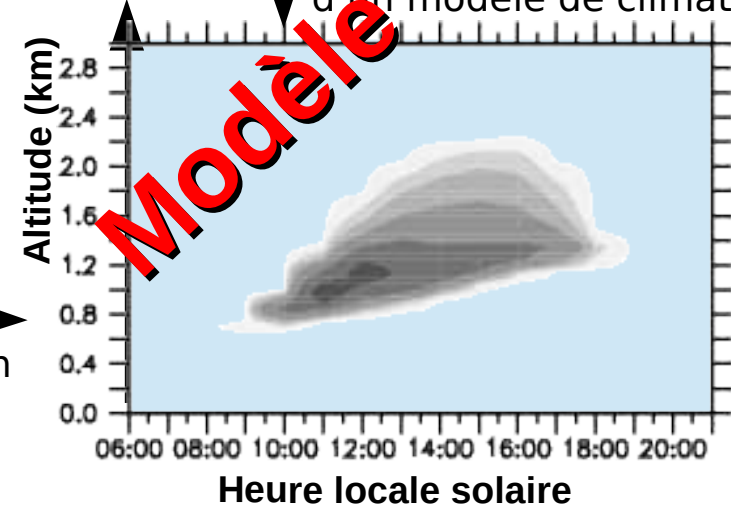
On calcule à chaque instant et pour toutes les altitudes du maillage la fraction de du domaine horizontal couverte par les nuages, appelée fraction nuageuse.



Evaluation



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



De l'importance de la paramétrisation de la convection de couche limite pour simuler le transport des aérosols et le soulèvement des poussières

Frédéric Hourdin, Catherine Rio, Moussa Gueye, Binta Dialo, Adriana Sima
Laboratoire de Météorologie dynamique, CNRS/IPSL/UPMC, paris, france

1. Contexte et modèle

2 . Le « modèle du thermique » sec et nuageux

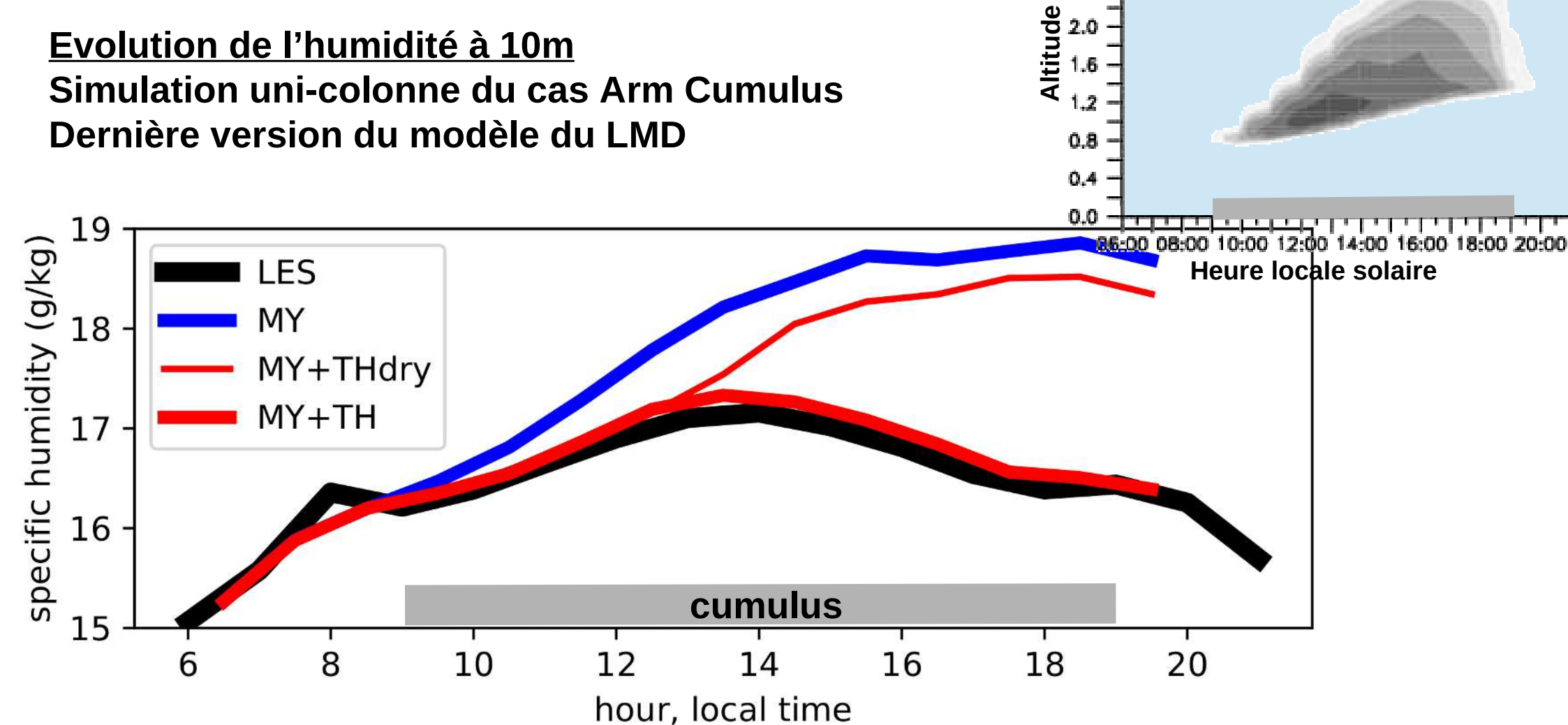
3. Importance pour le transport vertical des traceurs ...

4. ... et pour le cycle diurne du vent et le soulèvement des poussières

Evolution de l'humidité à 10m

Simulation uni-colonne du cas Arm Cumulus

Dernière version du modèle du LMD



- Les thermiques (TH) assèchent l'air en surface par rapport à la diffusion turbulente de Mellor et Yamada seule (MY)
- En meilleur accord avec une LES du même cas.
- Renforcé l'après-midi si on prend en compte l'accélération dans les panaches due à la condensation (TH versus Thdry).

SP : physique standard

Diffusion + contre gradient
(LMDZ5A)

NP : nouvelle physique

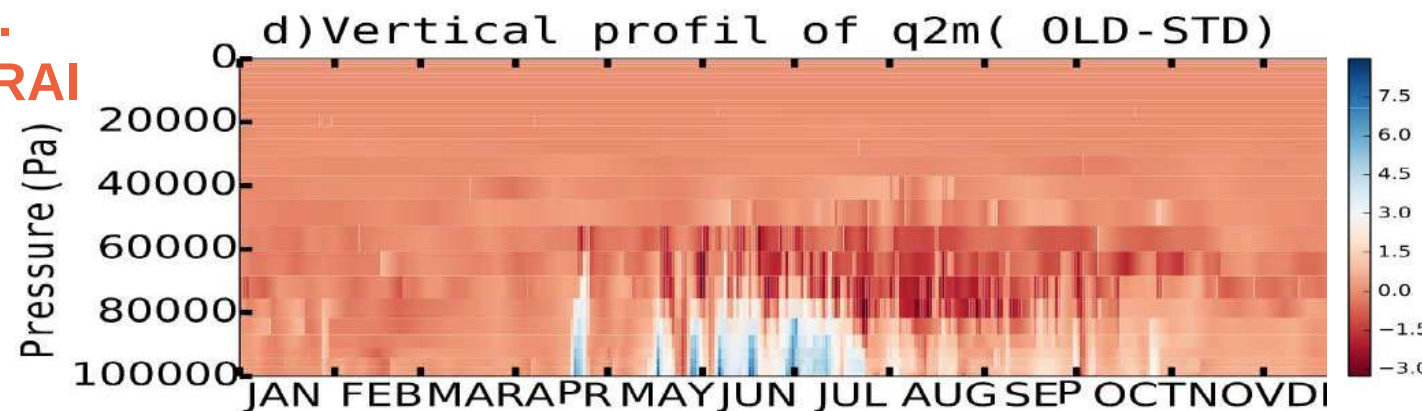
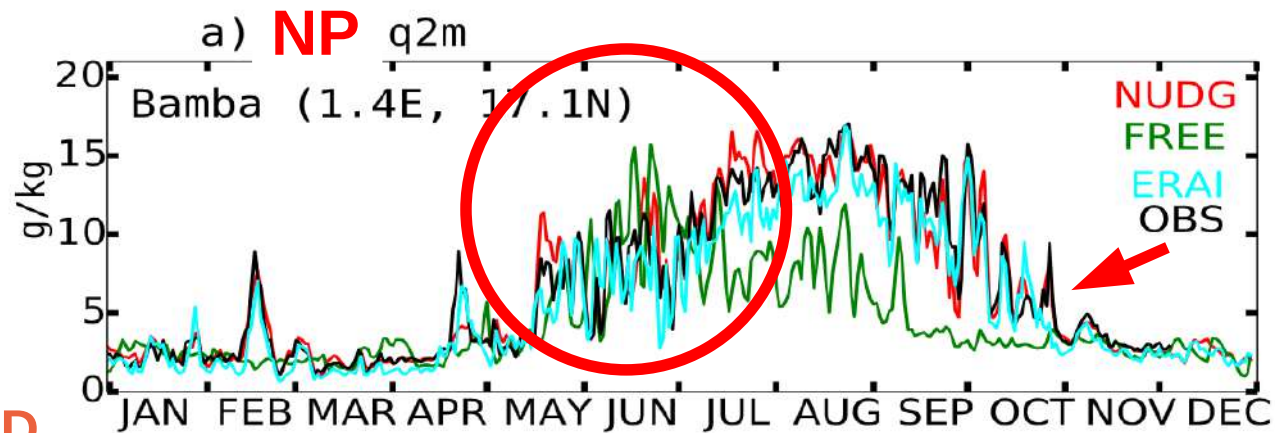
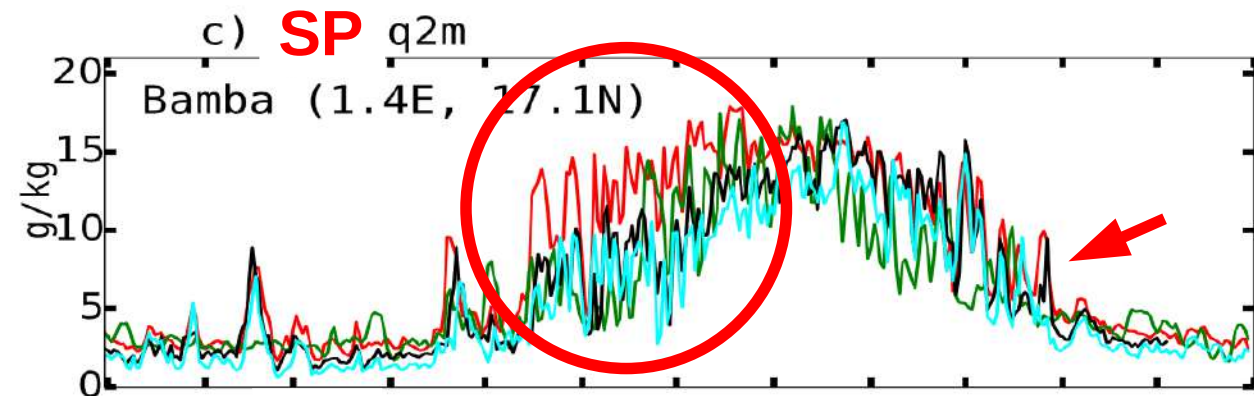
Diffusion (MY) + Thermiques
(LMDZ5B et 6A)

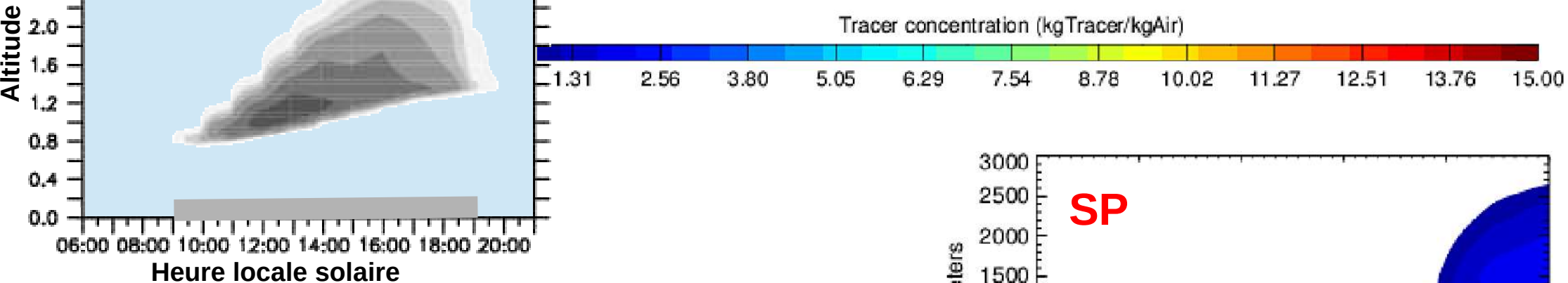
Evolution de l'humidité à 2m

Zoom et guidage par ERAI

Comparaison obs AMMA-Catch

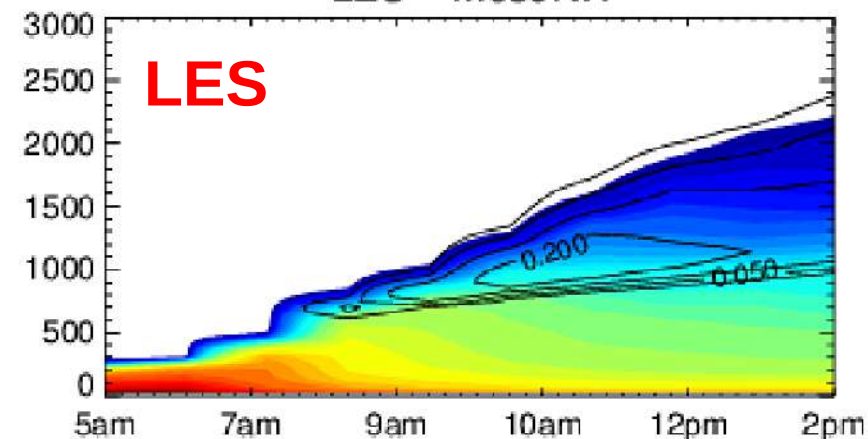
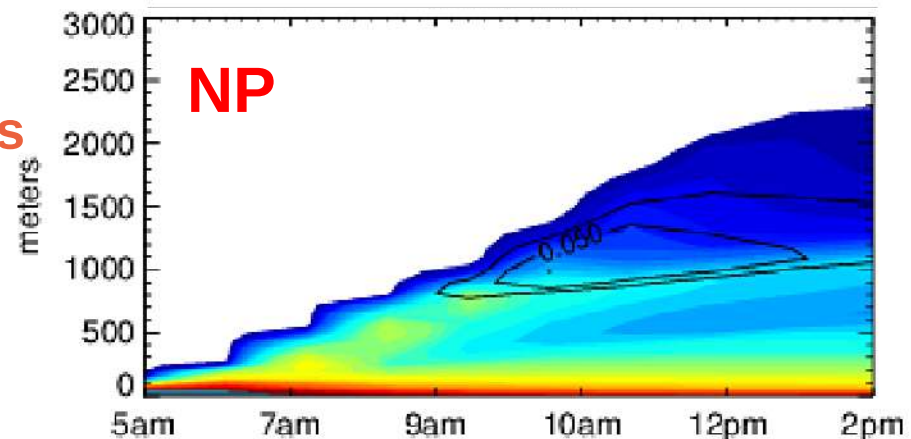
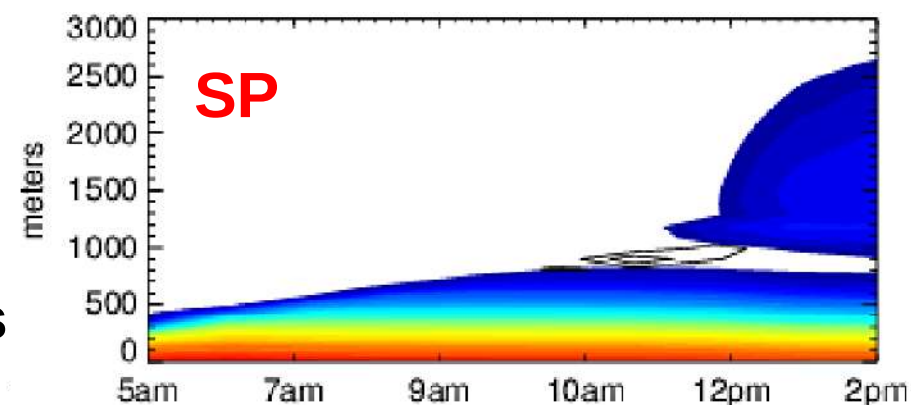
- Les thermiques assèchent à 2m
- On retrouve en 3D les résultats du 1D
- Meilleur accord/observations.
- Parfois même meilleur que ERAI





Traceur idéalisé émis en surface. Avec un temps de vie de 15 minutes Cas Arm Cumulus

- Les thermiques mélangent davantage les traceurs émis en surface
- Diminution des concentrations en surface
- Meilleur accord avec la LES
- Important pour l'inversion des sources de méthane (Locatelli et al., 2015)



21 Jun

Locatelli, R., P. Bousquet, F. Hourdin, M. Saunois, A. Cozic, F. Couvreux, J.-Y. Grandpeix, M.-P. Lefebvre, C. Rio, P. Bergamaschi, S. D. Chambers, U. Karstens, V. Kazan, S. van der Laan, H. A. J. Meijer, J. Moncrieff, M. Ramonet, H. A. Scheeren, C. Schlosser, M. Schmidt, A. Vermeulen, and A. G. Williams, , 2015,

Atmospheric transport and chemistry of trace gases in LMDz5B: evaluation and implications for inverse modelling

doi:10.5194/gmd-8-129-2015

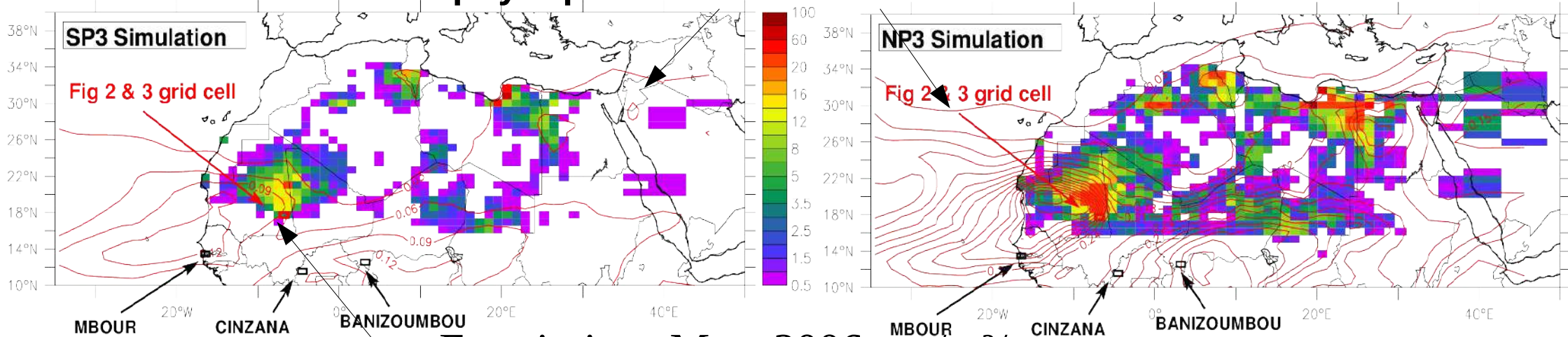
De l'importance de la paramétrisation de la convection de couche limite pour simuler le transport des aérosols et le soulèvement des poussières

Frédéric Hourdin, Catherine Rio, Moussa Gueye, Binta Dialo, Adriana Sima
Laboratoire de Météorologie dynamique, CNRS/IPSL/UPMC, paris, france

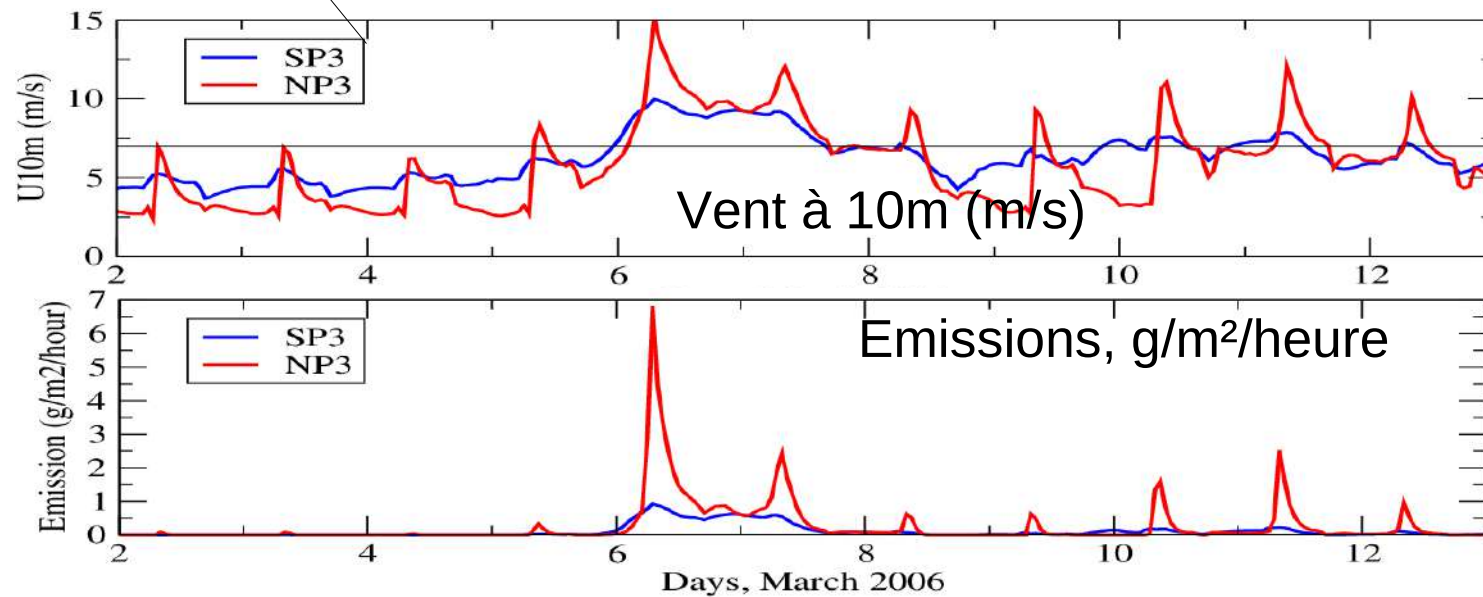
1. Contexte et modèle
- 2 . Le « modèle du thermique » sec et nuageux
3. Importance pour le transport vertical des traceurs ...
- 4. ... et pour le cycle diurne du vent et le soulèvement des poussières**

Mars 2006, simulation LMDZ, Guidage de u et v à 3 heures

Simulations physique **standard** et **nouvelle**



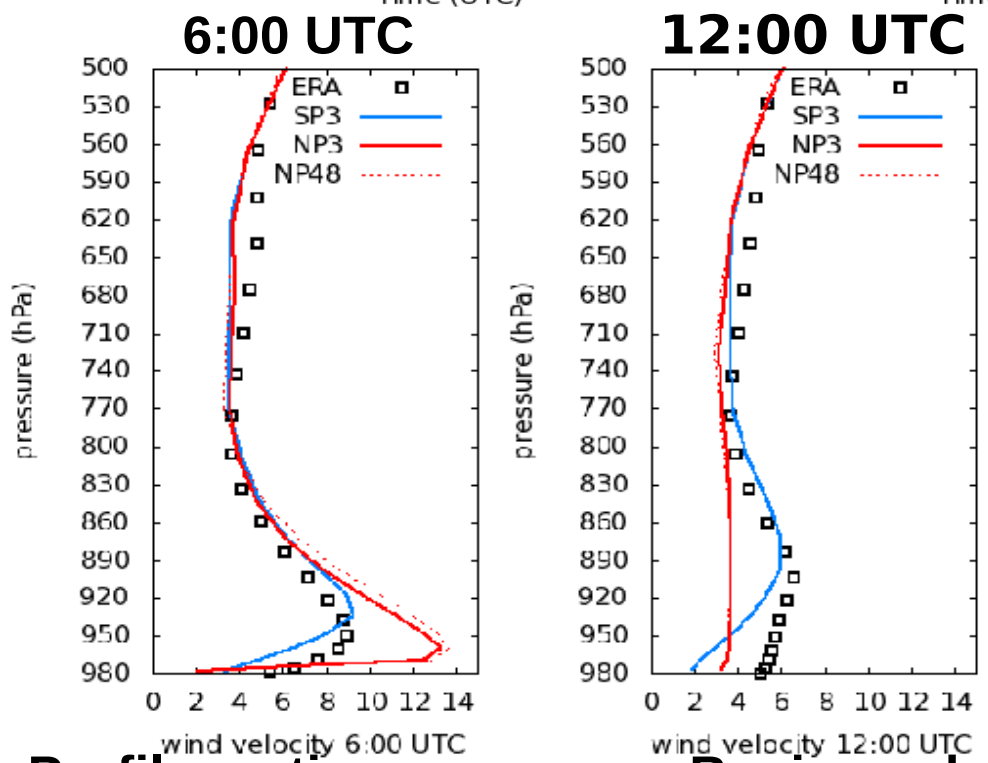
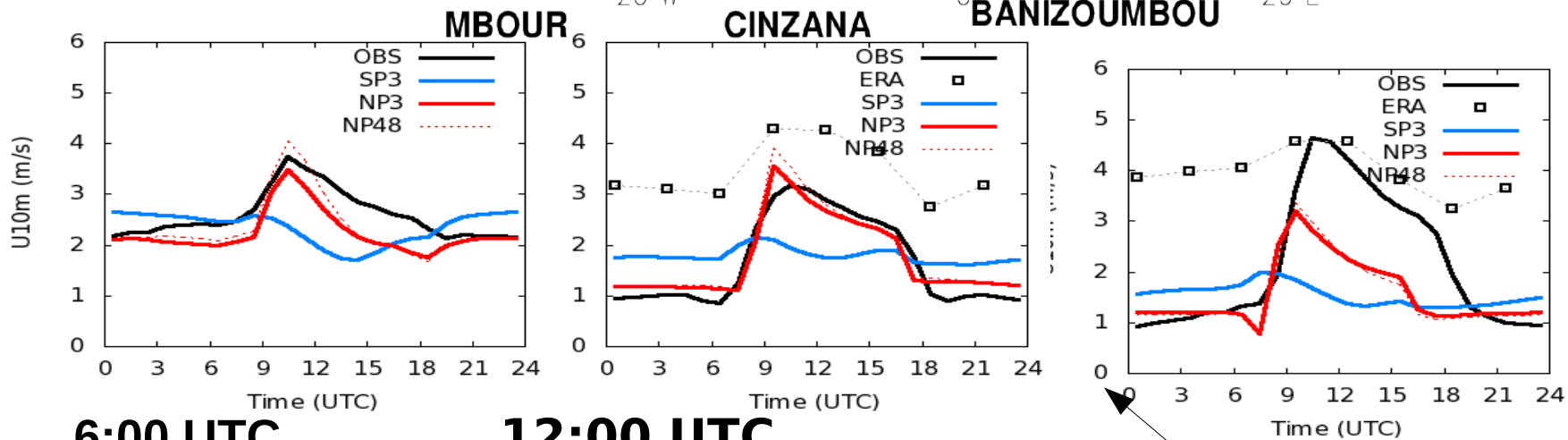
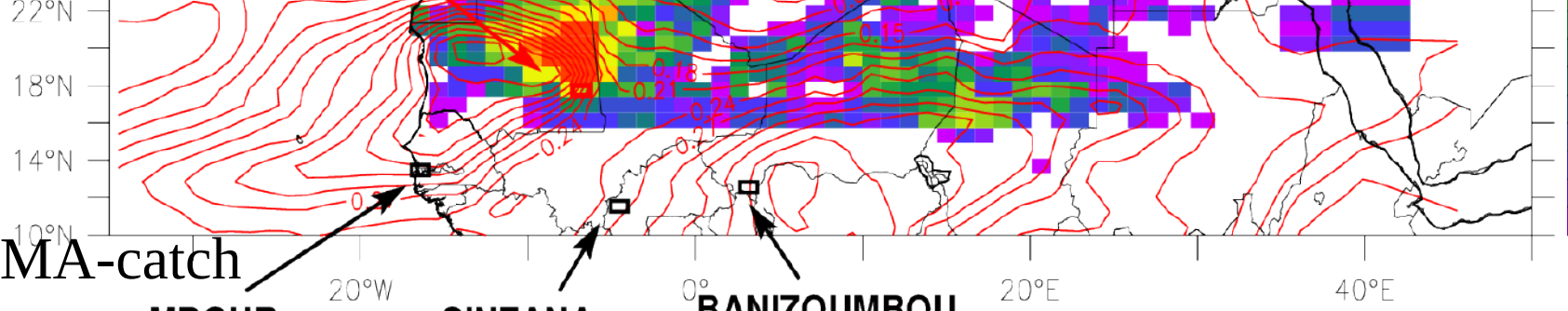
Emmissions Mars 2006, $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$



- Les thermiques renforcent le cycle diurne des vents en surface
- Les thermiques renforcent en retour l'émission de poussières

Stations AMMA

Transect dust et AMMA-catch

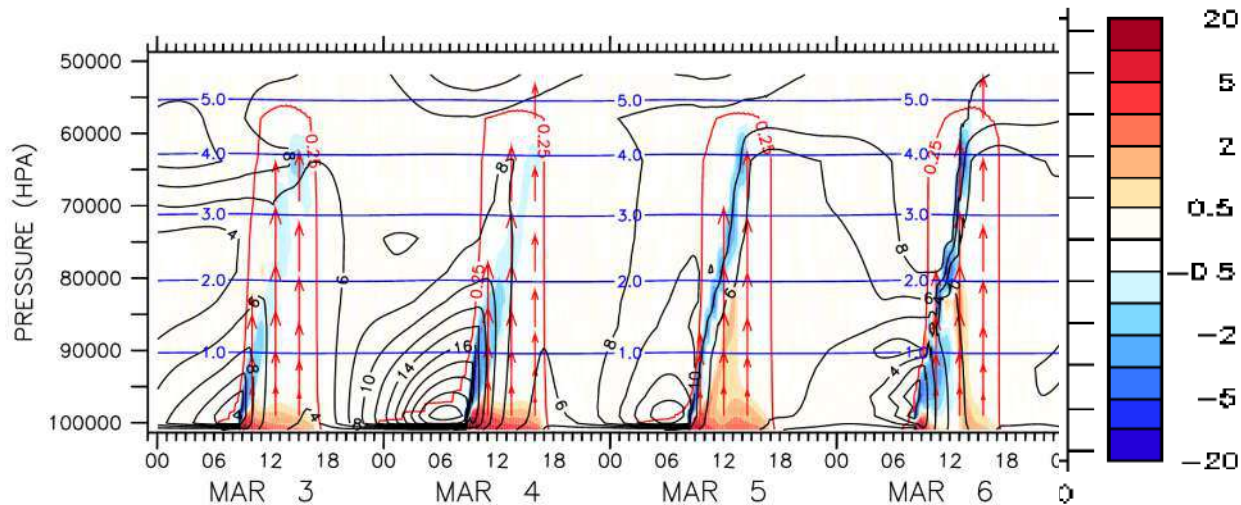


Cycle diurne du vent à 10m (m/s)

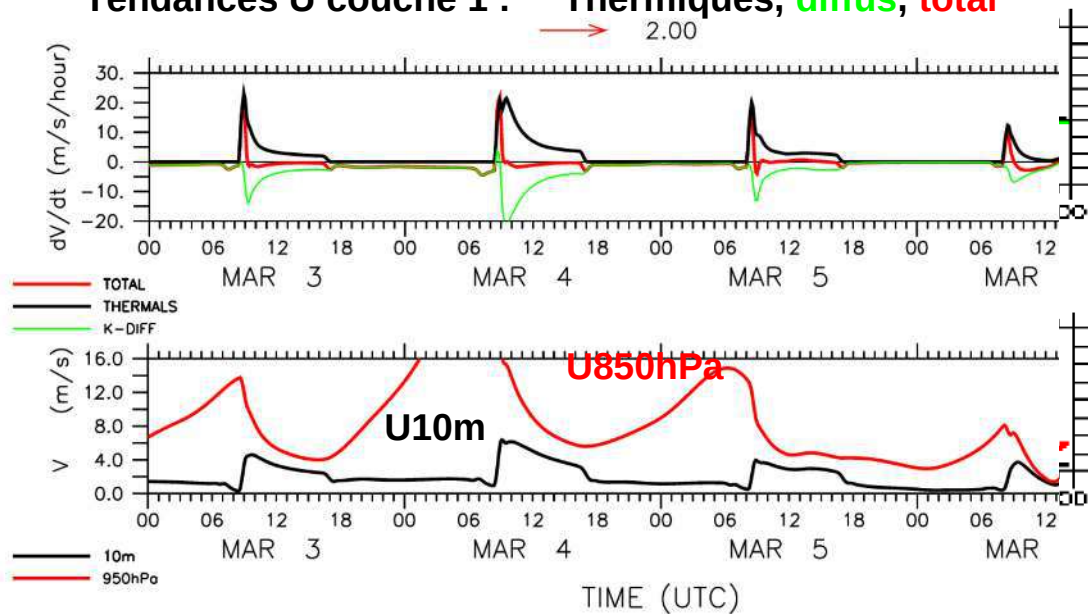
- Cycle diurne moyen du vent beaucoup plus réaliste avec les thermiques qu'avec l'ancien modèle en diffusion turbulente.
- Meilleur accord avec les observations qu'ERA (utilisé pour le guidage)

Profils verticaux moyens, Banizoumbou

Couleurs : Tendances des « thermiques »
 (transport non local) sur $\|V\|$ (m/s/jour)
Contours noirs : $\|V\|$ (m/s)
W thermiques (flèches rouges)



Tendances U couche 1 : Thermiques, diffus, total



Conservation dans le panache

$$\frac{\partial f}{\partial z} = e - d, f = \rho \alpha w$$

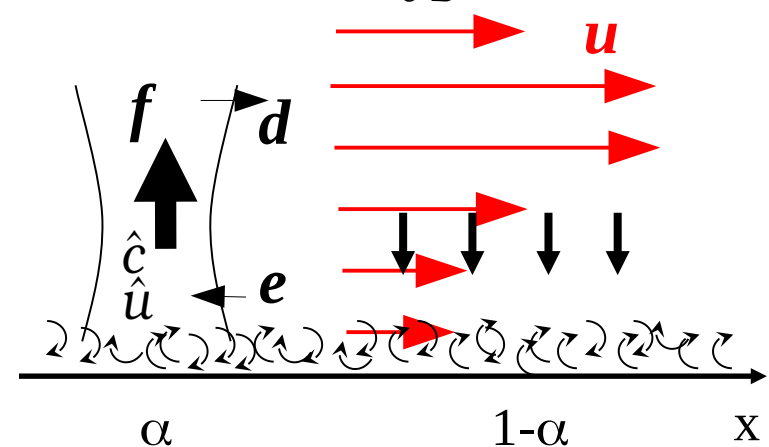
$$\frac{\partial f \hat{c}}{\partial z} = e c - d \hat{c} \quad \text{Couple de pression panache / environnement}$$

$$\frac{\partial f \hat{u}}{\partial z} = e u - d \hat{u} + C(\hat{u} - u)$$

Transport vertical de moment

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho w' u')}{\partial z}$$

$$\overline{\rho w' c'} = -\rho K z \frac{\partial u}{\partial z} + f(\hat{u} - u)$$



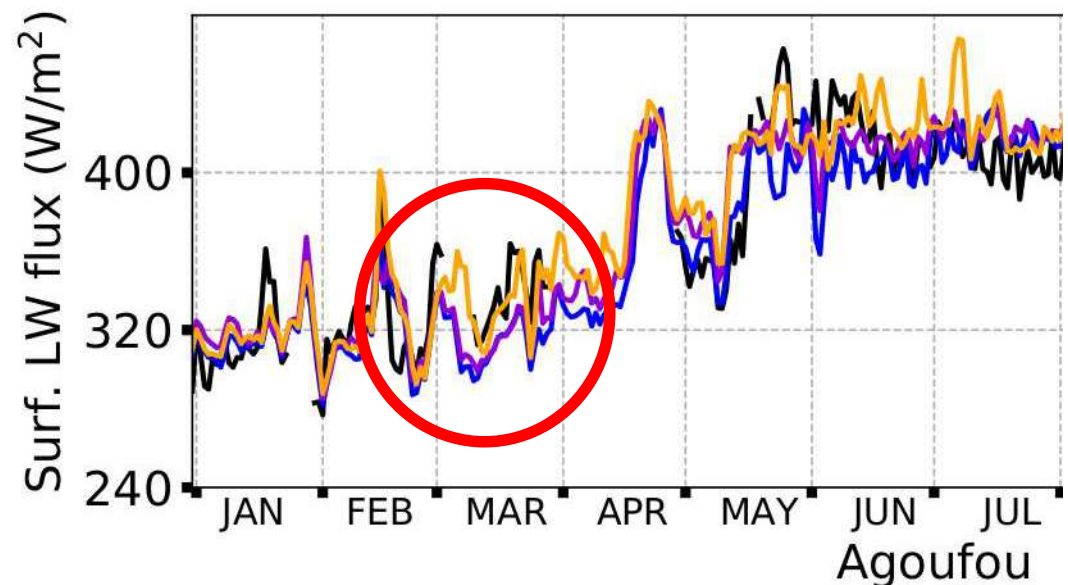
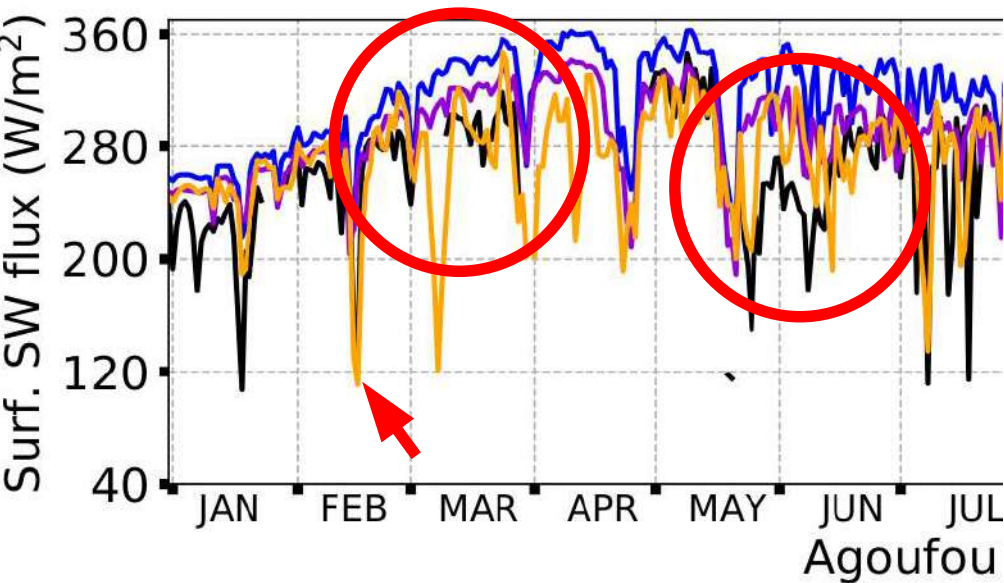
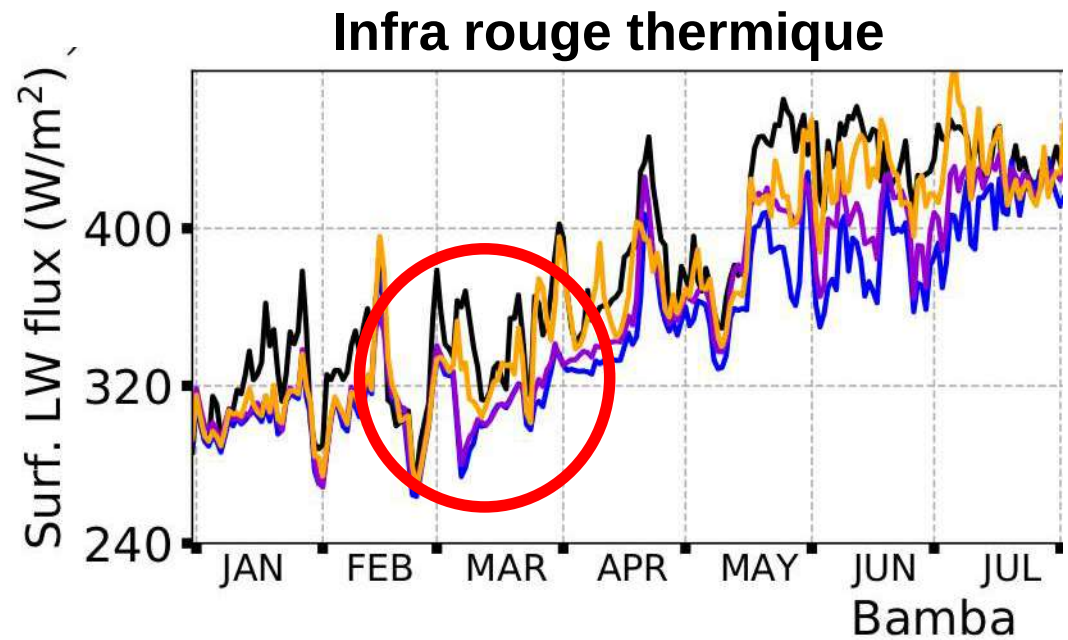
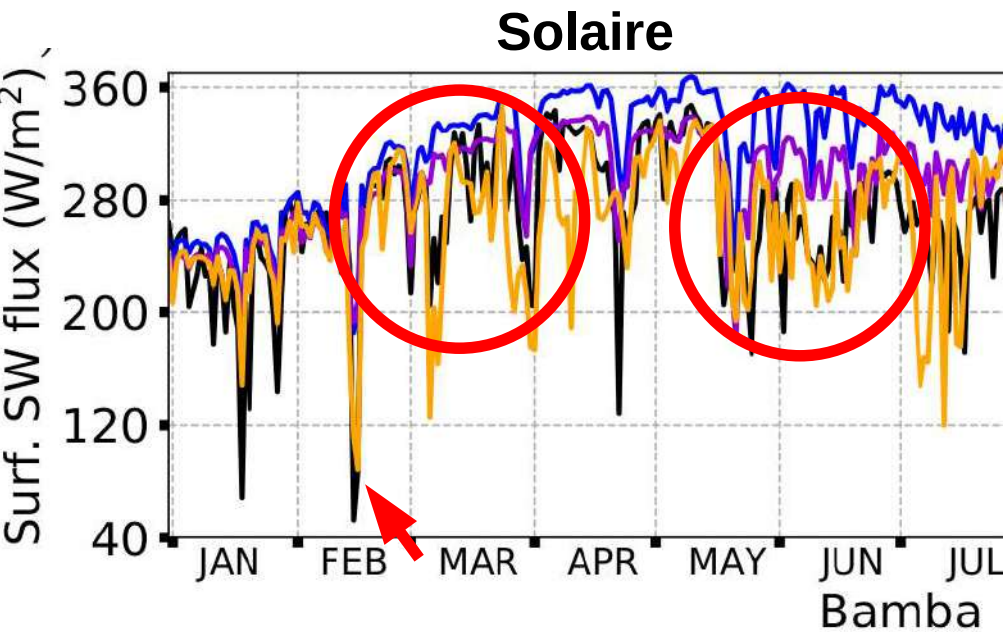
Vitesses ascendantes ~ 1 m/s

→ subsidence 10 cm/s

→ temps d'advection 2000s / 200m

- Observations AMMA-Catch
- Sans poussières
- Climatologie de poussière
- Poussières interactives

Flux radiatif descendant à la surface (W/m^2)
Simulation LMDZ NP guidée en vent..
Année 2006.



→ Les poussières interactives améliorent la représentation des flux radiatifs

Conclusions :

La convection de couche limite joue un rôle déterminant

→ dans le transport vertical des constituants atmosphériques.

Elle « **redresse les profils verticaux** » des constituants émis en surface.

→ le transport vertical de quantité de mouvement

→ le **maximum de vent** observé **le matin sur les déserts**, responsable d'une part très importante des **émissions de poussières Sahélo Saharienne** en saison sèches

Modélisation de la convection de couche limite

→ Ces structures d'échelle kilométrique **doivent être paramétrisées** en dehors des simulations LES ; ie **dès que la résolution est plus grossière que ~200m**

(cf. thèse de Rachelle Honner sur la zone grise de la convection de couche limite).

→ L'approche EDMF (Eddy Diffusion - Mass Flux) comme « **le modèle du thermique** » **rend bien compte de ce transport.**

→ **Bonne représentation des poussières désertiques avec une résolution de 100km**

→ La modélisation (**paramétrisation**) plutôt que la simulation (LES) des structures convectives est un élément de **compréhension du fonctionnement** du système.

En cours :

Paramétrisation du soulèvement par les rafales associées :

→ aux thermiques (Adriana Sima)

→ aux poches froides (Lamine Thiam)

Conclusions / perspectives (2/2)

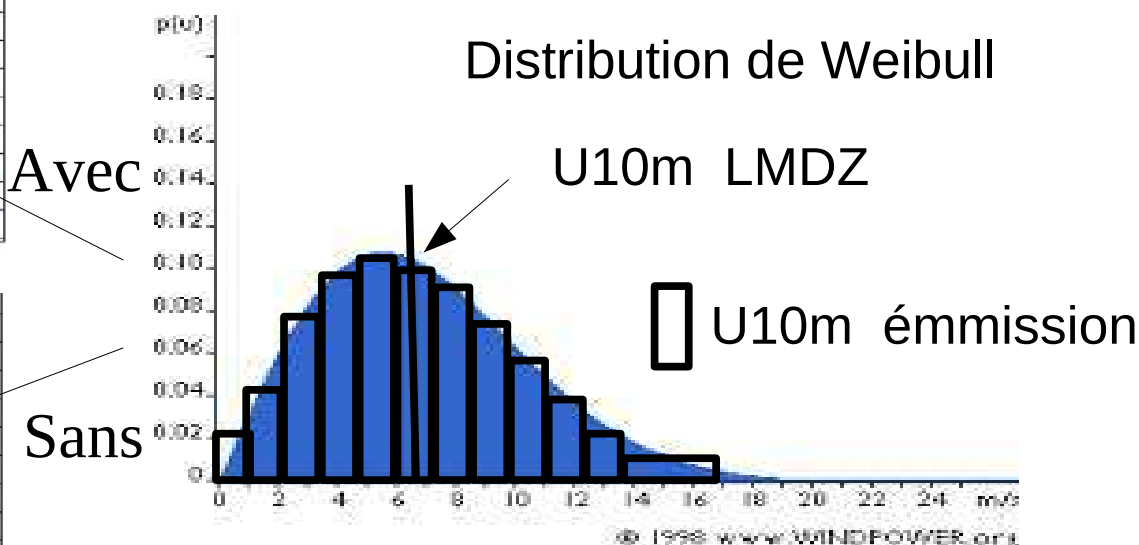
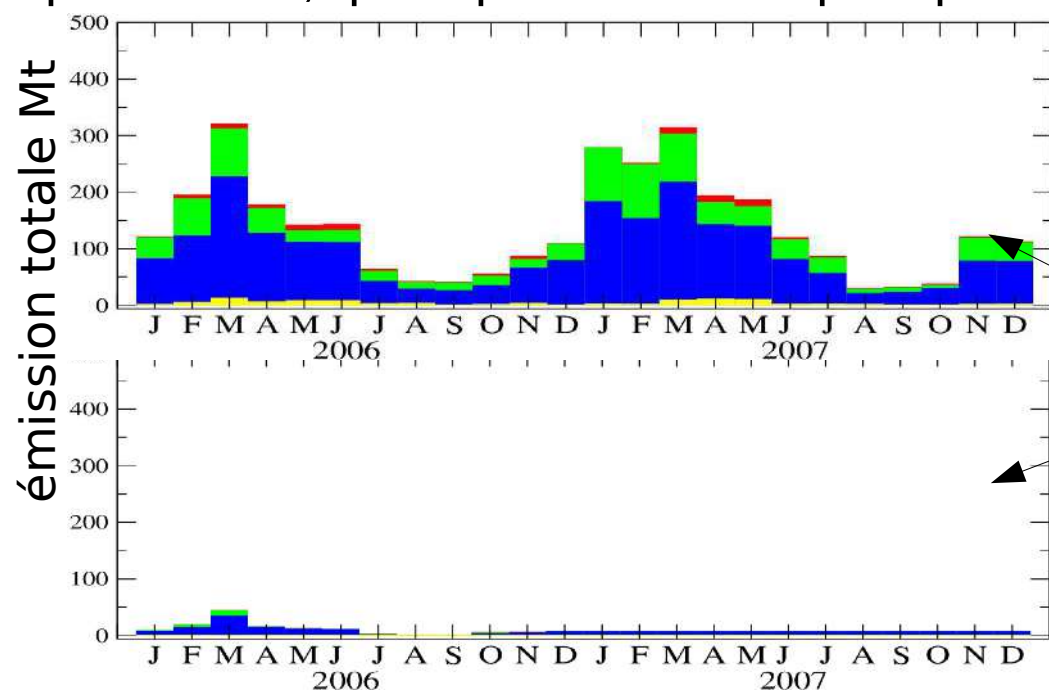
→ α devant ALEwk ad hoc, ajusté / cycle saisonnier des poussières. Bon résultat pour les bonnes raisons ? Dépendance convection / ALE et ALE / bourrasques U10m ?

→ Les fronts de rafales ne couvrent qu'une fraction de la maille. Peut on estimer cette surface effective plutôt que d'utiliser $W^2 = 2 * ALE_wk$?

→ Importance de la distribution sous-maille ? Est-ce pour de bonnes raisons ? Prédire la largeur de la distribution à partir des bourrasques ? Hétérogénéité du terrain ?

→ **Besoin d'évaluation directe à partir des distributions de vent observées.**

On ne peut se reposer ni sur les réanalyses, trop loin des obs, ni sur les simulations de poussières, qui dépendent de trop de paramètres incertains.



De l'importance de la paramétrisation de la convection de couche limite pour simuler le transport des aérosols et le soulèvement des poussières

Frédéric Hourdin, Catherine Rio, Moussa Gueye, Binta Dialo, Adriana Sima
Laboratoire de Météorologie dynamique, CNRS/IPSL/UPMC, paris, france

1. Contexte et modèle
- 2 . Le « modèle du thermique » sec et nuageux
3. Importance pour le transport vertical des traceurs ...
4. ... et pour le cycle diurne du vent et le soulèvement des poussières

De l'importance de la paramétrisation de la convection de la couche limite pour simuler le transport des aérosols et le soulèvement des poussières

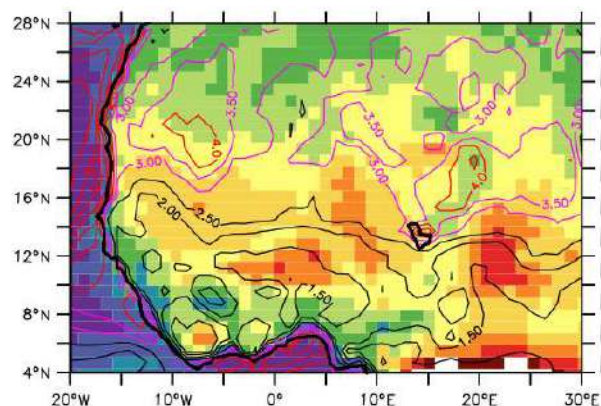
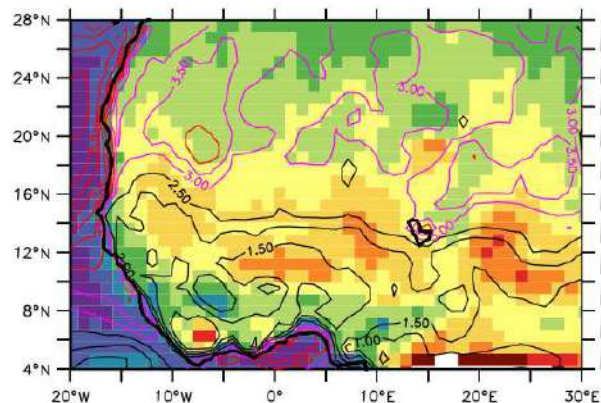
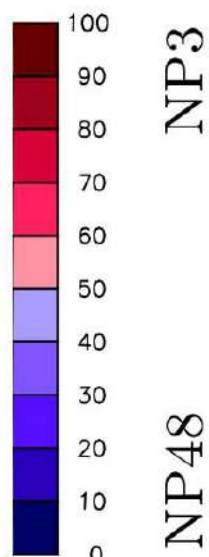
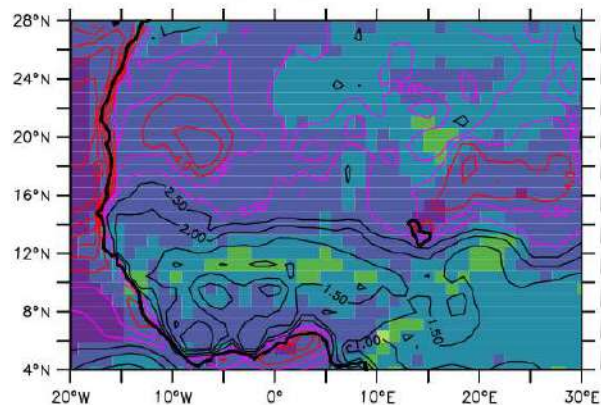
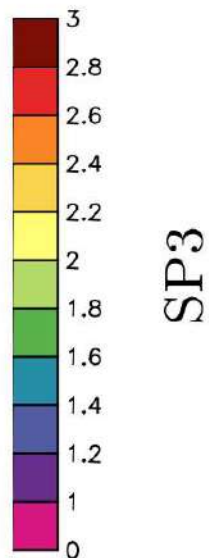
Frédéric Hourdin, Catherine Rio, Moussa Gueye, Binta Dialo, Adriana Sima
Laboratoire de Météorologie dynamique, CNRS/IPSL/UPMC, paris, france

L'échec intrinsèque des paramétrisations de type diffusion turbulente dans la représentation du transport ascendant de chaleur dans la couche limite convective, reconnu depuis les années 70, a conduit à diverses propositions de paramétrisations telles que des termes de contre-gradient et des fermetures du troisième ordre pour tenir compte de l'asymétrie du transport vertical. Une approche désormais aujourd'hui relativement répandue consiste à combiner une paramétrisation du flux de masse des structures organisées de la couche limite convective avec une fermeture locale du TKE pour la turbulence à petite échelle. L'idée remonte à une proposition de Chatfield et Brost (1987) et est depuis souvent appelée l'approche Eddy Diffusion Mass Flux (EDMF). Le "modèle de panache thermique" développé pour LMDZ a été le premier schéma EDMF publié et testé dans un modèle climatique (Hourdin et al., 2002). Il a été introduit pour la première fois dans la composante atmosphérique LMDZ5B du modèle IPSL pour CMIP5. Cependant, cette première version a souffert de problèmes de jeunesse. Ce n'est que pour CMIP6A, environ 20 ans après le développement de la paramétrisation, qu'une première version satisfaisante du modèle a été livrée. Au fil des années, et plus souvent avec cette dernière version, le rôle clé de la représentation de la convection peu profonde sur de nombreuses composantes du système a été réalisé. Il conditionne le transport vertical d'humidité (asséchant la surface et renforçant l'évaporation) de chaleur (en remontant le gradient de température potentielle) et de quantité de mouvement. Nous présenterons ici l'impact de l'introduction de cette paramétrisation en flux de masse le transport vertical de constituants atmosphérique comme les aérosols. Nous montrerons également comment le fort cycle diurne de la couche limite convective dans les zones désertiques est essentiel pour bien représenter le maximum de vent près de la surface le matin, responsable d'un maximum d'émission de poussière, lorsque l'élan du jet nocturne de basse altitude est ramené brusquement vers la surface lorsqu'il est atteint par la convection sèche qui se développe. Les bourrasques associées aux panaches thermiques sont également un processus dominant pour expliquer la distribution sous maille des vents de surface dans la journée. Une paramétrisation de celle-ci est rendue possible par l'introduction de le modèle du thermique.

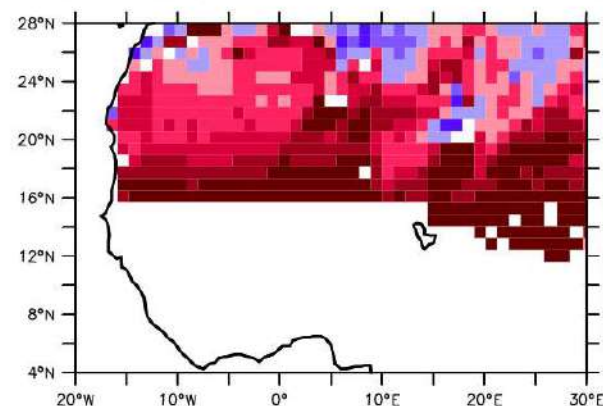
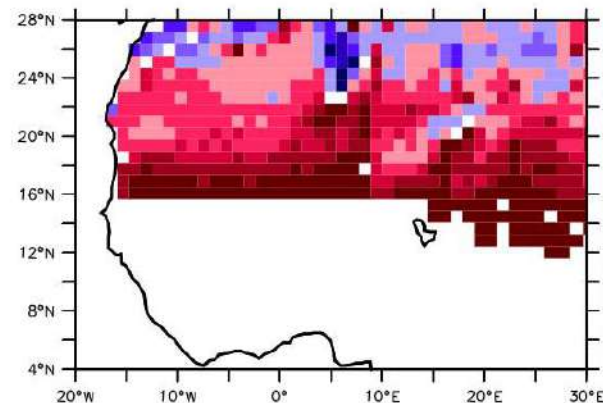
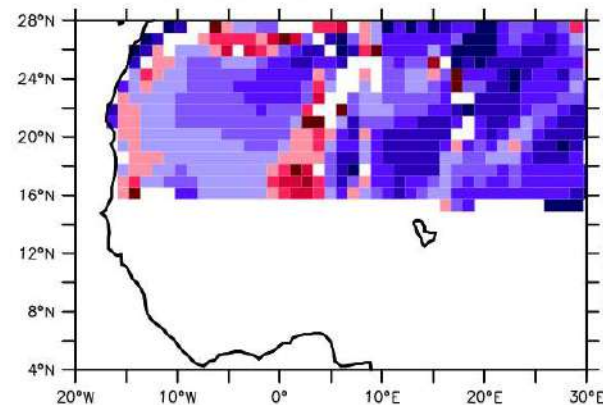
Chatfield, R. B., et Brost, R. A. (1987). A two-stream model of the vertical transport of trace species in the convective boundary layer. *Journal of Geophysical Research*, 92, 13,263-13,276.

Hourdin, F., Couvreux, F., & Menut, L. (2002). Paramétrage de la couche limite de convection sèche basé sur une représentation du flux de masse des thermiques. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59, 1105-1123

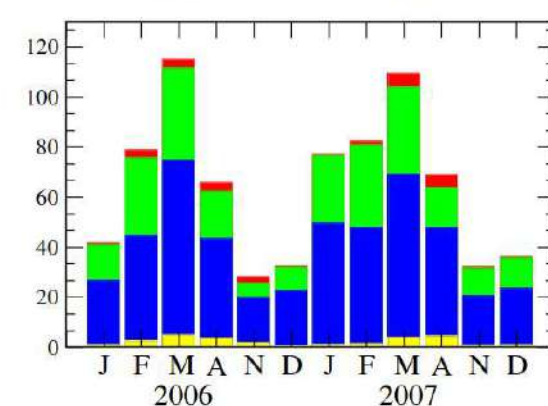
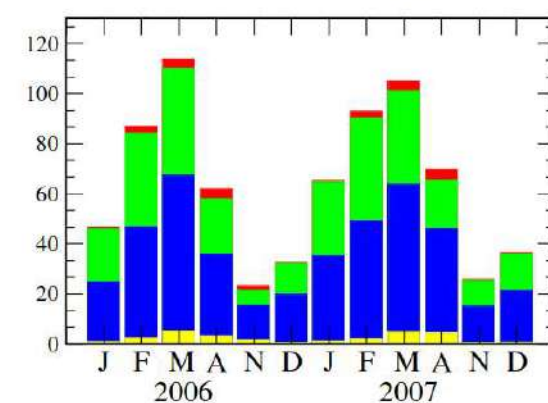
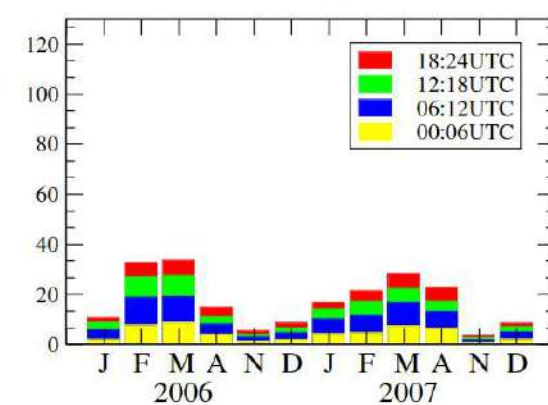
mean (contours) and
max/mean daily wind
March 2006



Emited between
06 and 12 UTC (%)
March 2006



Dust emission
in Mt
Total



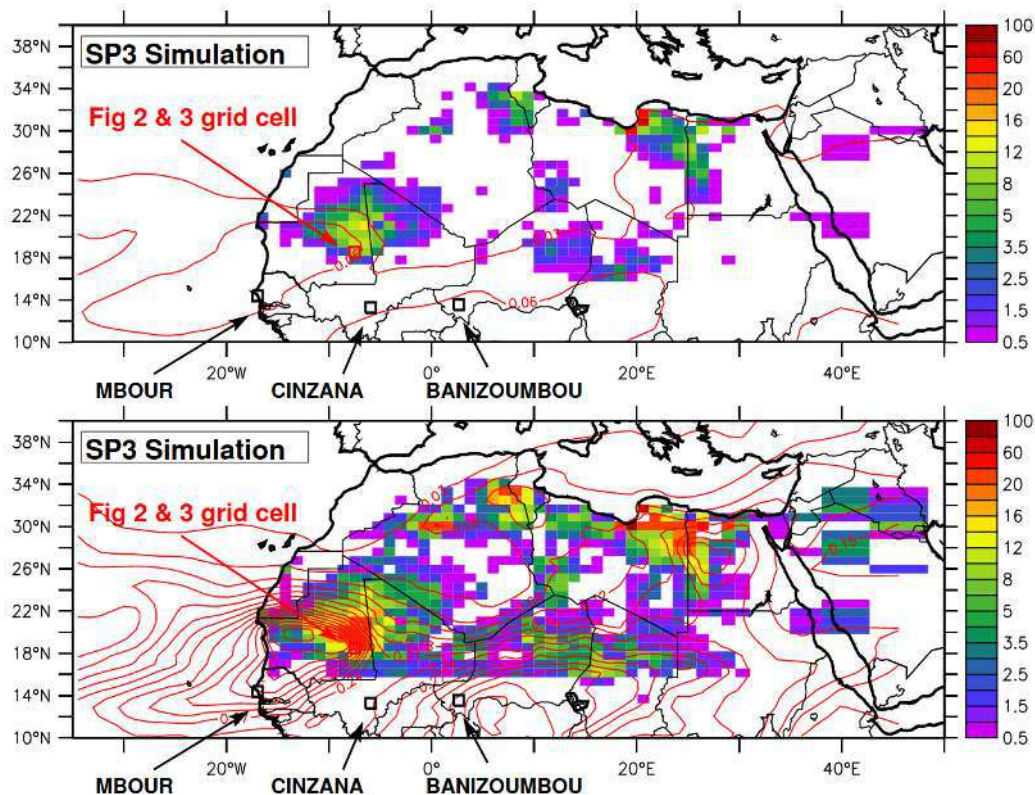


Figure 1. Comparison of the total emission ($\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) for the SP3 (top) and NP3 (bottom) simulations (NP and SP versions of the physical package with $\tau = 3 \text{ h}$ for nudging) for March 2006. Contours correspond to the mean AOD at 550 nm, with a 0.02 interval between contours.

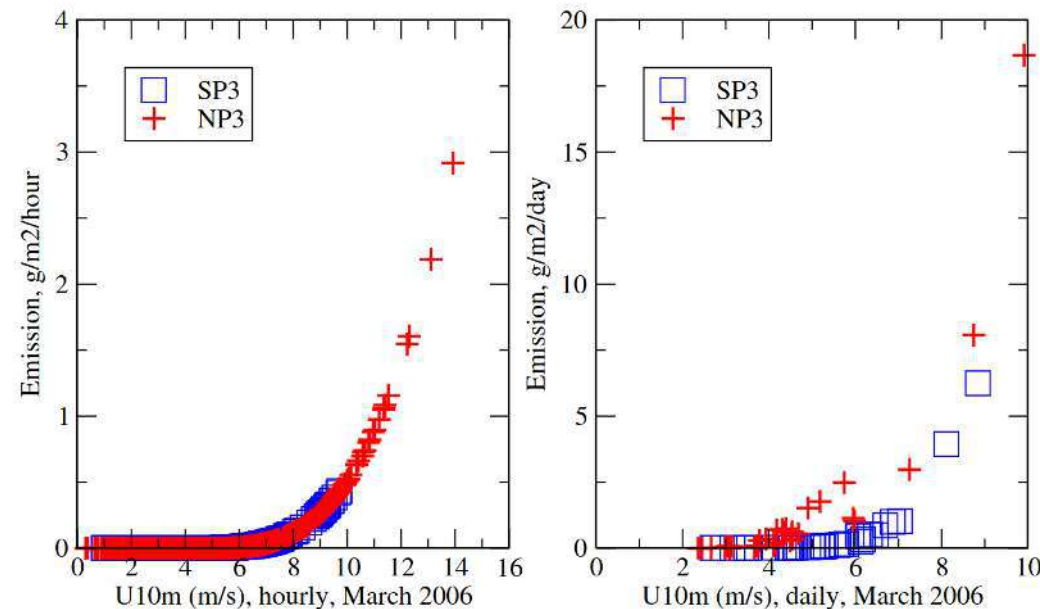


Figure 2. Scatter plot of the emission vs. 10 m wind speed (m s^{-1}) for simulations SP3 (blue) and NP3 (red) for March 2006, at 7.5° W , 18.5° N (location shown in red in Fig. 1). The left panel corresponds to an hourly sampling of instantaneous values (with emission given in $\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) while the right panel shows daily averages (with emissions given in $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$).

