

Physique des nuages

ou
Comprendre les questionnements scientifiques actuels...

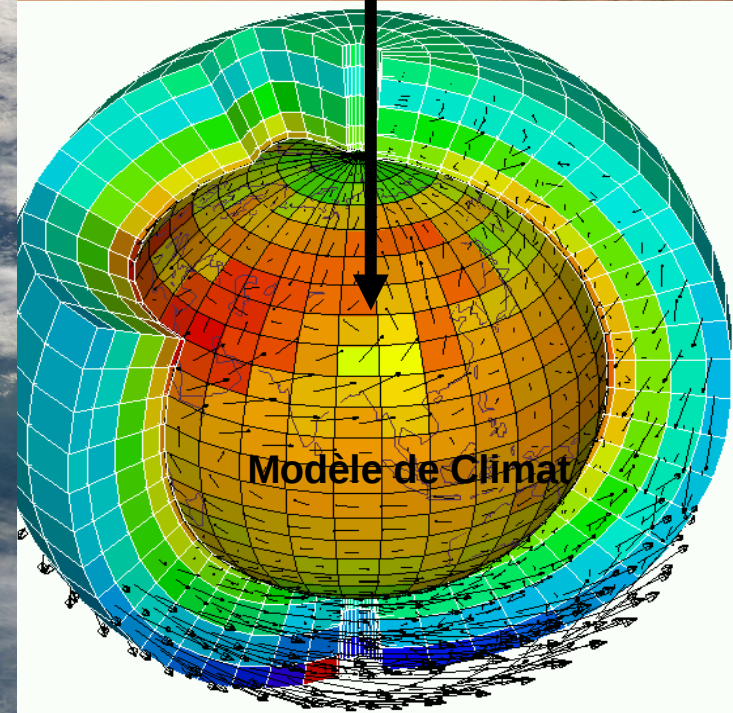
Schéma conceptuel de
convection nuageuse

Catherine Rio & Jean-Yves Grandpeix
Laboratoire de Météorologie Dynamique
Jussieu, Paris

Afrique de l'Ouest.
Soulèvement de poussières devant une ligne de grain



Brésil. Systèmes convectifs profonds
Photo depuis la Navette Spatiale



Plan du cours MFE22

18/03: Les nuages dans l'atmosphère et le climat

25/03: Macro-physique des nuages

08/04: TP Numérique : Nuages & Rayonnement

22/04: Les nuages dans les Modèles de Climat

06/05: Micro-physique des nuages chauds

07/05: TP Numérique: Schéma de convection

1. La convection nuageuse



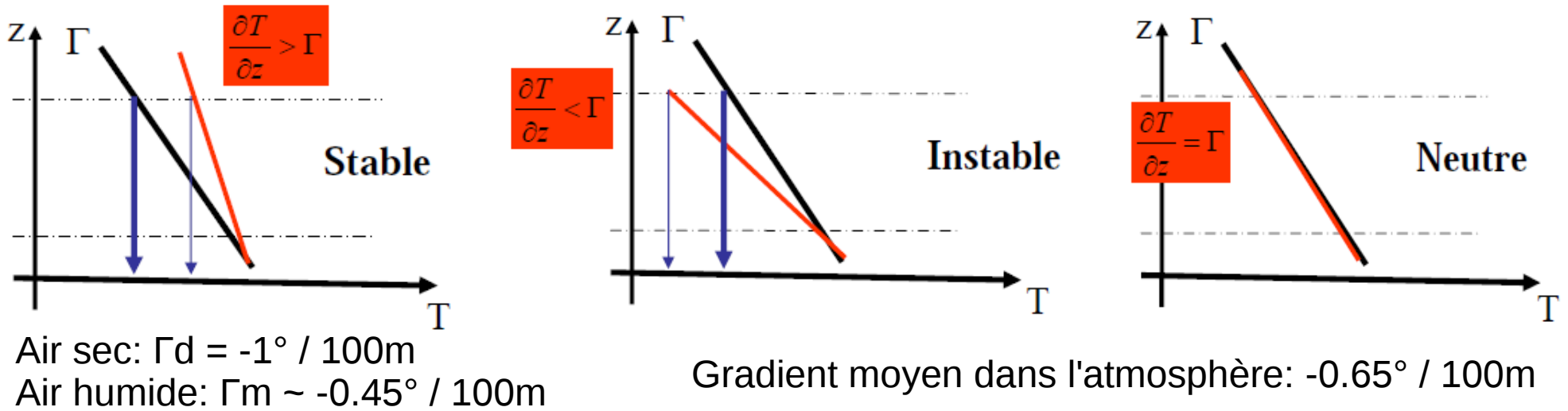
Target Name: Earth
Spacecraft: Space Shuttle
Produced by: NASA
Copyright: NASA Copyright Free
Policy
Cross Reference: STS41C-40-2130
Date Released: April 1984

1.1 La couche limite nuageuse

1.2 La transition vers la convection profonde

1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

Notion de stabilité locale de l'atmosphère

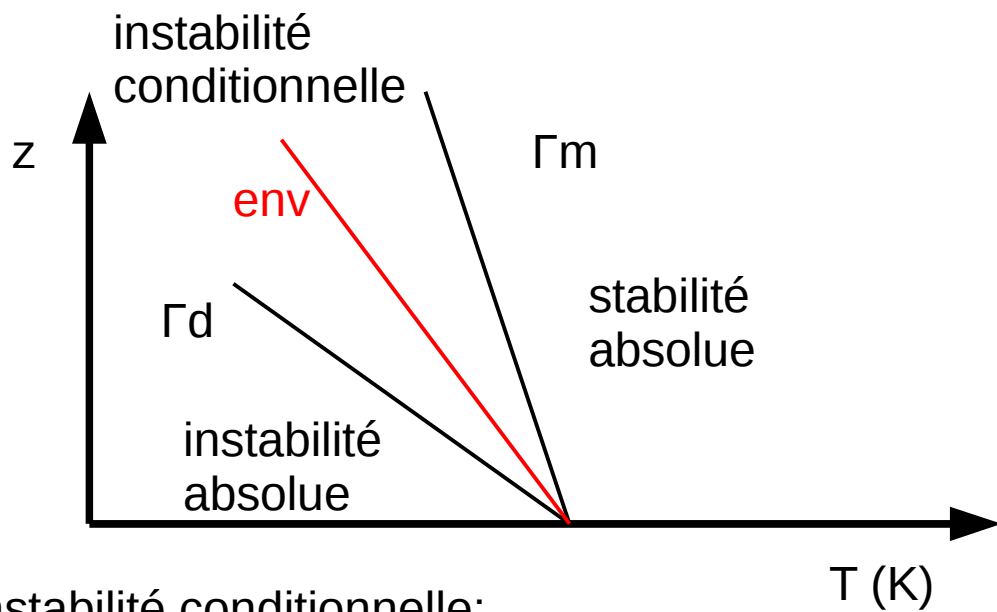


On définit la température potentielle:
Température de la particule d'air insaturé si elle était ramenée à p_0 par transformation adiabatique

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^\kappa$$

$\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0$	Instable <i>Air froid au dessus air chaud</i>
$\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$	Stable <i>Air chaud au dessus air froid</i>
$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$	Neutre

L'instabilité conditionnelle



Instabilité conditionnelle:
Les particules d'air insaturé sont stables
Les particules d'air saturé sont instables

Propriété des couches nuageuses

Notion de flottabilité

Lorsqu'une particule de masse volumique ρ_p se déplace sur la verticale, elle est soumise à la force de flottabilité:

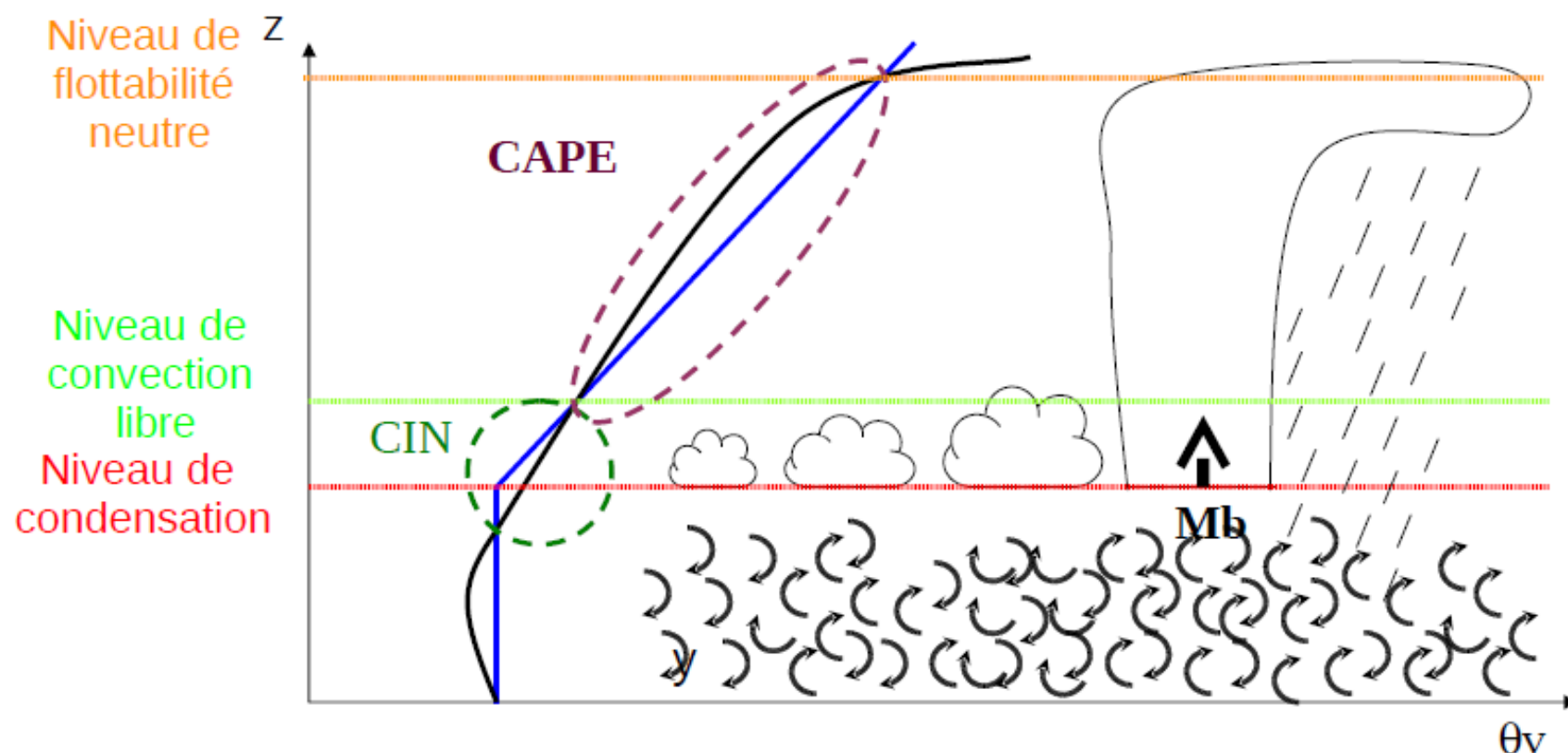
$$\gamma = -g \frac{\rho_p - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} = g \frac{\theta_{vp} - \bar{\theta}_v}{\bar{\theta}_v}$$

avec

$$\theta_v = \theta(1 + 0.61q_v - q_l)$$

Le contenu en eau vapeur (liquide) augmente (diminue) la flottabilité d'une particule

C'est la température potentielle virtuelle, celle que devrait avoir une particule d'air sec pour avoir la même densité que l'air humide considéré.

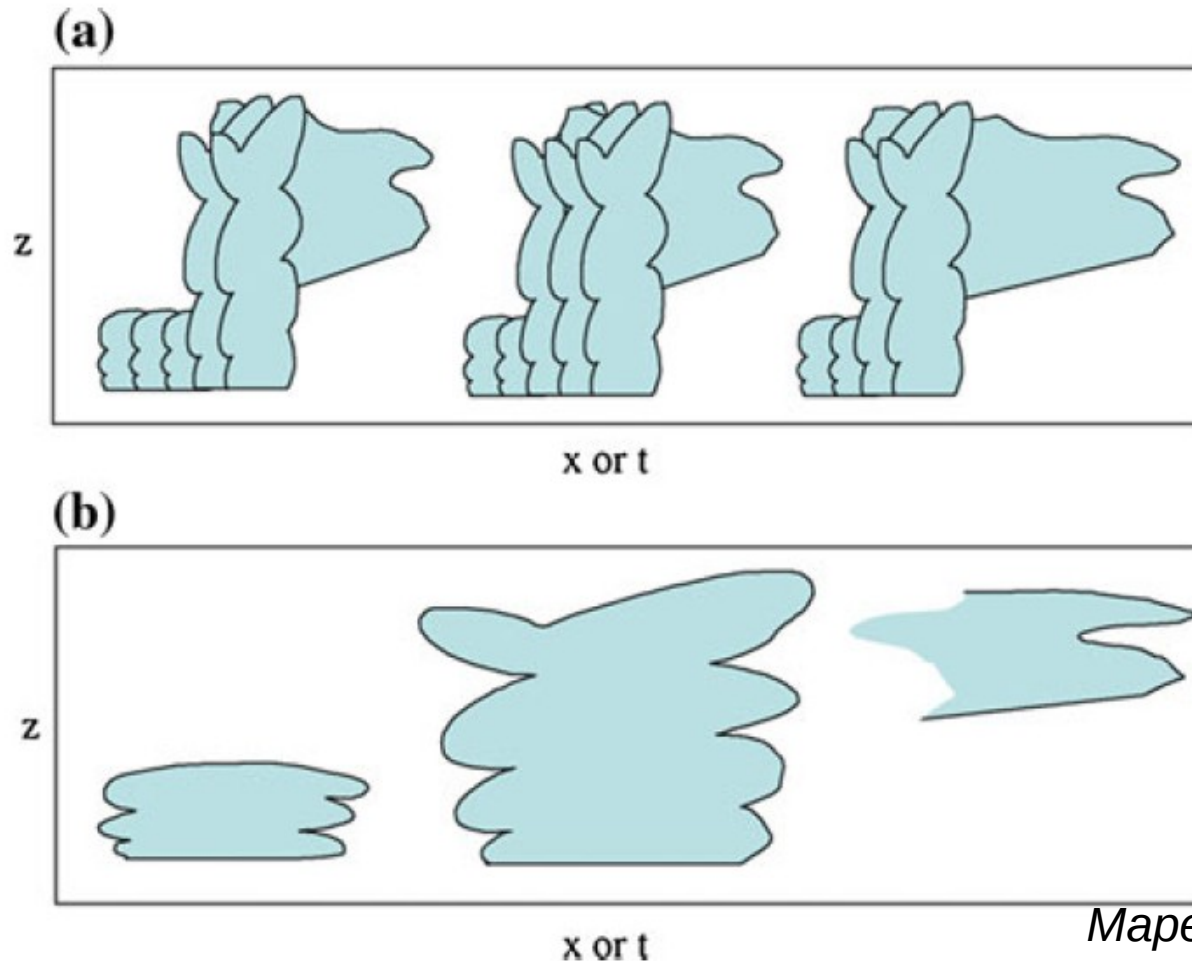


La convection nuageuse

Trois structures convectives basiques:

- convection peu profonde en sommet de couche limite
- tours convectives profondes
- nuages stratiformes et enclumes

Ces trois structures se retrouvent dans le cycle de vie des systèmes convectifs (12h-24h).



Mapes et al., DAO, 2006

Mais elles se retrouvent aussi dans la variabilité de la convection à l'échelle de plusieurs jours ou mois.

1.1 La couche limite nuageuse

La couche limite atmosphérique

Basse couche de l'atmosphère qui subit directement les interactions avec la surface

Nuit: qqs centaines de mètres

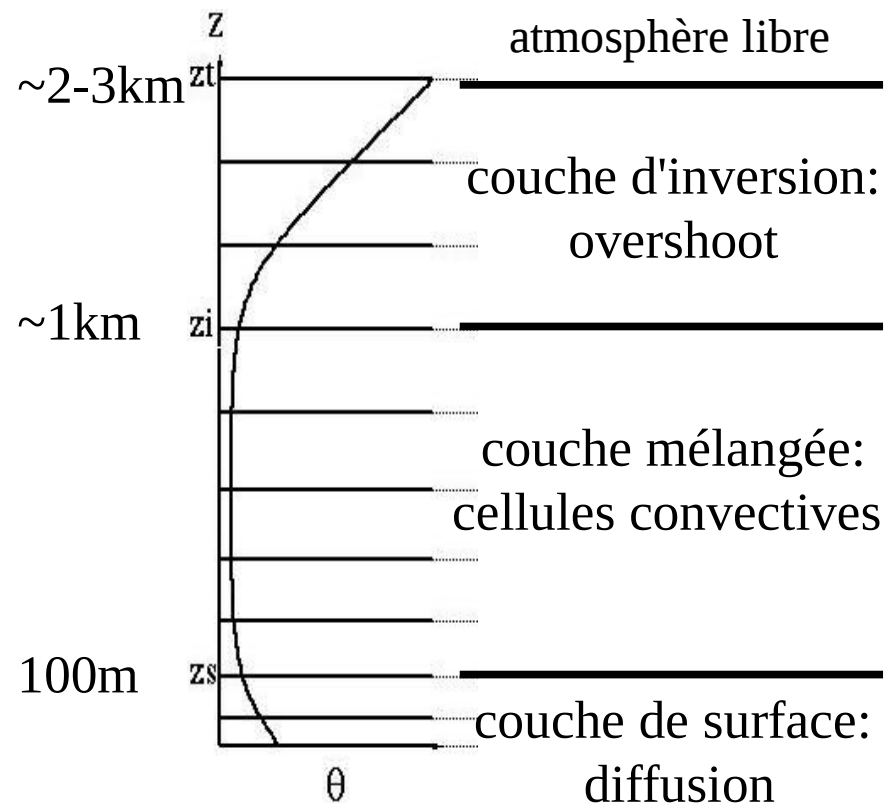
Jour: entre 1 et 3 km



Elle est le siège de mouvements turbulents à différentes échelles, générés par:

- le chauffage du sol par le rayonnement solaire (forçage thermique)
- le cisaillement de vent en surface dû à la friction (forçage dynamique)

La couche limite
atmosphérique
convective

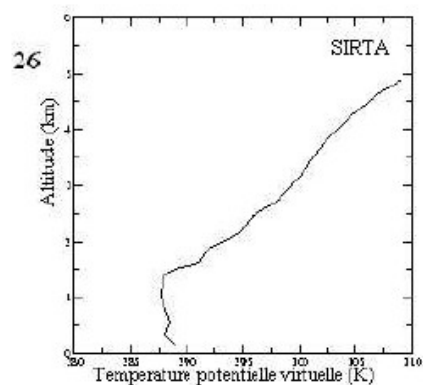


1.1 La couche limite nuageuse

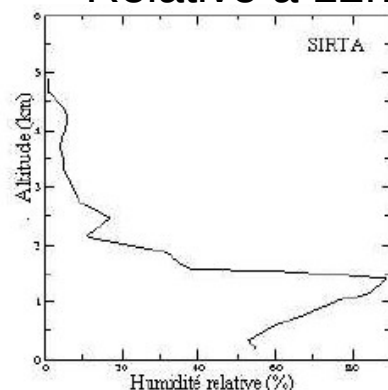
Observation de la couche limite convective au SIRTA (Palaiseau)

Trois jours successifs de cumulus de beau temps: 26, 27 et 28 mai 2003

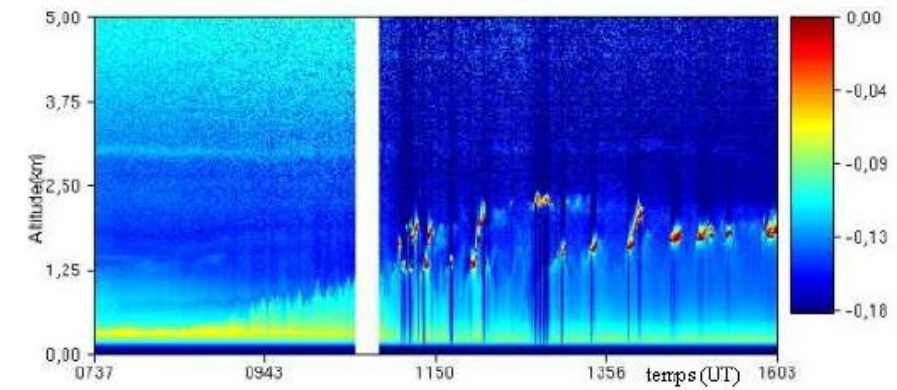
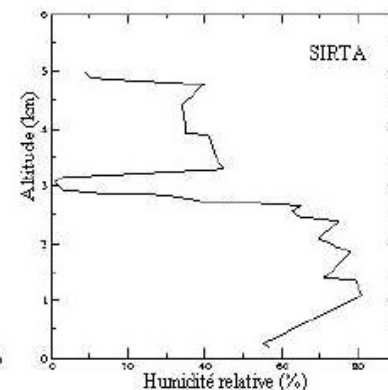
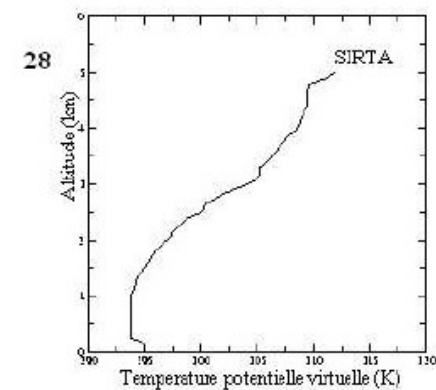
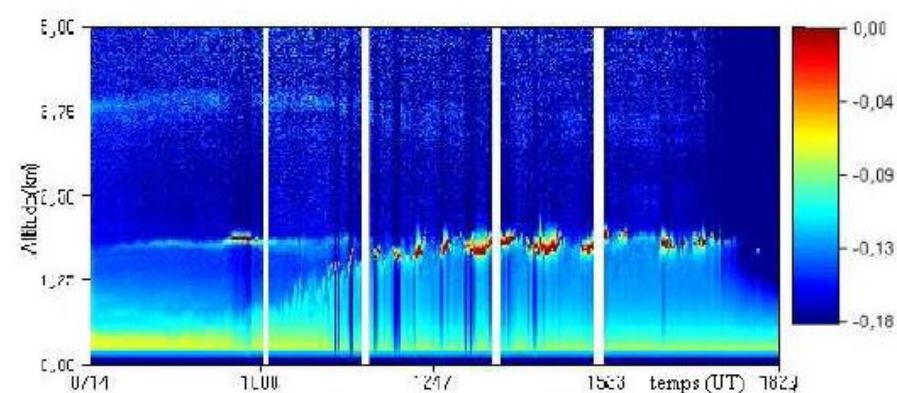
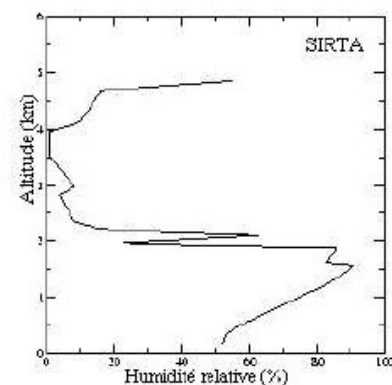
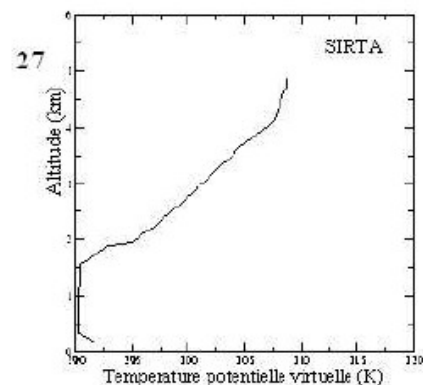
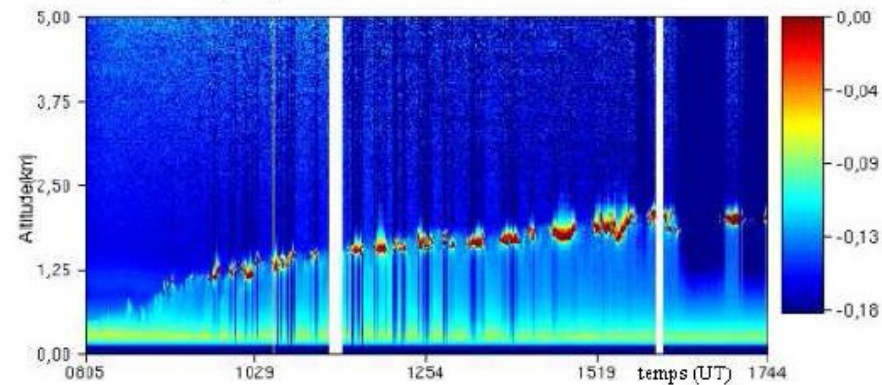
Profil de température
Potentielle à 12h



Profil d'humidité
Relative à 12h



Echo LIDAR

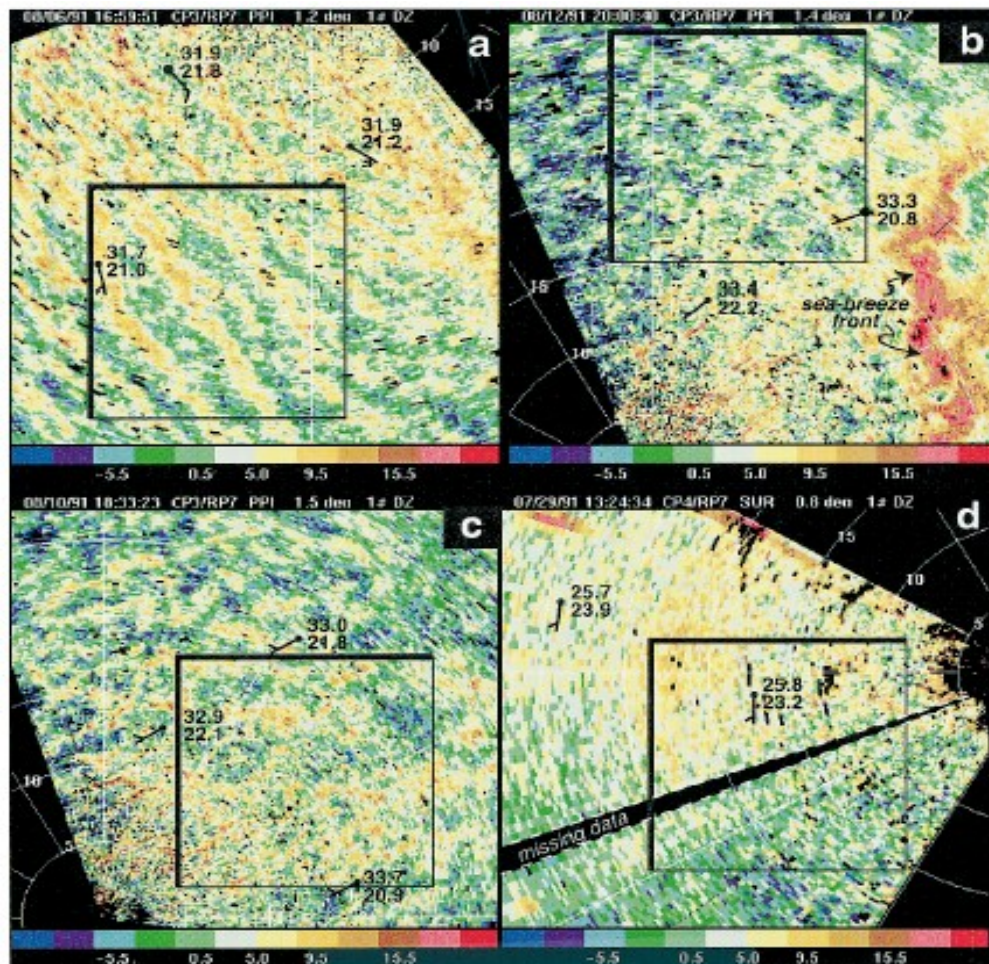


1.1 La couche limite nuageuse

Observation des structures organisées de la couche limite

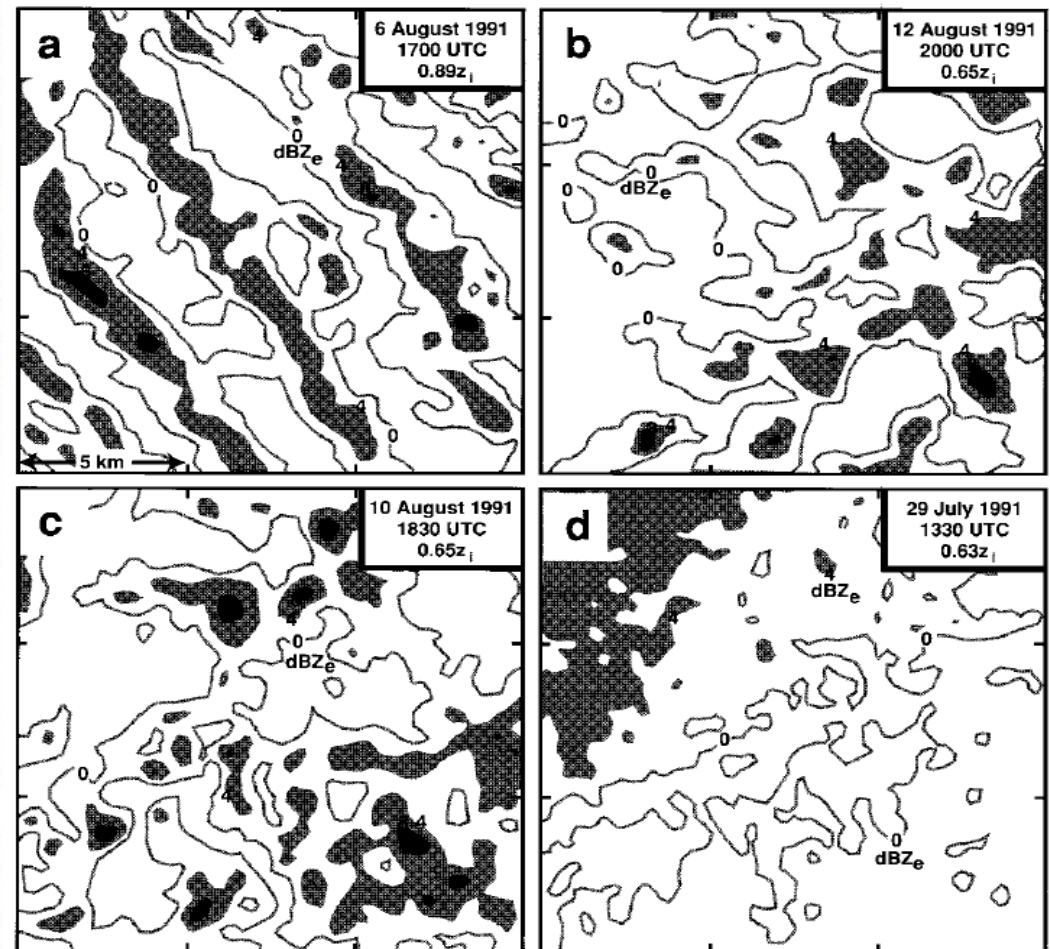
Floride, été 1991

Réflectivité radar observée



Organisation en
rouleaux

Organisation en
cellules



Convection non
organisée

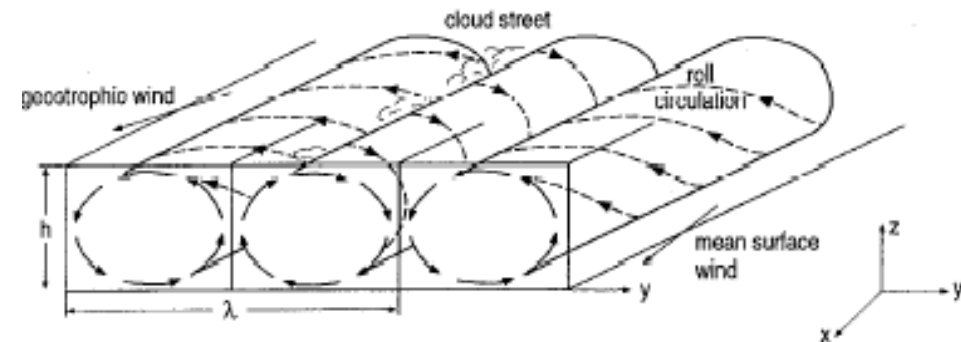
Pas de convection

Weckwerth et al., MWR, 1997

1.1 La couche limite nuageuse

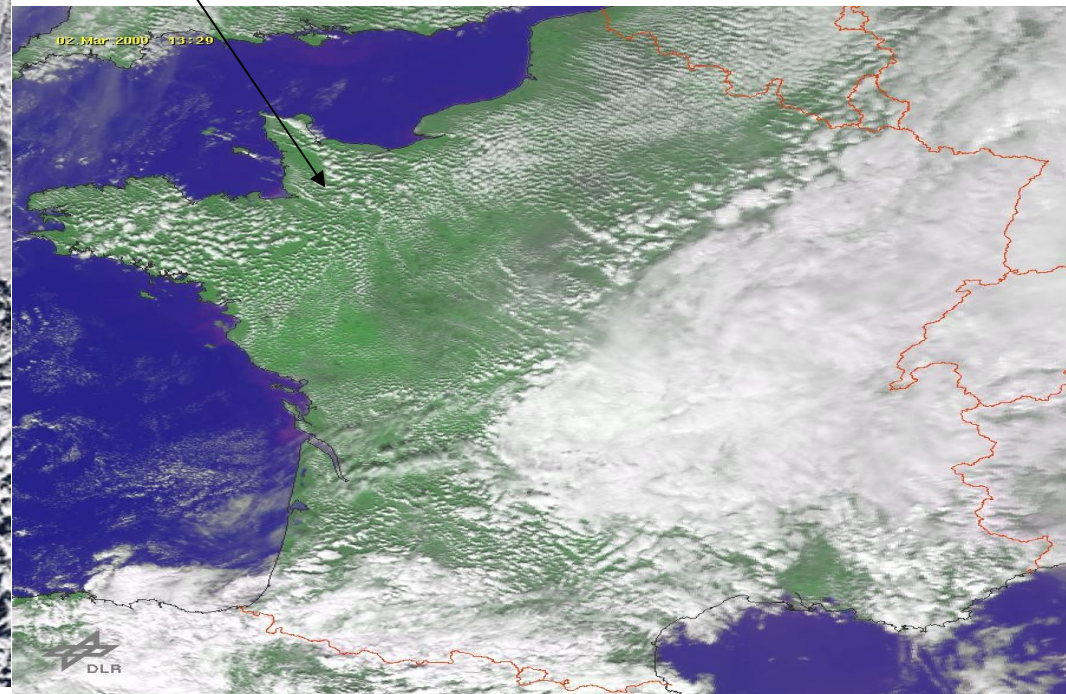
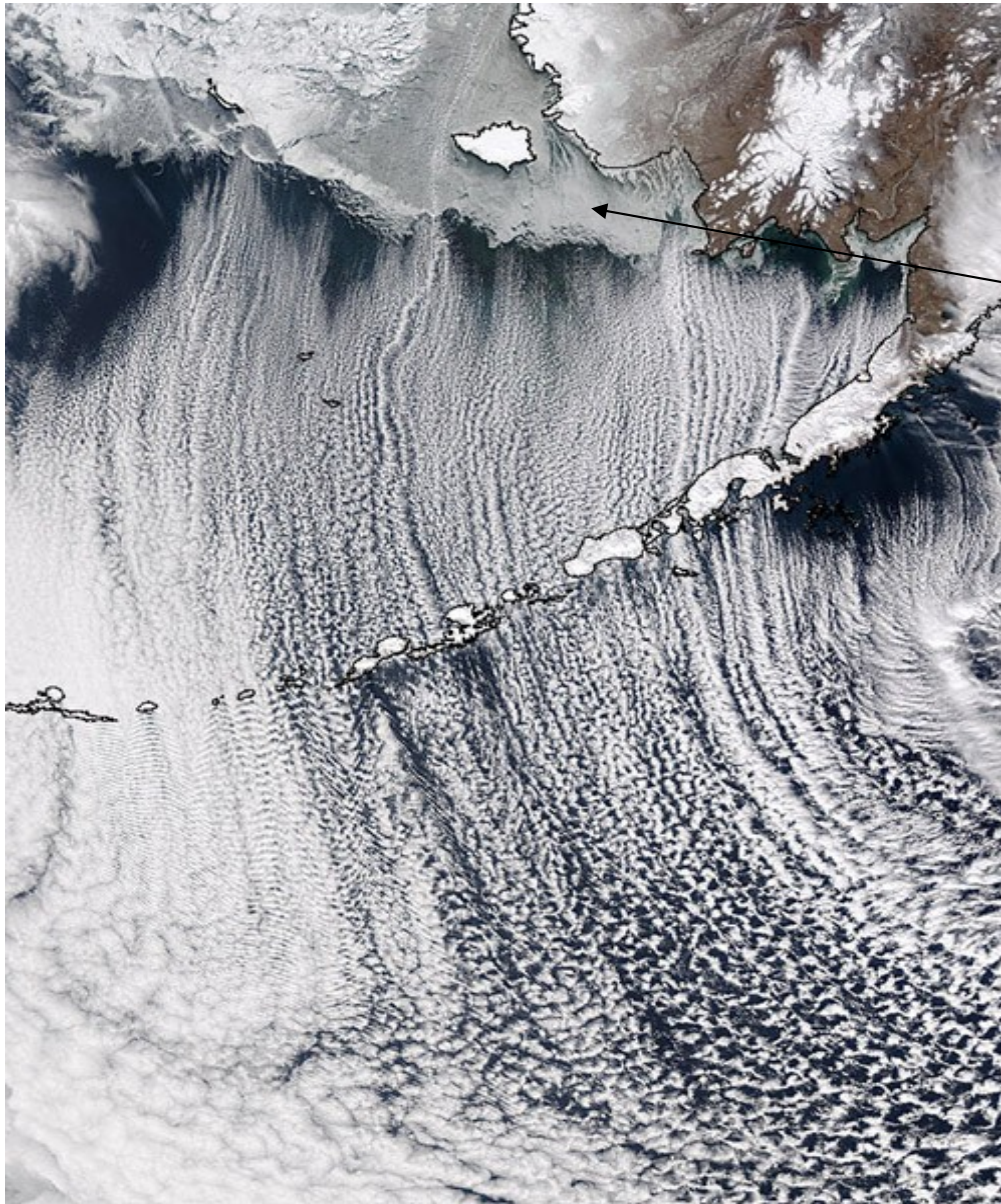
L'organisation en rouleaux: les rues de nuages

Les structures organisées sont visualisées ici par des rues de nuages



Exemple classique de rues de nuages générées au sommet de rouleaux convectifs:

- Air polaire froid arrivant au-dessus d'un océan plus chaud.
- Air maritime chaud arrivant sur un continent plus chaud.



1.1 La couche limite nuageuse

Observation de la couche limite convective: les panaches thermiques

Analyse en composites d'évènements chauds mesurés par vol avion en été en Australie

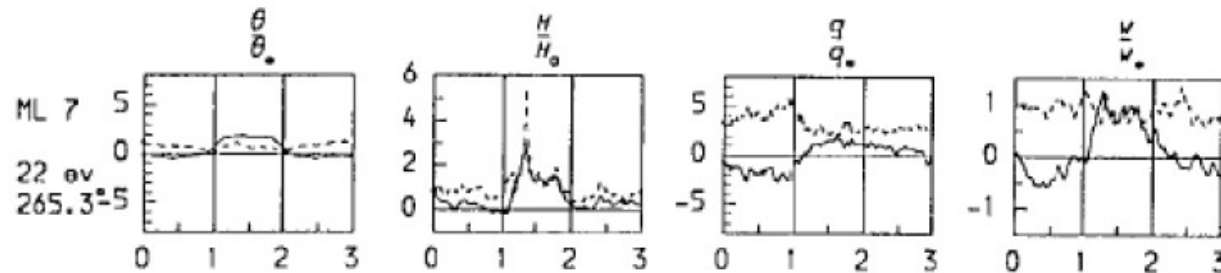
Température
potentielle

Flux de
chaleur

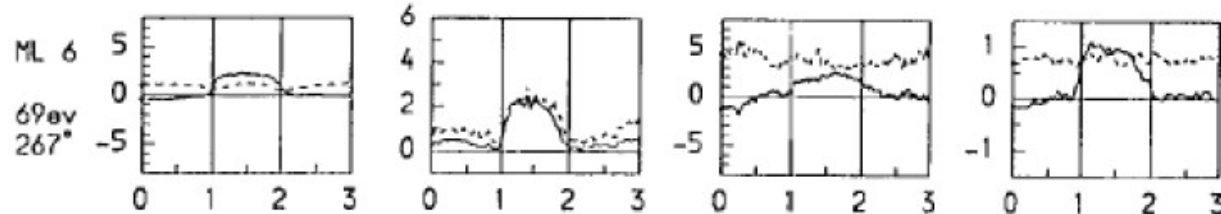
Humidité
spécifique

Vitesse
verticale

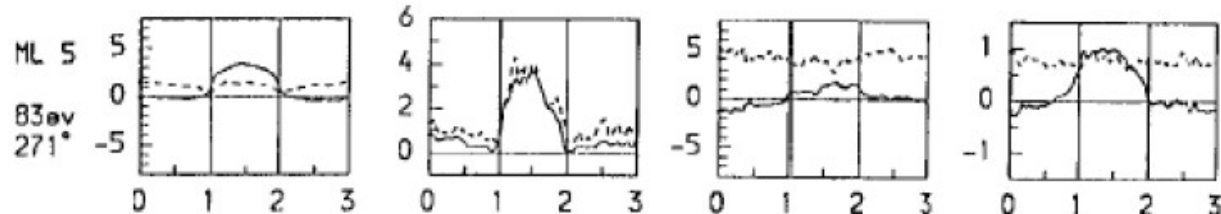
$0.5 < z/z_i < 0.6$



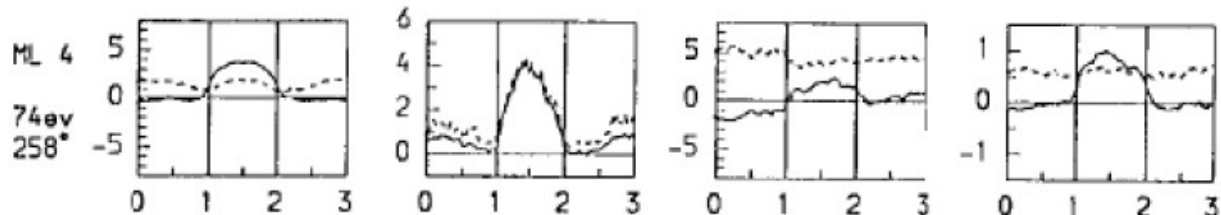
$0.3 < z/z_i < 0.5$



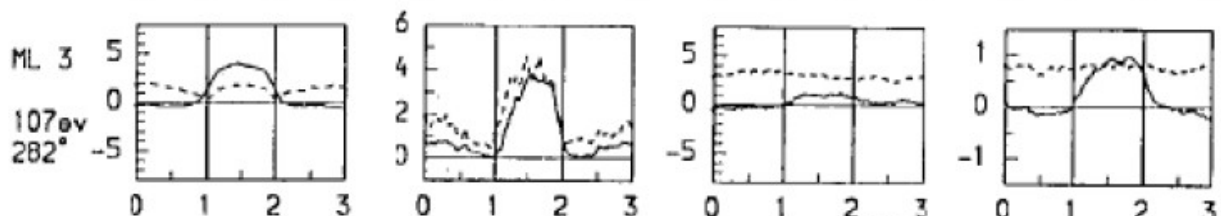
$0.2 < z/z_i < 0.3$



$0.15 < z/z_i < 0.2$



$0.1 < z/z_i < 0.15$



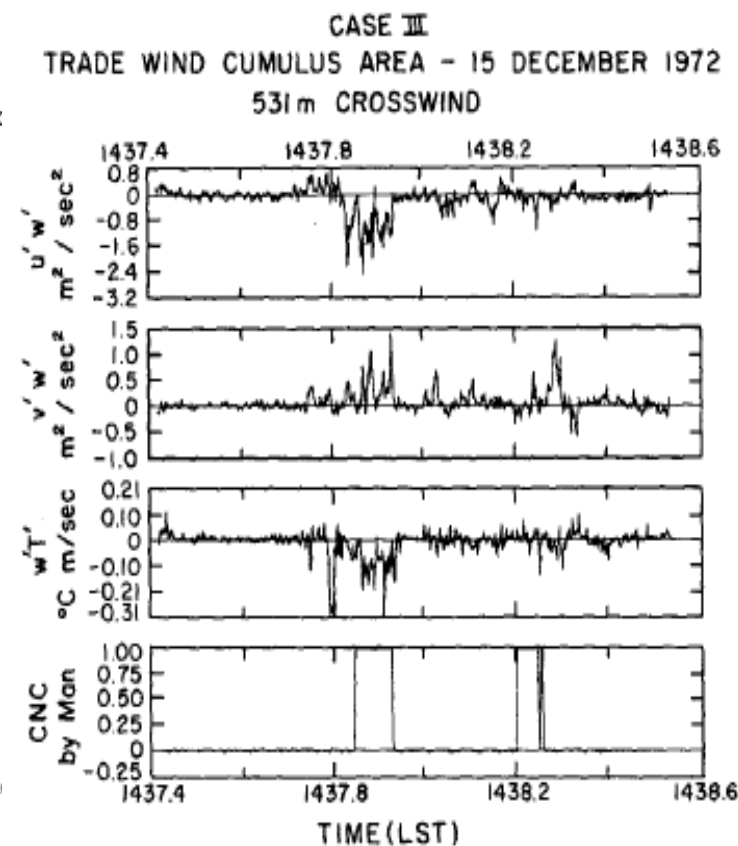
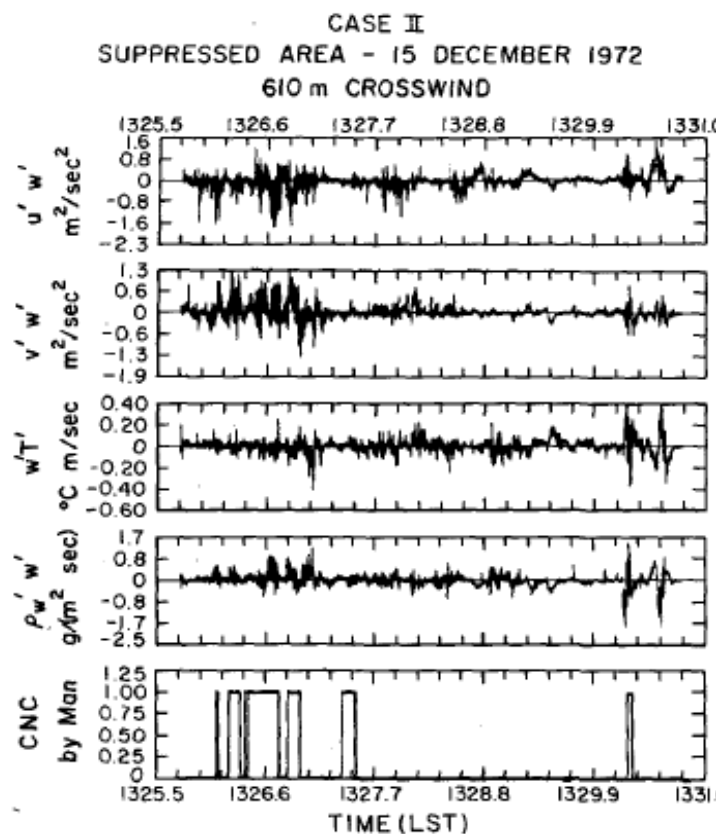
1.1 La couche limite nuageuse

Observation de la couche limite convective: les panaches thermiques

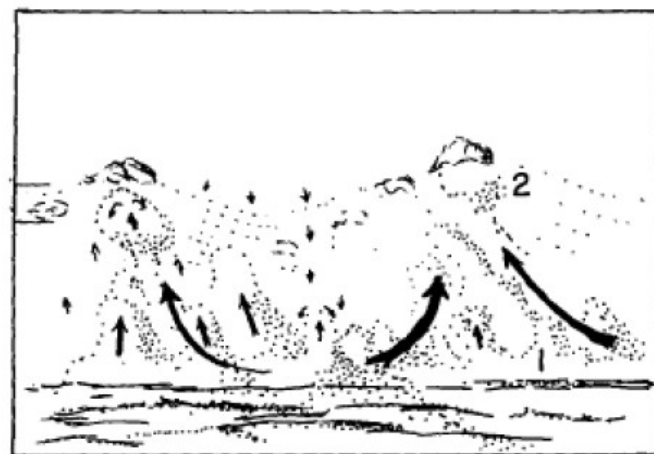
Cas II: 15 dec 1972- 12h48



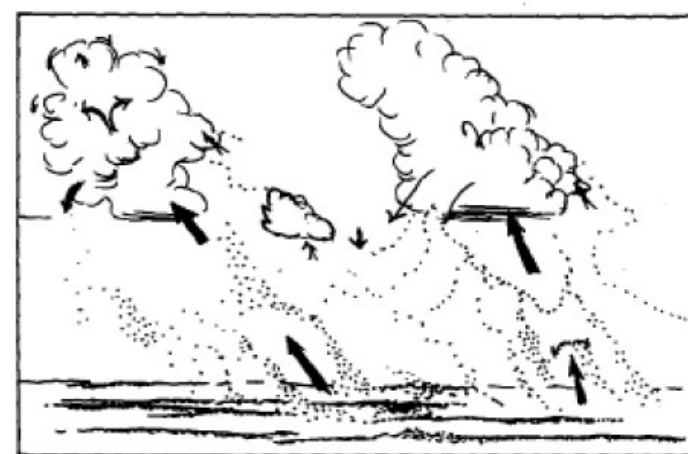
Cas III: 15 dec 1972 - 14h18



Les cumulus sont la partie saturée des thermiques initiés en surface



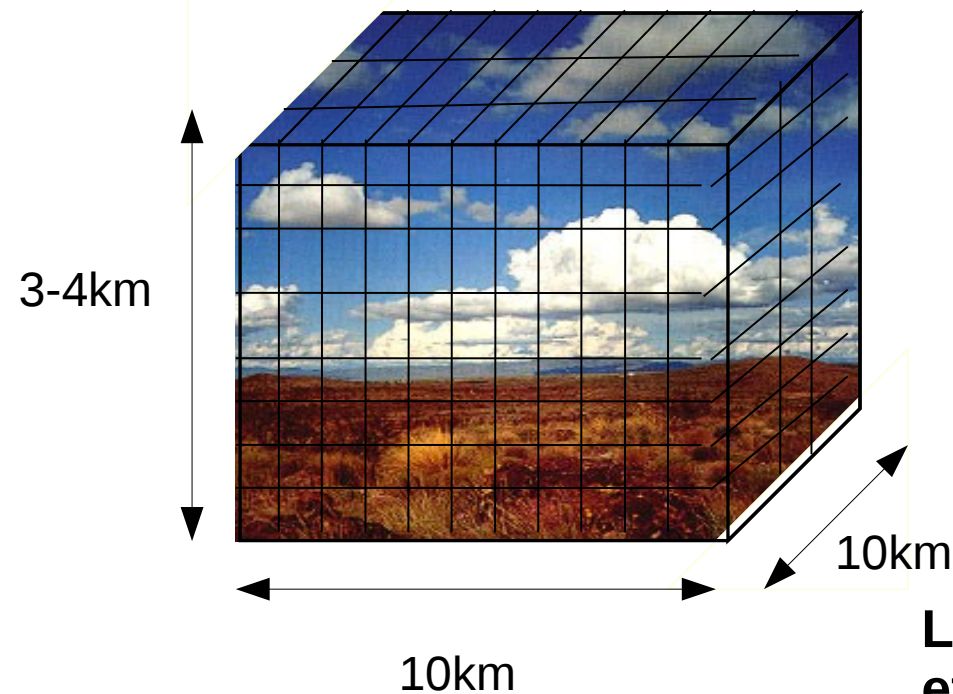
(a)



(b)

1.1 La couche limite nuageuse

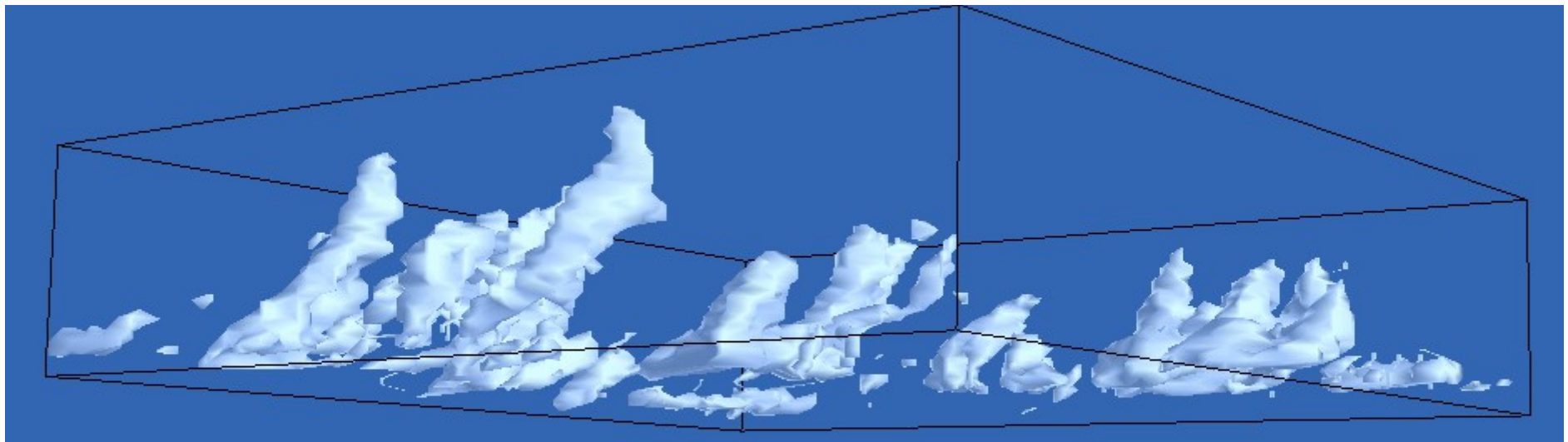
Apport des simulations des grands tourbillons: LES pour Large-Eddy Simulations



- Simulations à haute résolution: $\Delta x \sim \Delta y \sim 50\text{m}$
- Sur un domaine $10\text{km} \times 10\text{km} \times 4\text{km}$
- Pas de temps: $\Delta t \sim 2\text{s}$
- Forçages uniformes: flux de surface, profils initiaux, advections grande-échelle
- Conditions aux limites cycliques

Les structures cohérentes de la couche limite et les cumulus sont explicitement résolus

Champ de cumulus simulé:



1.1 La couche limite nuageuse

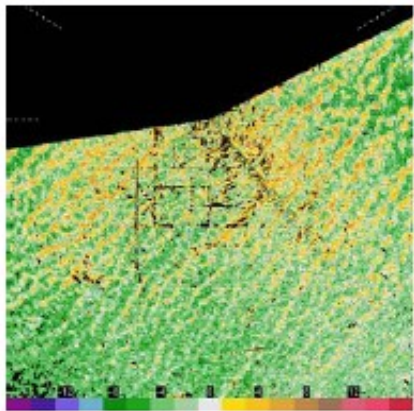
Apport des simulations des grands tourbillons

Avantages:

- champs 4D (x,y,z,t) des variables
- Simulent les structures de la couche limite sèche

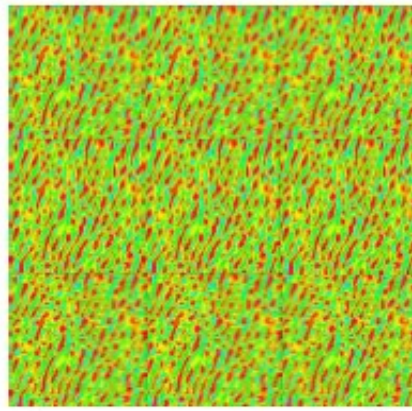
- Et les propriétés des nuages

Radar observations



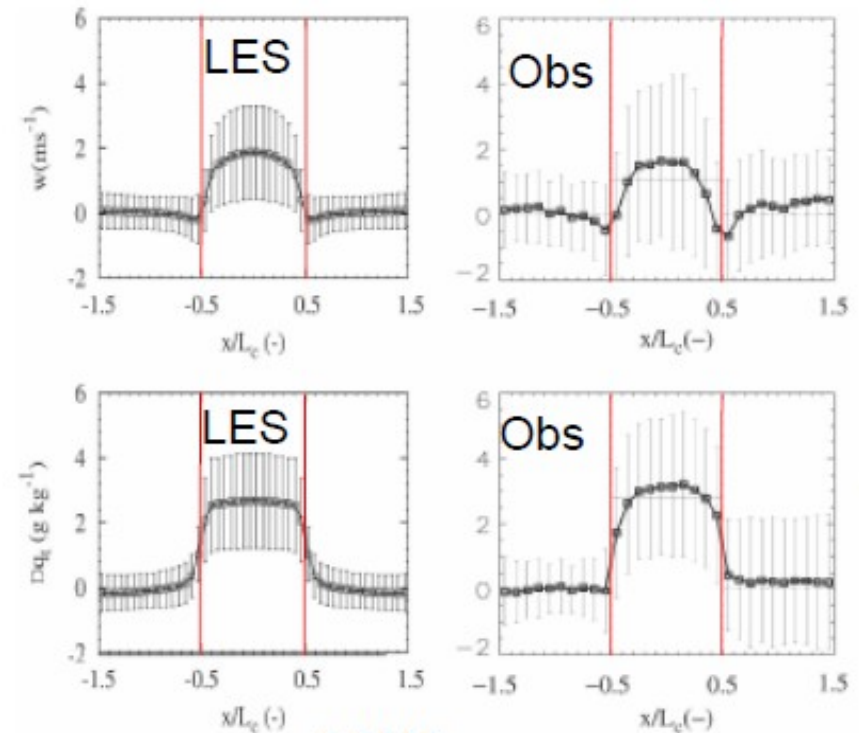
30 km

LES



30 km

Couvreur et al., BLM, 2005



Heus et al., JAS, 2008

Limitations:

- reposent sur des paramétrisation des processus “sous-maille” (turbulence diffuse, microphysique des nuages)
- lourd en temps de calcul: taille de domaine et durée des simulations limités

1.1 La couche limite nuageuse

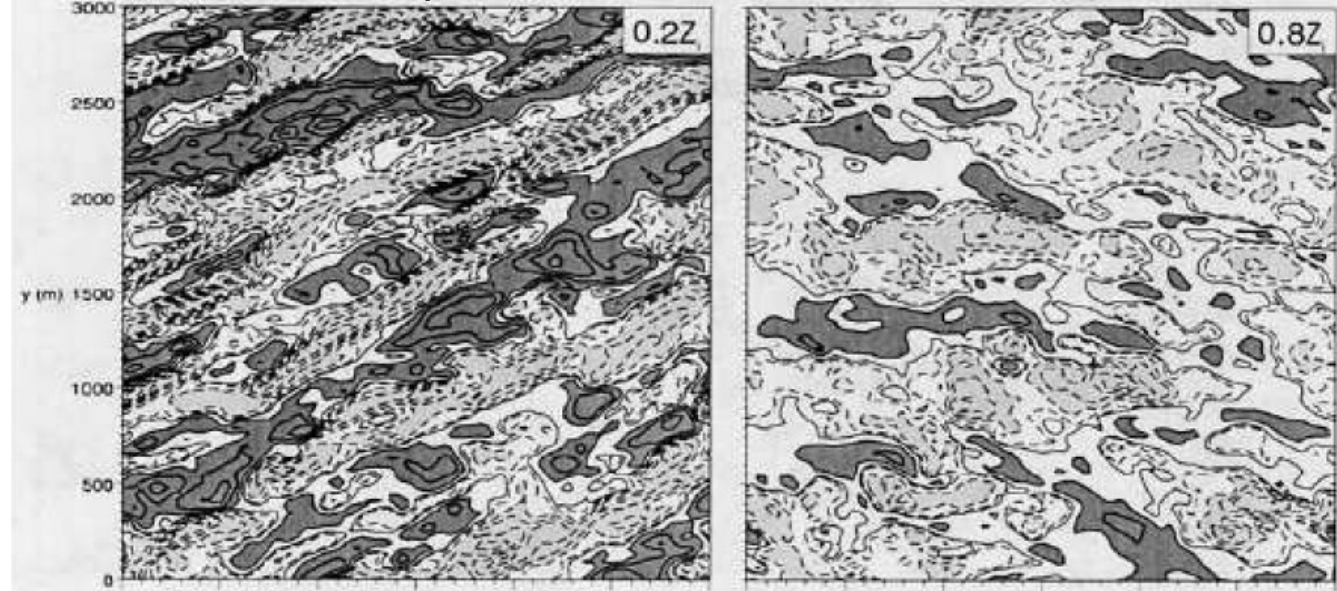
Apport des simulations des grands tourbillons: Etude des structures organisées

Expériences idéalisées

Cisaillement domine
Flux de surface nul

Alternance de bandes de vitesse forte et faible, alignées dans la direction du vent moyen, et qui disparaissent vers le milieu de la couche mélangée

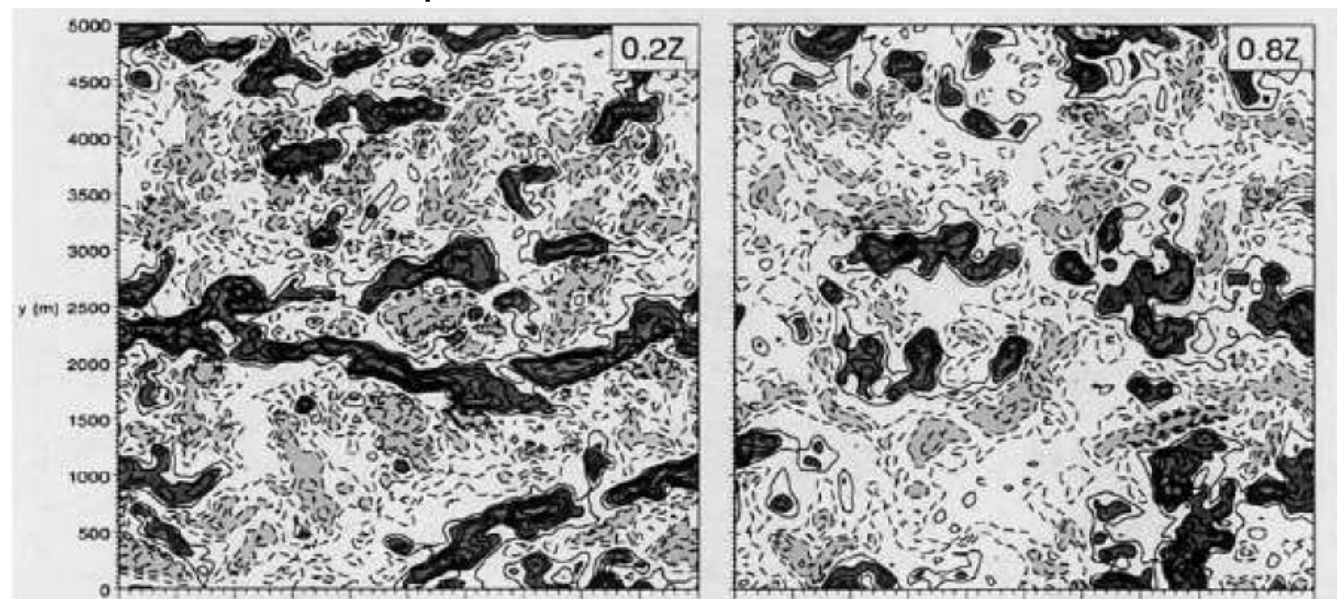
Contours de champs de vitesse horizontale



Flottabilité domine
Faible cisaillement de vent

Panaches ascendants sur toute la hauteur de la couche mélangée

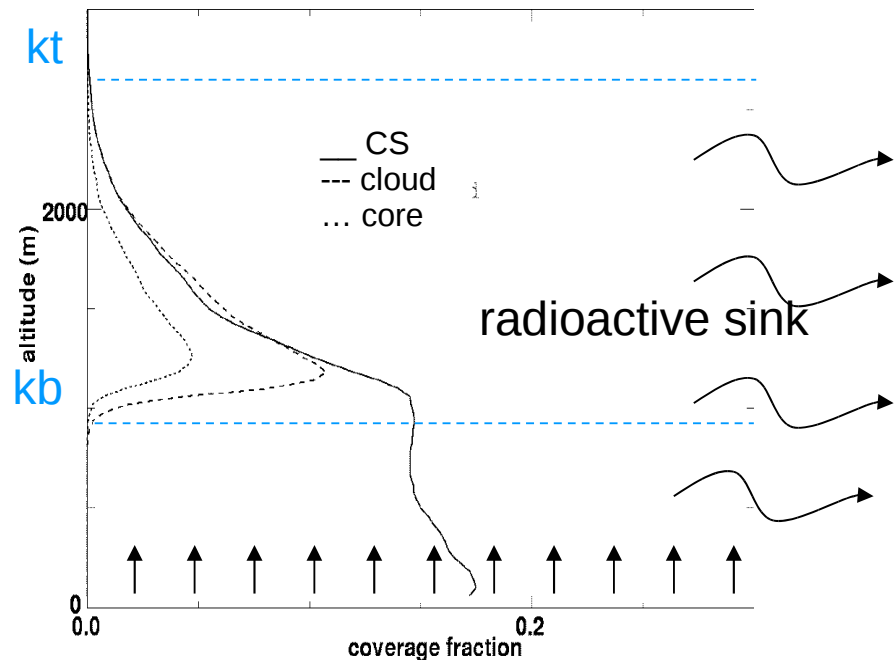
Contours de champs de vitesse verticale



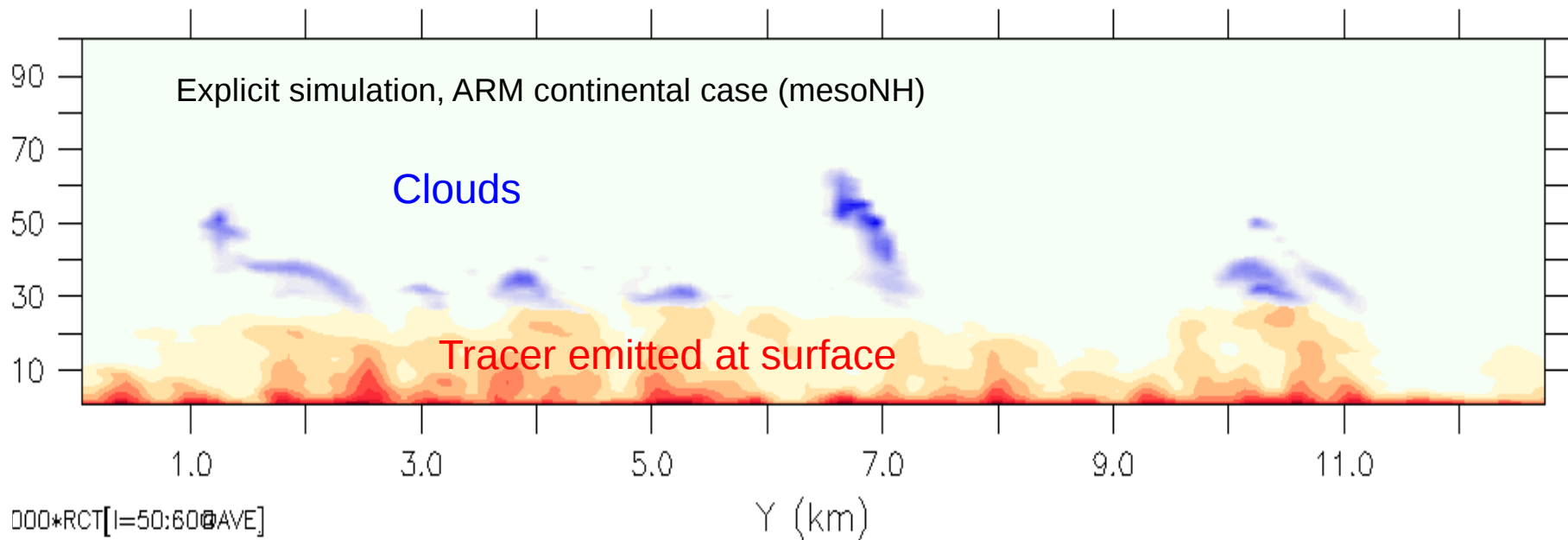
1.1 La couche limite nuageuse

Apport des simulations des grands tourbillons: Identification des thermiques

Emission d'un traceur en surface dont la concentration décroît dans le temps.



Détection des fortes concentrations de traceur pour identifier les structures thermiques

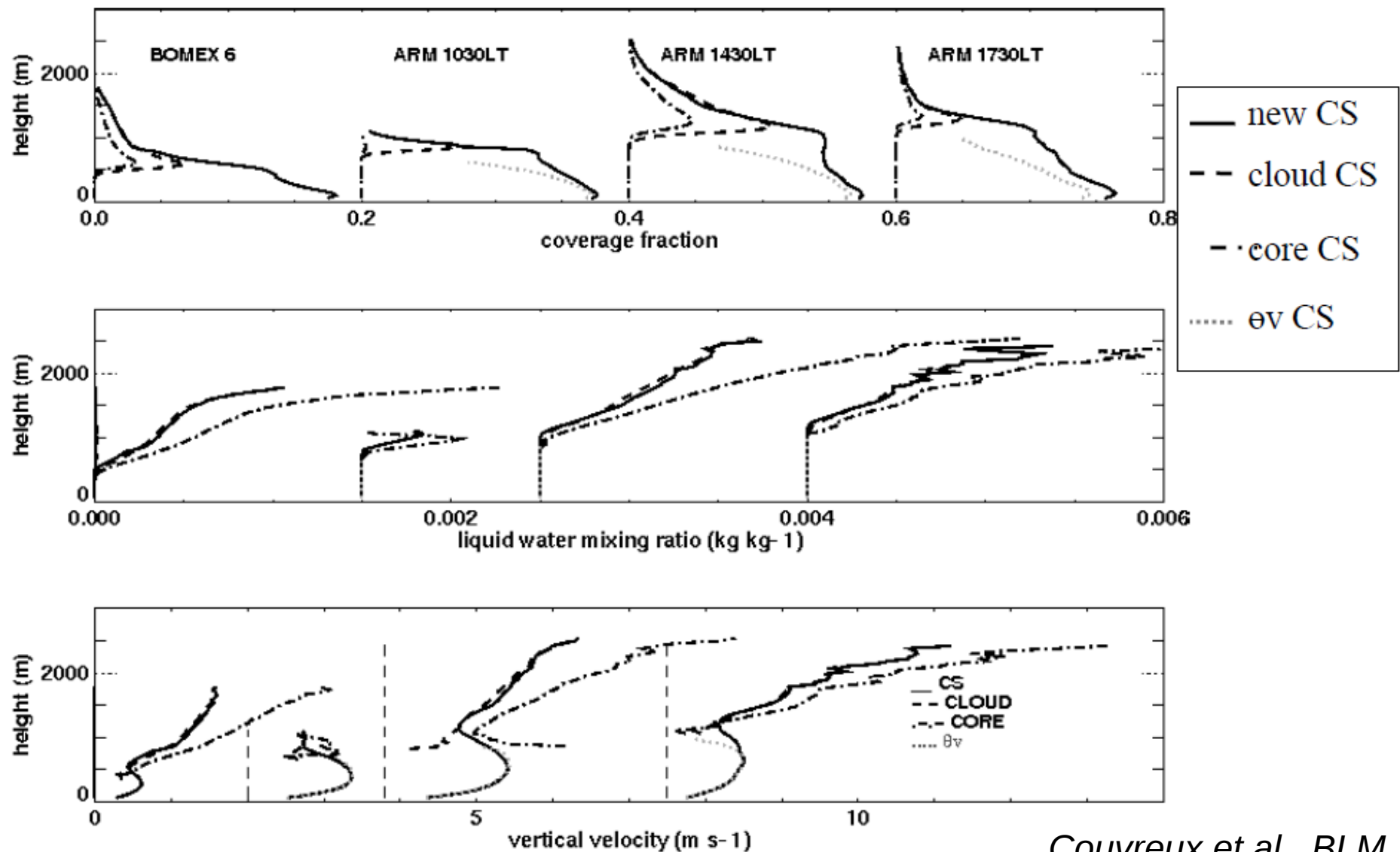


1.1 La couche limite nuageuse

Apport des simulations des grands tourbillons: Identification des thermiques

Cas de cumulus de beau temps en Oklahoma

Permet de calculer les caractéristiques moyennes des thermiques de couche limite, grandeurs difficilement mesurables: vitesse verticale, fraction couverte, température, humidité etc...



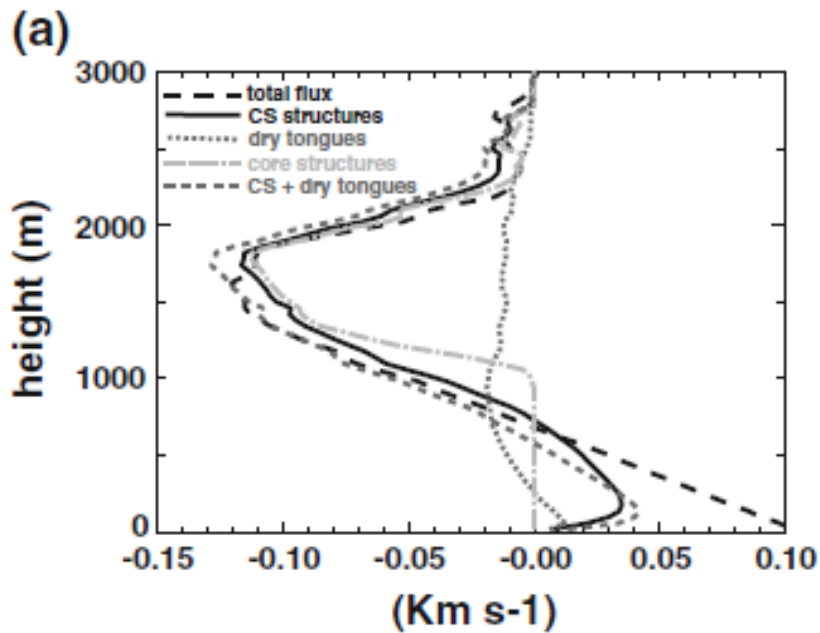
1.1 La couche limite nuageuse

Apport des simulations des grands tourbillons: Identification des thermiques
Cas de cumulus de beau temps en Oklahoma

Contribution des thermiques au flux total de chaleur et d'humidité

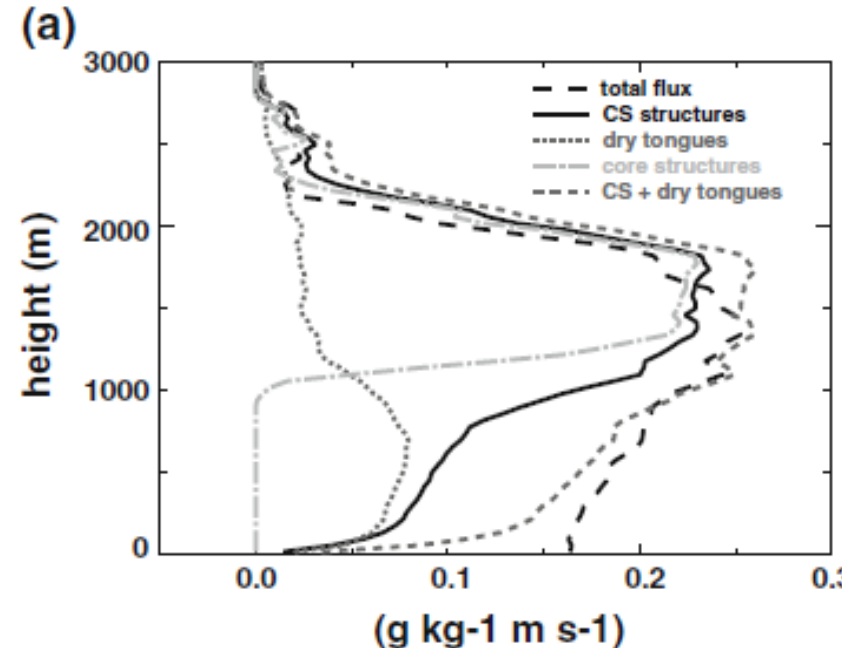
Contribution dominante dans la couche nuageuse, 50% en-dessous

Flux de chaleur



L'effet des thermiques est de réchauffer la couche mélangée et refroidir la couche nuageuse

Flux d'humidité



L'effet des thermiques est d'humidifier la couche limite sur toute sa hauteur

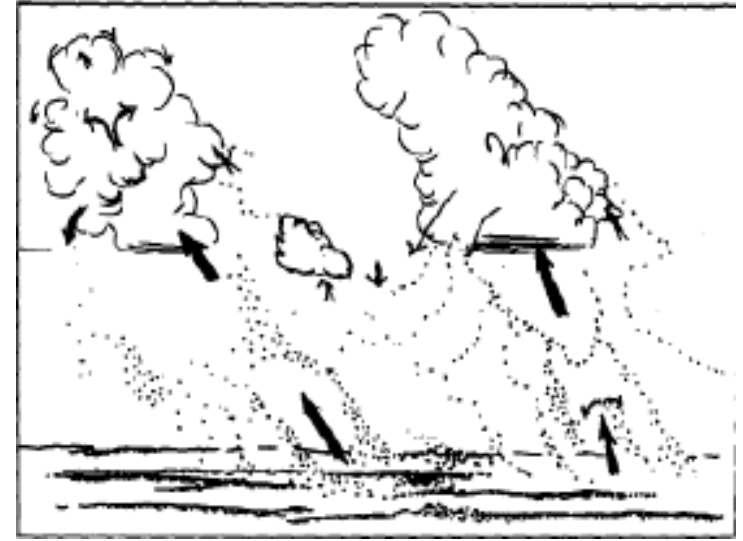
1.1 La couche limite nuageuse

Les différents champs d'étude

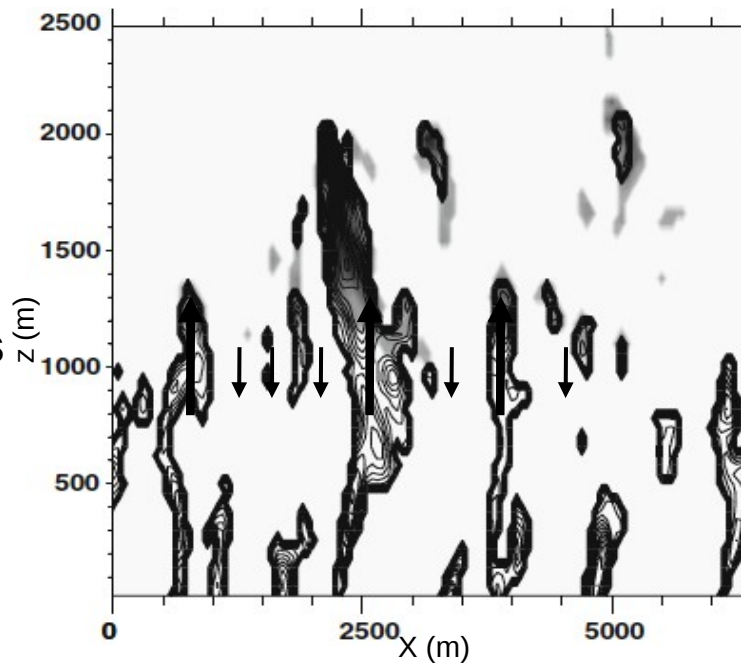
Observations
de
terrain



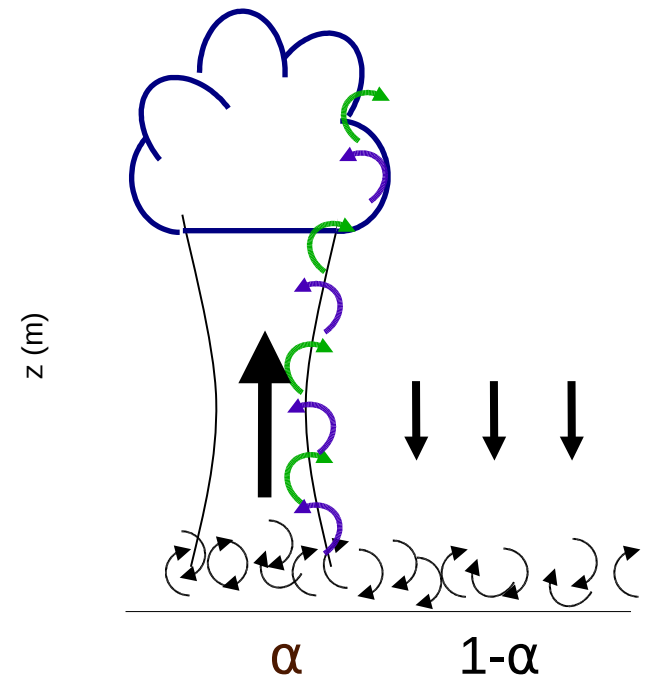
Schémas
conceptuels
simples



Etude des
processus
dans les
simulations
3D



Mise en
équation
dans les
modèles
de climat



1.2 La transition vers la convection profonde

Convection continentale aux moyennes latitudes

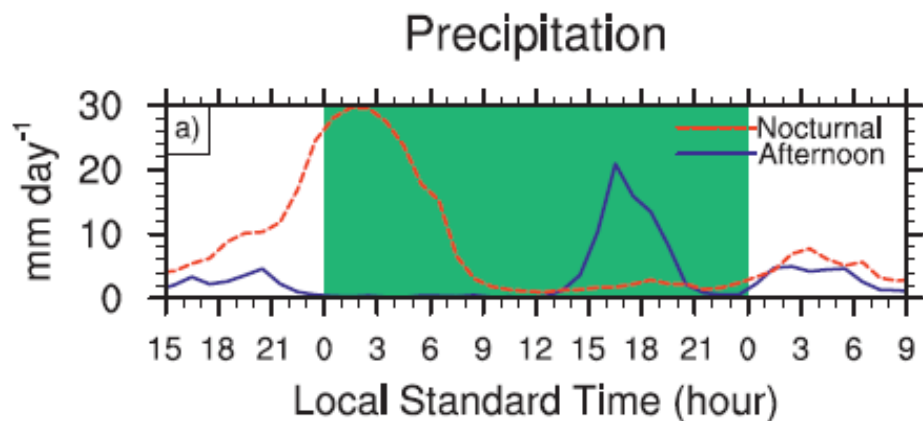
11 ans d'observations sur le site ARM en Oklahoma

Composites de cycles diurnes:

- sans nuages
- cumulus de beau temps
- convection orageuse en fin d'après-midi
- convection orageuse nocturne

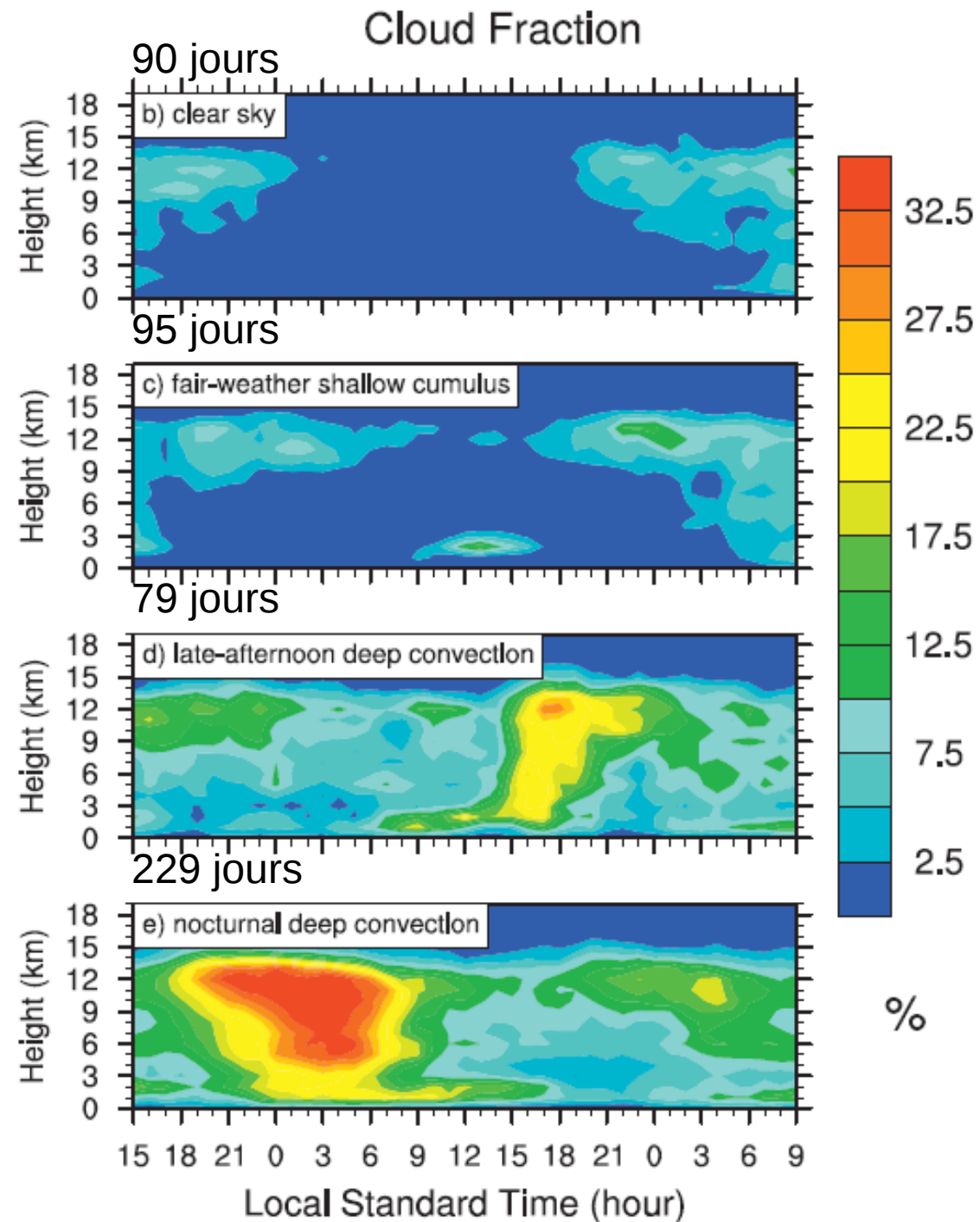
Pluies de fin d'après-midi: orages locaux

Pluies nocturnes: Systèmes propagatifs initiés sur les Rocheuses



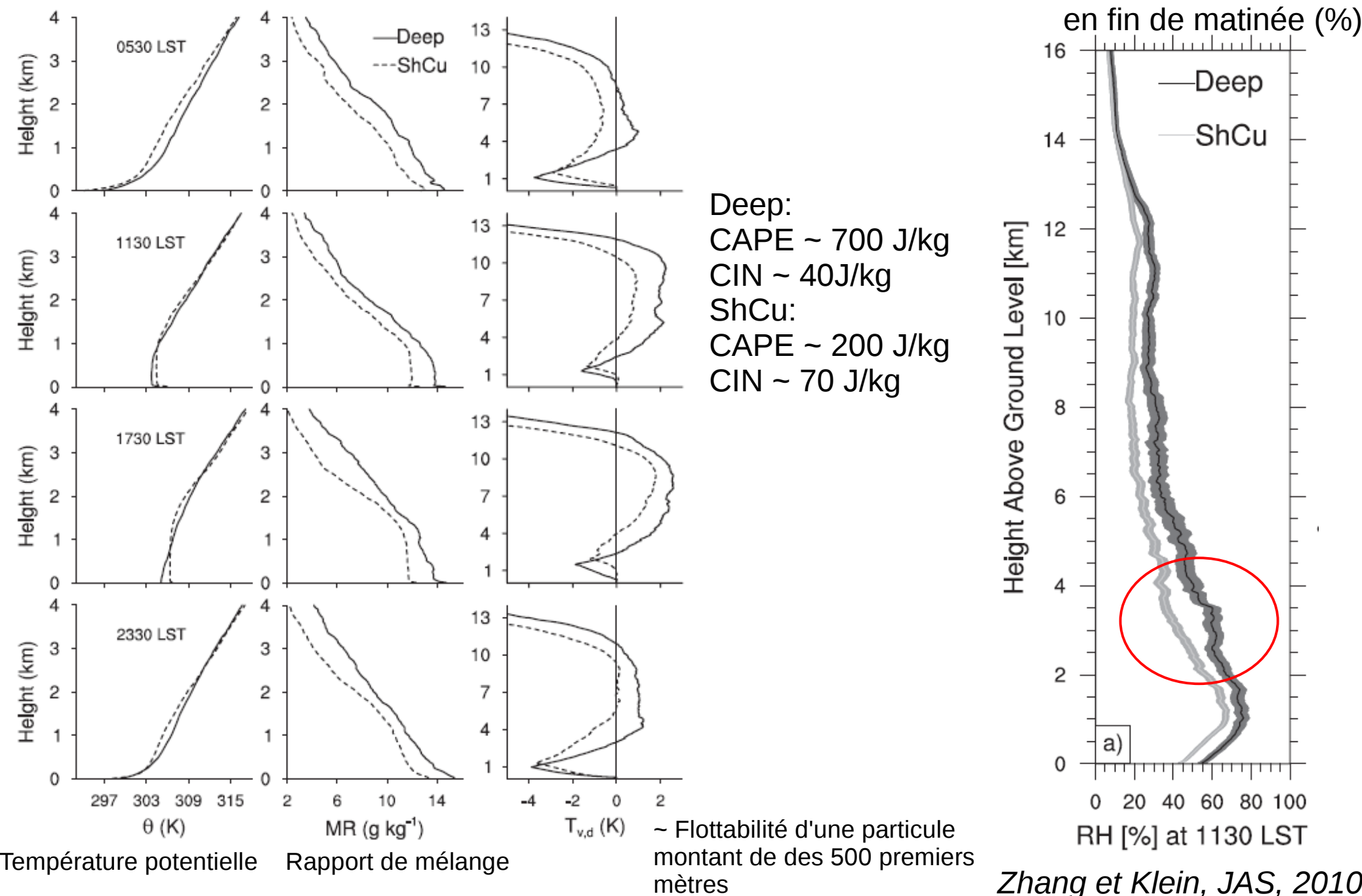
Pourquoi la convection orageuse se déclenche certains jours et d'autres pas?

Zhang et Klein, JAS, 2010



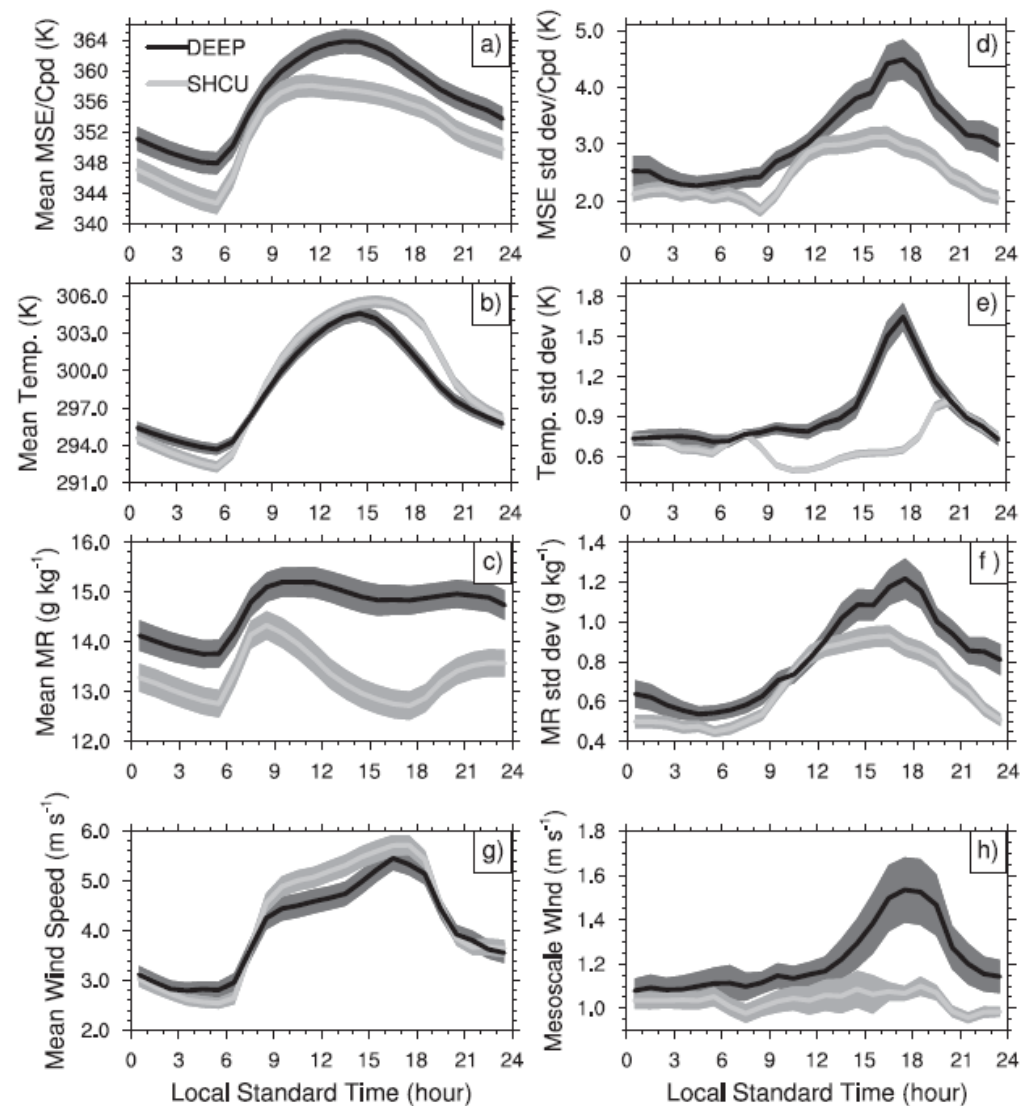
1.2 La transition vers la convection profonde

Conditions environnementales: cumulus de beau temps (ShCu pour shallow cumulus)
versus convection orageuse de fin d'après-midi (Deep)

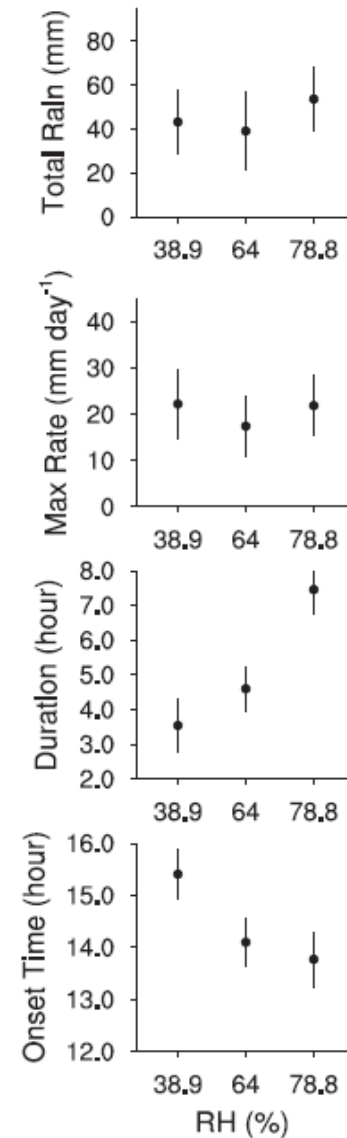


1.2 La transition vers la convection profonde

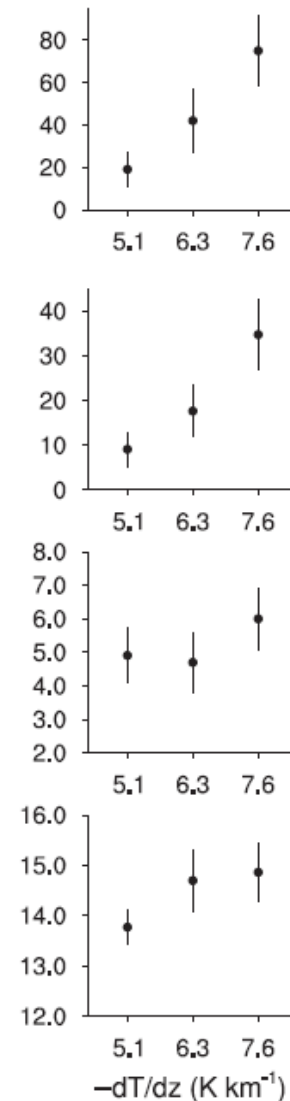
Rôle des inhomogénéités dans la couche limite?



Rôle de l'humidité relative entre 2 et 4km?



Rôle du gradient de température entre 2 et 4km?



1.2 La transition vers la convection profonde

Orage local en région semi-aride: le 10 juillet 2006 à Niamey

Images MSG

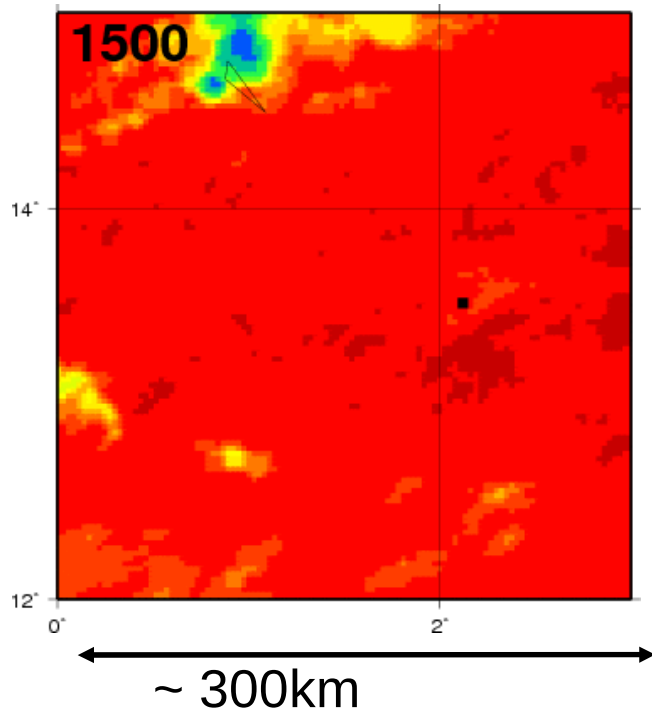
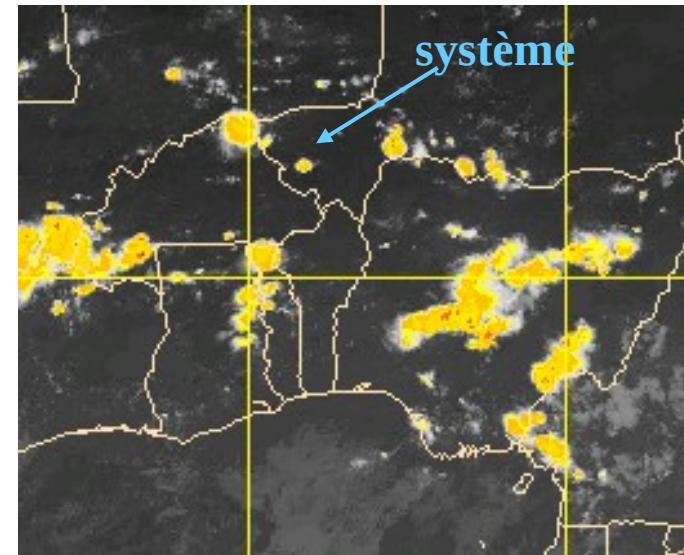
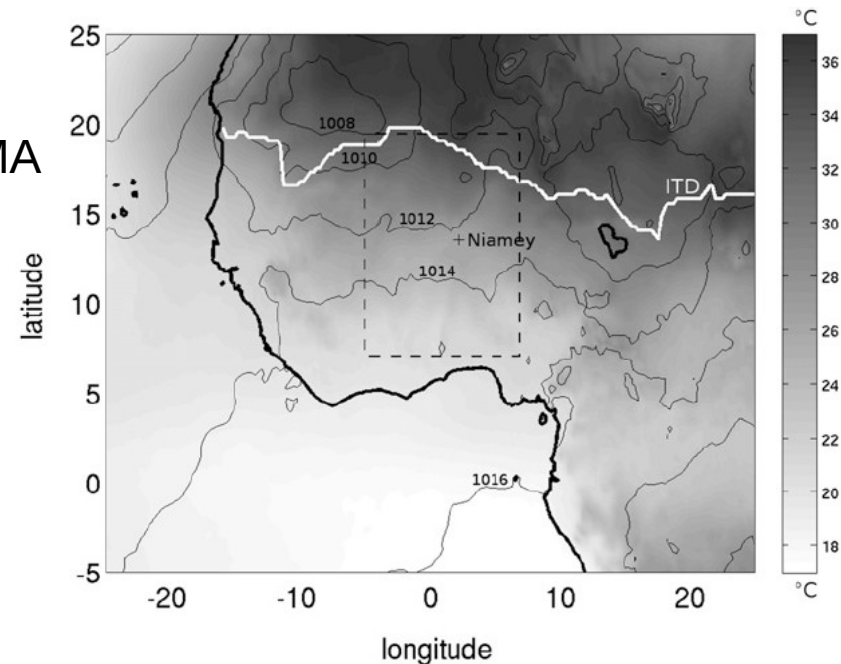


Image Météosat IR-10.8 à 1800 UTC



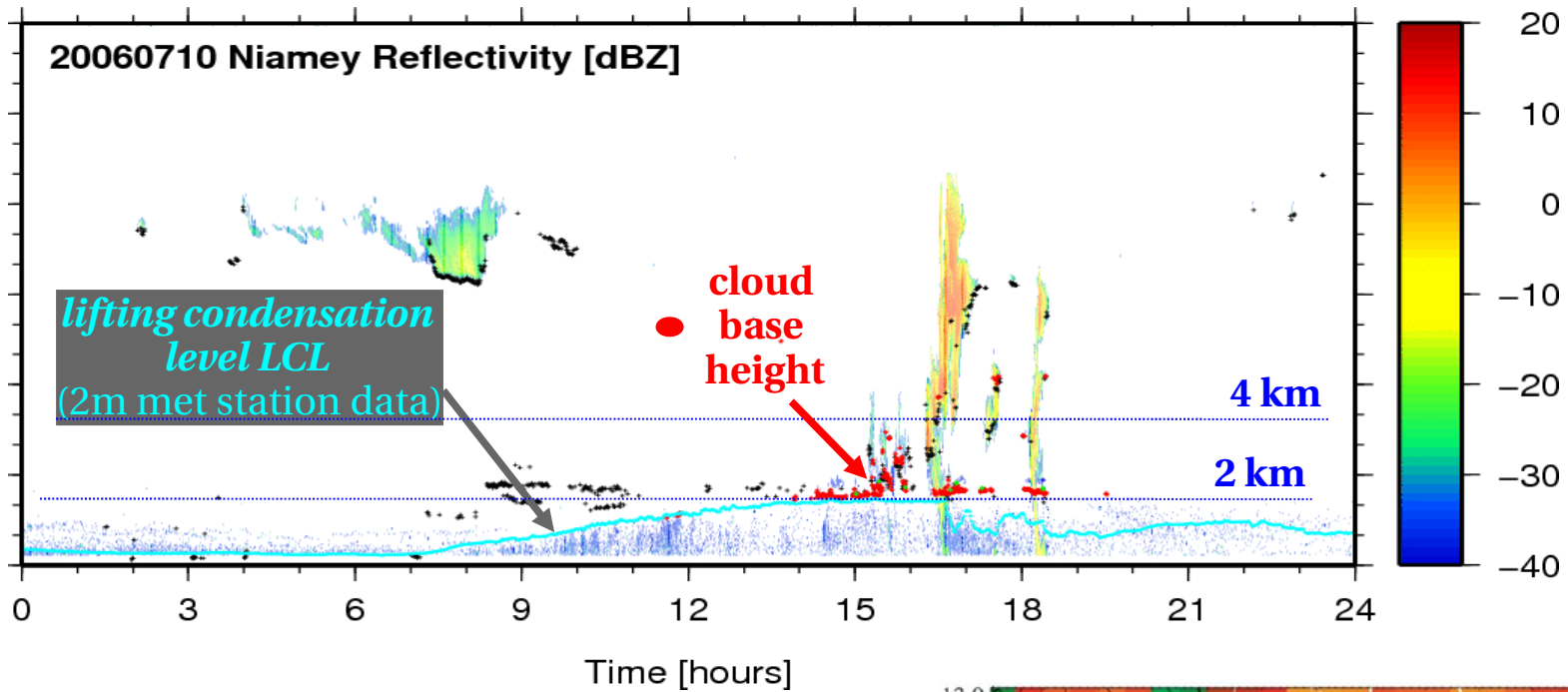
Système observé dans le cadre de la campagne AMMA

- Instruments de la ARM Mobile Facility
- RADAR MIT
- Radiosondages au-dessus de Niamey
- vol ATR
- flux de surface
- images satellite



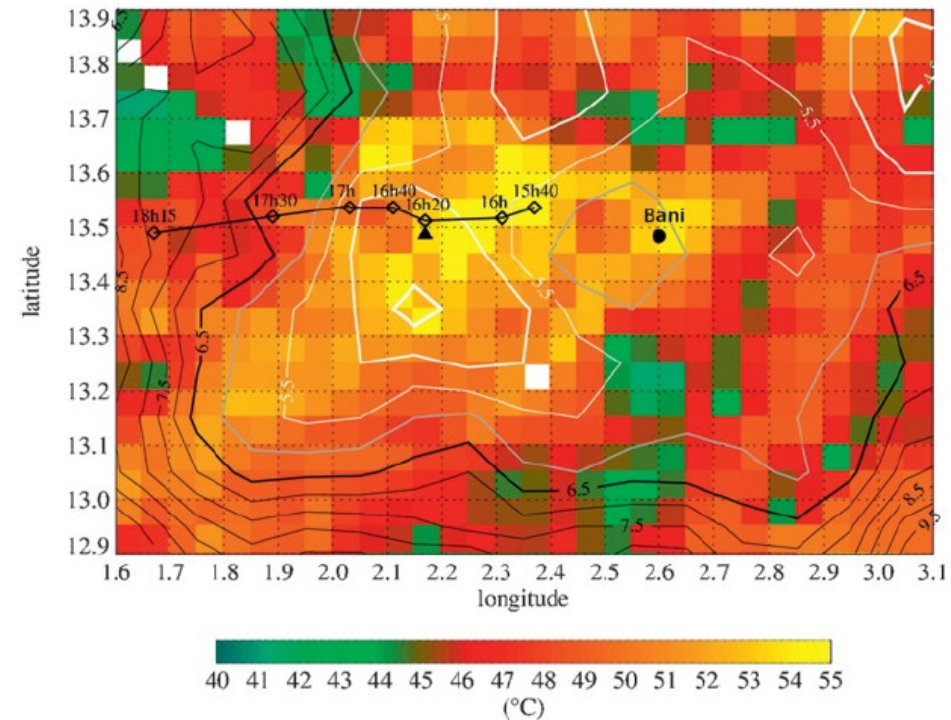
1.2 La transition vers la convection profonde

Orage local en région semi-aride: le 10 juillet 2006 à Niamey



Température de surface (couleurs) et humidité du sol (contours) observés à 12h et trajectoire du système convectif

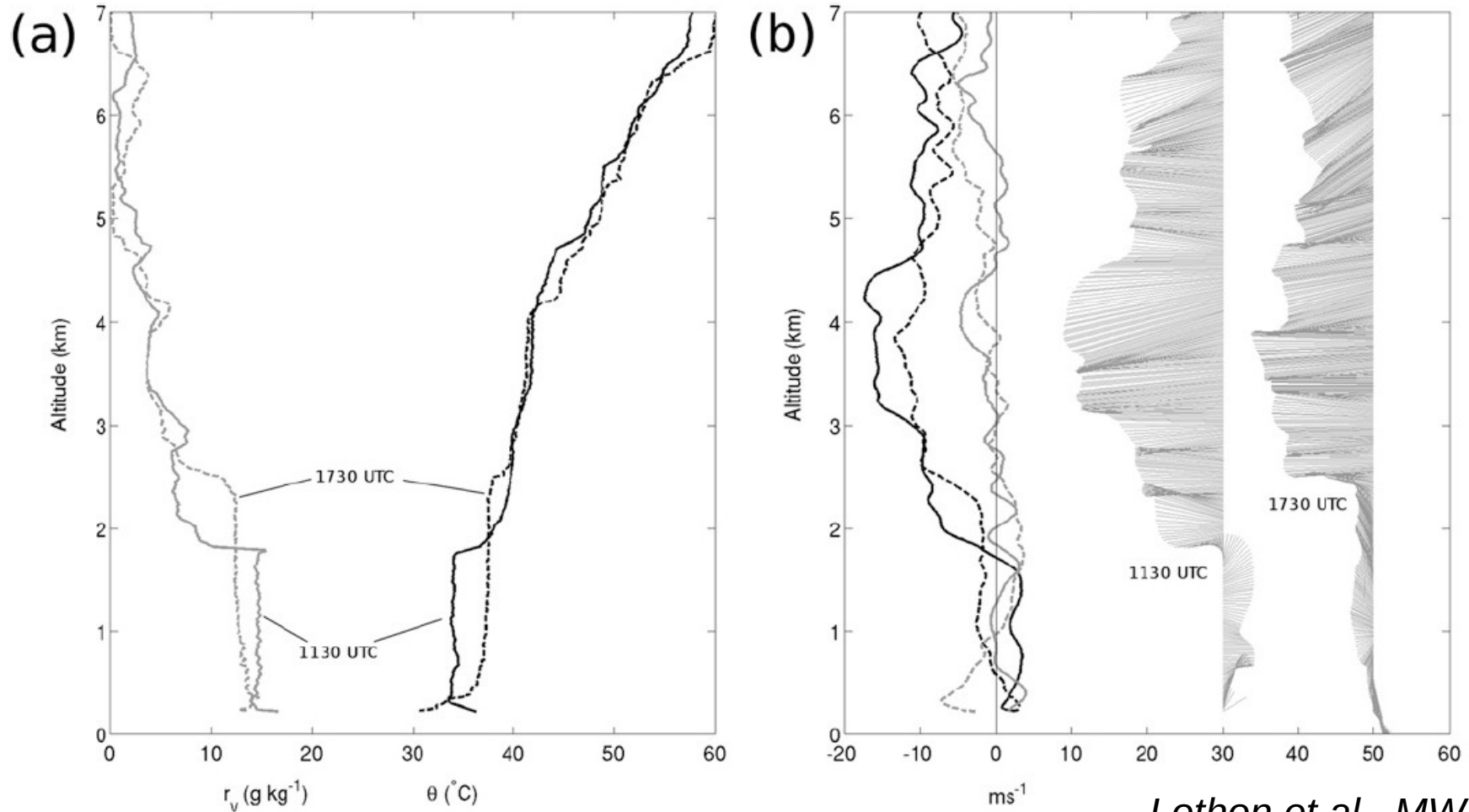
Le système s'initie sur un patch chaud:
Rôle des hétérogénéités de surface?



1.2 La transition vers la convection profonde

Orage local en région semi-aride: le 10 juillet 2006 à Niamey

Radiosondages de θ , r_v et du vent à 1130UTC et 1730UTC



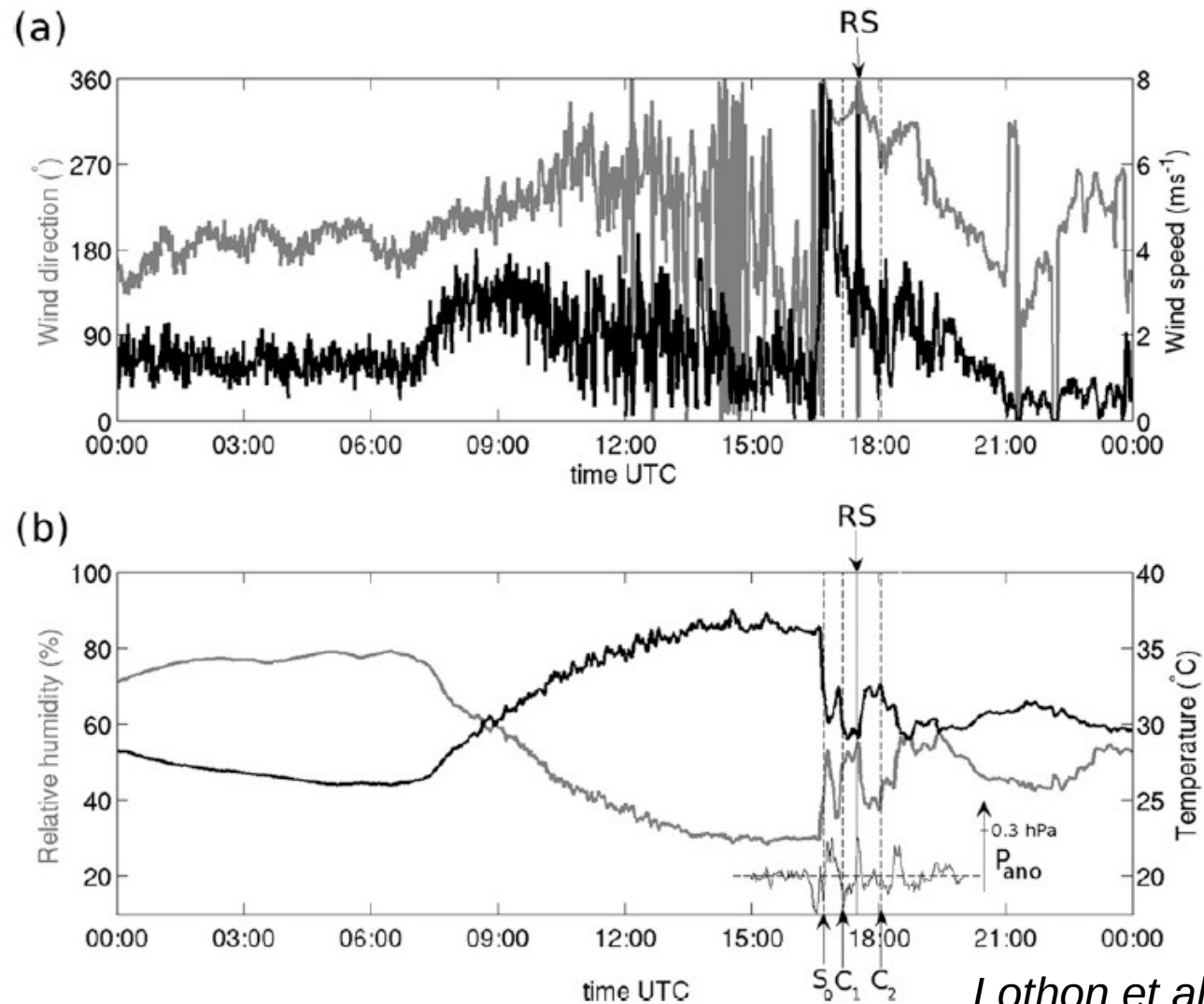
Lothon et al., MWR, 2011

- Réchauffement et assèchement de la couche mélangée
- fort cisaillement en sommet de couche mélangé
- Effet du front de rafale sur les profils à 130UTC

1.2 La transition vers la convection profonde

Orage local en région semi-aride: le 10 juillet 2006 à Niamey

Cycle diurne du vent, de l'humidité relative et de la température en surface



Lothon et al., MWR, 2011

Trace du passage de plusieurs fronts de rafale successifs:
augmentation du vent, chute de température et augmentation de l'humidité

1.2 La transition vers la convection profonde

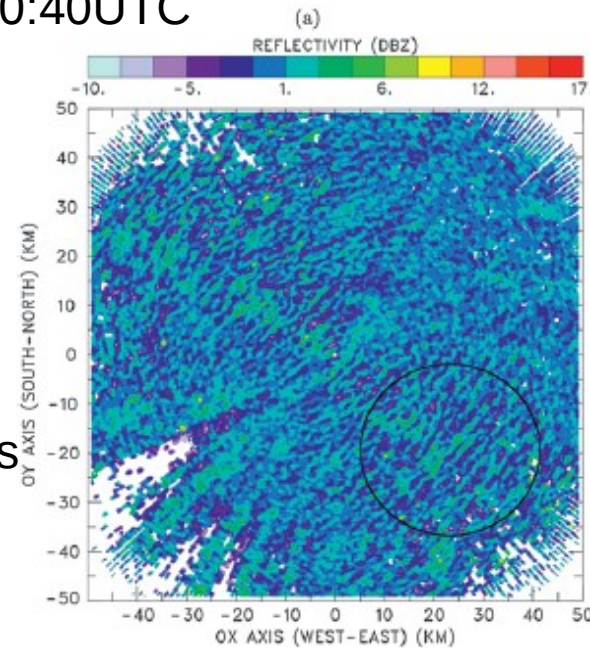
Orage local en région semi-aride: le 10 juillet 2006 à Niamey

Développement des structures organisées de la couche limite

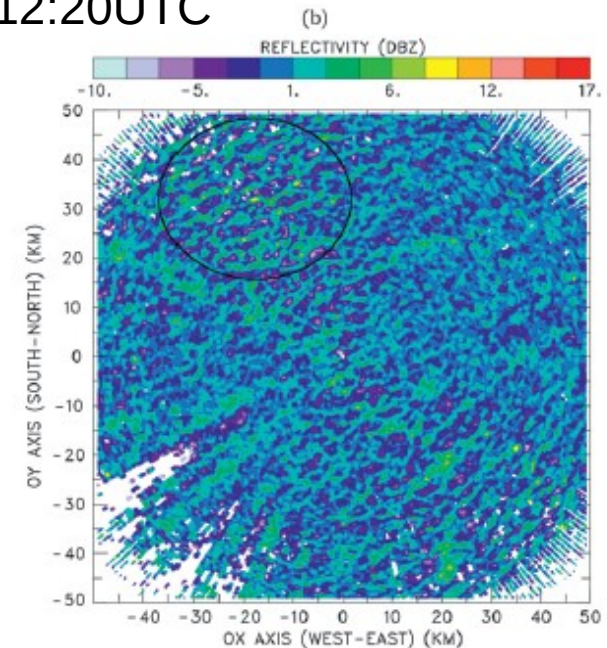
Coupes horizontales à 600m de la réflectivité du RADAR du MIT

- Passage progressif d'une organisation en rouleaux en organisation en cellules
- Augmentation progressive des échelles horizontales des structures

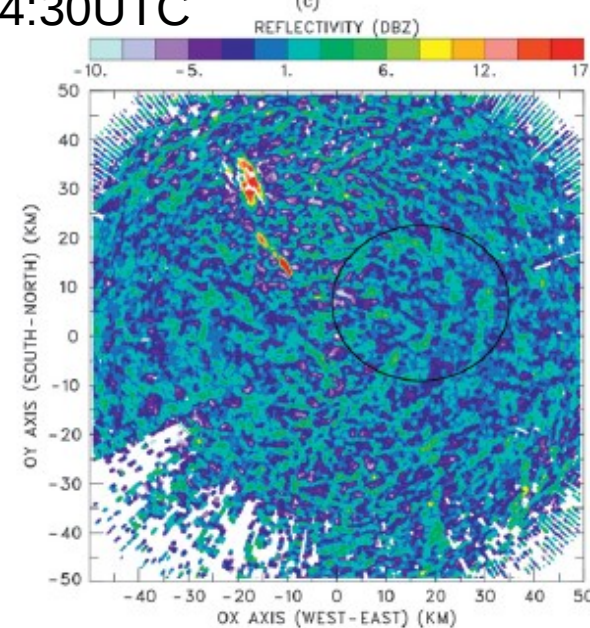
10:40UTC



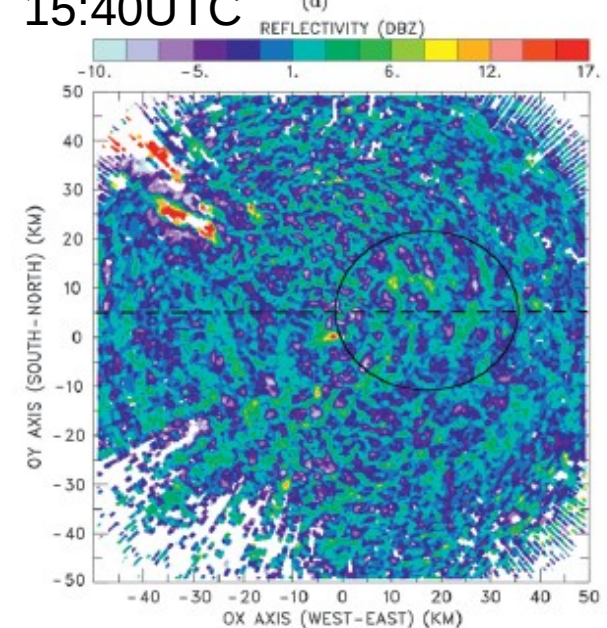
12:20UTC



14:30UTC



15:40UTC

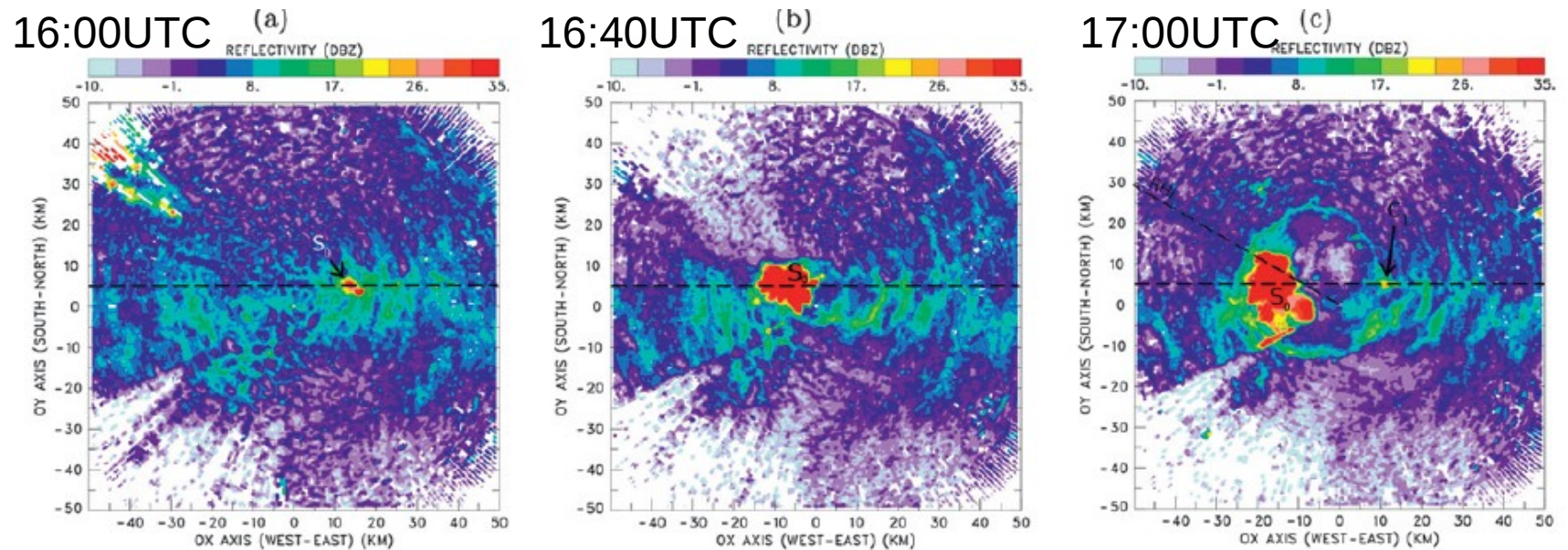


1.2 La transition vers la convection profonde

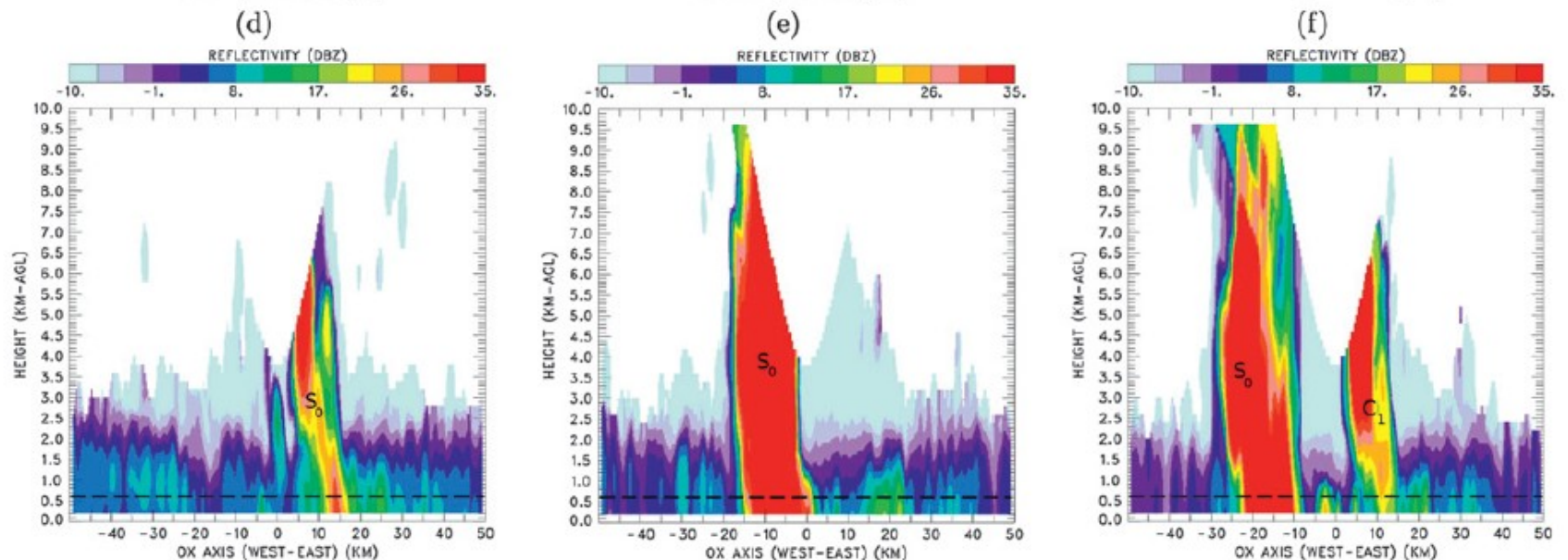
Orage local en région semi-aride: le 10 juillet 2006 à Niamey

Développement des structures organisées associées à la convection profonde

Coupe
horizontale
à 600m



Coupe verticale
5km au nord du
RADAR



Lothon et al., MWR, 2011

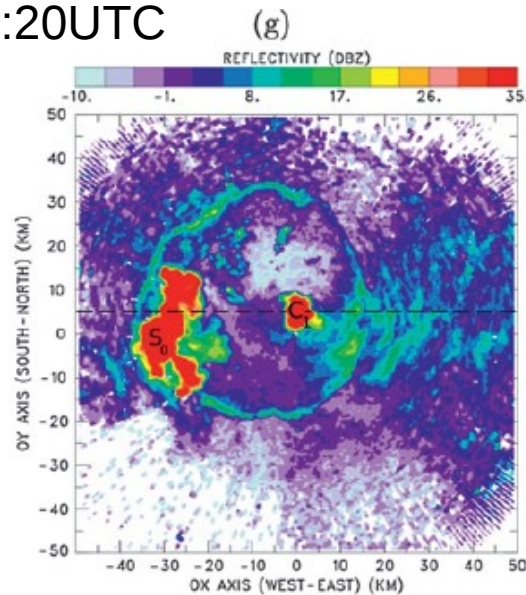
1.2 La transition vers la convection profonde

Orage local en région semi-aride: le 10 juillet 2006 à Niamey

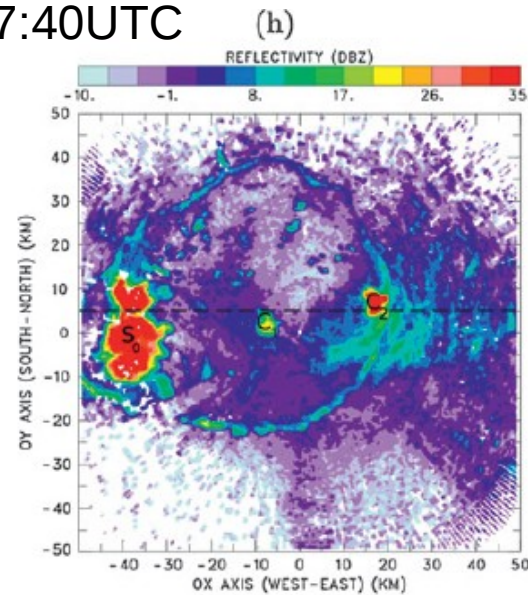
Développement des structures organisées associées à la convection profonde

Coupe
horizontale
à 600m

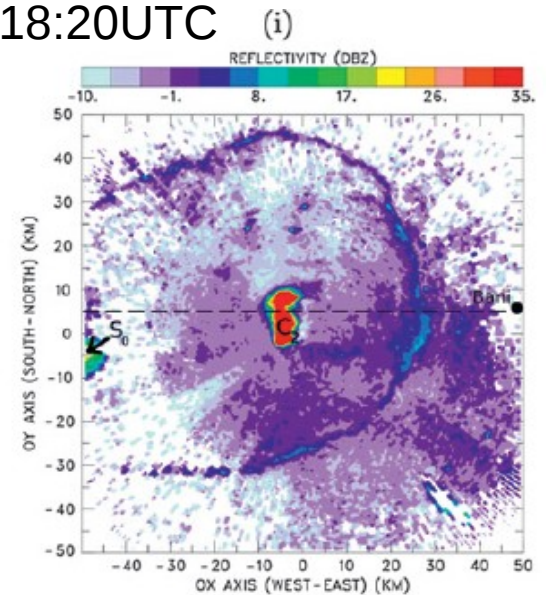
17:20UTC



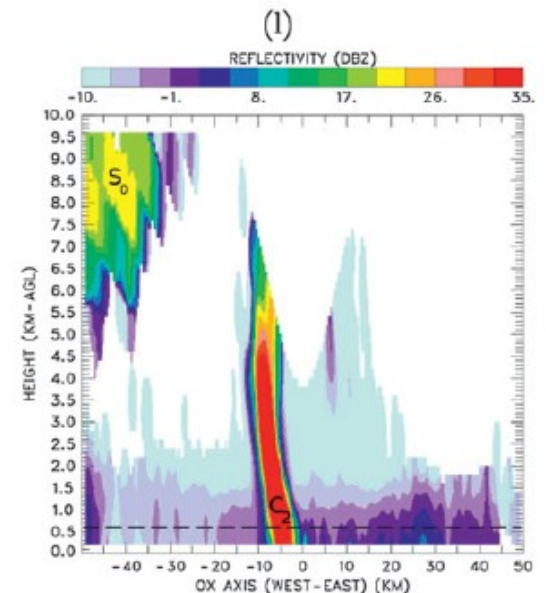
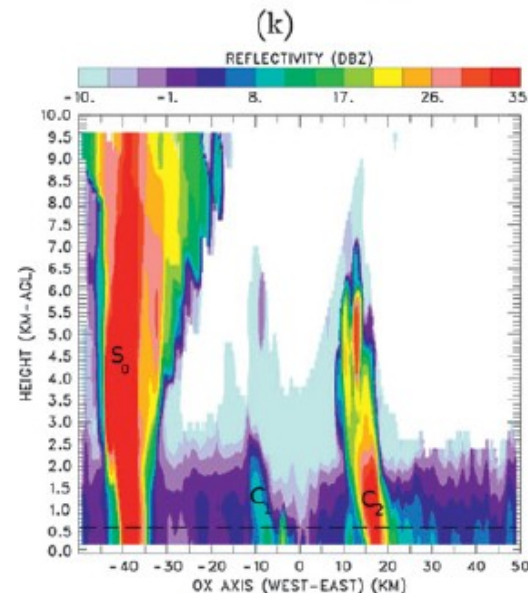
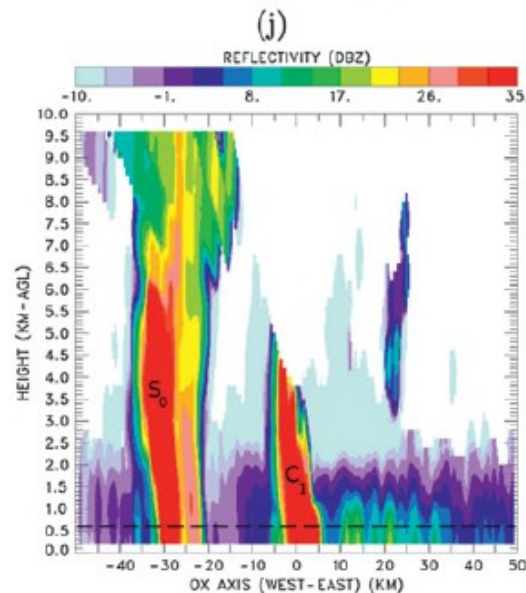
17:40UTC



18:20UTC



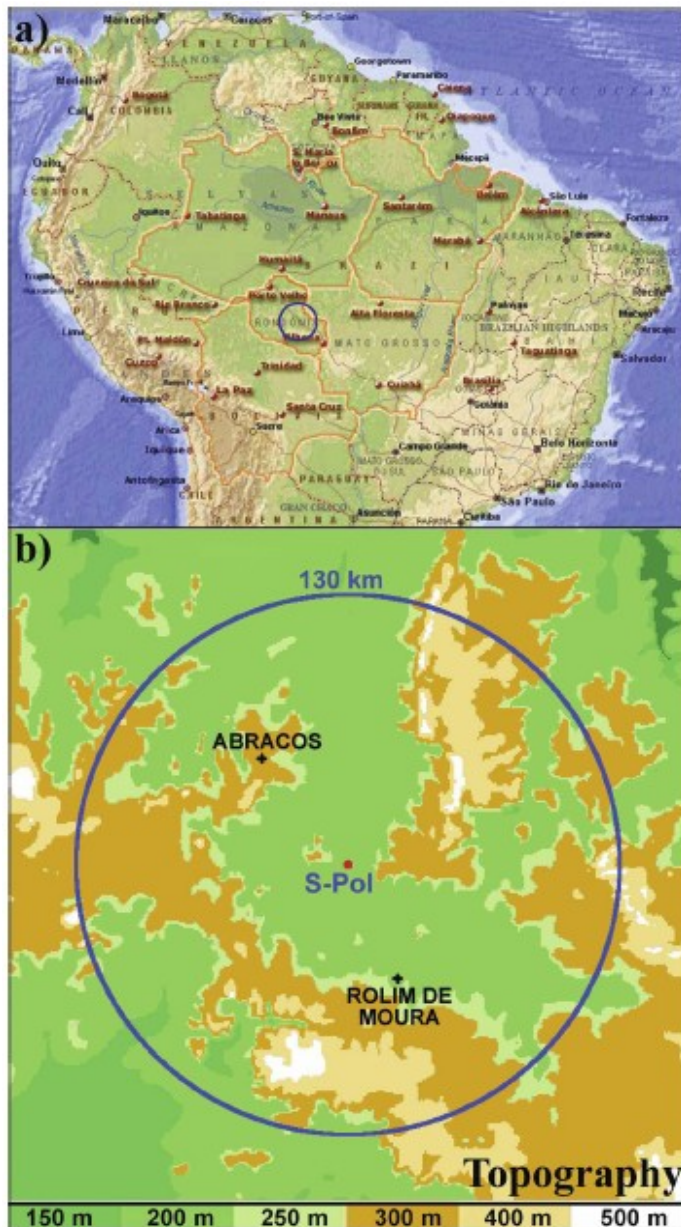
Coupe verticale
5km au nord du
RADAR



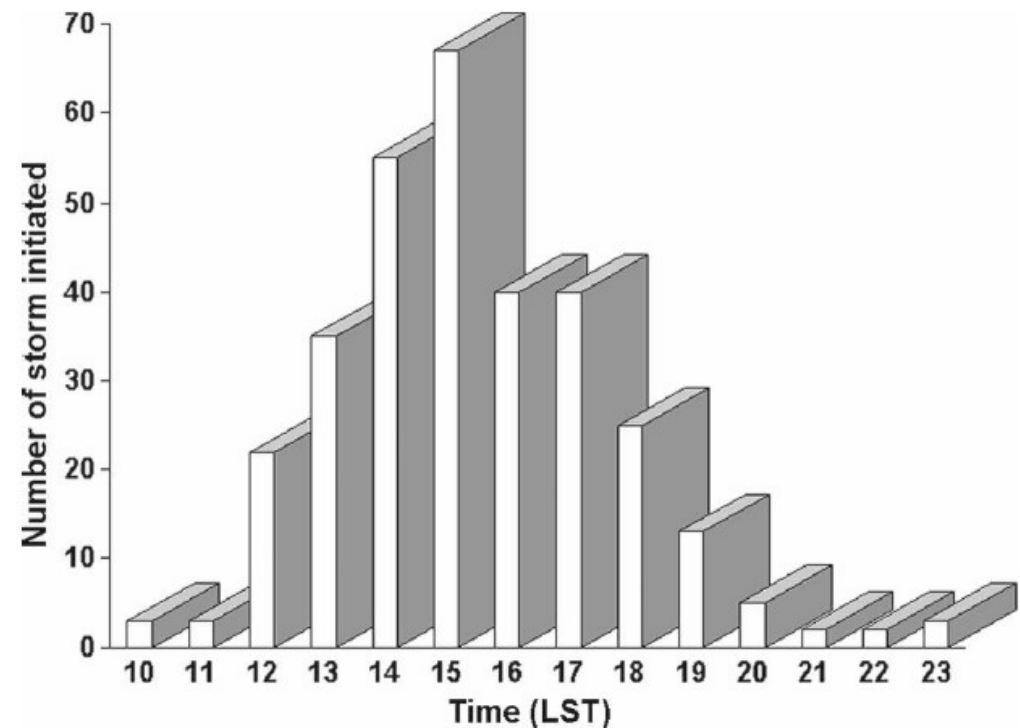
1.2 La transition vers la convection profonde

Initiation de systèmes convectifs dans un environnement tropical humide

5 février 1999 en Amazonie: 315 orages initiés dans un rayon de 130km



Heure locale d'initiation des systèmes



Classification en 4 catégories de cause d'initiation:

- Soulèvement par un front de rafale (GF)
- Soulèvement par topographie (TF)
- Collision entre fronts de rafale (CB)
- Pas de mécanisme identifié (UC)

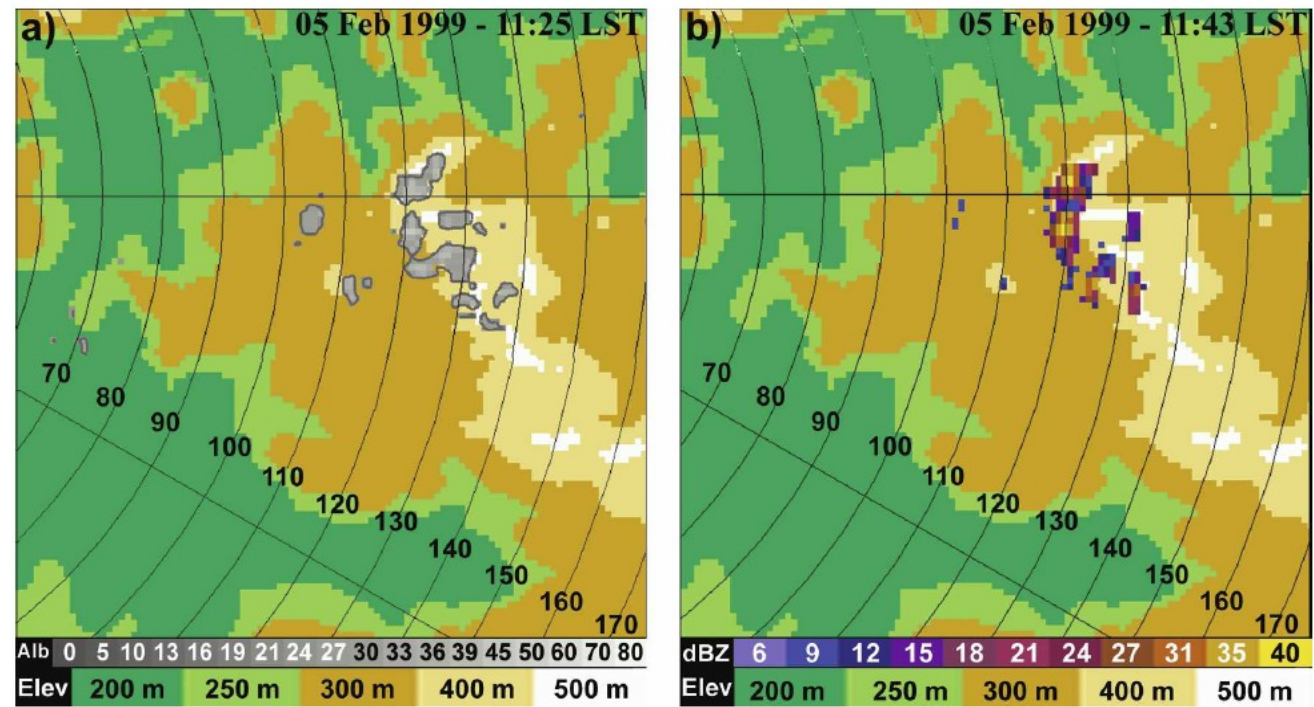
Région d'étude, sites d'observations et topographie

Lima et Wilson, MWR, 2008

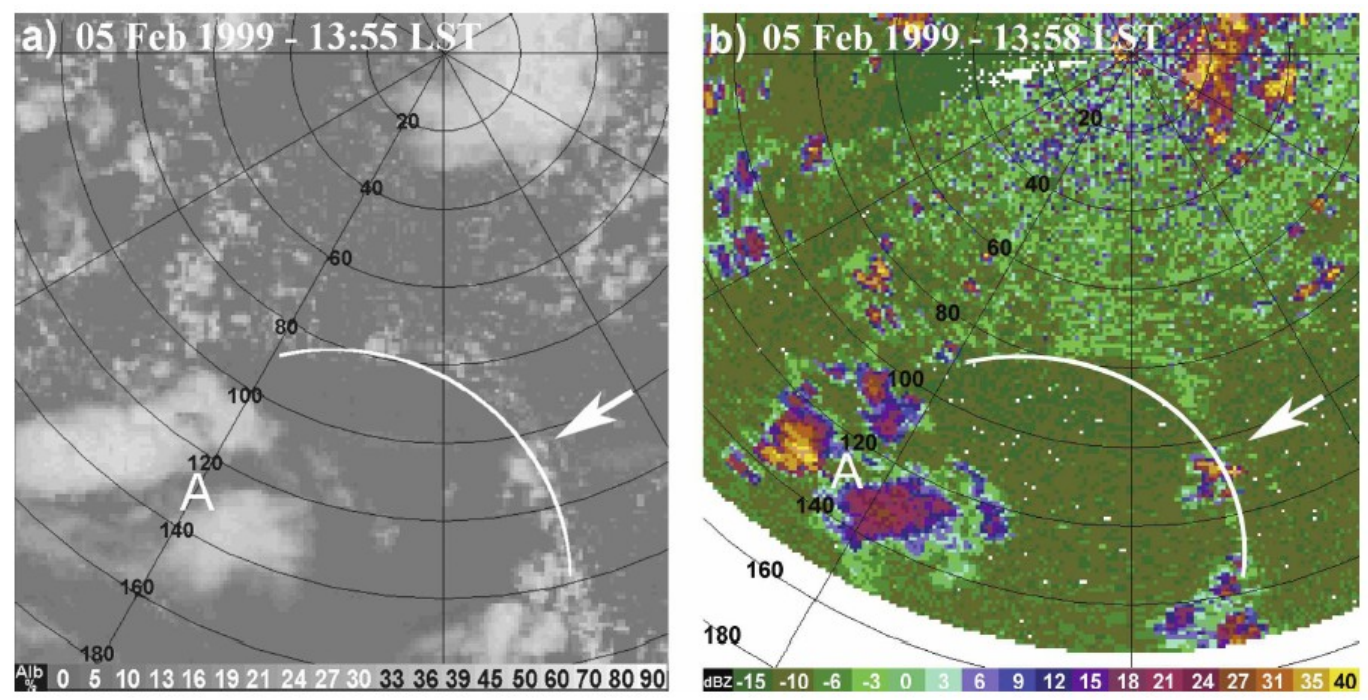
1.2 La transition vers la convection profonde

Initiation de systèmes convectifs dans un environnement tropical humide

Exemple d'initiation sur terrain élevé supérieur à 300m



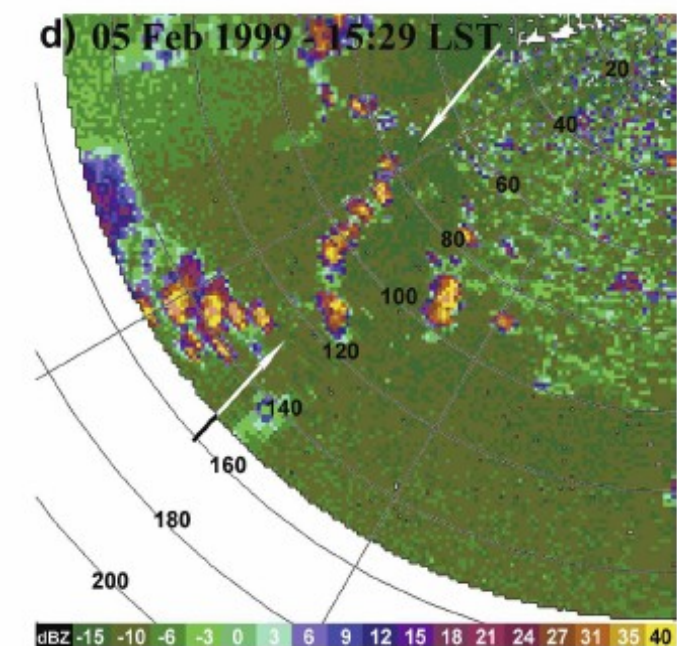
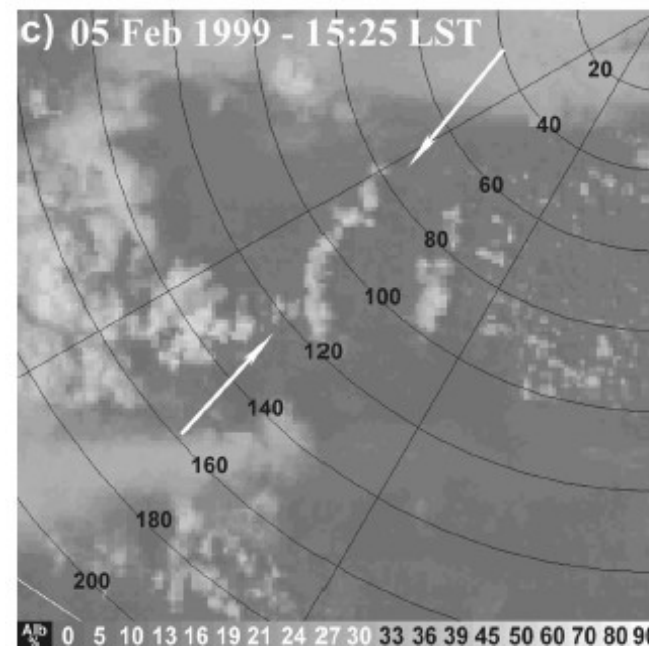
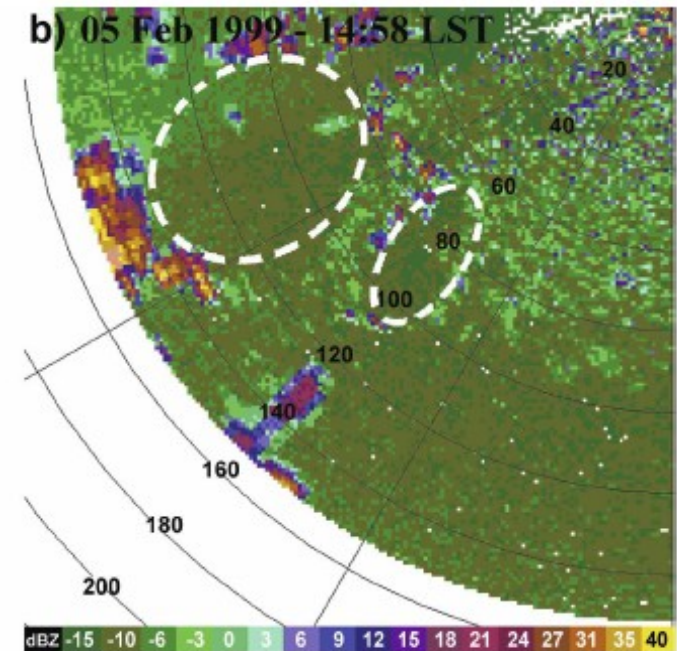
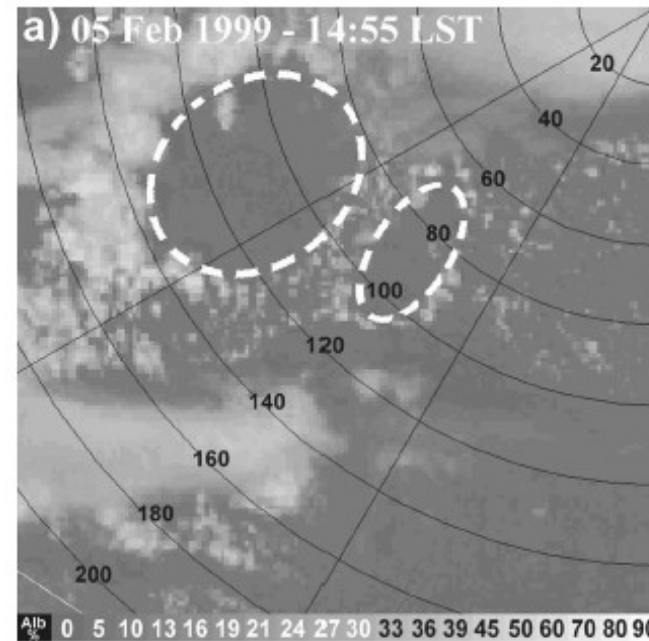
Exemple d'initiation par soulèvement d'un front de rafale



1.2 La transition vers la convection profonde

Initiation de systèmes convectifs dans un environnement tropical humide

Exemple d'initiation par collision de deux fronts de rafale



1.2 La transition vers la convection profonde

Initiation de systèmes convectifs dans un environnement tropical humide

Pourcentage d'occurrence de chaque type d'initiation

GF: Soulèvement par un front de rafale
TF: Soulèvement par topographie
CB: Collision entre fronts de rafale
UC: Pas de mécanisme identifié

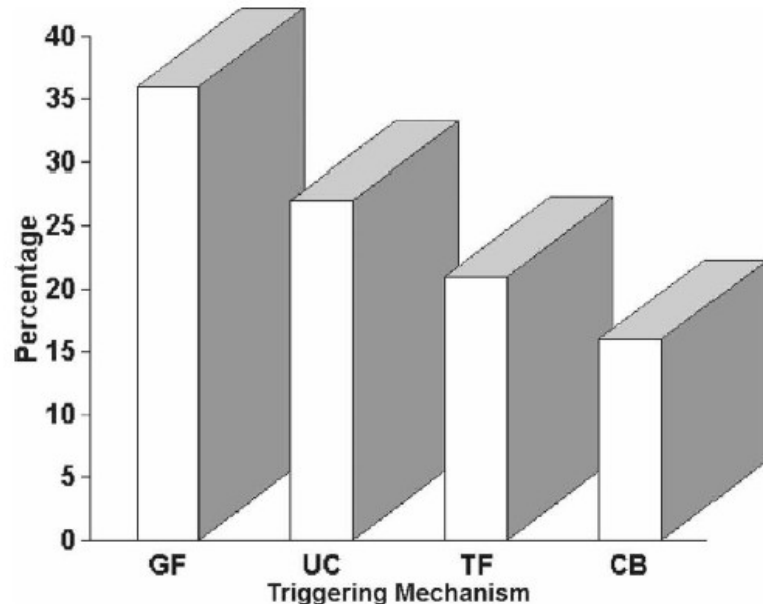
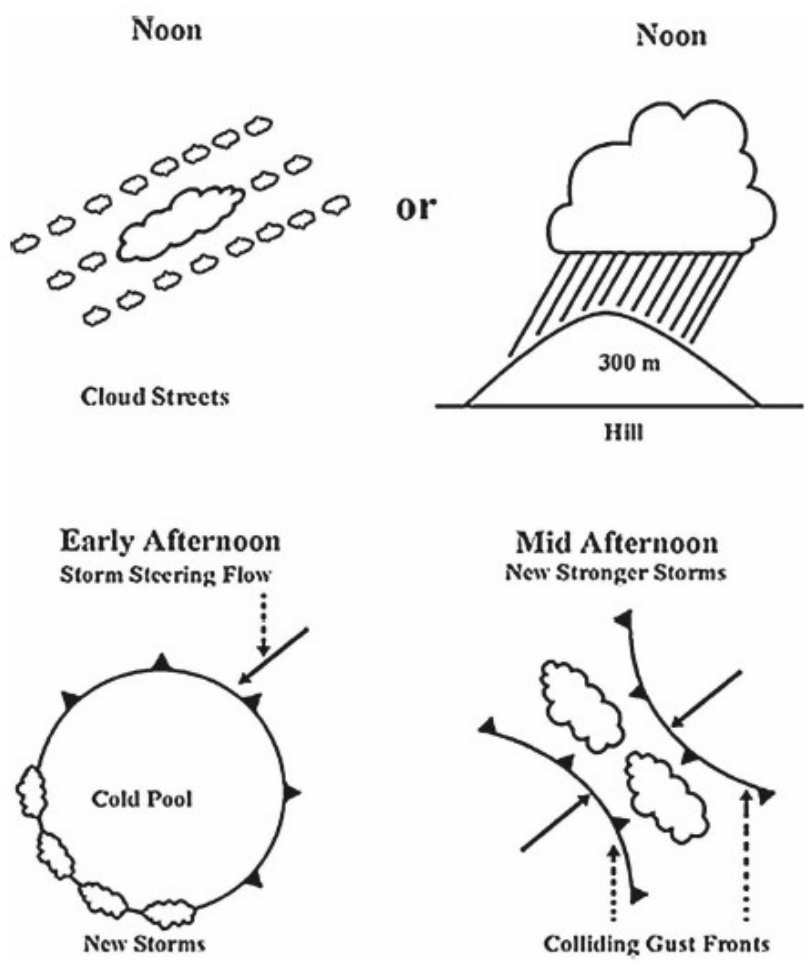
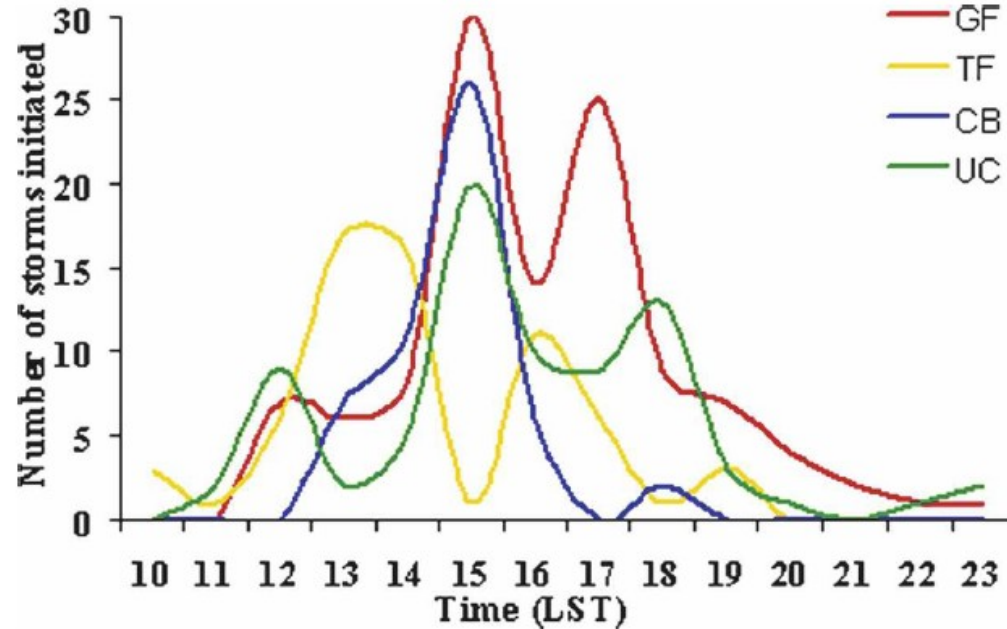


Schéma conceptuel d'initiation d'orages en Amazonie

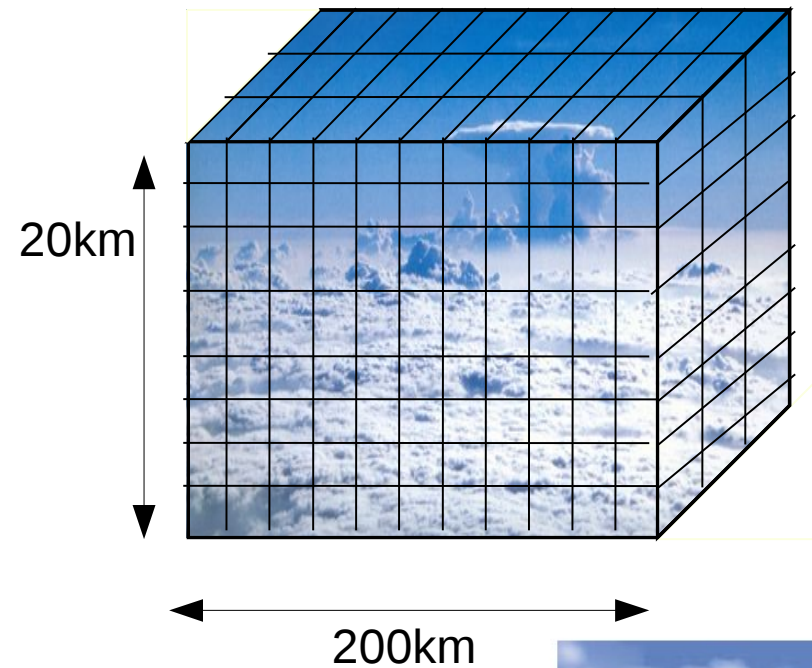


Initiation en fonction de l'heure locale



1.2 La transition vers la convection profonde

Apport des modèles explicites de nuages: CRM pour Cloud Resolving Model



- Résolution horizontale: $\Delta x \sim \Delta y \sim 200\text{m} \rightarrow 4\text{km}$
- Sur un domaine $200\text{km} \times 200\text{km} \times 20\text{km}$
- Pas de temps: $\Delta t \sim 10\text{s}$
- Forçages uniformes: flux de surface, profils initiaux, advections grande-échelle
- Conditions aux limites cycliques

Les structures nuageuses sont explicitement résolues

Champ de nuages
simulé



1.2 La transition vers la convection profonde

Humidification progressive de la couche d'inversion

Rôle de pré-conditionnement des thermiques secs et nuageux pour la convection plus profonde

- assèchement et réchauffement de la surface
 - > diminution de la CIN
- humidification et refroidissement de la couche d'inversion
 - > diminution du déficit à la saturation

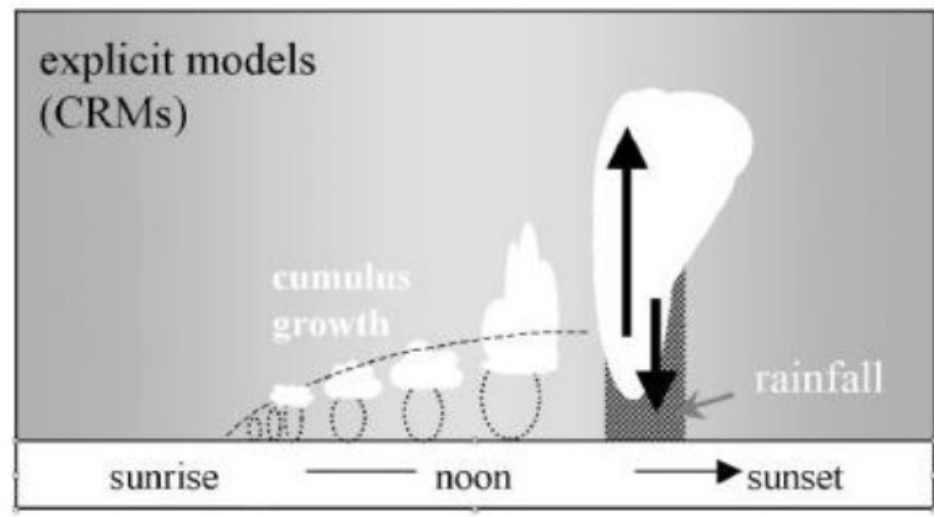
$$NSD = \frac{\overline{r_{sat}} - r}{\sigma_{r_{sat} - r}}$$

Mesure de l'humidification

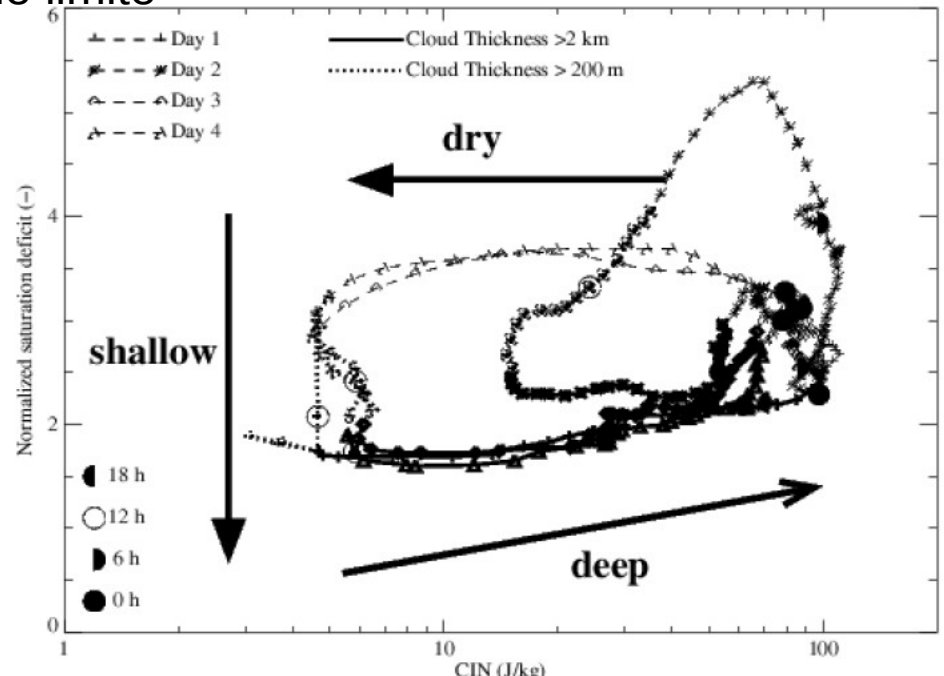
Mesure du mélange en sommet de couche limite

Simulation CRM de 4 jours consécutifs de convection profonde en Oklahoma

- Convection sèche: CIN diminue et NSD reste constant
- Convection peu profonde: CIN reste constante et NSD diminue
- Convection profonde: CIN augmente rapidement et NSD augmente lentement



Guichard et al., QJRMS, 2004



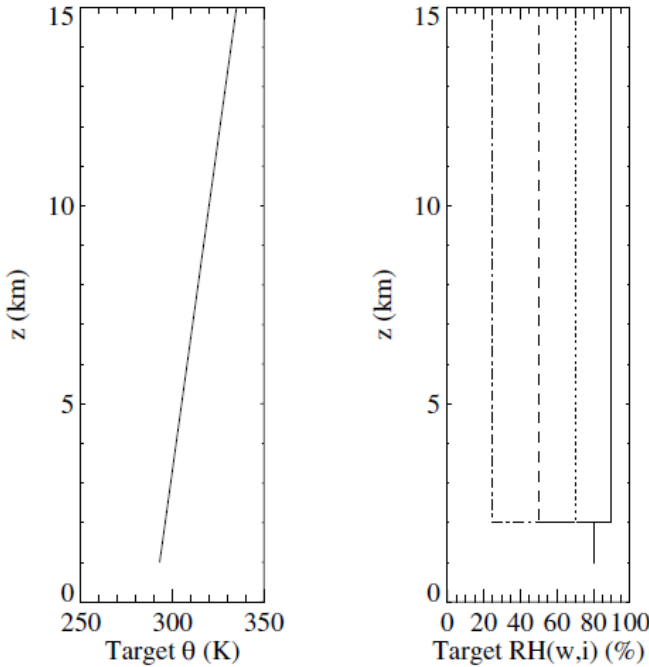
Chaboureaud et al., QJRMS, 2004

1.2 La transition vers la convection profonde

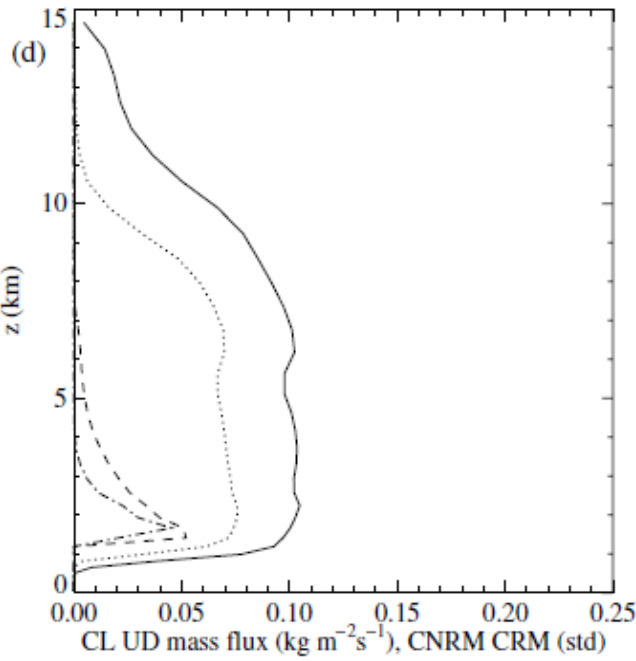
Derbyshire et al., QJRMS, 2004

L'humidité de la troposphère libre

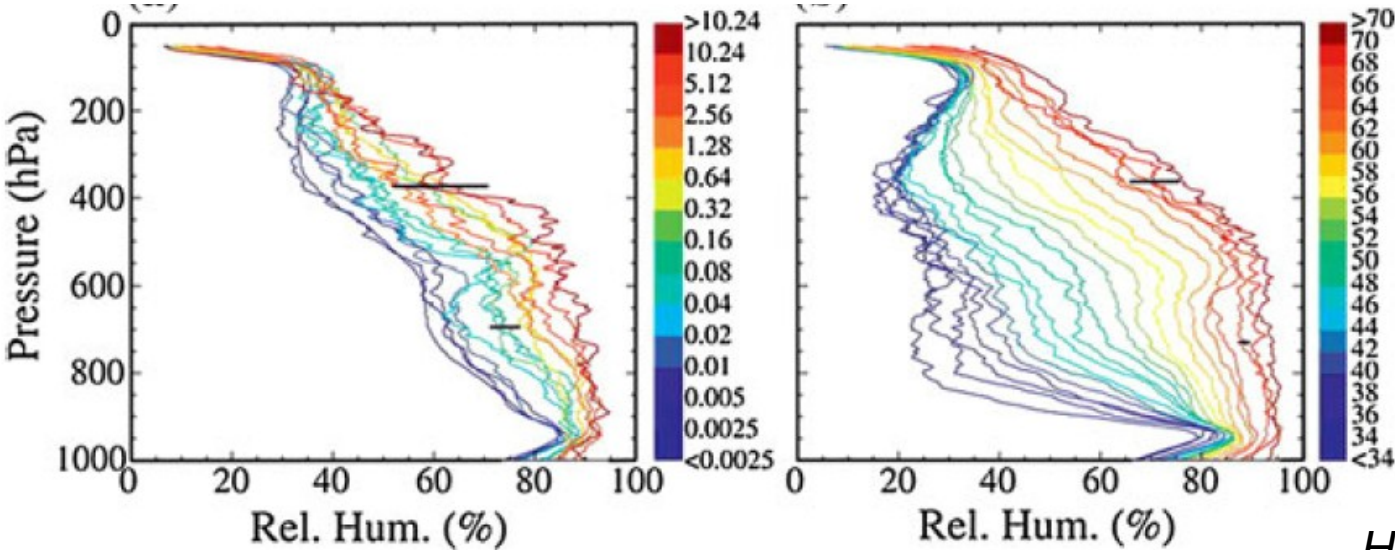
Simulations CRMs
idéalisées:
Profils à 25, 50, 70
et 90%
d'humidité relative



Flux convectif associé:



Lien entre taux de pluies (mm/h, gauche) et contenu intégré en eau (mm, droit)
et humidité relative dans les observations:

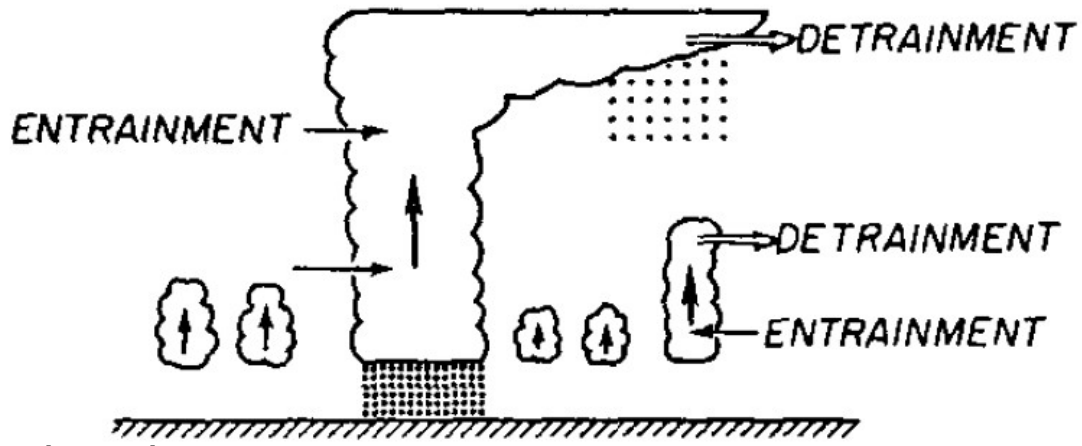


Holloway & Neelin 2009

1.2 La transition vers la convection profonde

Importance de l'entrainement d'air dans les cumulus

La convection est sensible à l'humidité de la troposphère libre via l'entrainement



Yanai et al., JAS, 1973

Grandeur très difficile à mesurer

Peut se calculer dans les LES/CRM à partir d'une variable ψ conservée sans mélange

$$\varepsilon = \frac{1}{\psi - \psi_u} \frac{\partial \psi_u}{\partial z}$$

Permet de tester des hypothèses sur les taux de mélange

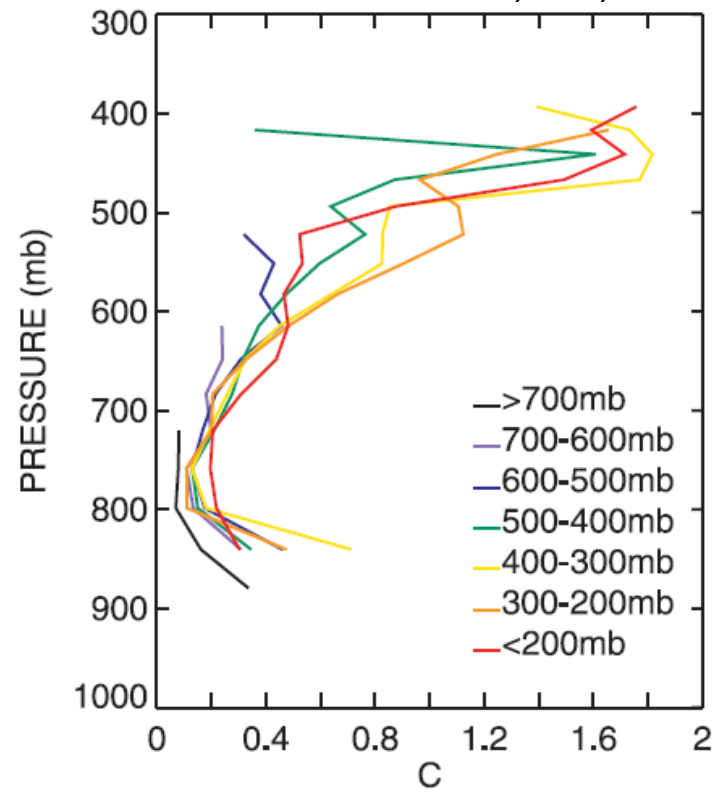
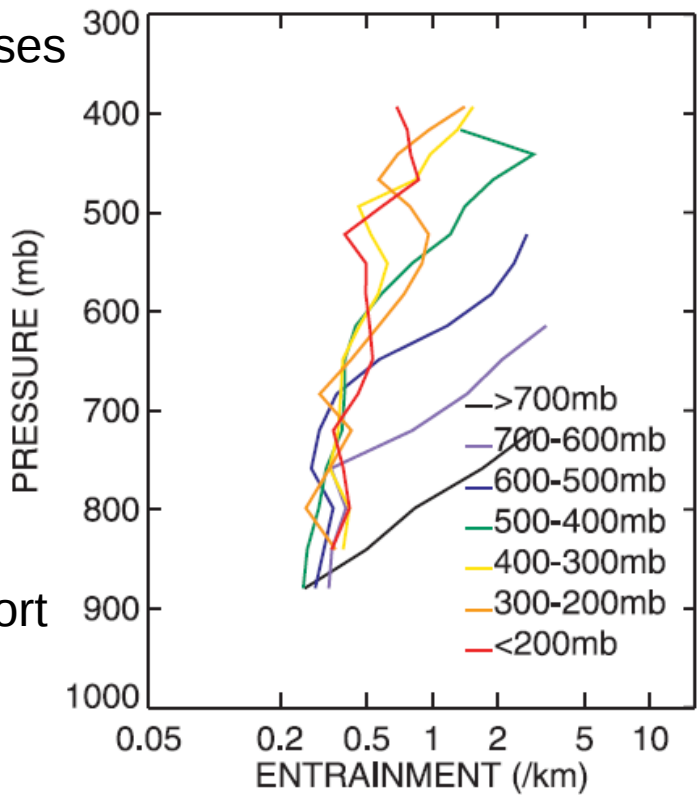
Ex:

$$\varepsilon(z) = CB/w^2$$

Gregory, QJRMS, 2001

Entrainement moins fort dans les nuages profonds car w + fort

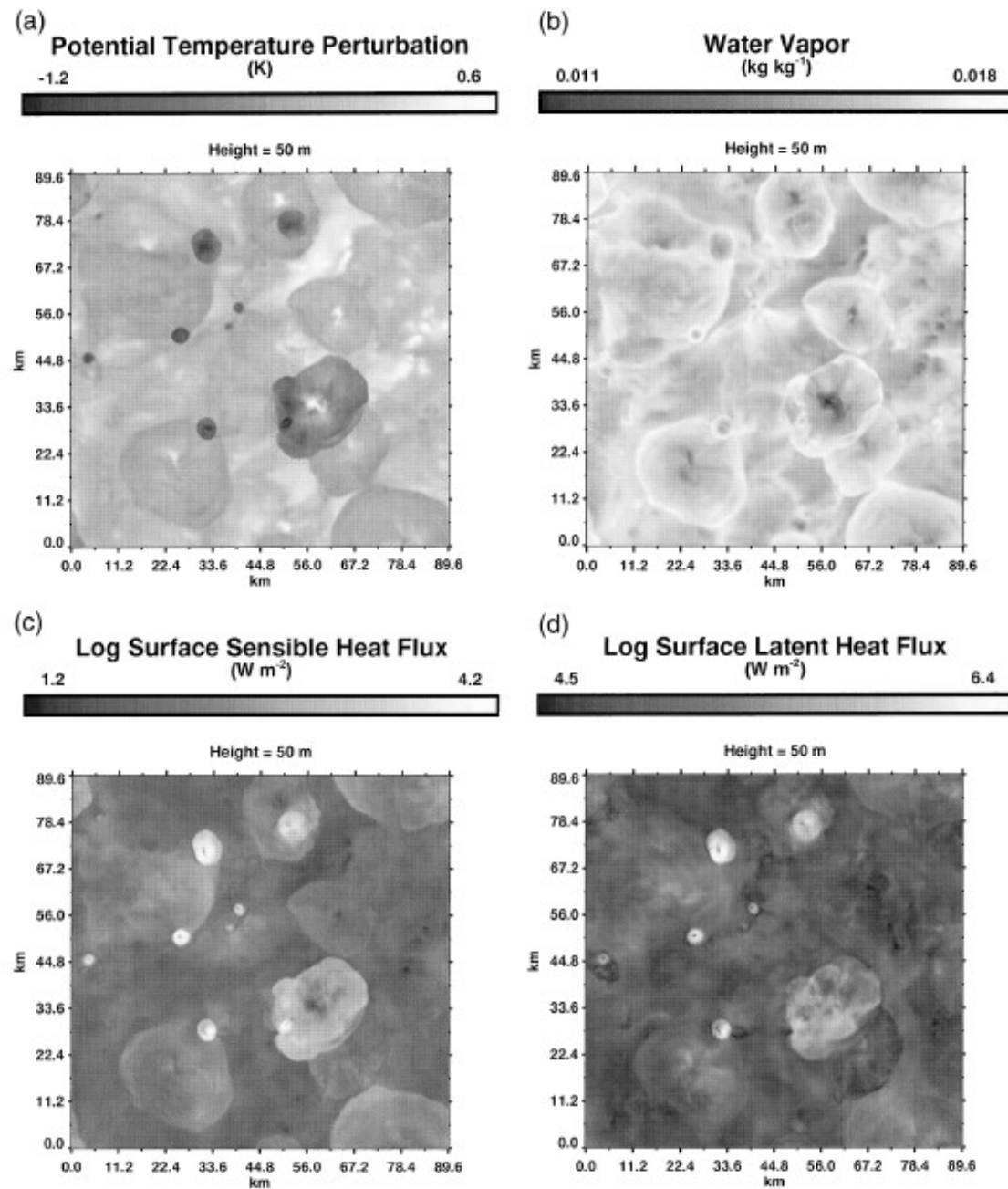
Del Genio et Wu, JC, 2010



1.2 La transition vers la convection profonde

Variabilité dans la couche limite: Le rôle des poches froides

Identification des poches froides dans une simulation LES:



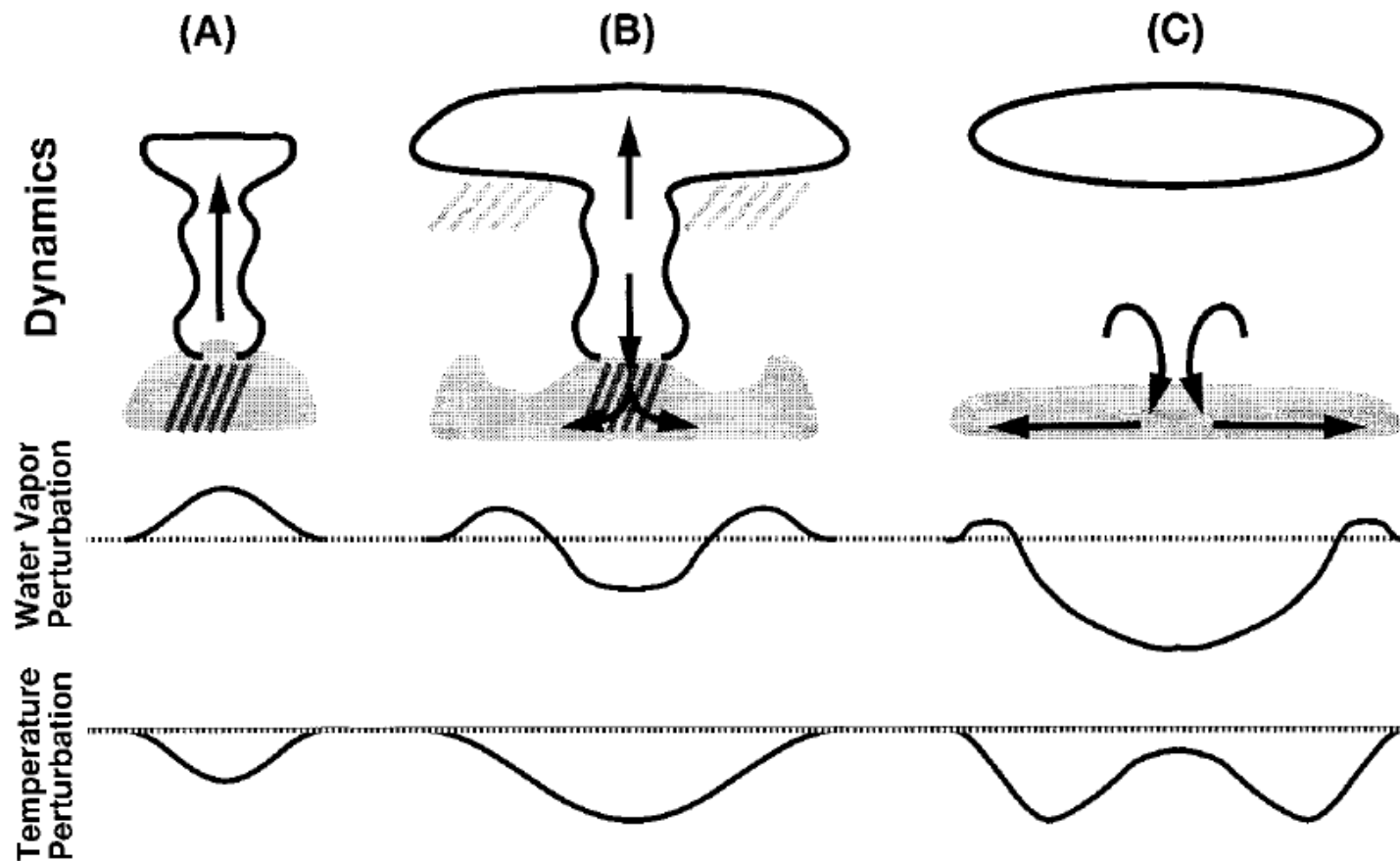
Poches froides versus environnement:

Perturbation de température $\sim -1\text{K}$
Perturbation d'humidité $\sim -1.5\text{ g/kg}$
Flux sensible $\times 1.9$
Flux latent $\times 2.6$

1.2 La transition vers la convection profonde

Variabilité dans la couche limite: Le rôle des poches froides

Développement en trois phases:



A: refroidissement et humidification par l'évaporation des pluies

B: refroidissement et assèchement par les descentes d'air

C: réchauffement et assèchement par entrainement d'air du dessus de la couche limite dans les poches:

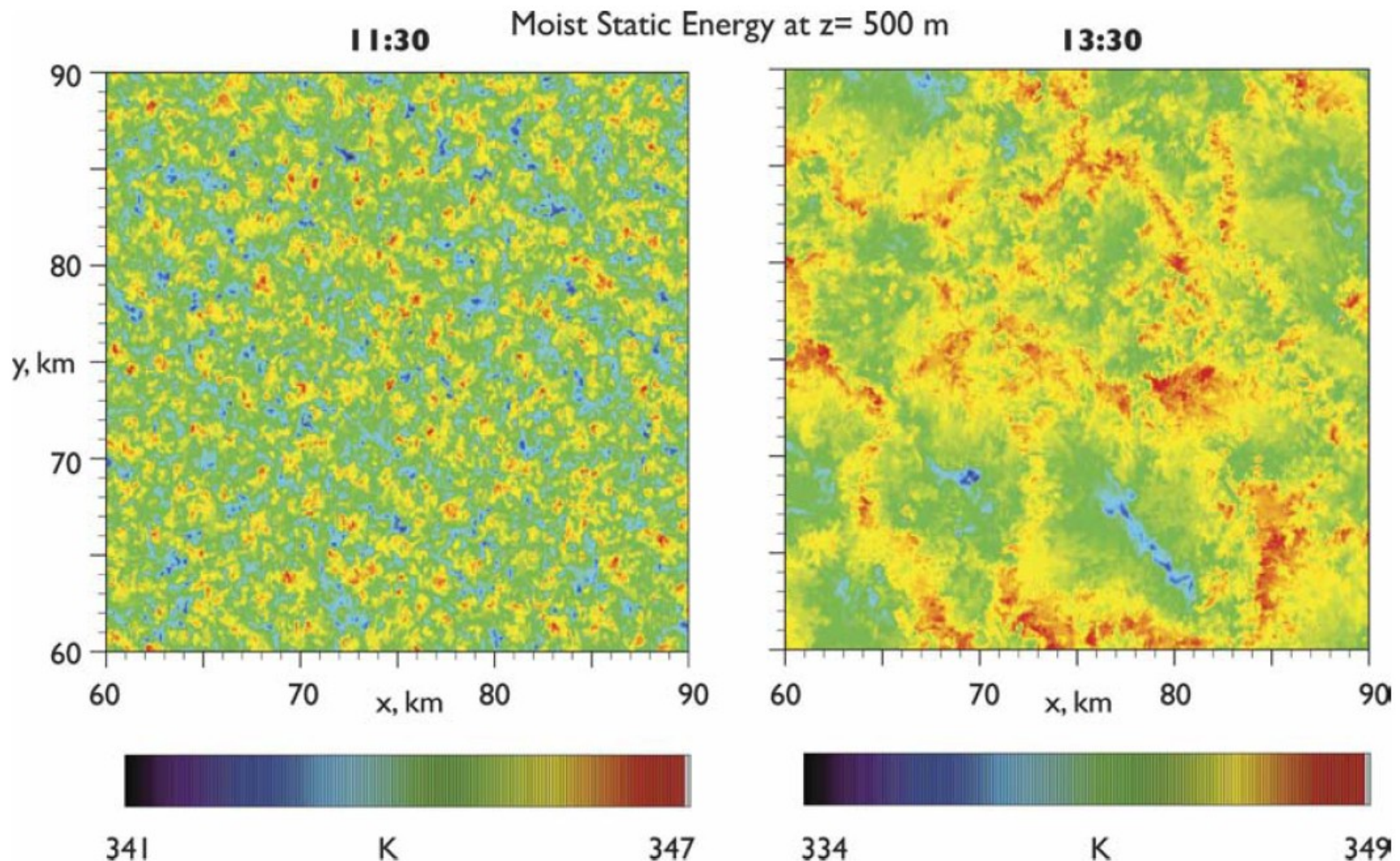
1.2 La transition vers la convection profonde

Variabilité dans la couche limite: Le rôle des poches froides

Coupe horizontale à 500m d'énergie statique humide dans une simulation LES de déclenchement de convection en Amazonie

Avant déclenchement

Après déclenchement

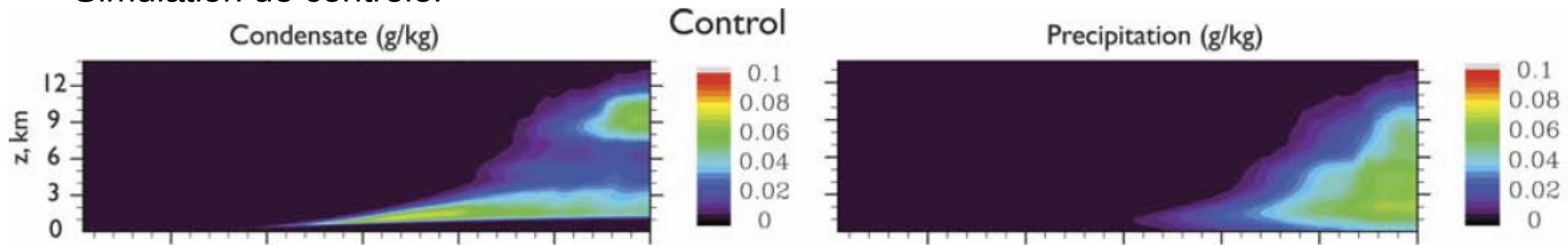


1.2 La transition vers la convection profonde

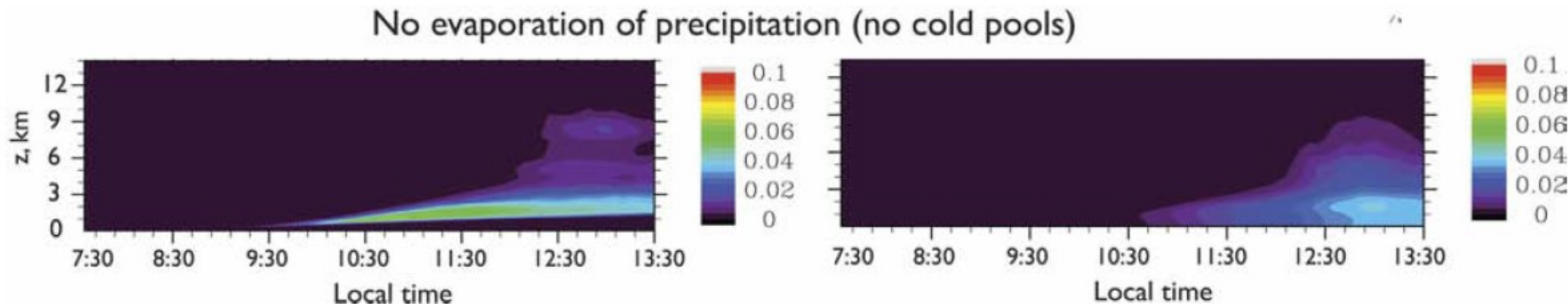
Variabilité dans la couche limite: Le rôle des poches froides

Cycle diurne du condensat et des pluies

Simulation de contrôle:

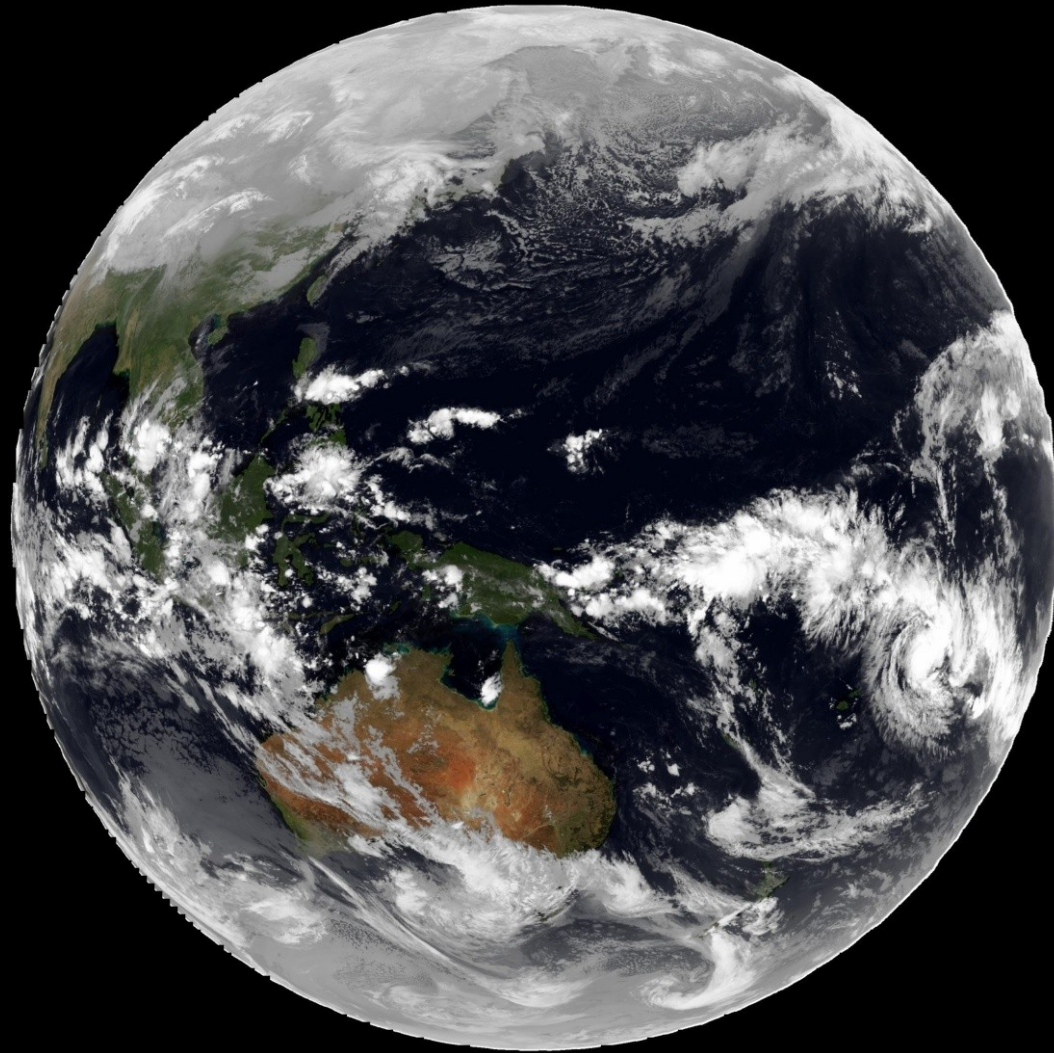


Simulation dans laquelle l'évaporation des pluies est désactivée, empêchant la création des poches froides

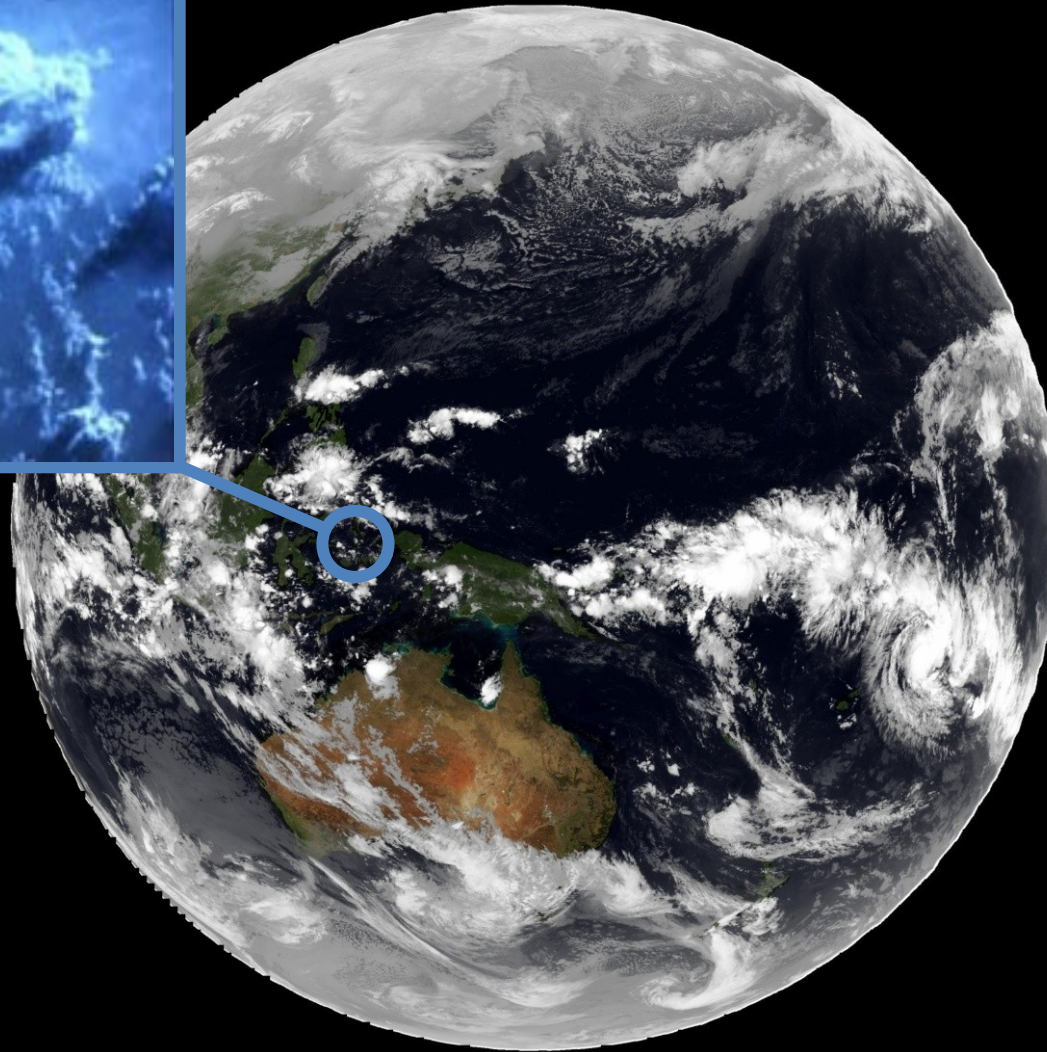


Les nuages restent de type congestus

Organisation de la convection profonde

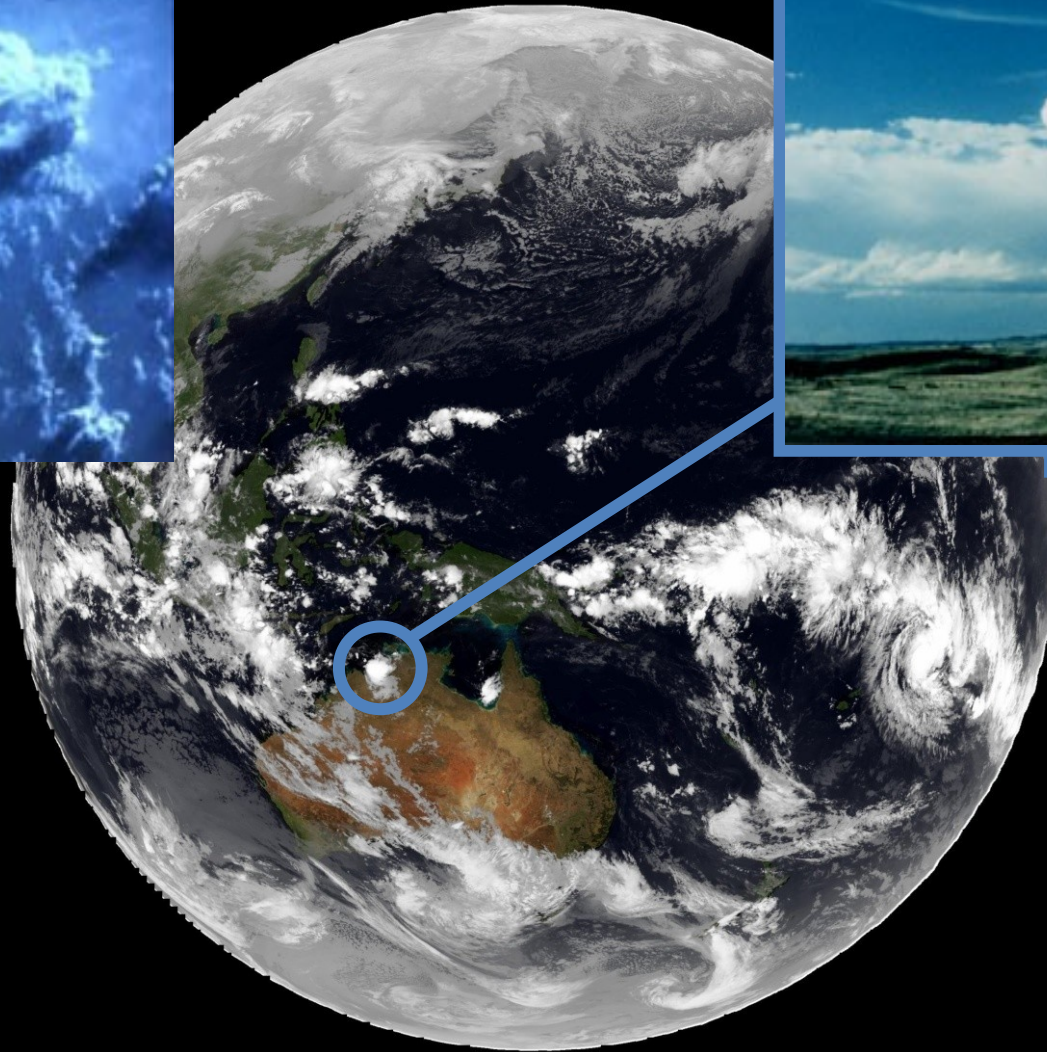


Organisation de la convection profonde



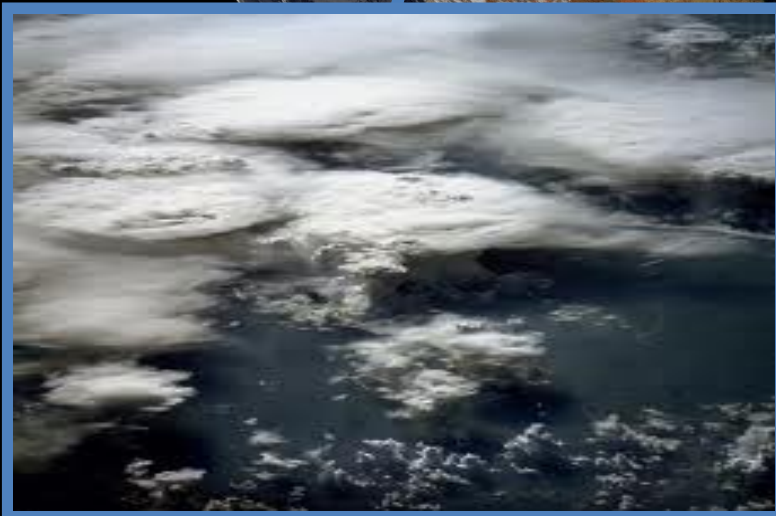
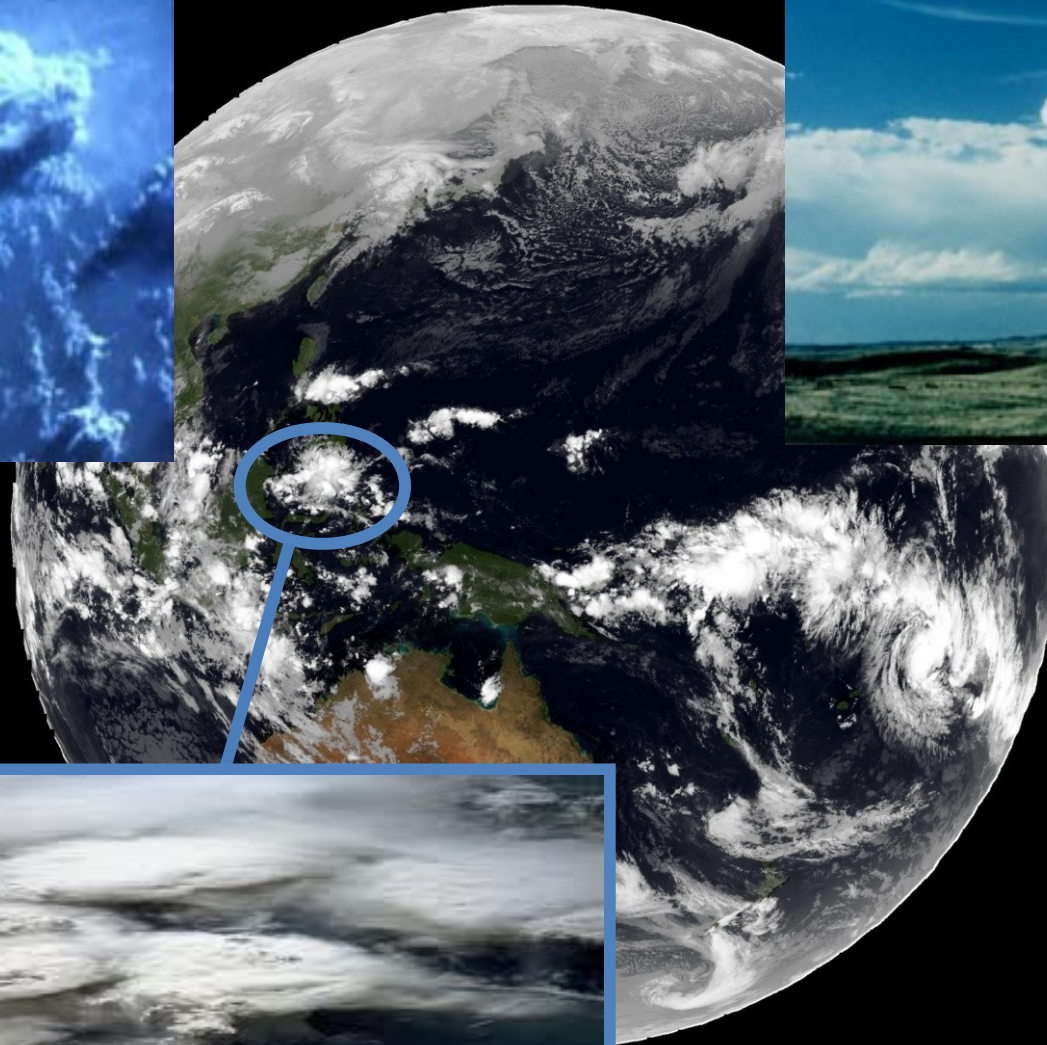
cellule orageuse
1-10km ; heure

Organisation de la convection profonde



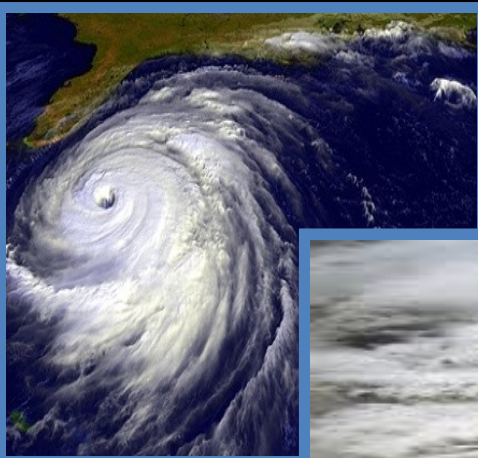
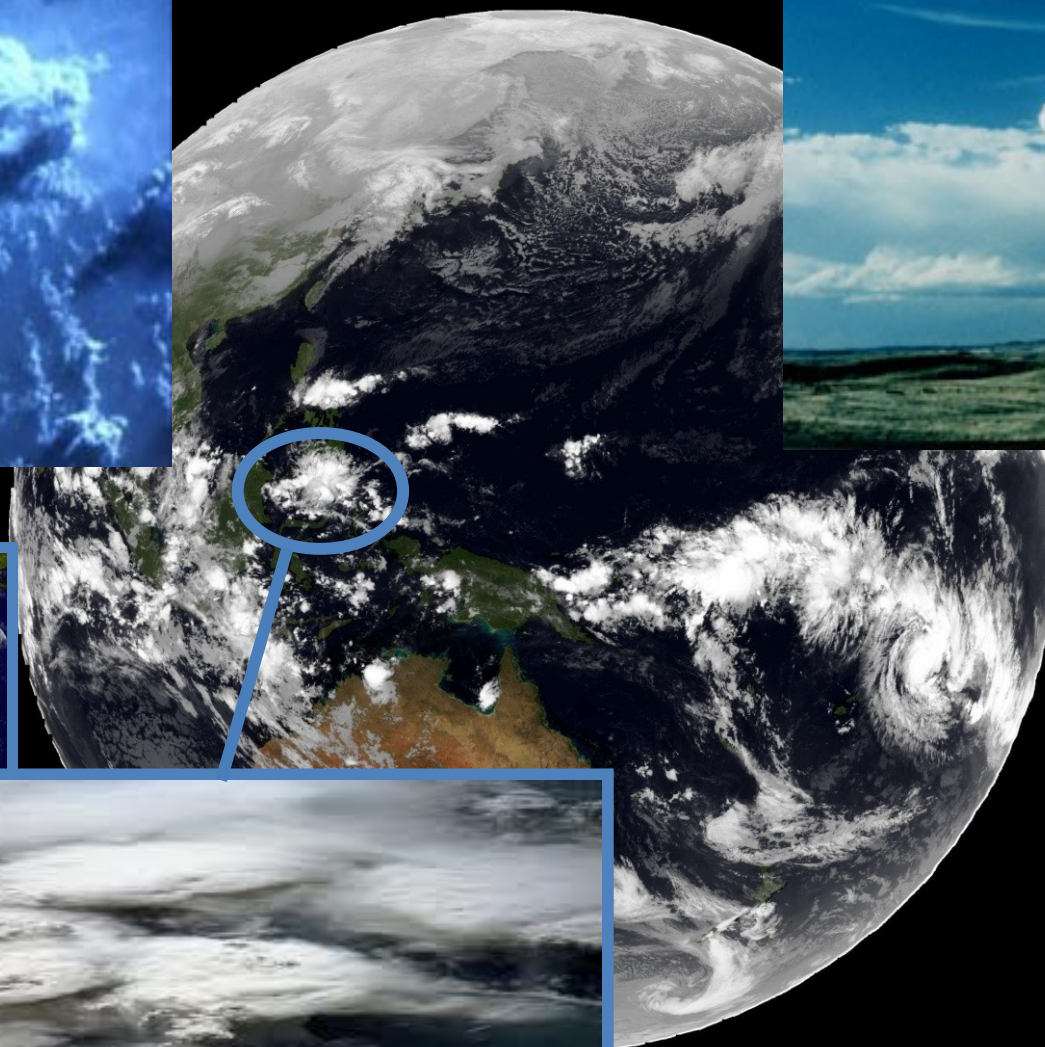
système méso-échelle
100-500km ; jour

Organisation de la convection profonde



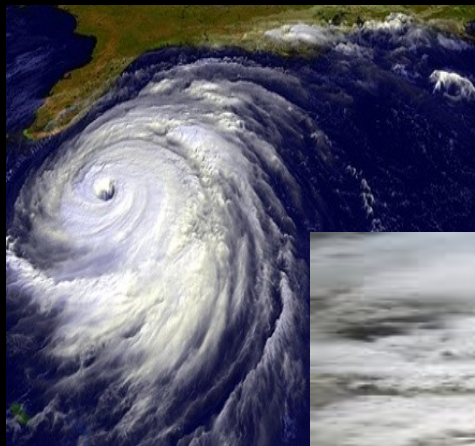
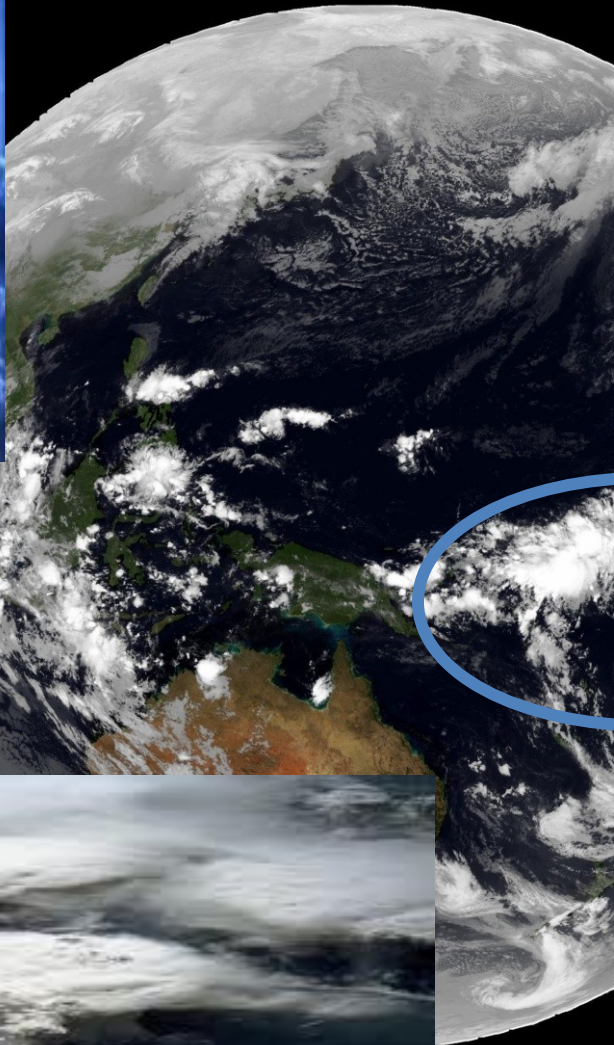
cluster synoptique
1000km ; jours

Organisation de la convection profonde

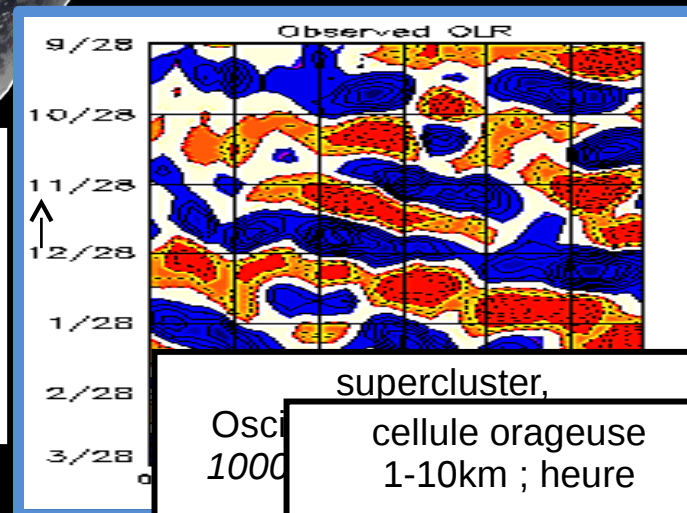


cyclone tropical, cluster
synoptique
1000km ; jours

Organisation de la convection profonde

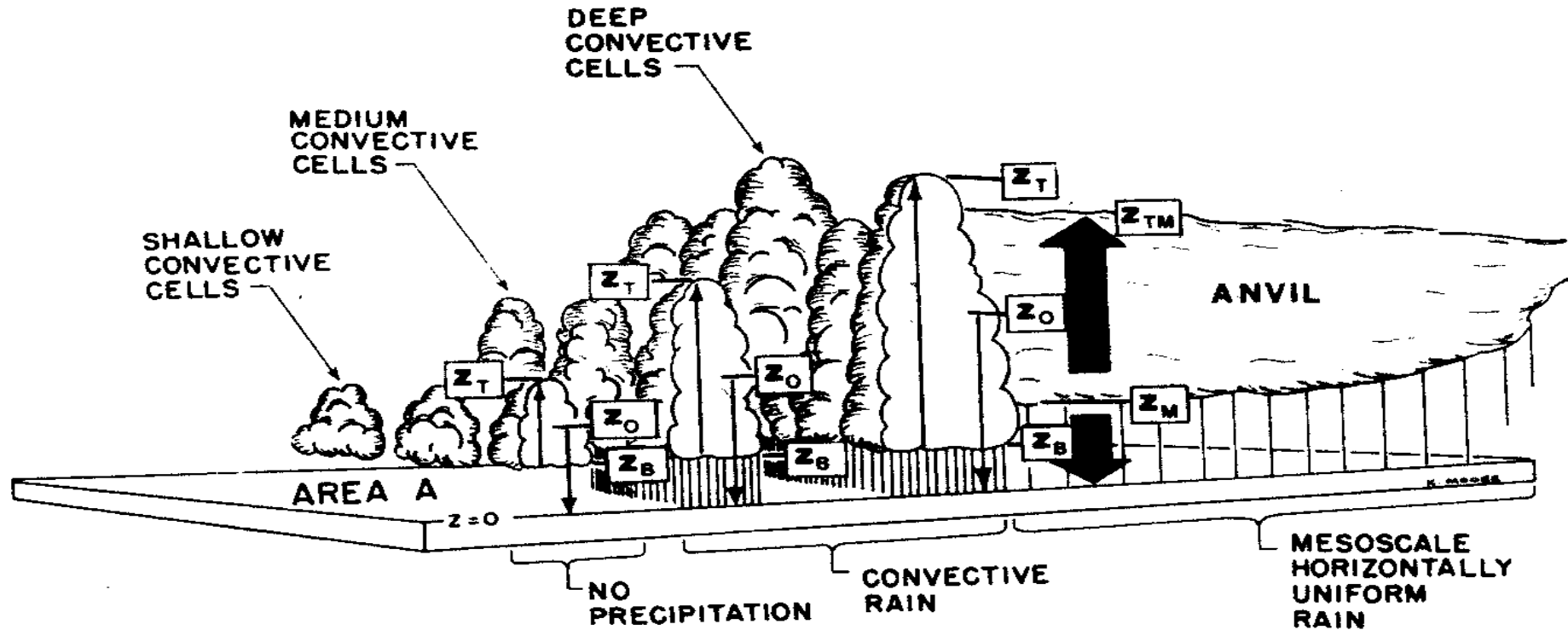


temps (jours)



1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

MCS pour Mesoscale Convective Systems



Houze et Betts, RGSP, 1981

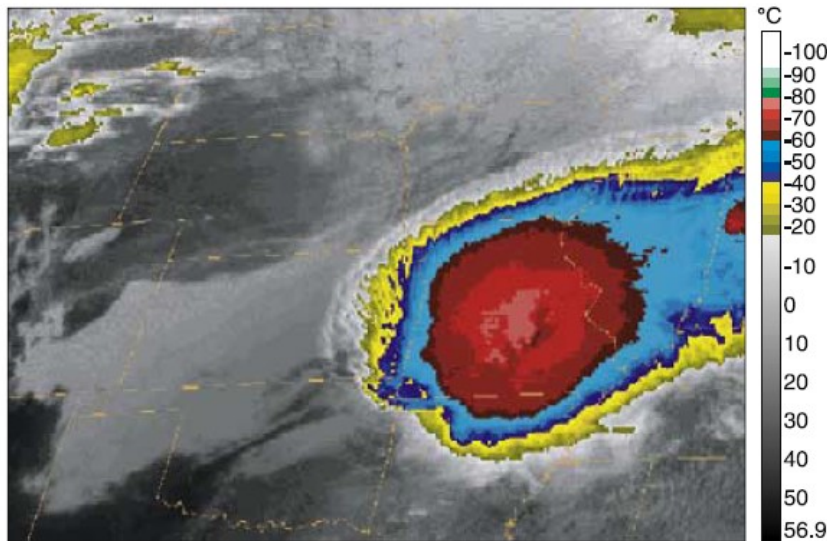


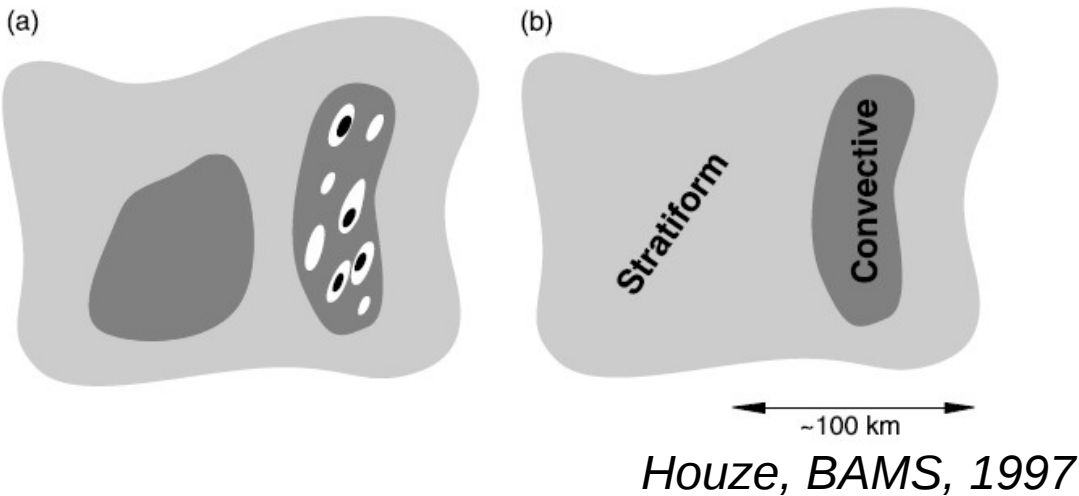
Image infra-rouge d'un MCS
au-dessus du Missouri

Houze, RG, 2004

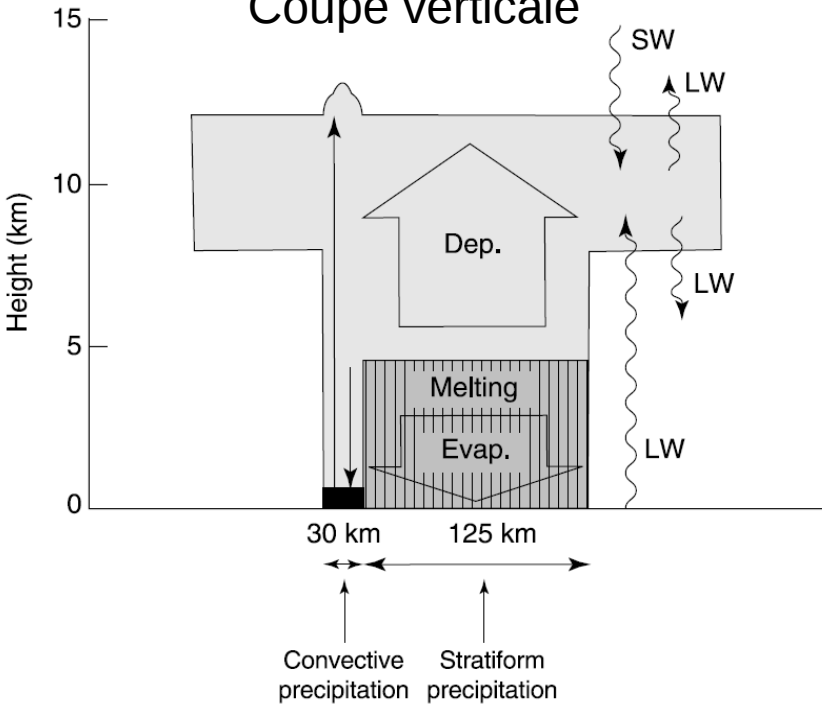
1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

Vision simplifiée d'un MCS: partie convective versus stratiforme

Coupe horizontale

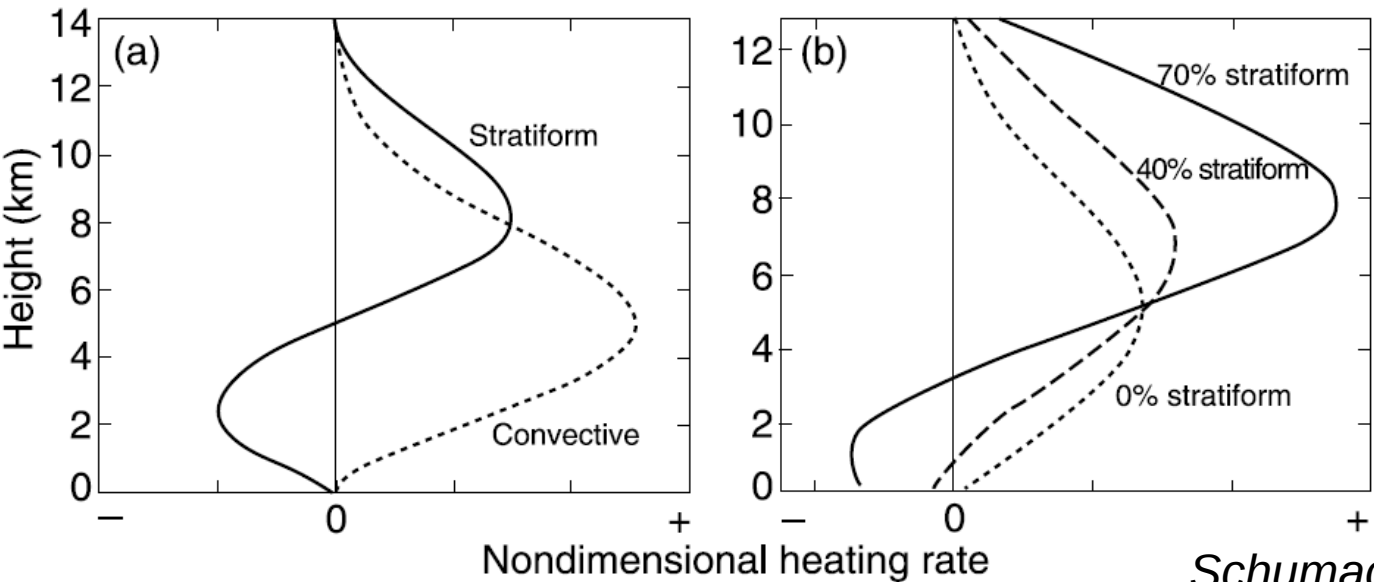


Coupe verticale



Profils de taux de chauffage idéalisés:

Houze, JMS, 1982

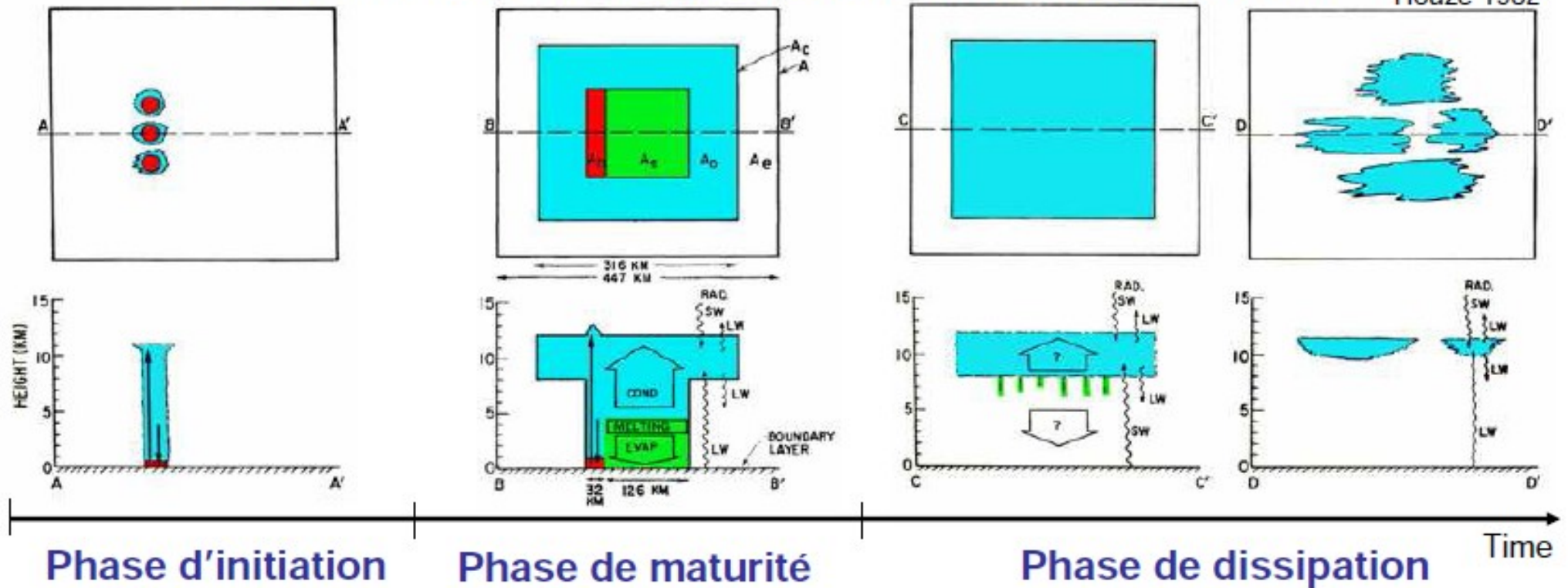


Schumacher et al., JAS, 2004

1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

Modèle conceptuel du cycle de vie d'un système convectif

Houze 1982



Phase d'initiation: développement de cellules convectives successives

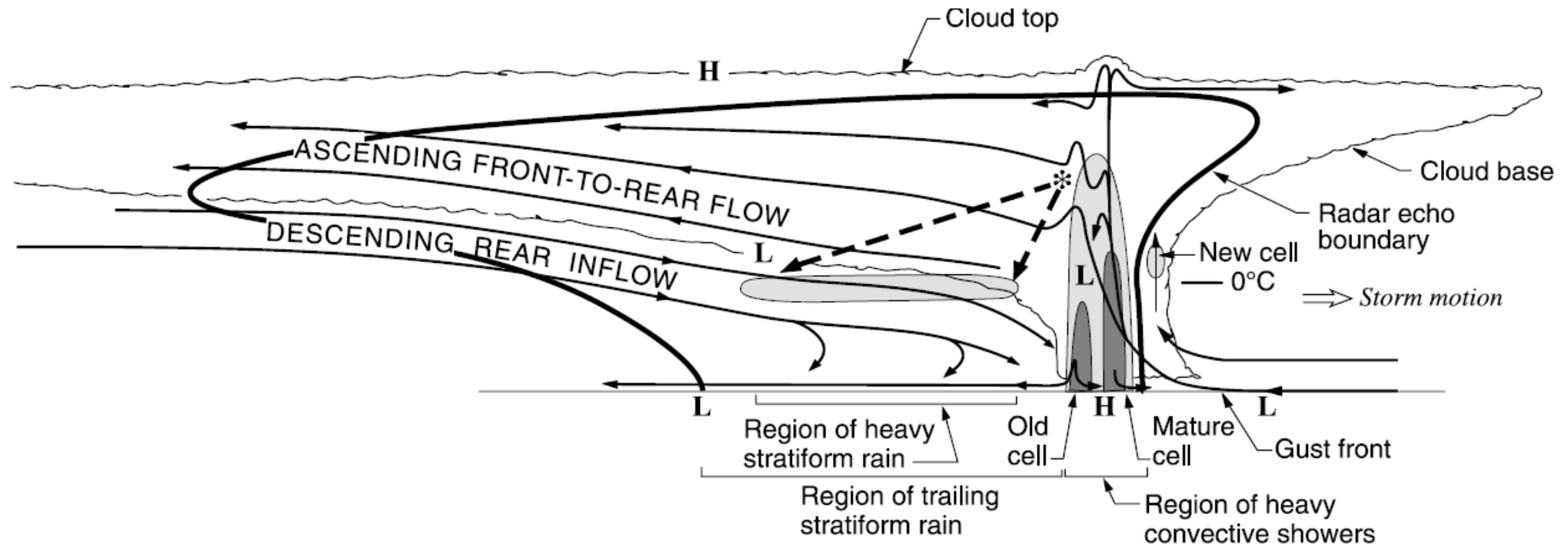
Phase de maturité: partie stratiforme bien développé via le détrainement des cellules convectives

Phase de dissipation: disparition des cellules convectives, dissipation des nuages stratiformes

1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

Réalité plus complexe: existence de circulations à méso-échelle

“rear inflow”: dû à des ondes de gravité générées en réponse au chauffage dans la région convective

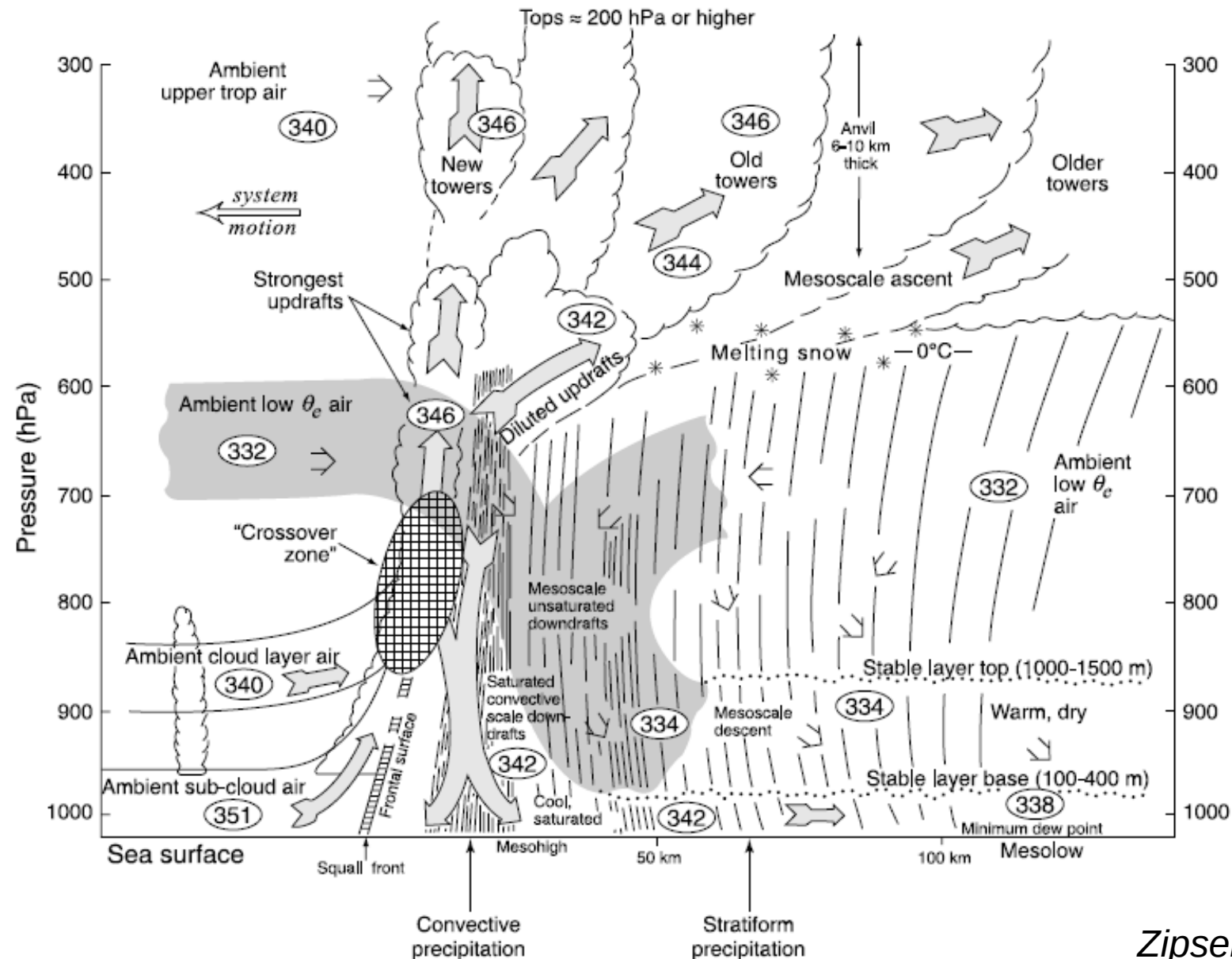


Houze et al., BAMS, 1989

1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

Réalité plus complexe:

“updrafts” et “downdrafts” à l'échelle convective et stratiforme

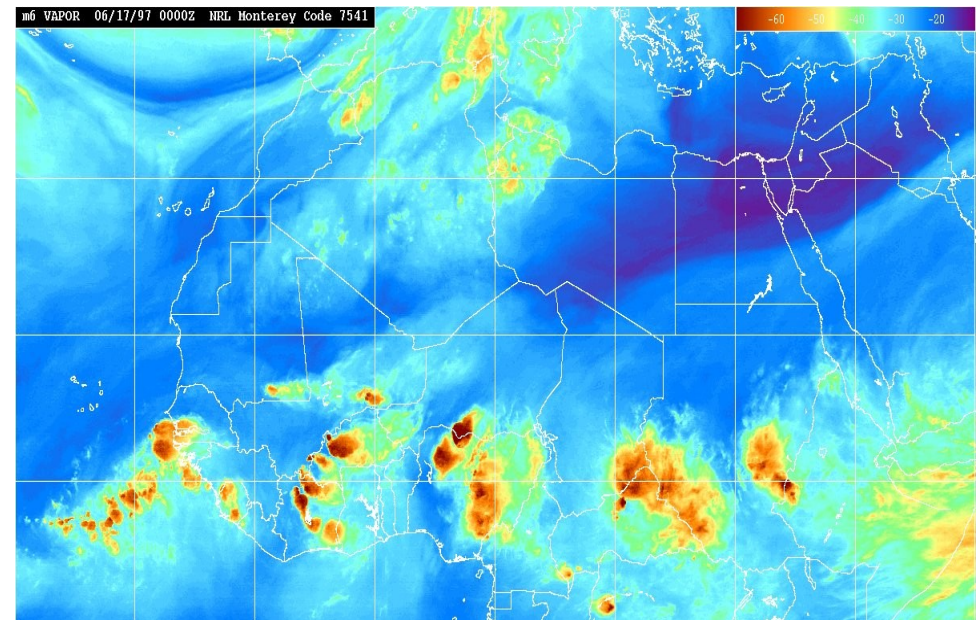


Zipser, MWR, 1977

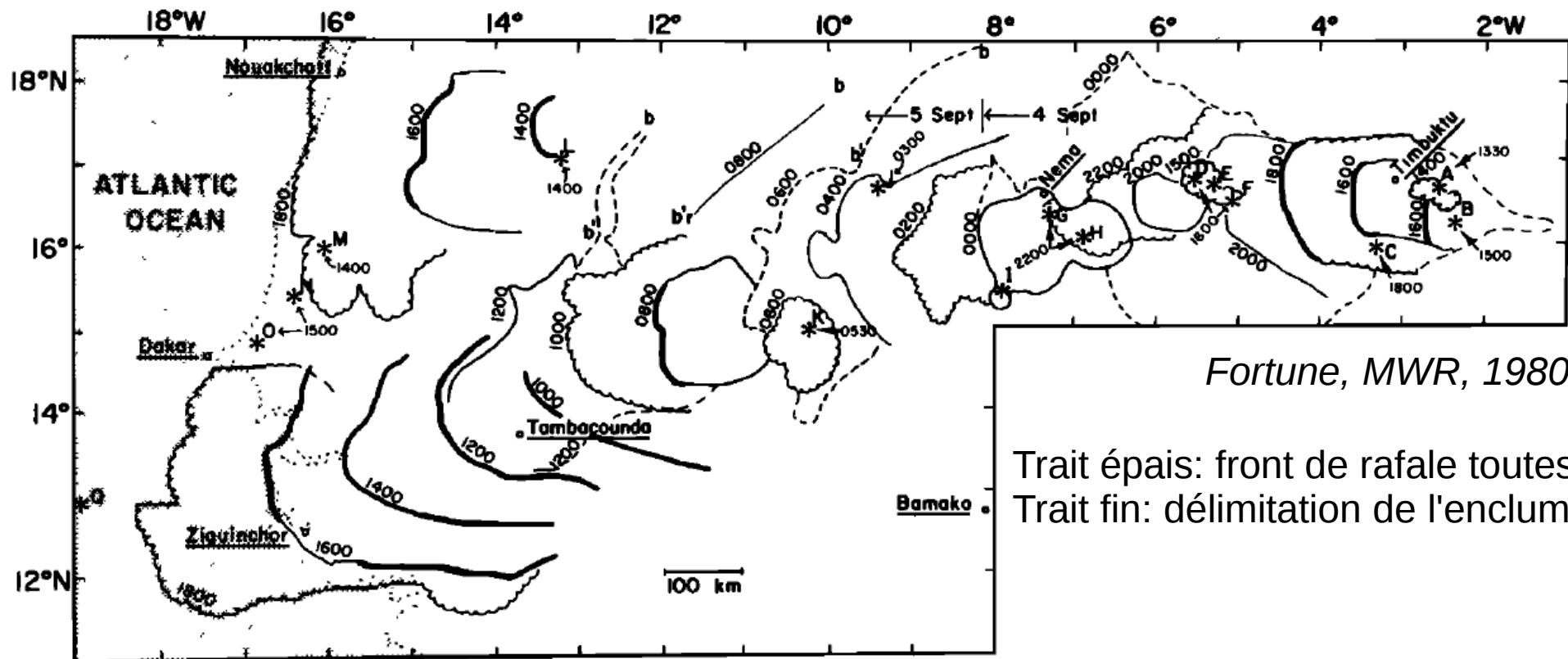
1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

Propagation des lignes de grain

Lignes de grain se propageant vers l'ouest en Afrique vues par satellite



Propagation d'une ligne de grain en Afrique le 4 sept 1974



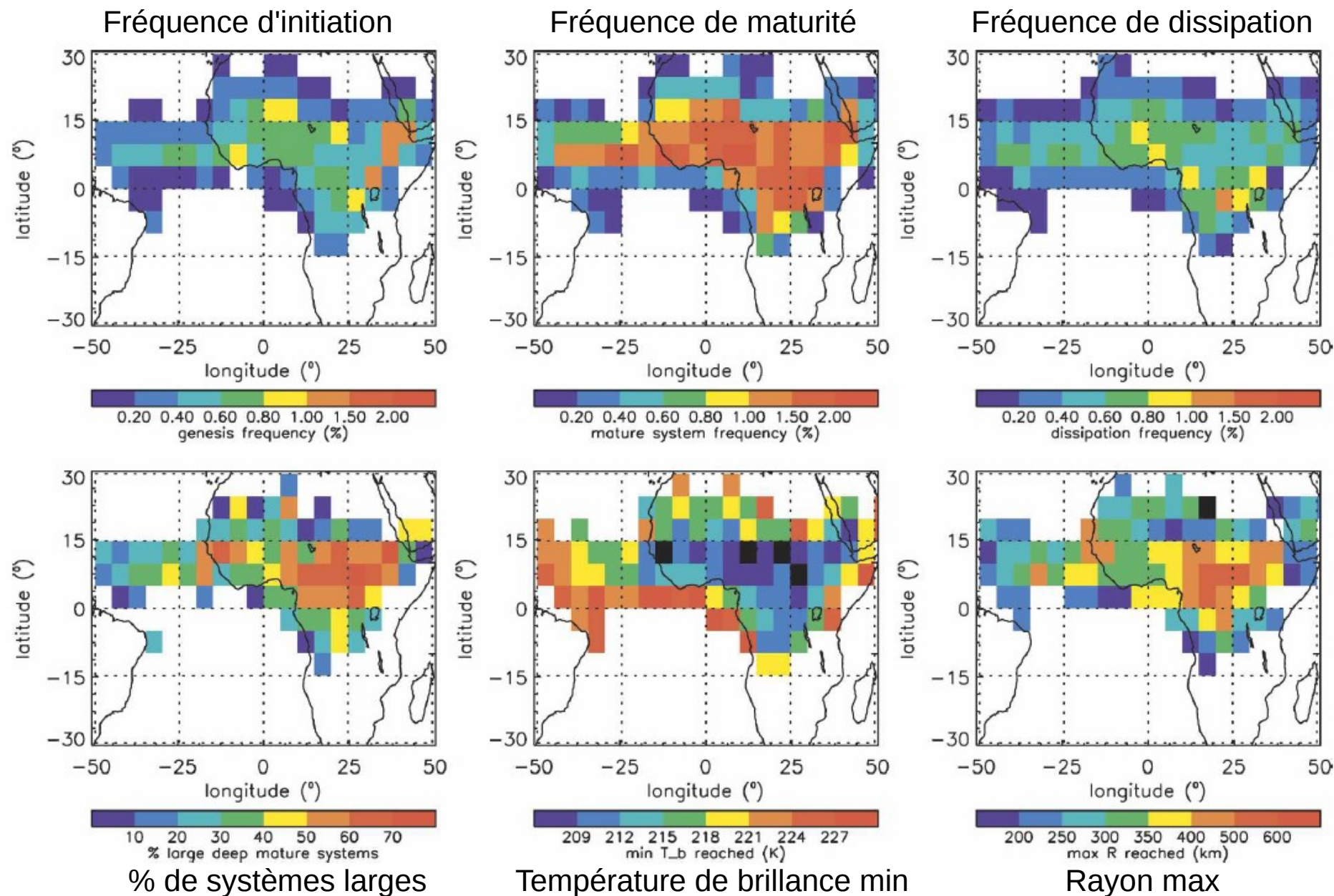
Fortune, MWR, 1980

Trait épais: front de rafale toutes les 2h
Trait fin: délimitation de l'enclume

1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

Systèmes continentaux versus océaniques

Composites de systèmes convectifs de juin à septembre 2005

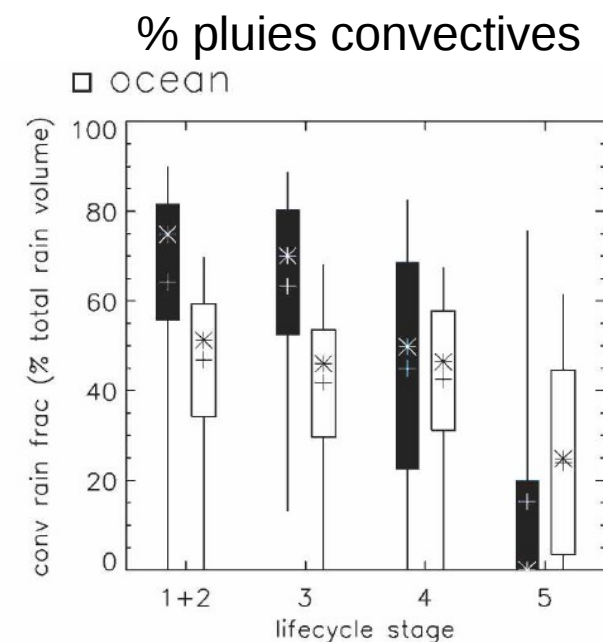
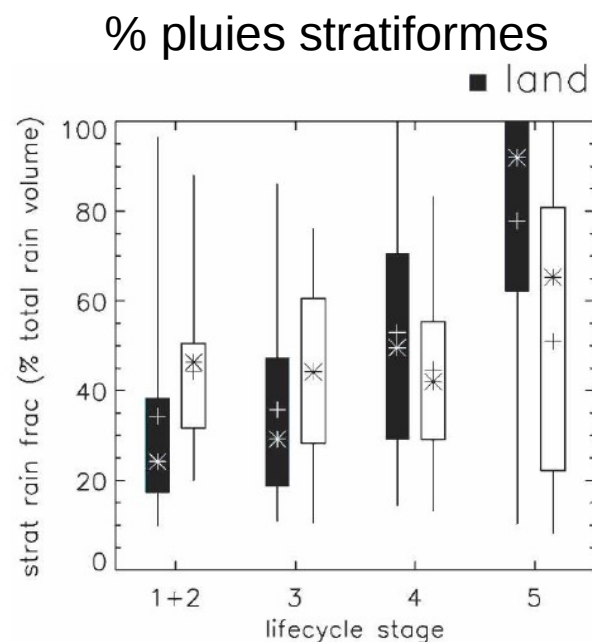
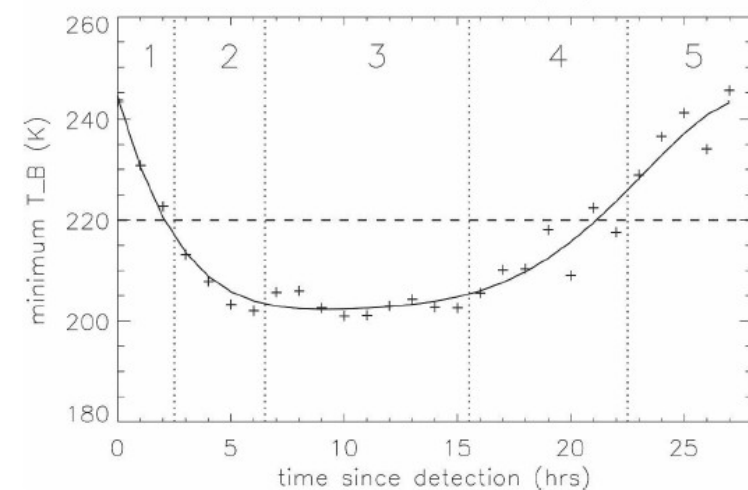
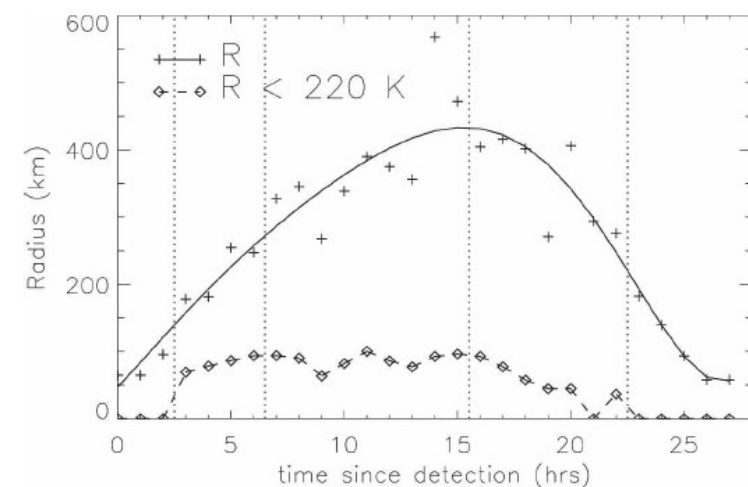


1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

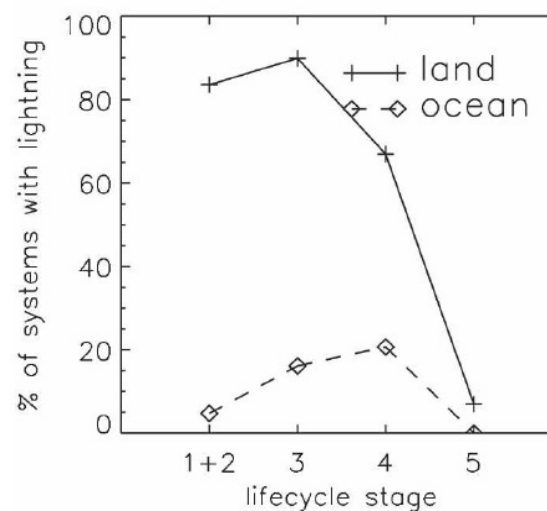
Systèmes continentaux versus océaniques

Composites de systèmes convectifs de juin à septembre 2005

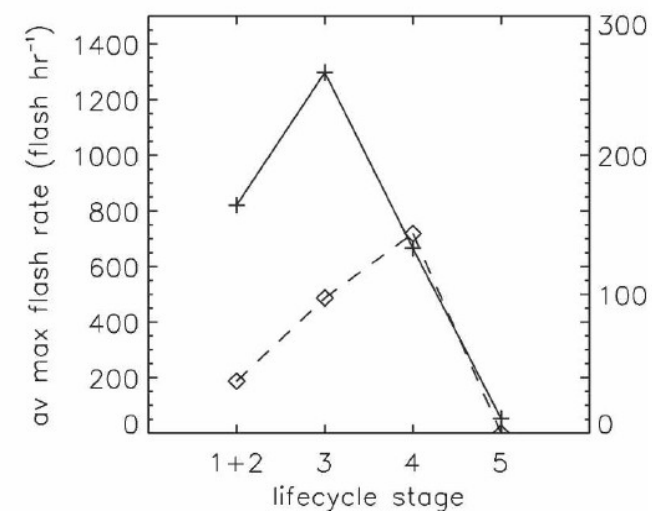
Classification du cycle de vie en 5 phases



% de systèmes avec éclairs



Intensité max des éclairs

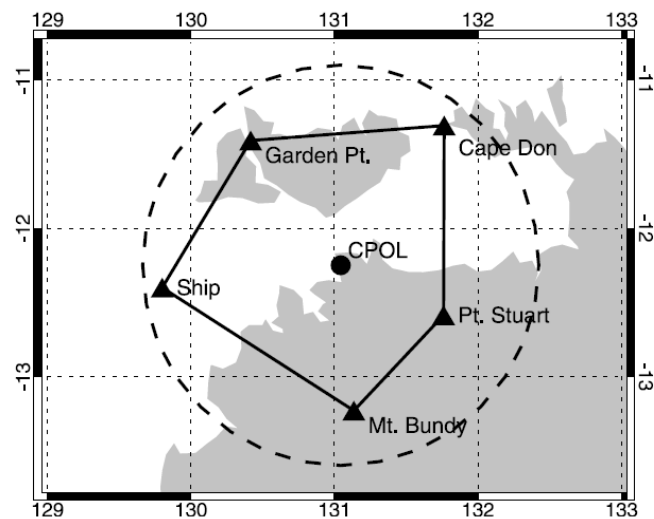


1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

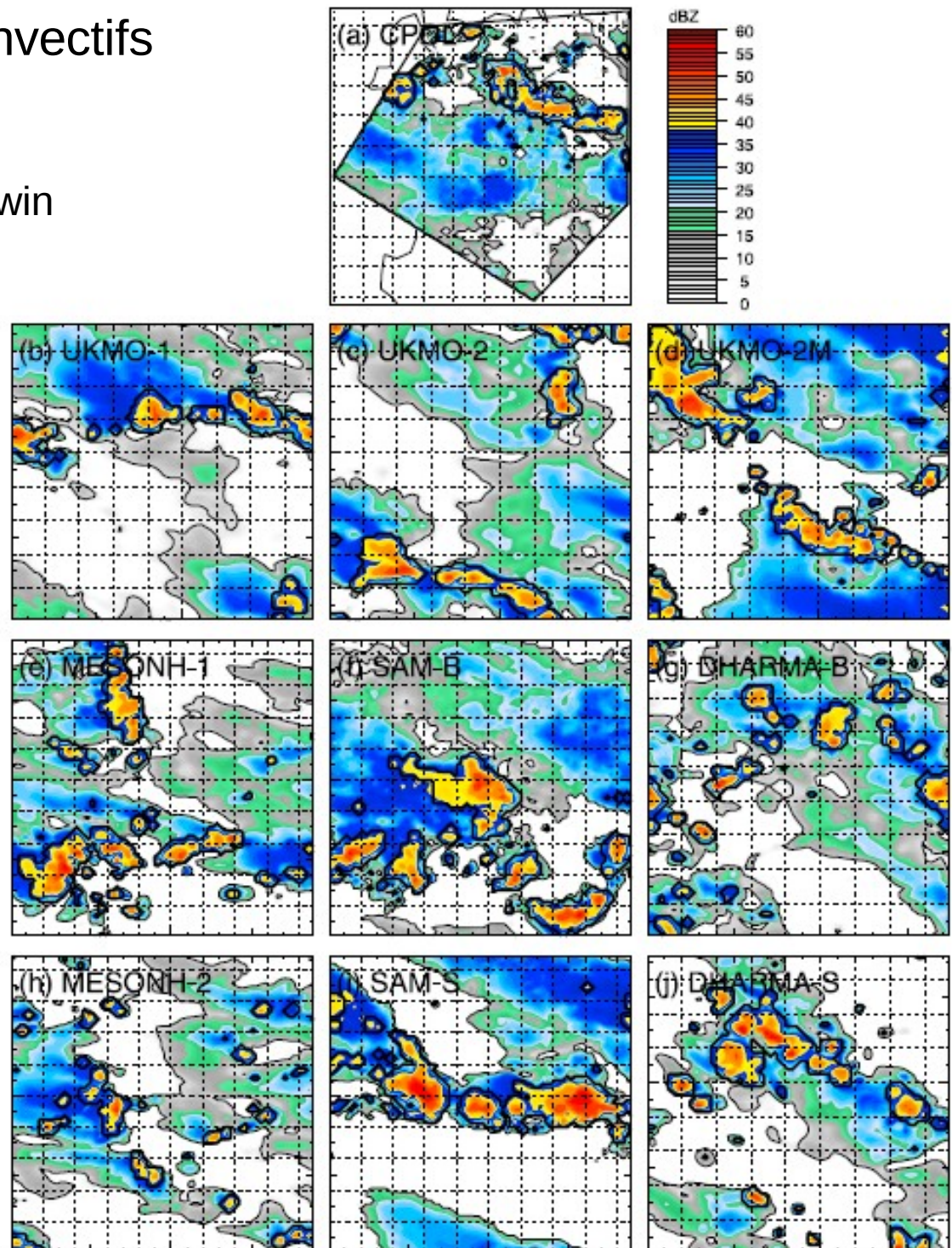
Simulations CRM des systèmes convectifs
à méso-échelle

Expérience TWP-ICE:

Janvier/février 2006 dans la région de Darwin



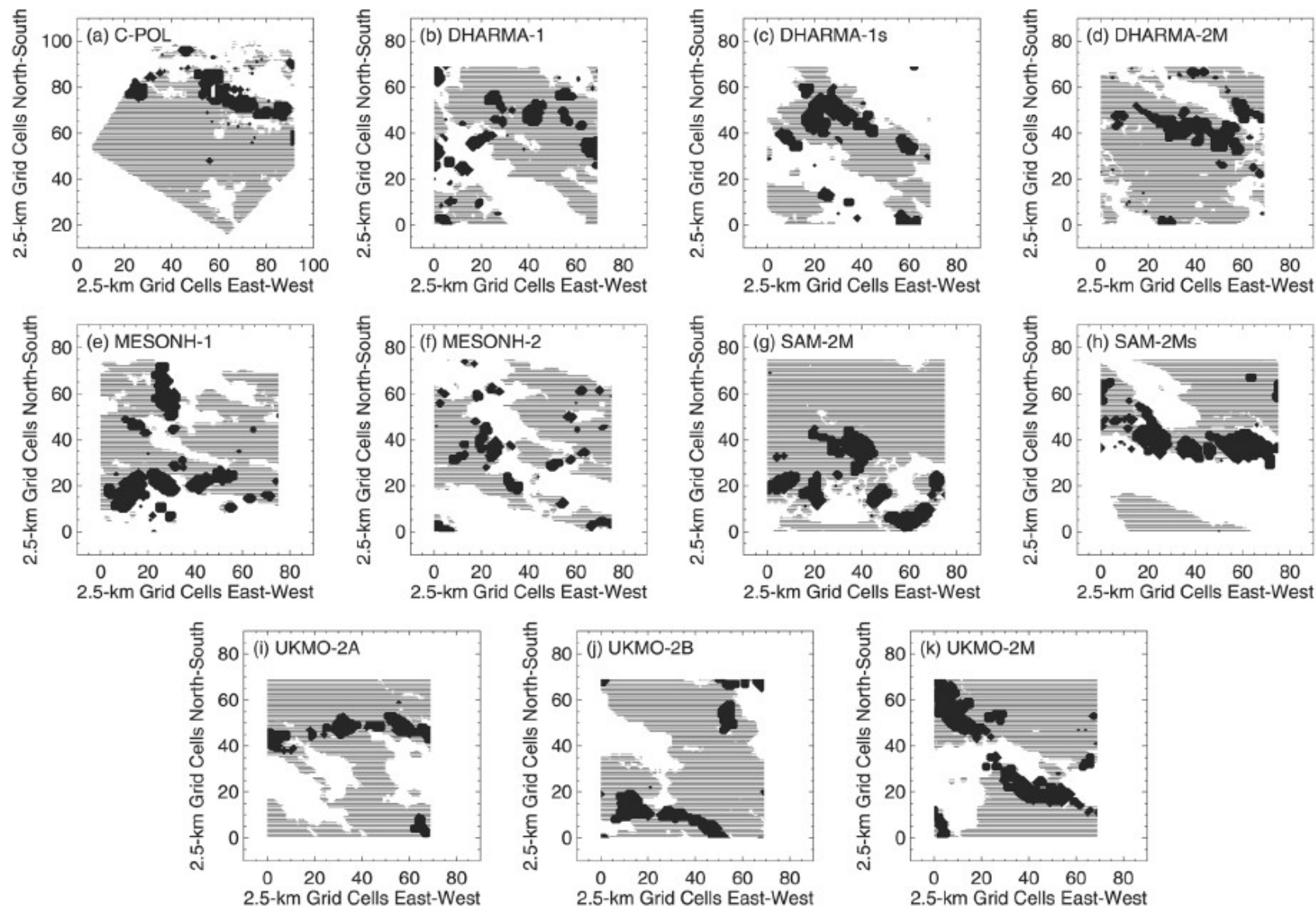
Coupe horizontale de la réflectivité
à 0300UTC le 20 janvier telle
qu'observée par le RADAR CPOL
et telle que simulée par différents CRMs



1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

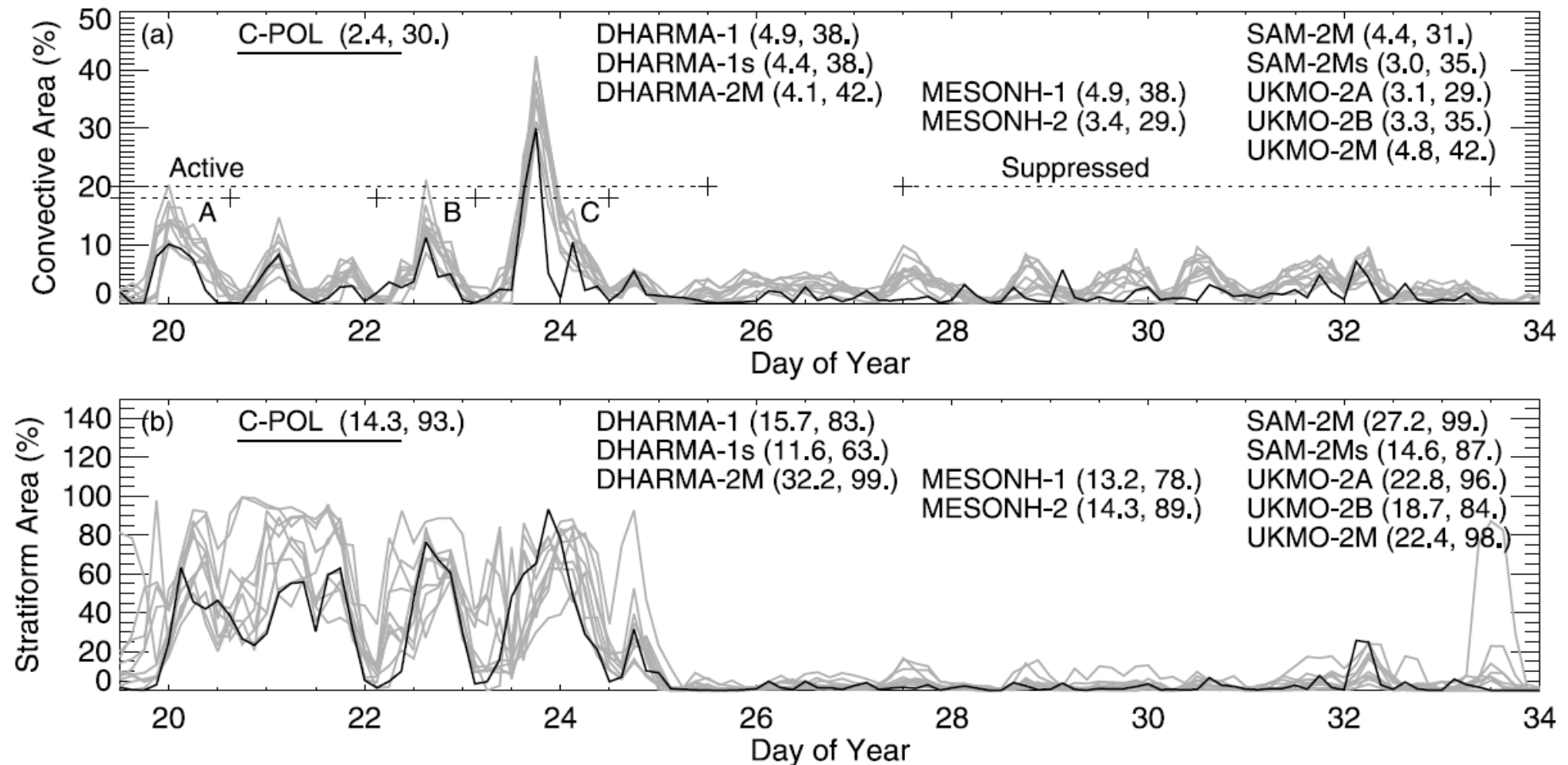
Simulations CRM des systèmes convectifs à méso-échelle

Répartition région convective (noir) / région stratiforme (gris) associée



1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

Simulations CRM des systèmes convectifs à méso-échelle

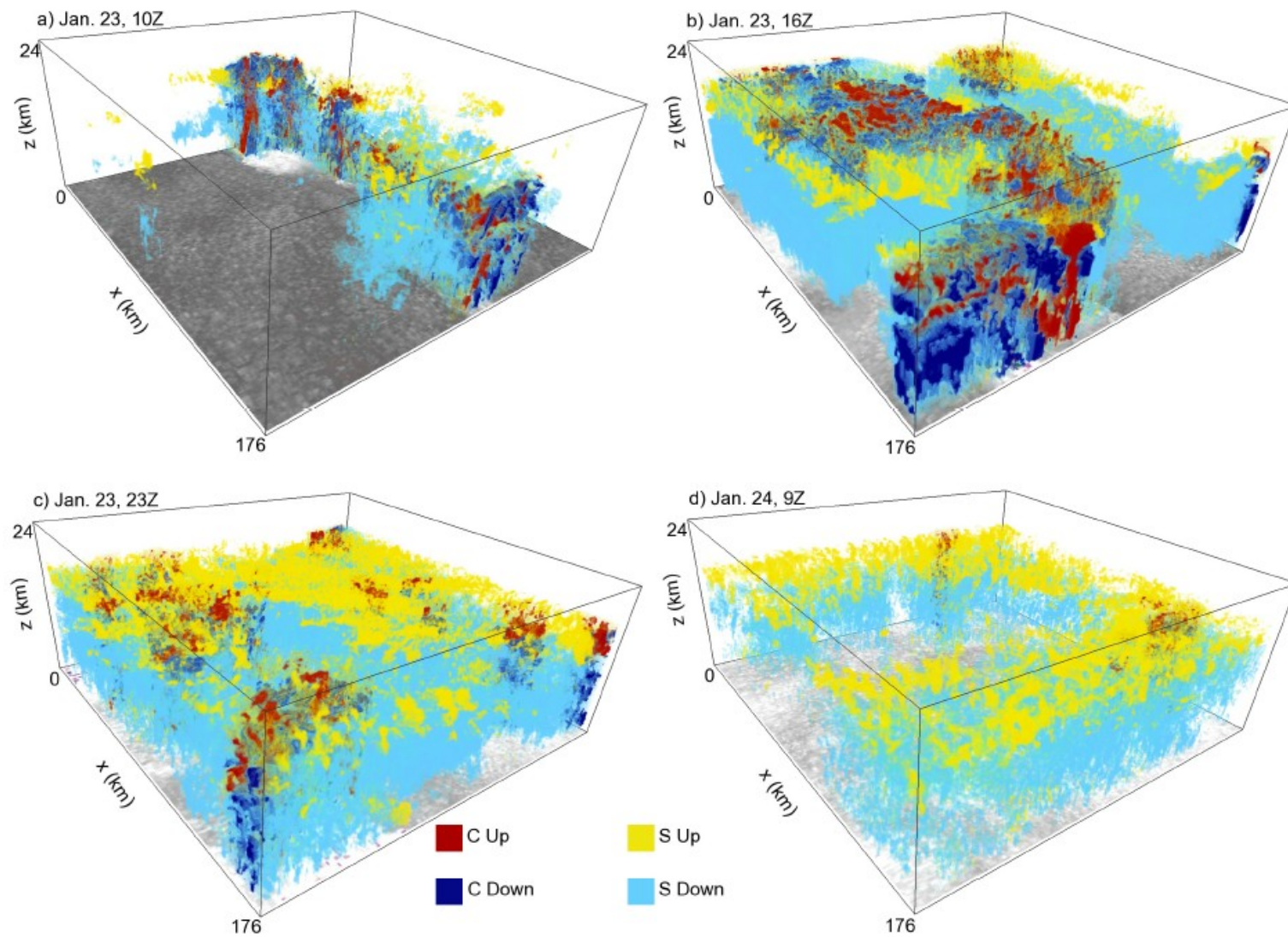


- Surestimation de la fraction convective dans les CRMs
- Résultats très variables d'un modèle à l'autre pour la fraction stratiforme (importance de la microphysique)

1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

Simulations CRM des systèmes convectifs à méso-échelle

Identification des “updrafts” et “downdrafts” convectifs et stratiformes au cours du cycle de vie



Difficultés pour valider les caractéristiques des structures simulées à partir d'observations

Mrowiec et al., JGR, 2012

1.3 L'organisation de la convection à méso-échelle

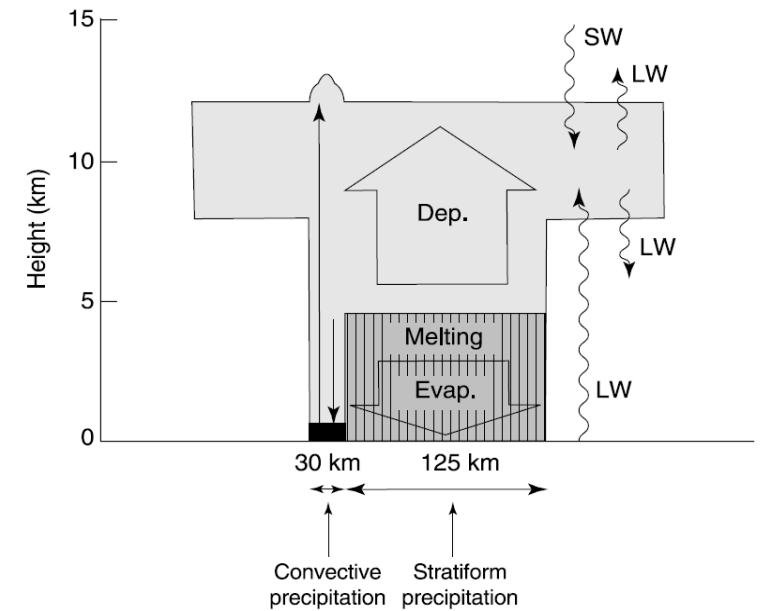
Les différents champs d'étude

**Observations
de
terrain**



<http://www.cnrm-game.fr/>

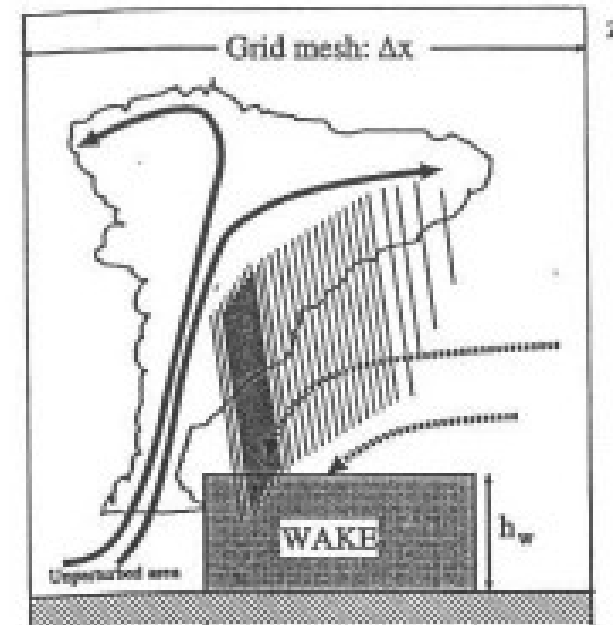
**Schémas
conceptuels
simples**



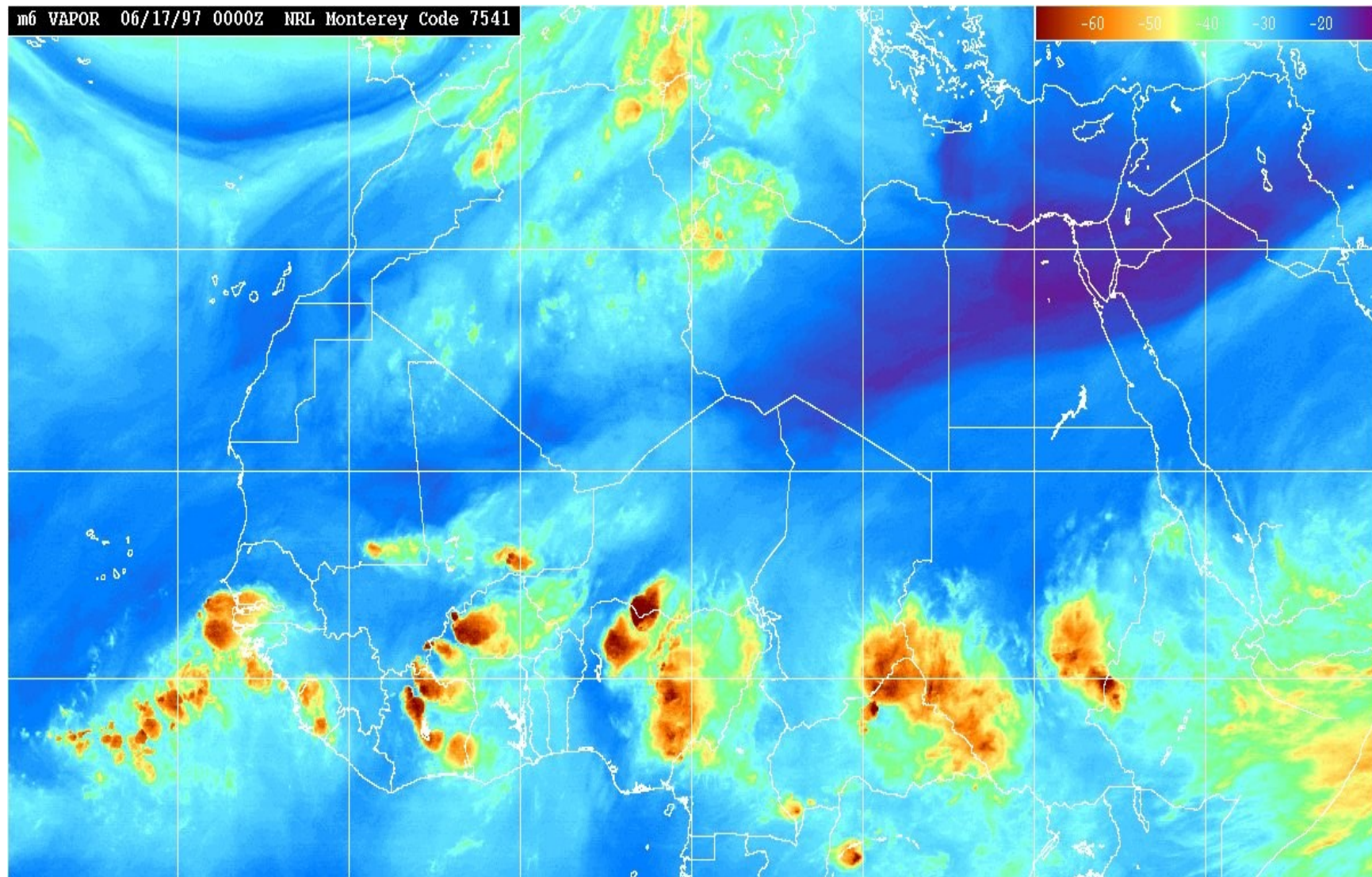
**Etude des
processus
dans les
simulations
3D**



**Mise en
équation
dans les
modèles
de climat**



2. Convection nuageuse et pluie



2.1 Systèmes convectifs et pluies globales

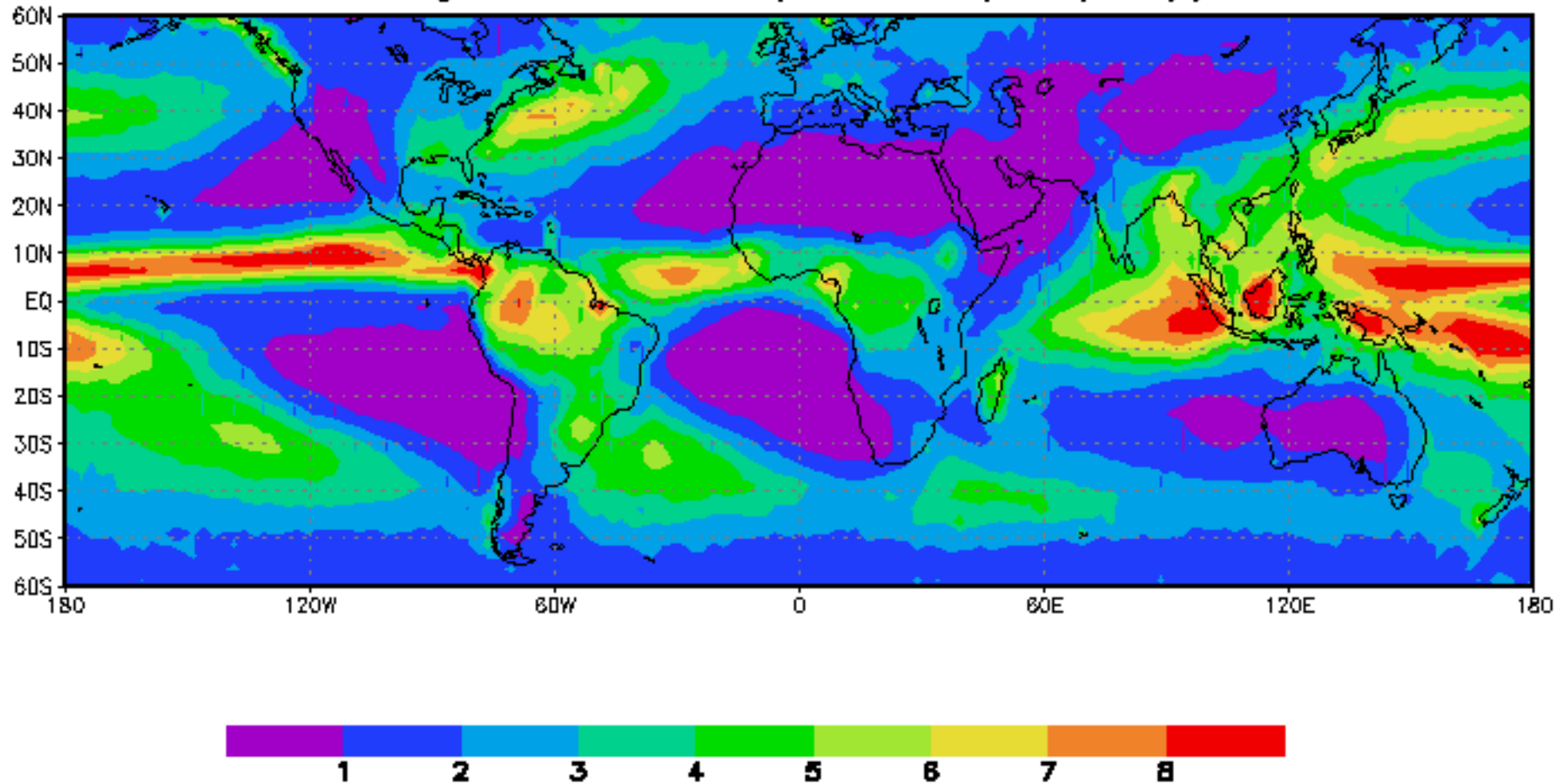
2.2 Le cycle diurne des pluies

2.3 Les pluies de mousson et l'oscillation de Madden Julian

2.1 Systèmes convectifs et pluies globales

Pluies moyennes globales

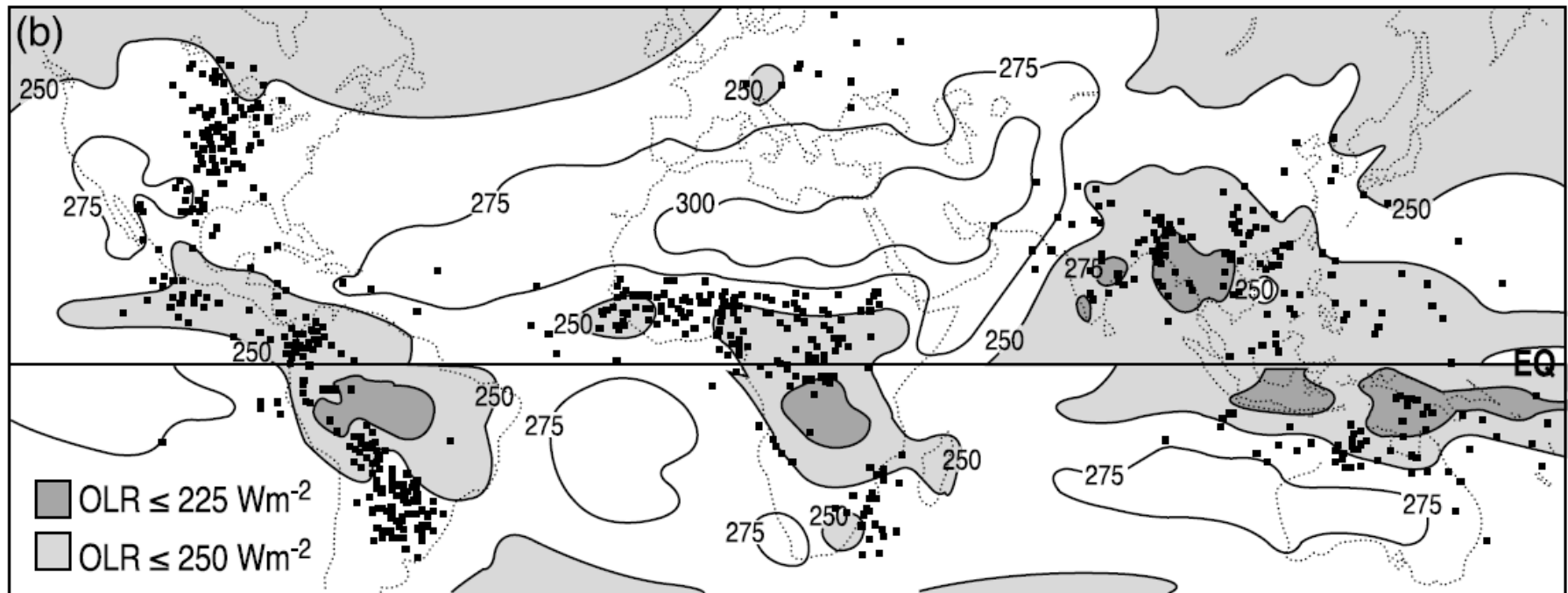
Annual Average GPCP Precipitation (mm/day): 1987–99



Il pleut principalement dans les régions tropicales

2.1 Systèmes convectifs et pluies globales

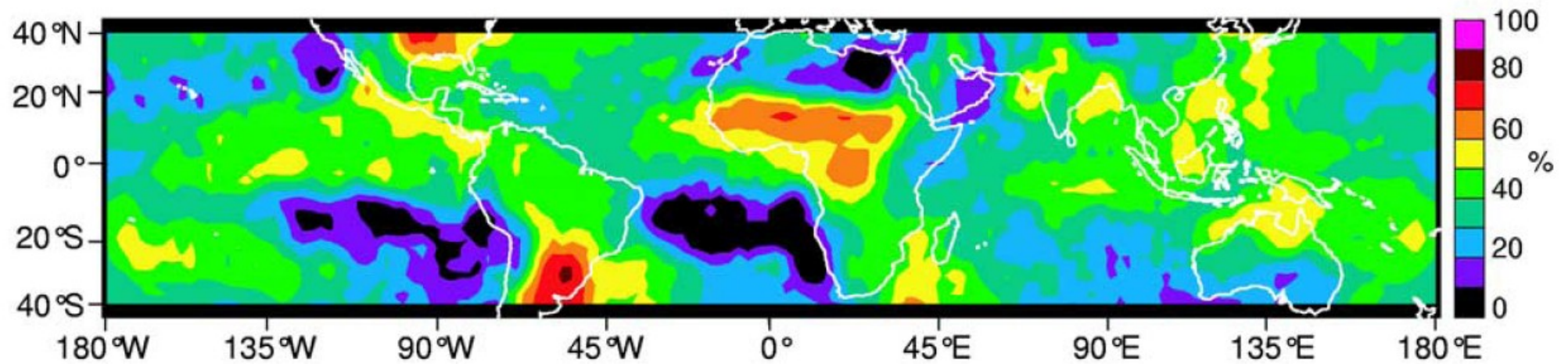
Distribution globale de MCS (points) et régions où la convection profonde est fréquente (gris)



Laing et Fritsch, QJRMS, 1997

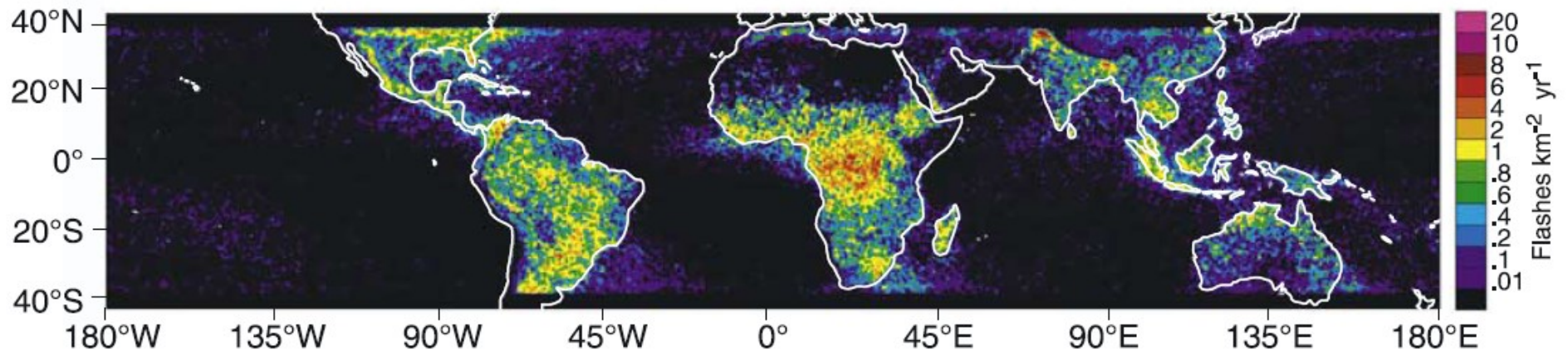
2.1 Systèmes convectifs et pluies globales

Pourcentage de MCSs avec un fort contenu en glace



Nesbitt et al., JC, 2000

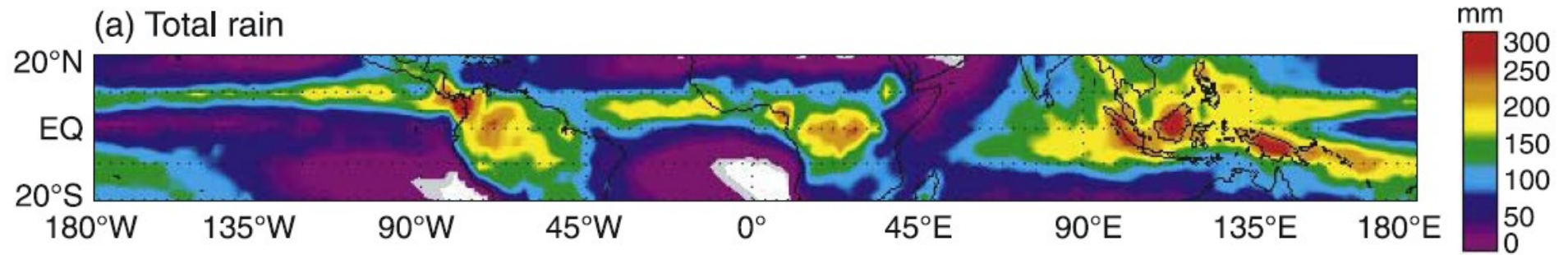
Intensité moyenne annuelle des éclairs



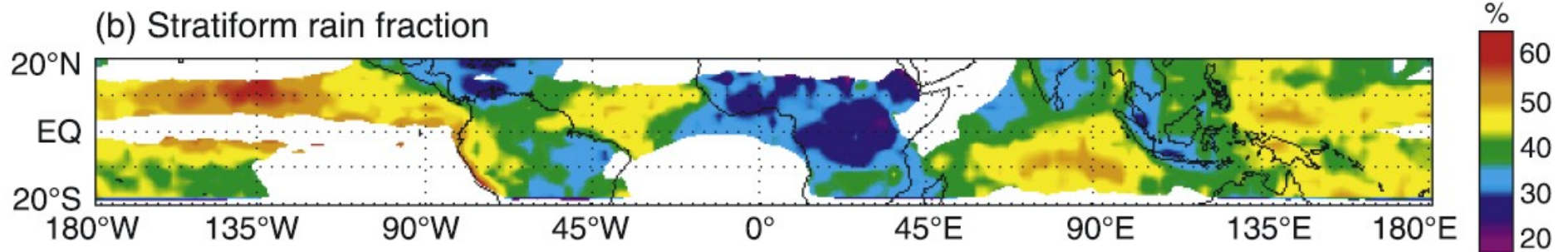
S. Nesbitt

2.1 Systèmes convectifs et pluies globales

Pluies annuelles totales



Pourcentage de pluies annuelles stratiformes

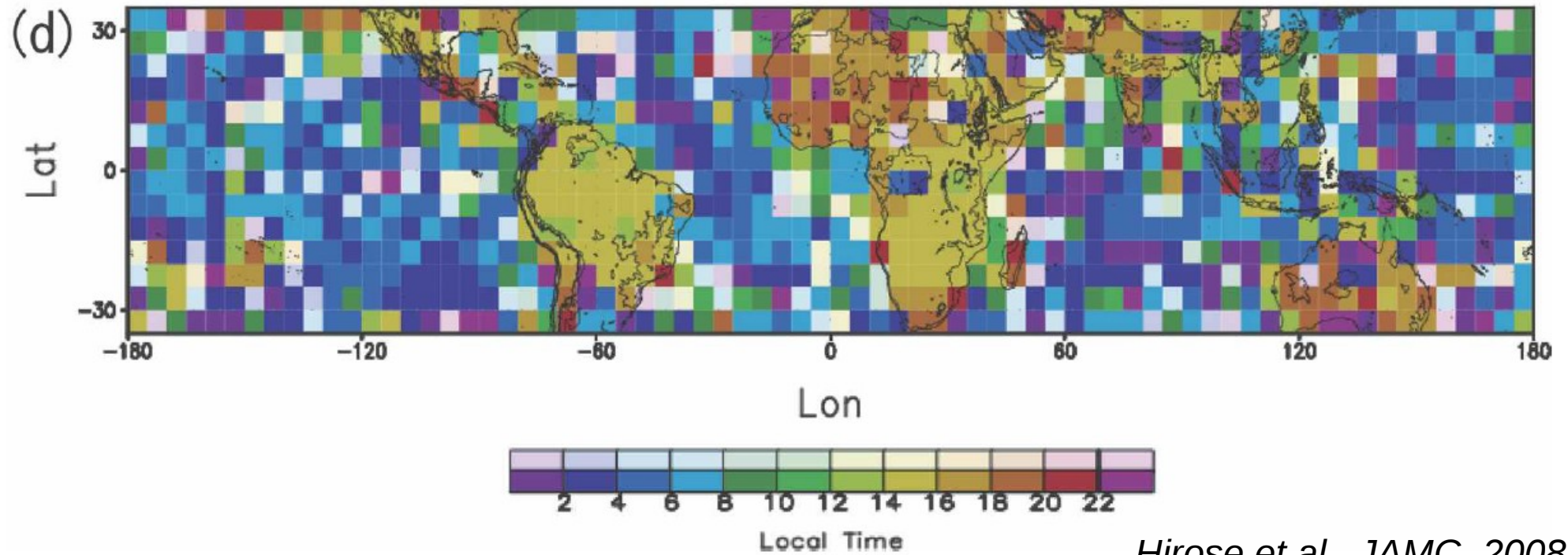


C. Schumacher

Pourcentage de pluies stratiformes plus important sur océan que sur continent

2.2 Le cycle diurne des pluies

Heure locale observée du maximum de précipitations



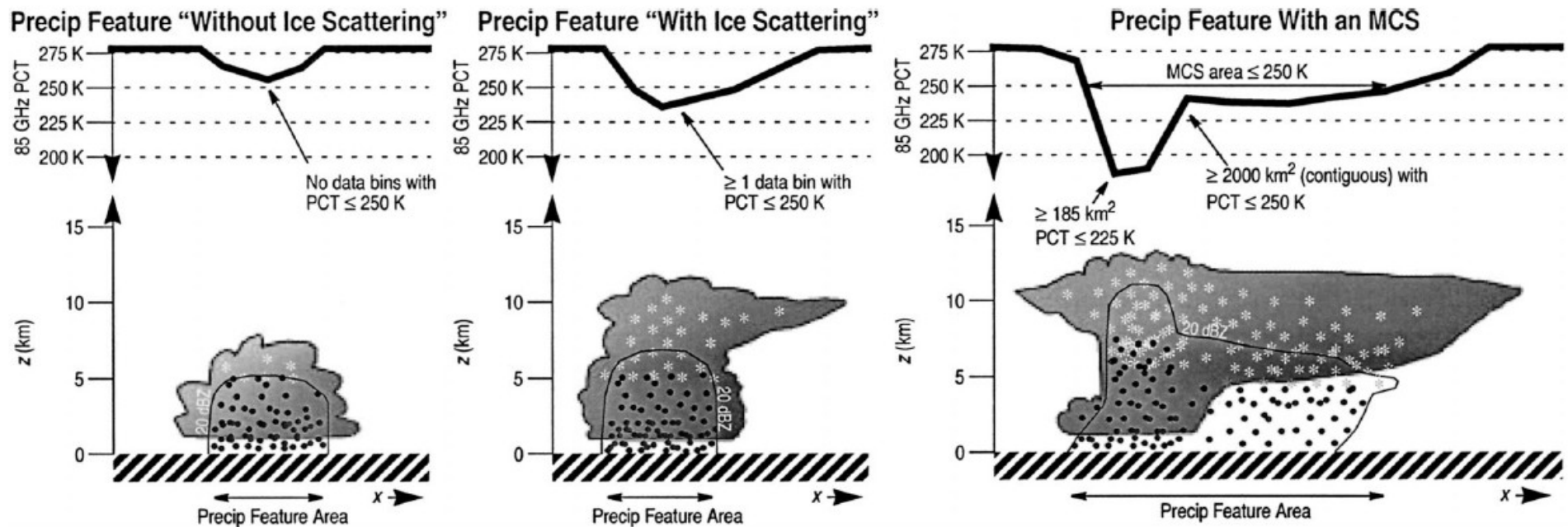
Hirose et al., JAMC, 2008

Maximum de pluies entre 14h et minuit sur continents, entre 2h et 8h sur océans

2.2 Le cycle diurne des pluies

Analyse de 3 ans d'observations de TRMM dans les Tropiques

Classification en 3 types de nuages précipitants



Nesbitt et al., Journal of Climate, 2000

2.2 Le cycle diurne des pluies

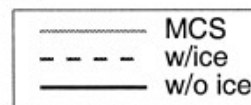
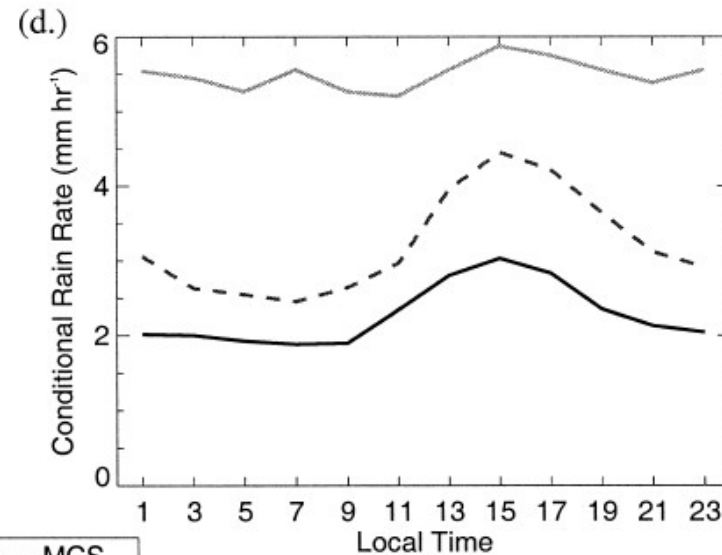
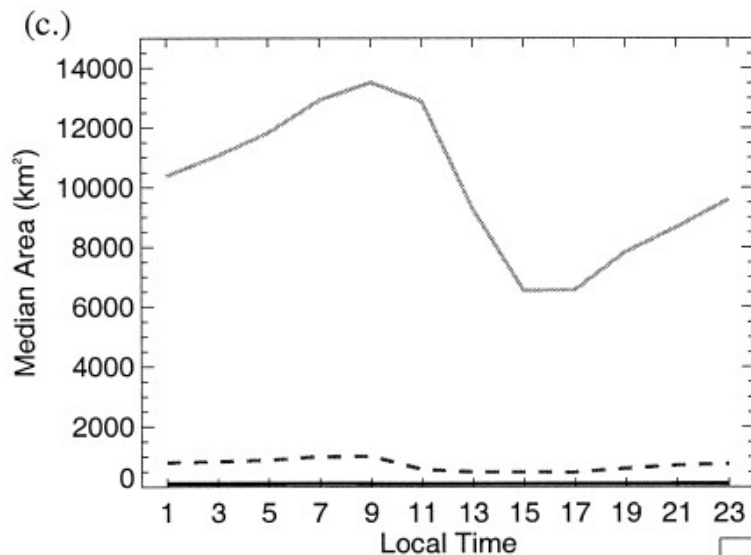
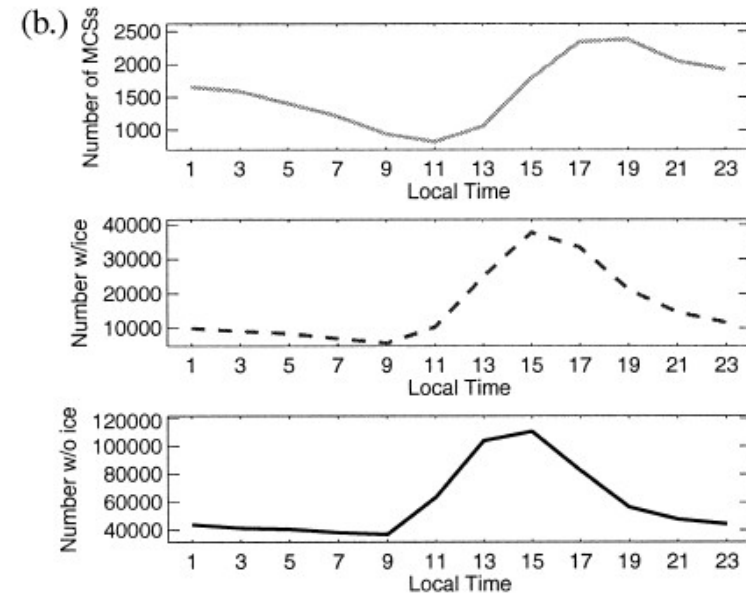
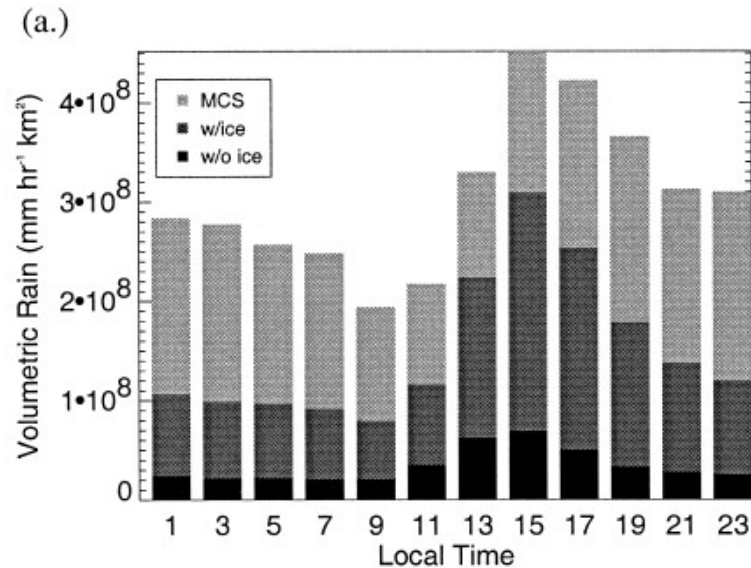
Le cycle diurne des pluies continentales

(a) pluies volumétriques

(b) Nombres d'éléments observés

(c) Aire moyenne

(d) Taux de pluie moyen



2.2 Le cycle diurne des pluies

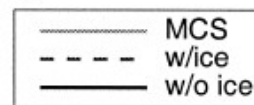
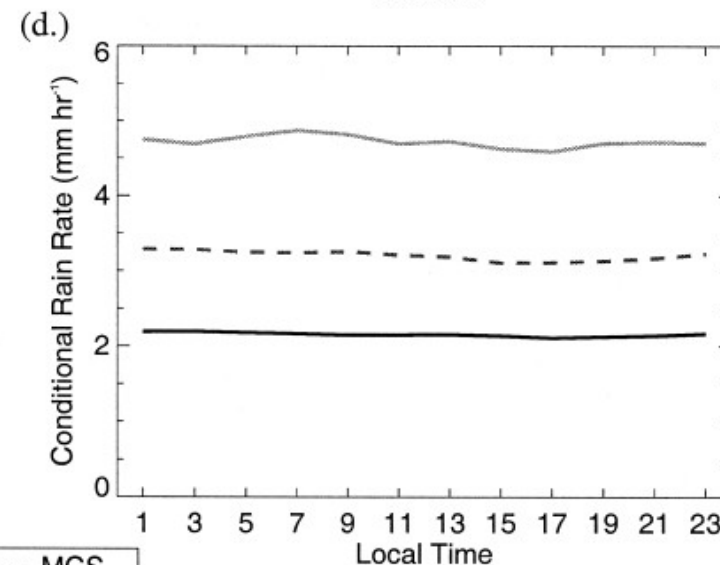
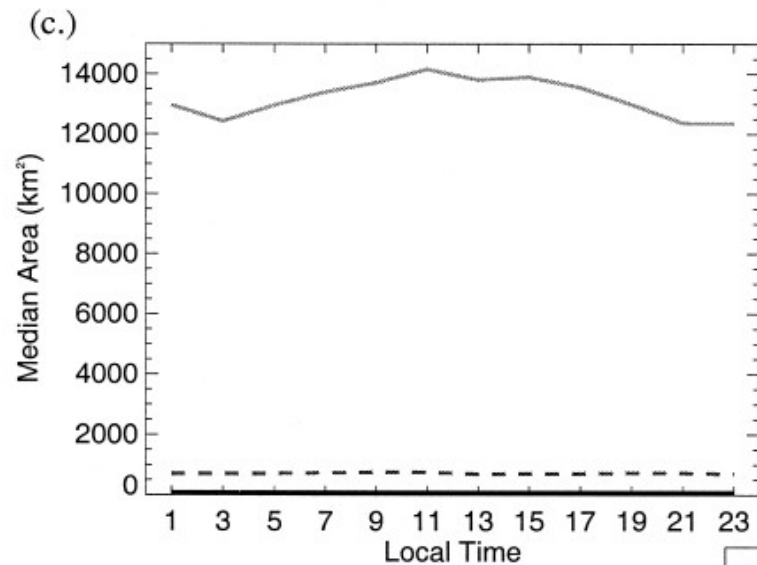
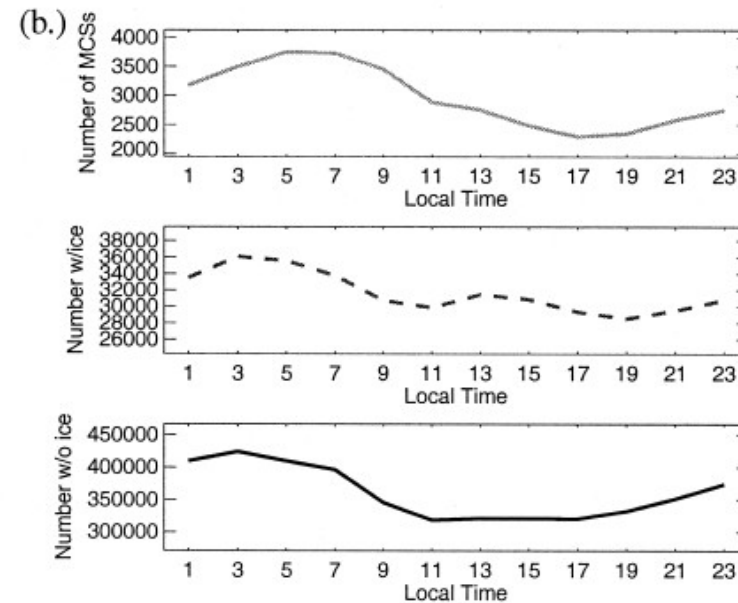
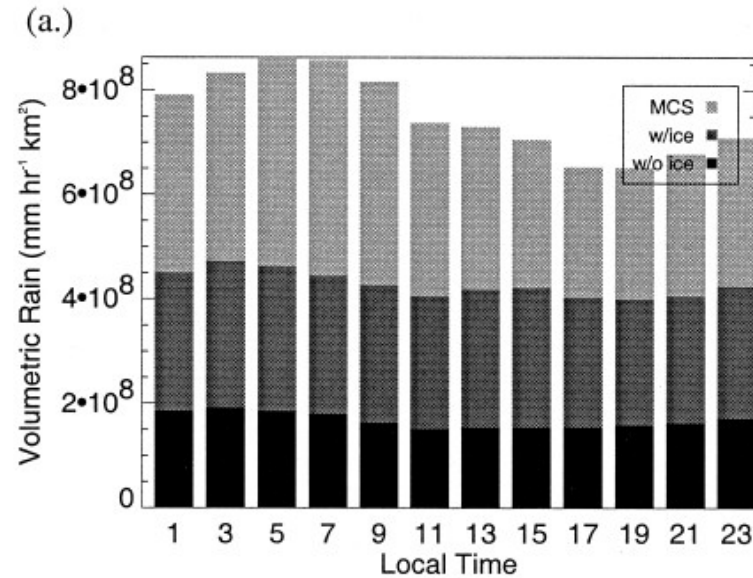
Le cycle diurne des pluies océaniques

(a) pluies volumétriques

(b) Nombres d'éléments observés

(c) Aire moyenne

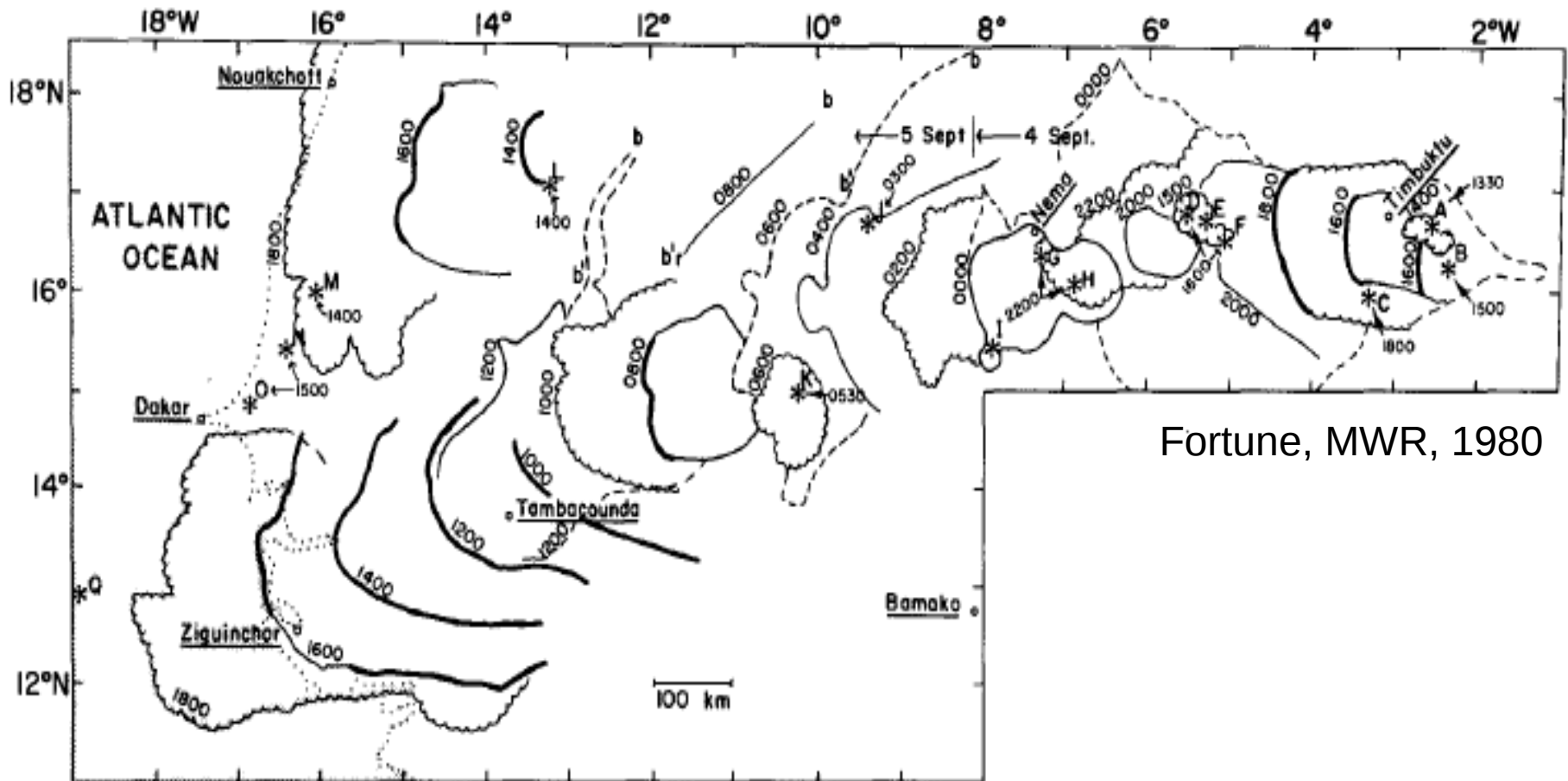
(d) Taux de pluie moyen



2.3 Pluies de mousson et oscillation de Madden Julian

MCS et mousson africaine

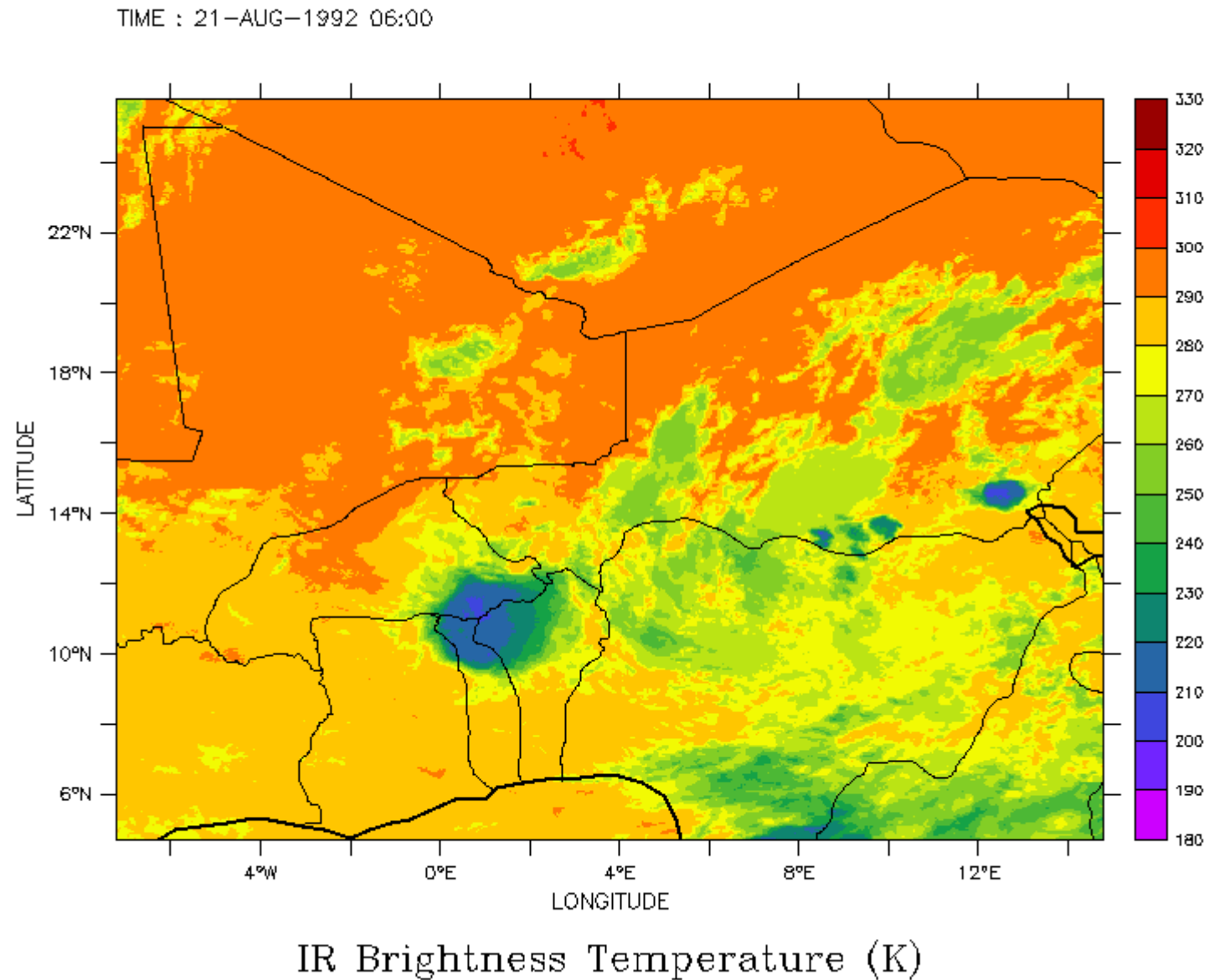
Propagation d'une ligne de grain sur l'Afrique les 4 et 5 septembre 1974



2.3 Pluies de mousson et oscillation de Madden Julian

MCS et mousson africaine

Exemple du cas Hapex Sahel du 21 aout 1992

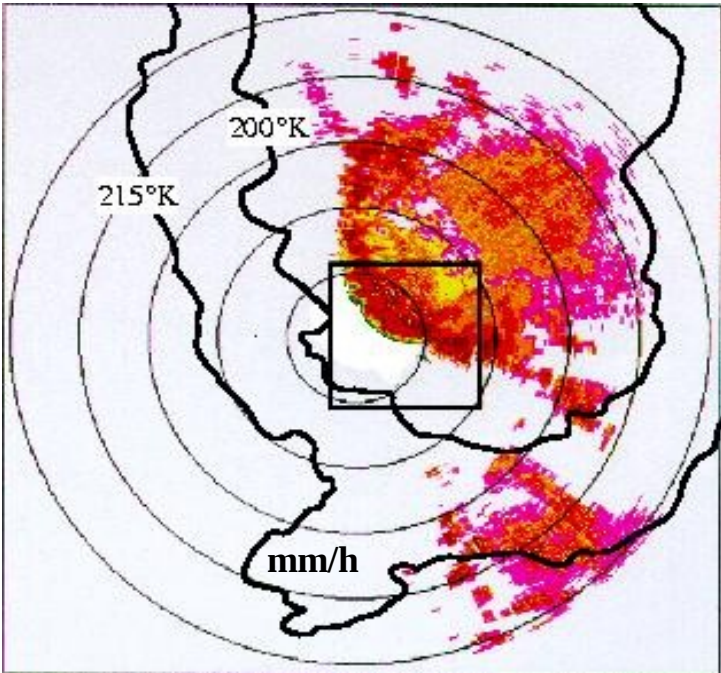


2.3 Pluies de mousson et oscillation de Madden Julian

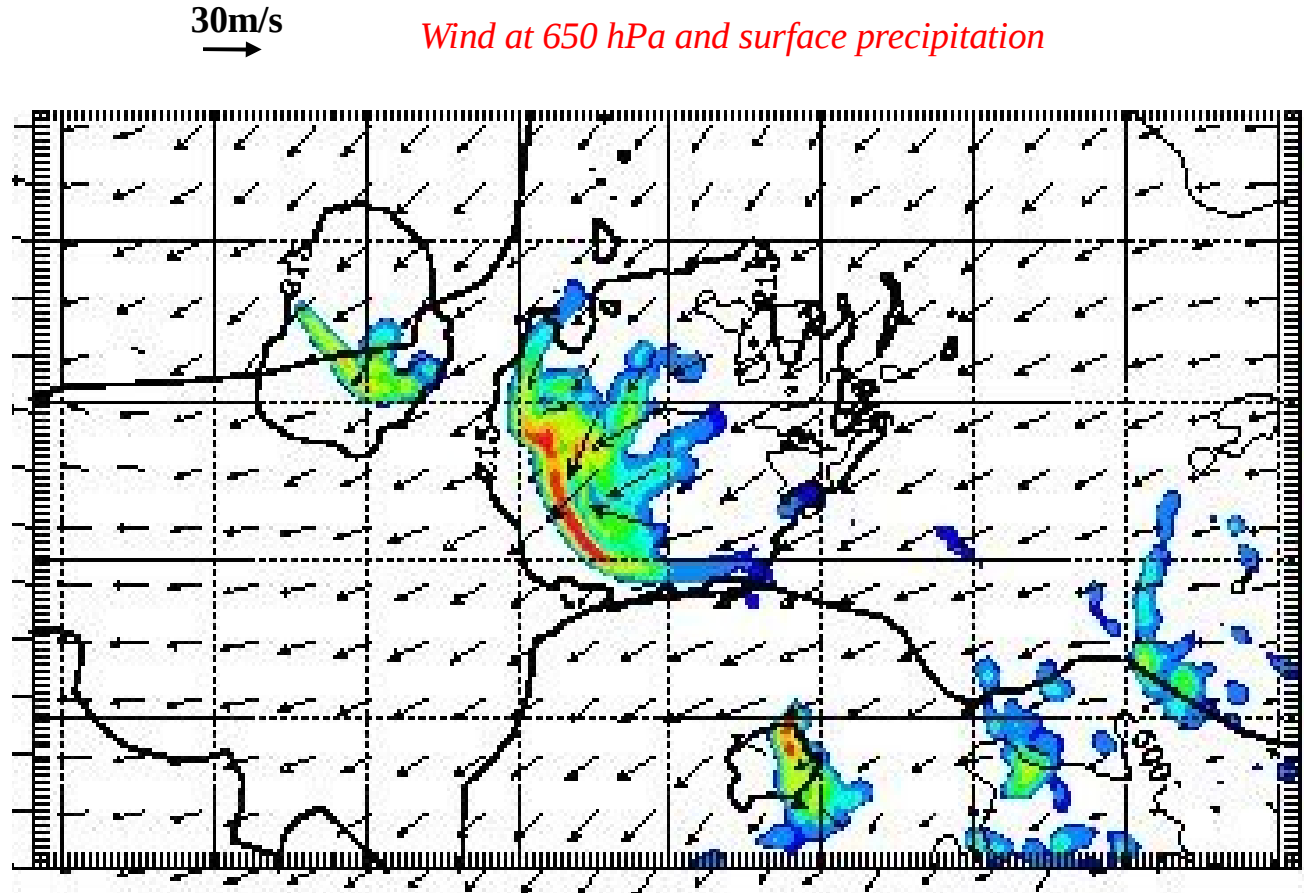
MCS et mousson africaine

Exemple du cas Hapex Sahel du 21 aout 1992

Pluies observées



Pluies simulées par MESO-NH



Wind at 650 hPa and surface precipitation

Niamey radar and IR
METEOSAT image

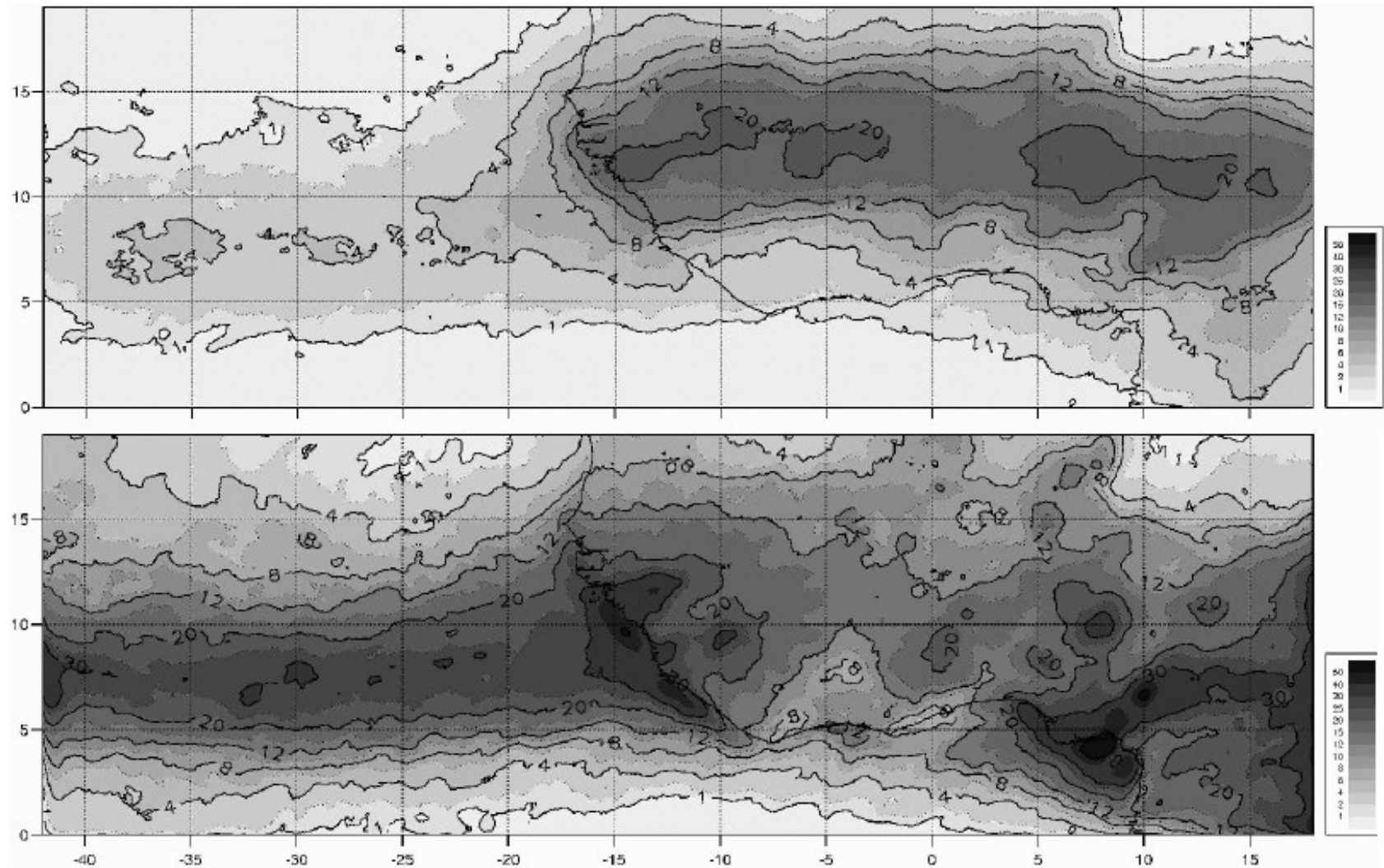
22UTC
21 aout 1992
Stage mature

Diongoue et al. 2002

2.3 Pluies de mousson et oscillation de Madden Julian

MCS et mousson africaine

Nébulosité moyenne sur JJAS associée aux MCS rapides ($>10\text{m/s}$) et aux MCS lents ($<10\text{m/s}$)

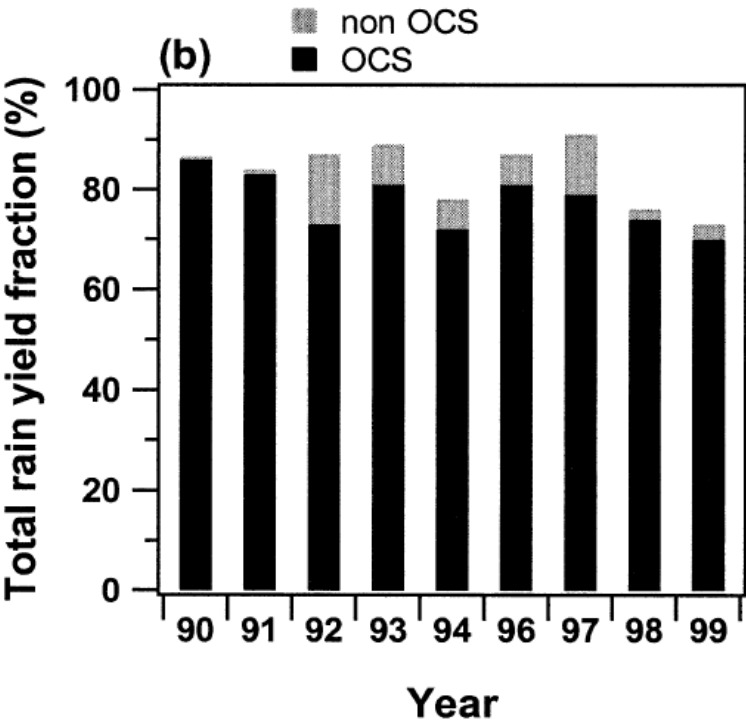
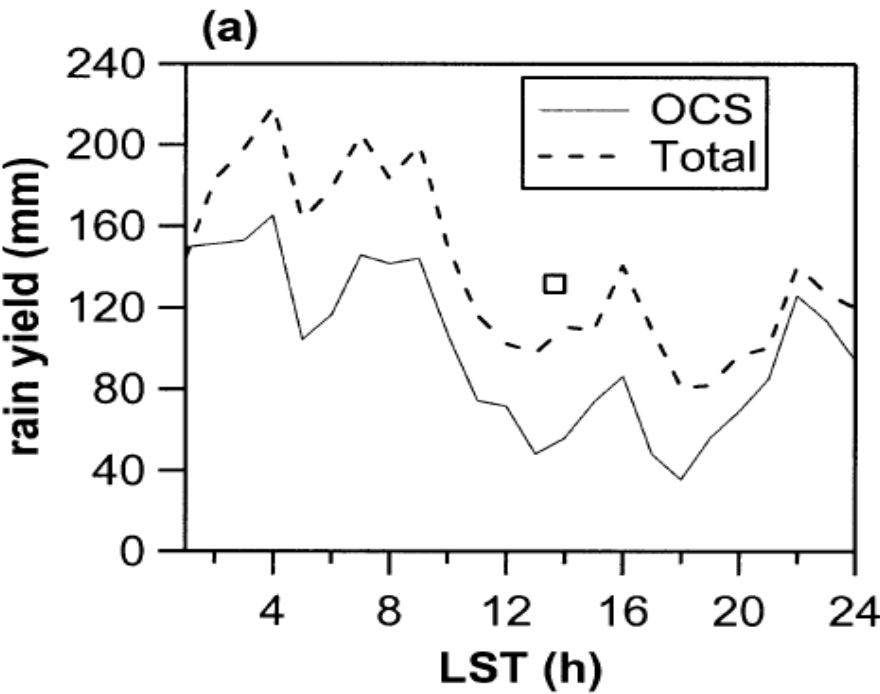
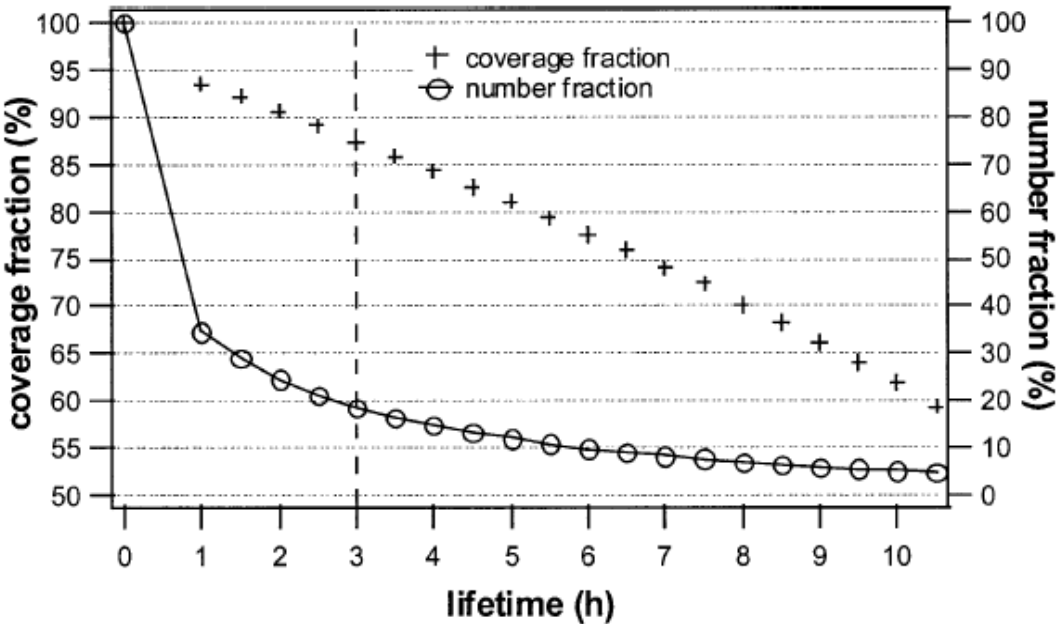


Tomasini et al., 2005

2.3 Pluies de mousson et oscillation de Madden Julian

MCS et mousson africaine

- Les systèmes convectifs “organisés”
- représentent 12% des systèmes
 - contribuent à 80% de la fraction nuageuse convective
 - contribuent à 90% des pluies

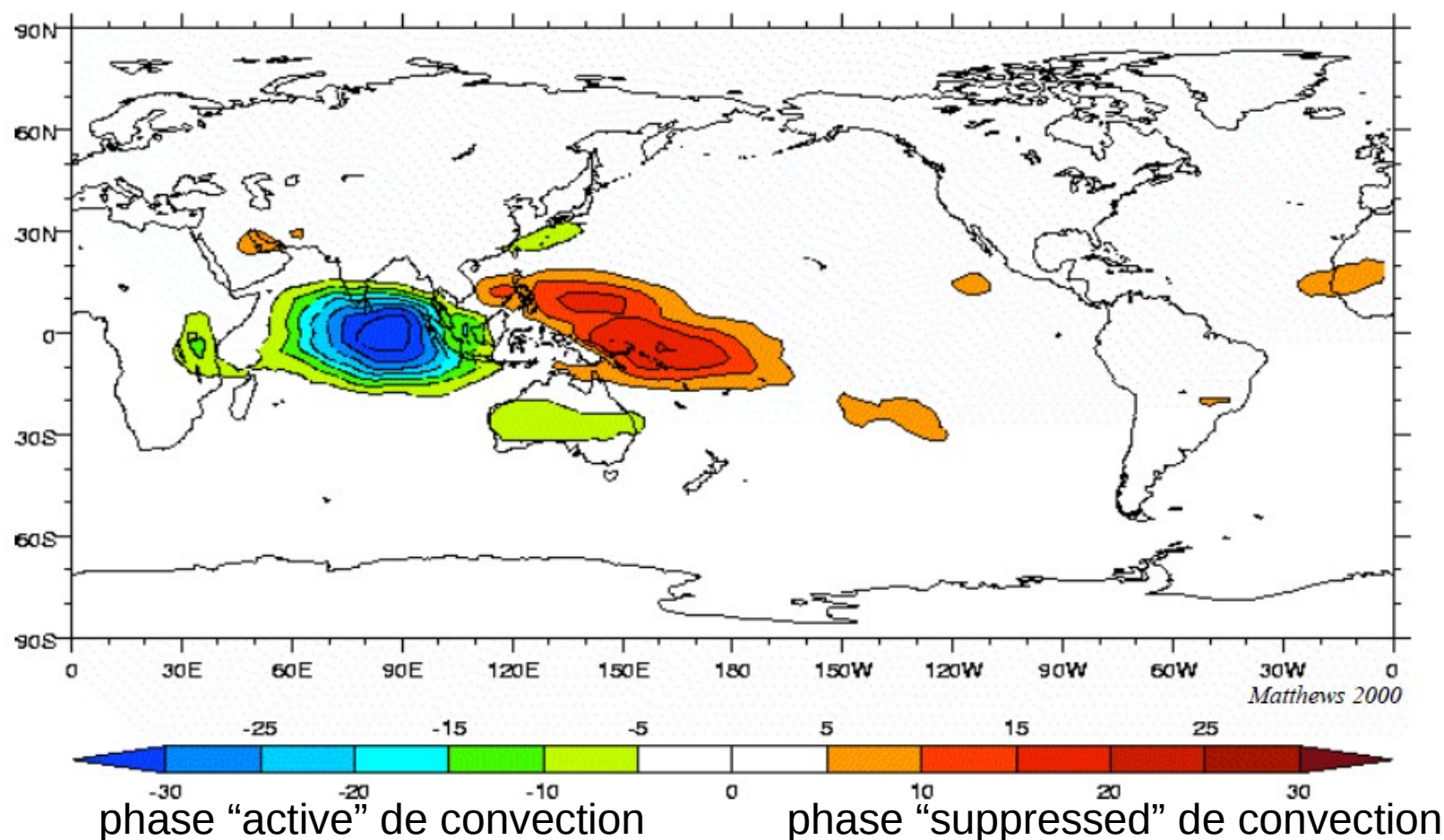


2.3 Pluies de mousson et oscillation de Madden Julian

L'oscillation de Madden-Julian (MJO)

- onde de périodicité de 30 à 60 jours
- propagation moyenne vers l'est le long de l'équateur.
- mode de variabilité qui module les variations météorologiques dans les Tropiques.

Anomalie d'OLR

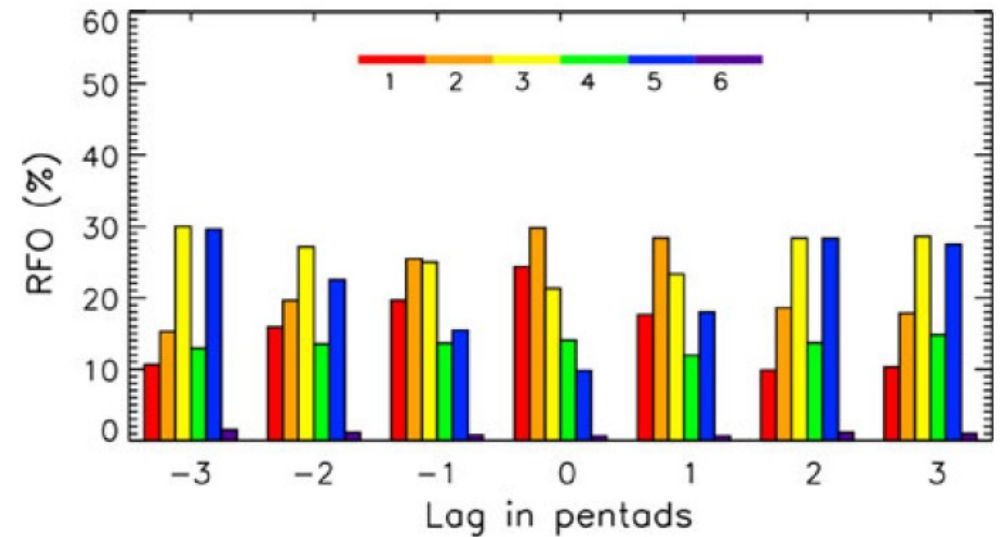


2.3 Pluies de mousson et oscillation de Madden Julian

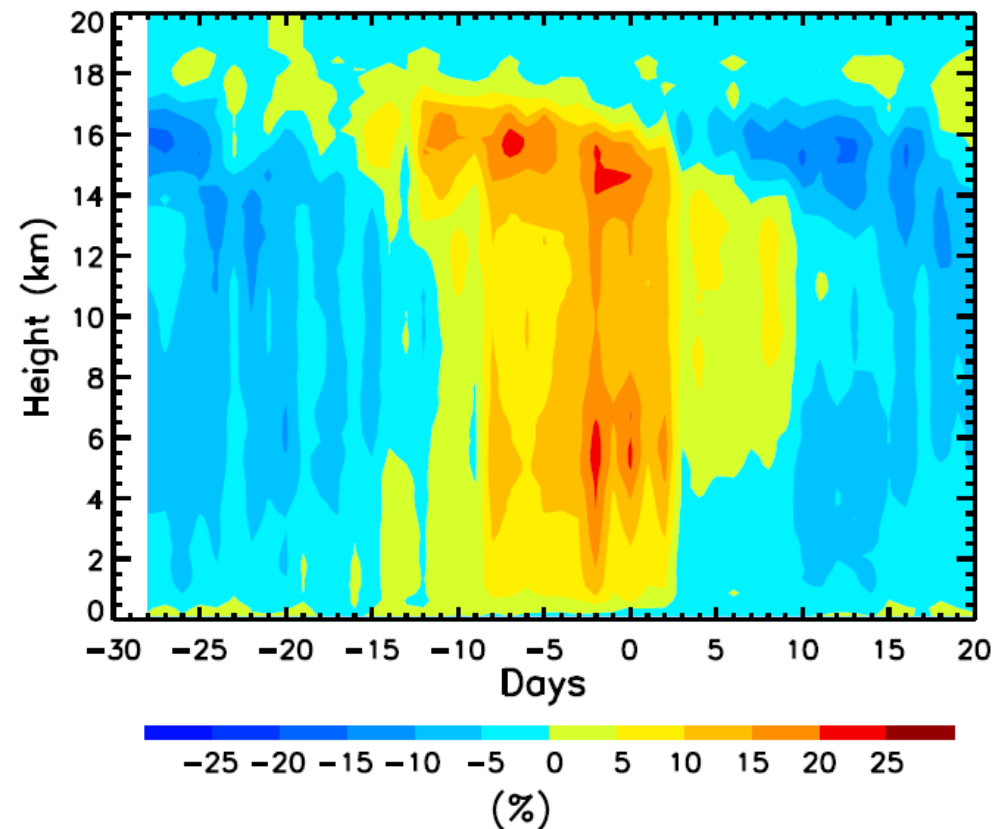
L'oscillation de Madden-Julian (MJO)

Composite de fréquence d'occurrence des différents types de nuages avant et après le maximum de convection

1. convection profonde
2. enclume
3. congestus
4. cirrus
5. cumulus
6. stratocumulus



Cloud Freq. Anomaly (%) Composite



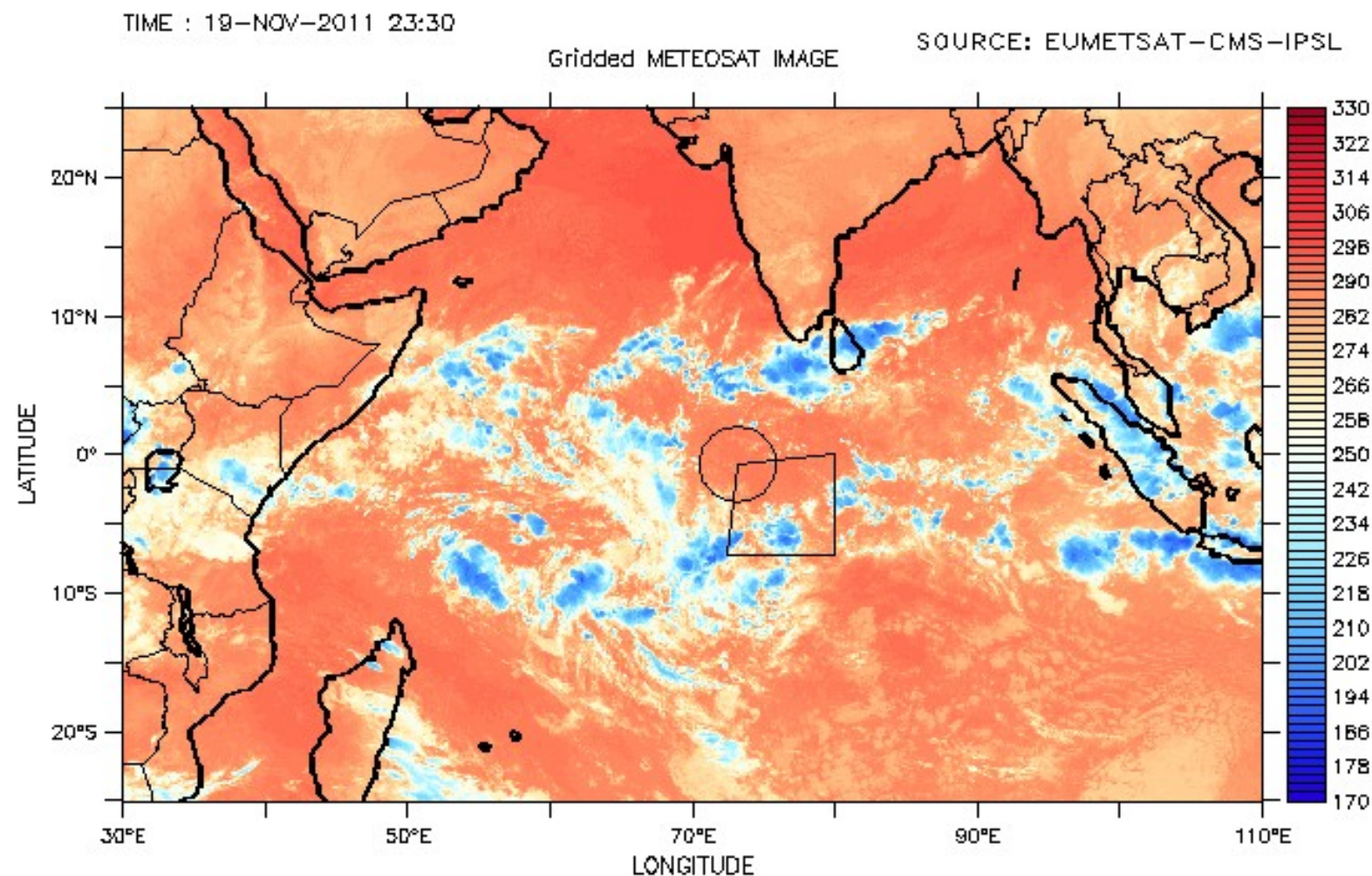
Anomalies de couverture nuageuse

2.3 Pluies de mousson et oscillation de Madden Julian

Campagne CINDY-DYNAMO

Evénement MJO du 20 novembre au 10 décembre 2011

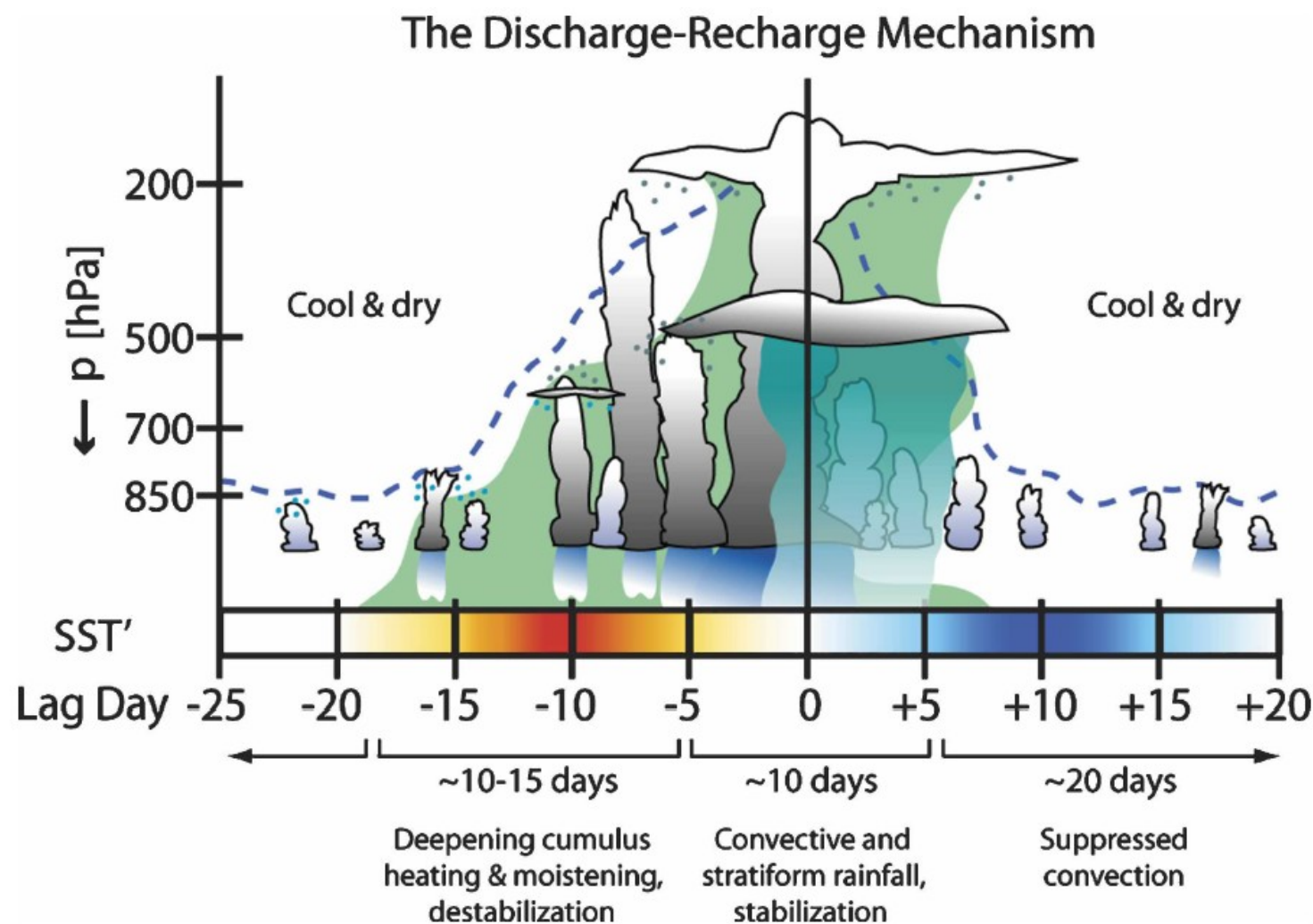
OLR vue par Météosat



METEOSAT_7 Infrared (IR) Brightness Temperature (K)

2.3 Pluies de mousson et oscillation de Madden Julian

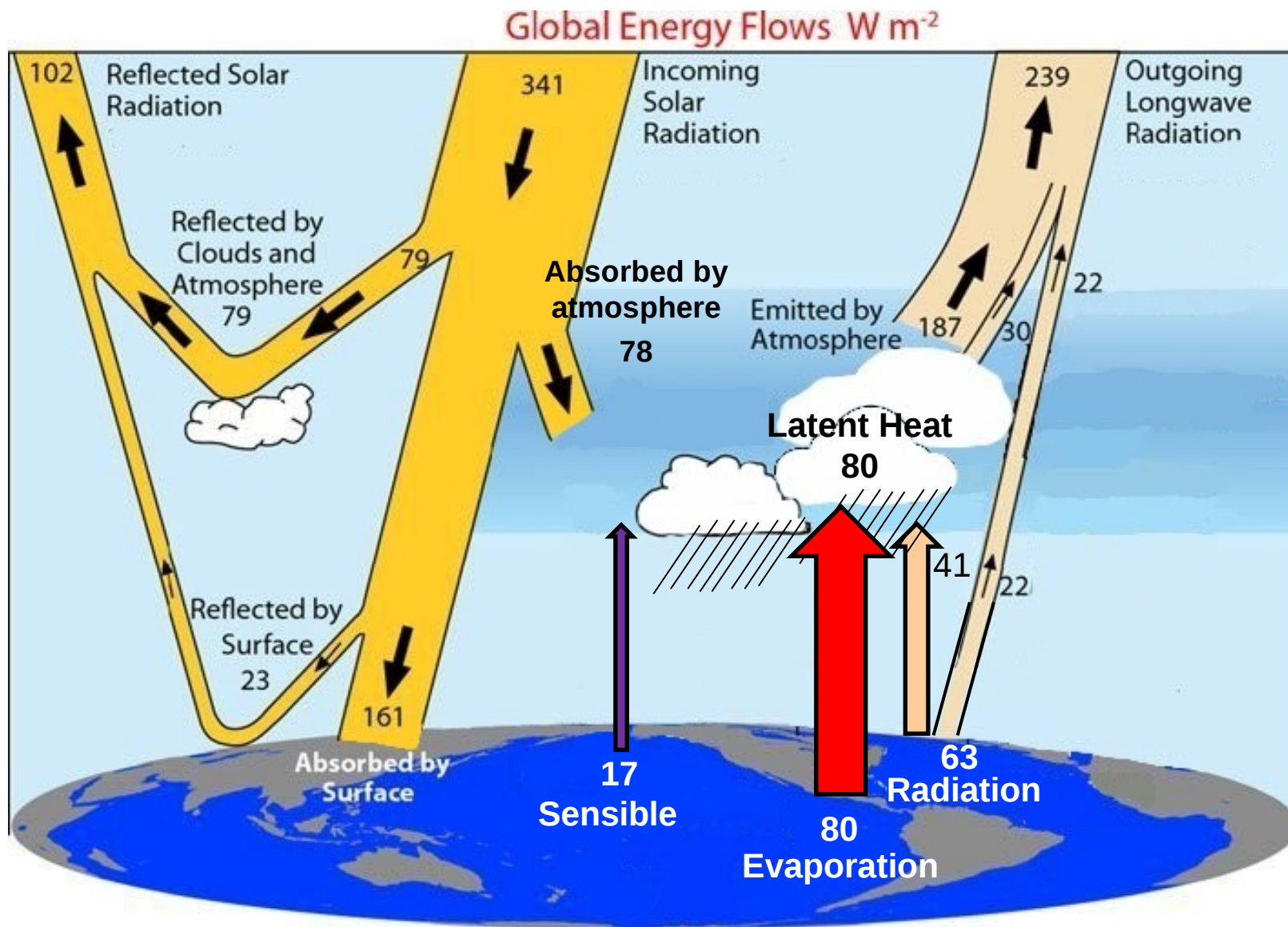
L'oscillation de Madden-Julian (MJO)



Benedict et Randall, JAS, 2007

- Recharge de l'humidité troposphérique par les cumulus peu profonds
- Décharge de l'humidité troposphérique par les pluies et la subsidence compensatoire

3. Convection nuageuse et rayonnement



Adapté de [Trenberth & Fasullo, 2012]

Rappels sur le forçage radiatif des nuages

Variation du bilan radiatif de la Terre qui résulterait de la disparition de tous les nuages

Le forçage radiatif des nuages: (*cloud radiative forcing*)
une mesure de l'effet des nuages sur le rayonnement

LWCRF = LW ciel clair - LW ciel total

SWCRF = SW ciel clair - SW ciel total

LWCRF est plutôt positif car les nuages sont plus froids que la surface (σT^4)

SWCRF est plutôt négatif car les nuages sont plus brillants que la surface

NetCRF = LWCRF+SWCRF

Si NetCRF >0 alors un effet globalement de réchauffement de la planète

Si NetCRF < 0 alors un effet globalement de refroidissement de la planète

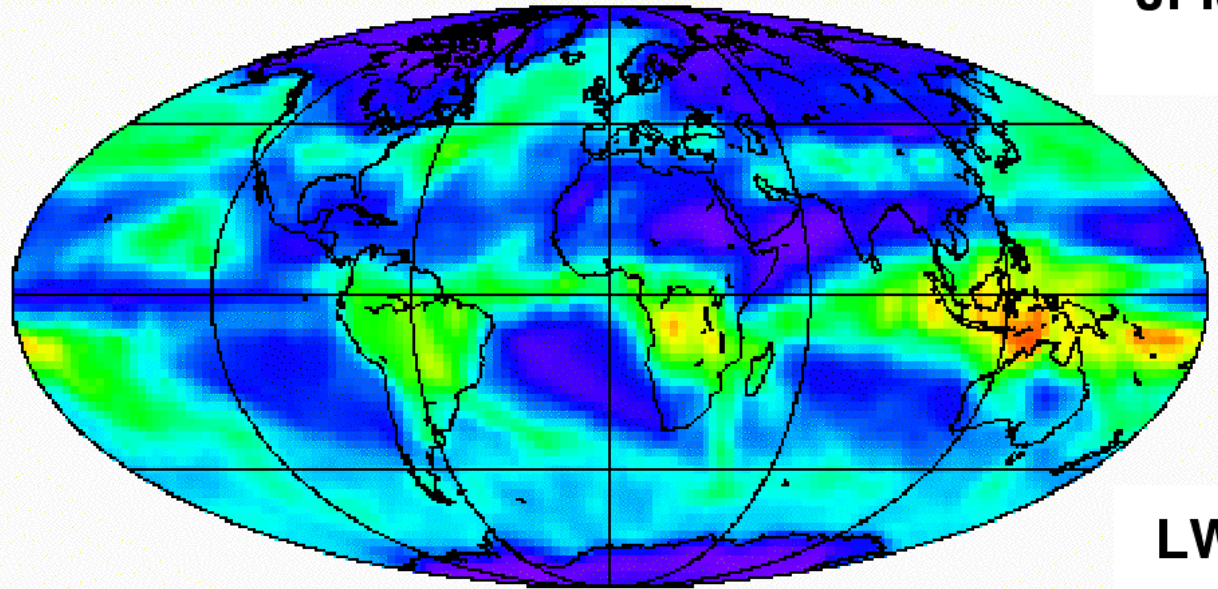
Rappels sur le forçage radiatif des nuages

JFM

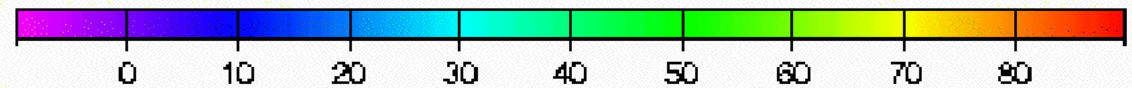
Forçage radiatif LW

Positif: les nuages diminuent l'énergie réfléchi

Moyenne annuelle: $+29\text{W/m}^2$



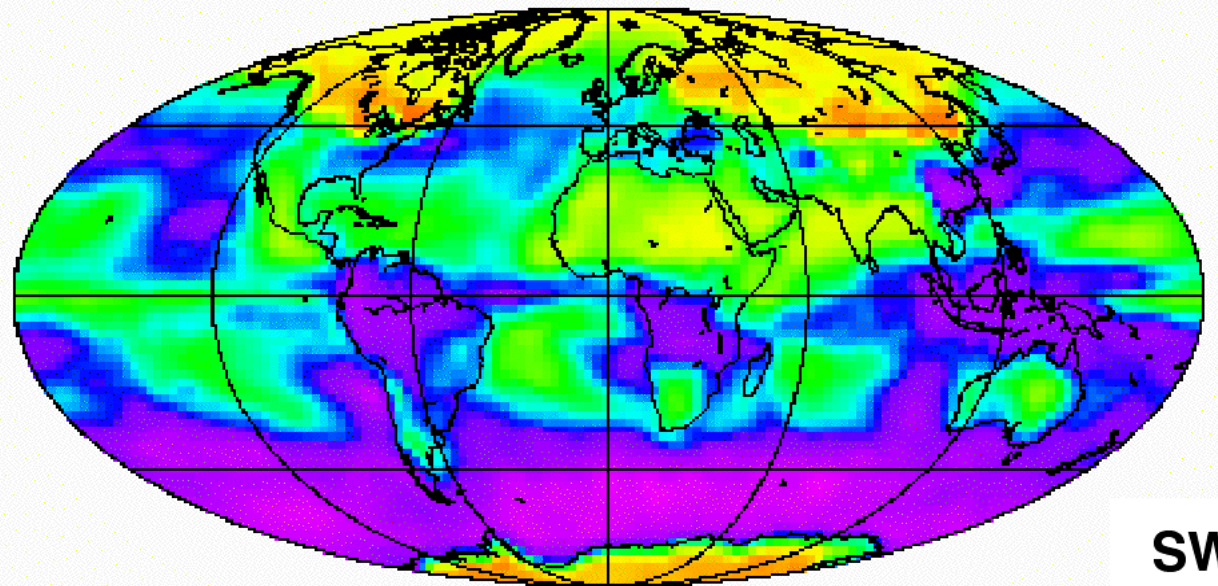
LW



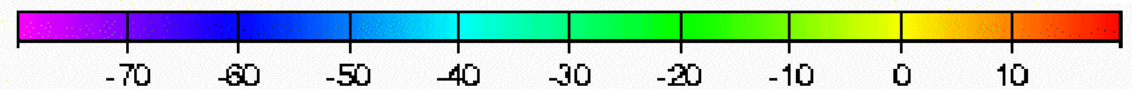
Forçage radiatif SW

Négatif: les nuages diminuent l'énergie absorbée

Moyenne annuelle: -47W/m^2



SW

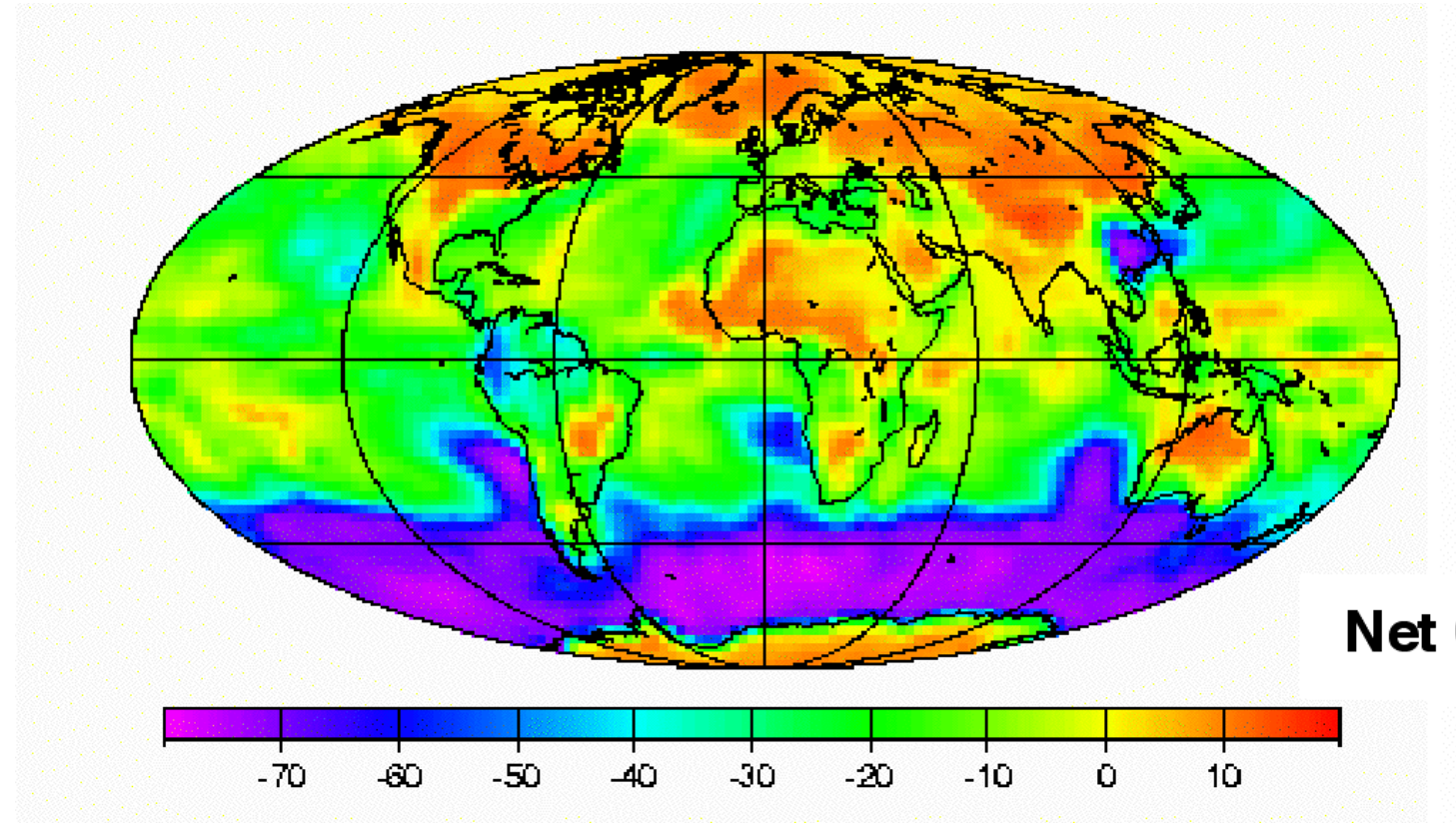


Rappels sur le forçage radiatif des nuages

Forçage radiatif net

Moyenne annuelle: -18W/m^2

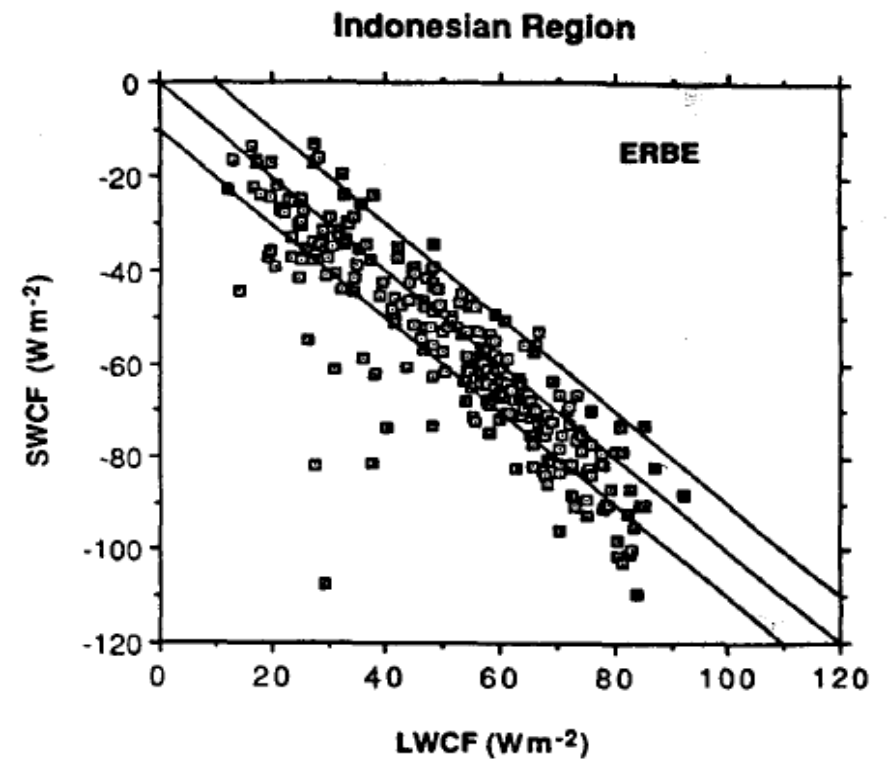
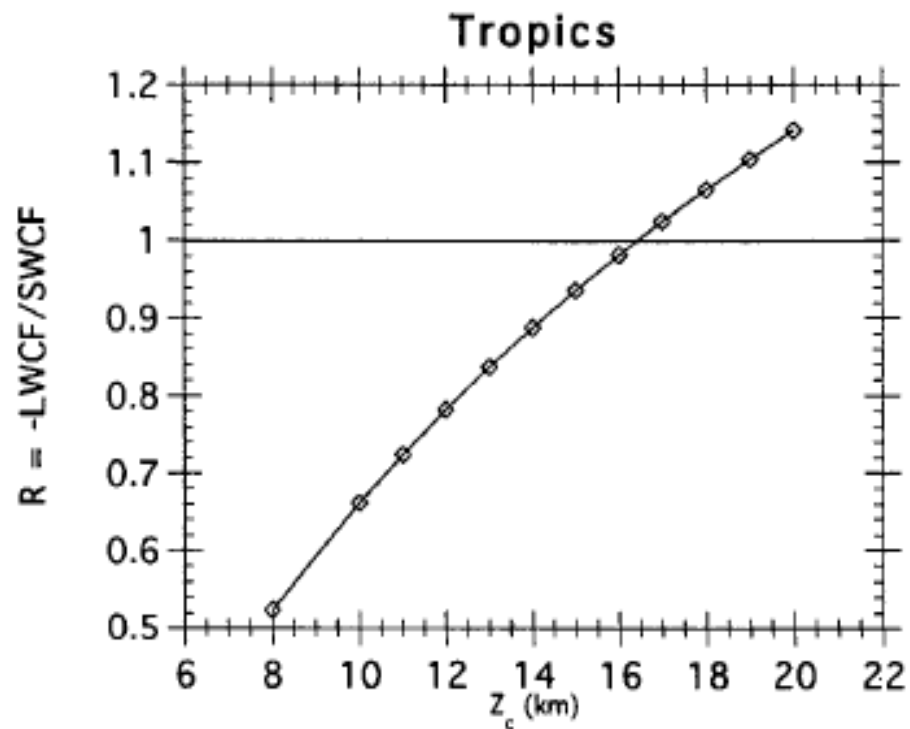
Globalement, l'effet des nuages est de refroidir la planète.



On observe une quasi-annulation du forçage radiatif net des nuages dans certaines régions des Tropiques

Introduction du TP

Kiehl (1994) propose un modèle simple pour expliquer cette quasi-annulation du forçage radiatif net dans les Tropiques



$$R = - \frac{LWCF}{SWCF}$$

$$= \frac{\sigma T_s^4 \left[1 - \left(1 - \frac{\Gamma z_c}{T_s} \right)^4 \right] - G_a(0, z_c)}{0.5Q} \quad (15)$$

Quelle est l'altitude d'un unique nuage "noir" telle que le forçage radiatif LW soit égal au forçage radiatif SW?