

Revisite des courants de densité : une nouvelle méthodologie pour leur détection et leur caractérisation dans les modèles haute-résolution

Laboratoire de Météorologie Dynamique, Paris

Max Planck Institute for Meteorology, Hambourg

Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse

Nicolas Rochetin

Ludovic Touzé-Peiffer

Cathy Hohenegger

Najda Villefranque

*Rochetin N., Hohenegger C., Touzé-Peiffer L. and Villefranque N.,
A physically based robust definition of convectively generated density
currents : detection and characterization in convection-permitting
simulations*

Submitted to J.A.M.E.S

Contexte

Processus clé du cycle de vie et de l'organisation spatiale de la convection

- Convection profonde organisée : composant interne
- Convection profonde isolée : régénération et/ou intensification des cellules orageuses
- Convection peu profonde : organisation spatiale des cumulus d'alizés (RICO, EUREC4A)

Bien décrit et largement documenté depuis au moins 40 ans (Houze, Moncrieff, Rotunno, Lafore, Thorpe, etc ...)

Valeur ajoutée dans LMDZ (Grandpeix & Lafore, 2010, Grandpeix, Lafore & Cheruy 2010 inspiré en partie de Qian et al. 1998)

- Cycle diurne des précipitations continentales (mémoire de la convection)
- Thermodynamique de couche-limite en présence de convection profonde

Un fort engouement pour les « cold pools » dans les CRM/LES et les obs in-situ depuis 7-8 ans

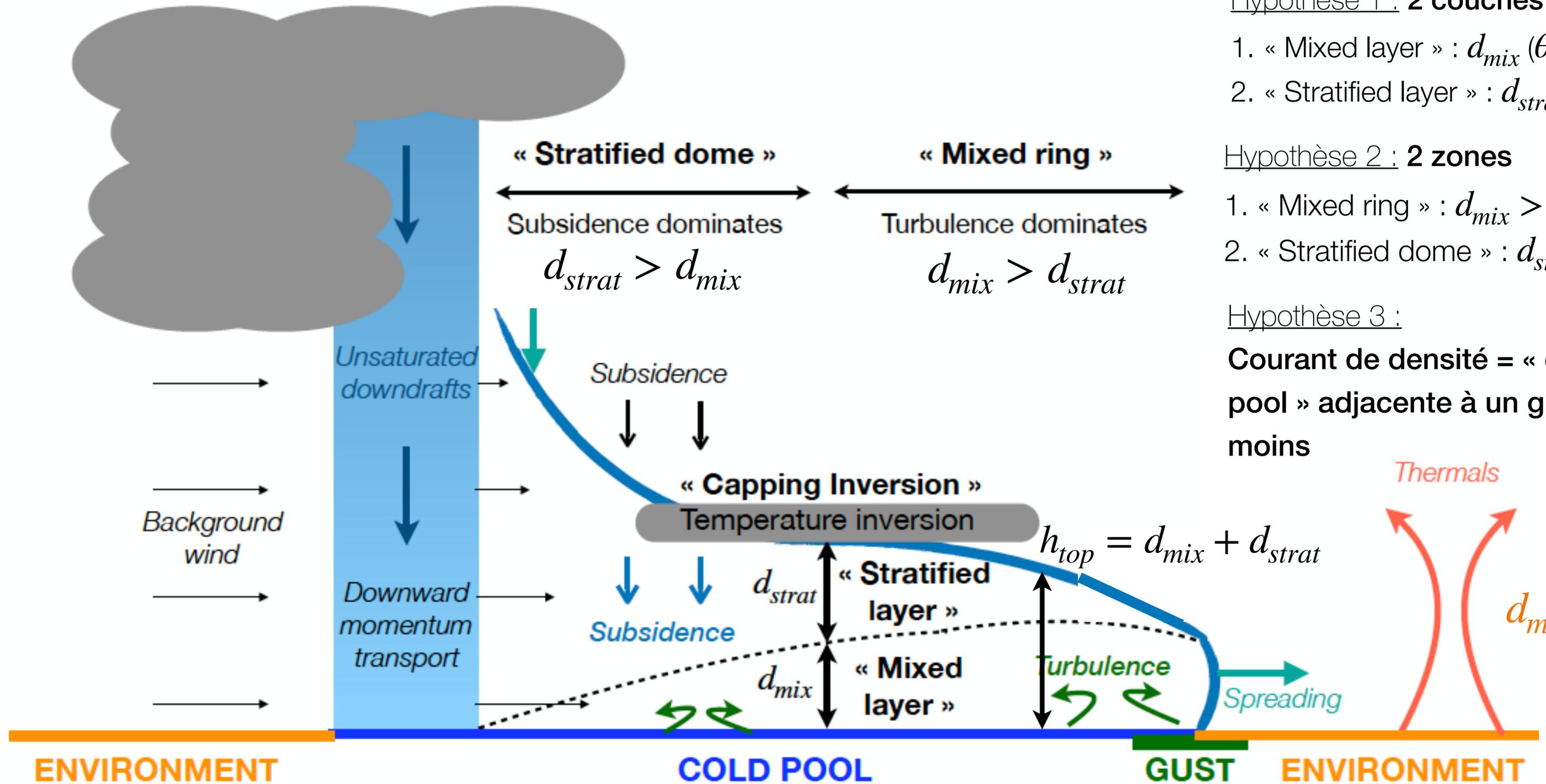
- Le terme de « cold pool » a éclipsé le terme « density current »
- Simulations souvent idéalisées : surfaces océaniques avec SST homogène en Equilibre Radiatif-Convectif
- Multiples méthodes de détection : anomalies de température, seuils de précipitation, traceurs, segmentation 3D, vitesse verticales (gust), chute de température (obs in-situ), etc ...

Aucune n'a été validée dans différents régimes de convection, sur différentes surfaces, à différentes heures locales, dans différentes situations synoptiques

Objectifs

1. **Proposer une méthode de détection des courants de densité basée sur un maximum d'arguments physiques**
2. **Matérialiser ces écoulements dans les LES et CRM, tels qu'observés et conceptualisés pour ...**
 - ▶ contraindre les paramétrisations
 - ▶ comprendre plus en détail la dynamique de la convection
3. **En extraire des signatures thermodynamiques ou radiatives permettant leur détection ...**
 - ▶ directe dans les obs in-situ
 - ▶ indirecte dans les satellites

Image conceptuelle et hypothèses de travail



Hypothèse 1 : **2 couches**

1. « Mixed layer » : $d_{mix}(\theta_v)$
2. « Stratified layer » : d_{strat}

Hypothèse 2 : **2 zones**

1. « Mixed ring » : $d_{mix} > d_{strat}$
2. « Stratified dome » : $d_{strat} > d_{mix}$

Hypothèse 3 :

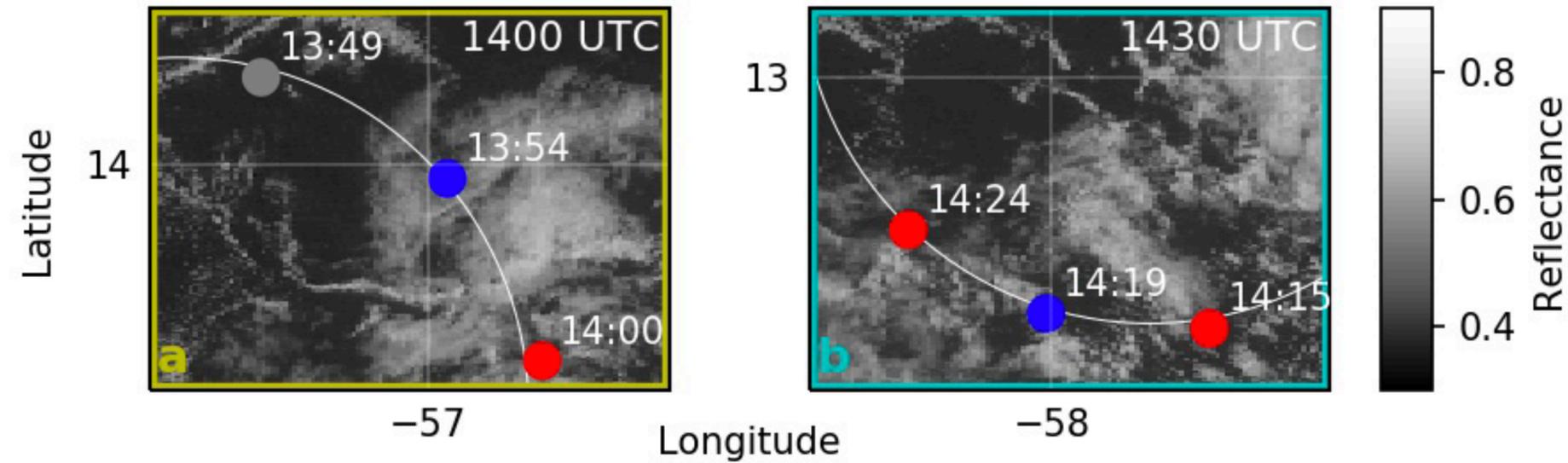
Courant de densité = « cold pool » adjacente à un gust au moins

DENSITY CURRENT = COLD POOL if COLD POOL \cap GUST $\neq \emptyset$

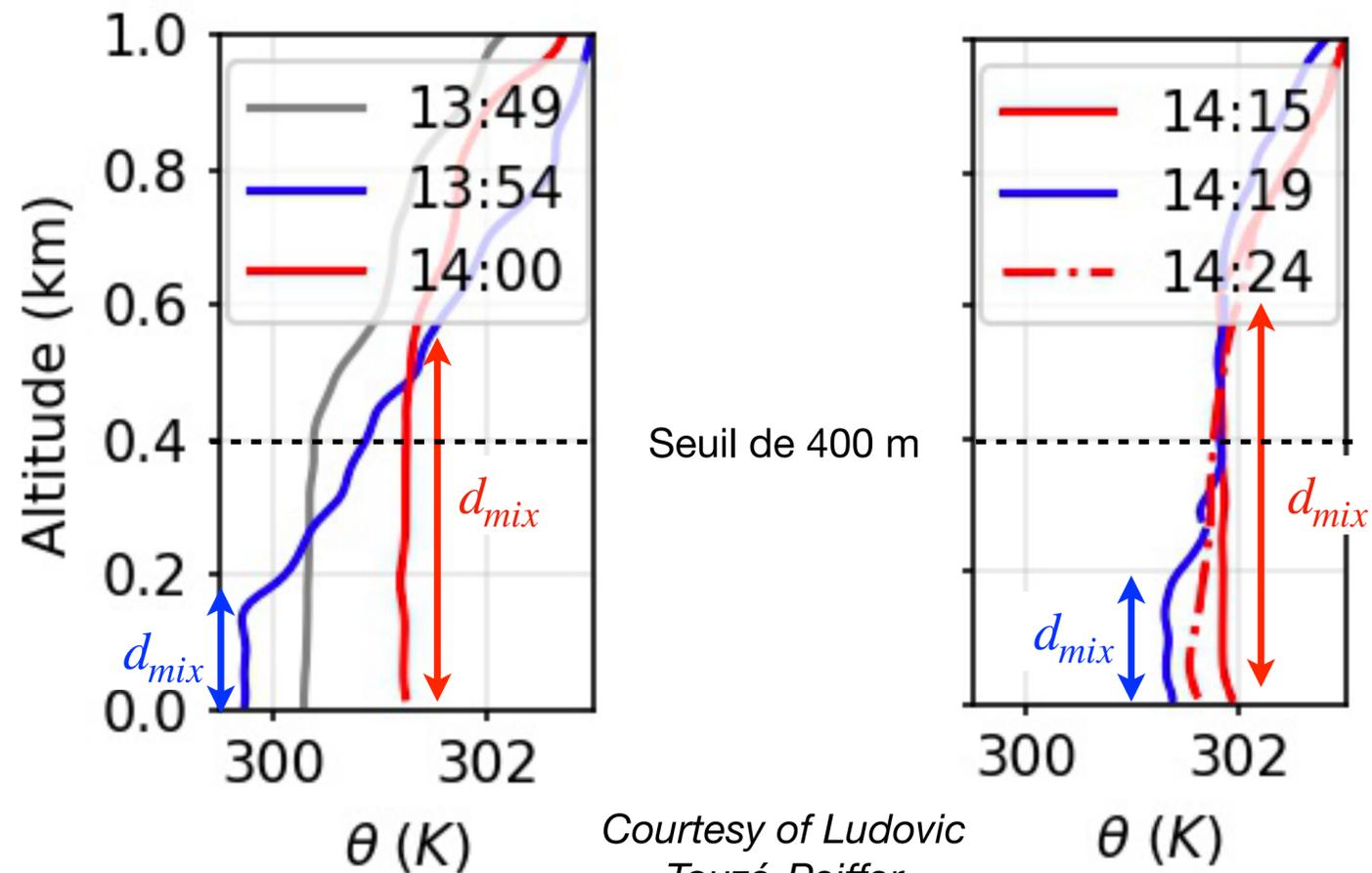
Que disent les observations EUREC4A ?

Lâchers de dropsonde depuis le HALO le 24/01/2020

Touzé-Peiffer L., Vogel R. and Rochetin N.
 Detecting cold pools from soundings during EUREC4A
 Submitted to J.A.M.E.S



- Environnement : $d_{mix} \geq 400$ m
- Cold pools : $d_{mix} < 400$ m



Courtesy of Ludovic Touzé-Peiffer

d_{mix} discrimine très bien les poches froides de leur environnement à partir des sondages EUREC4A

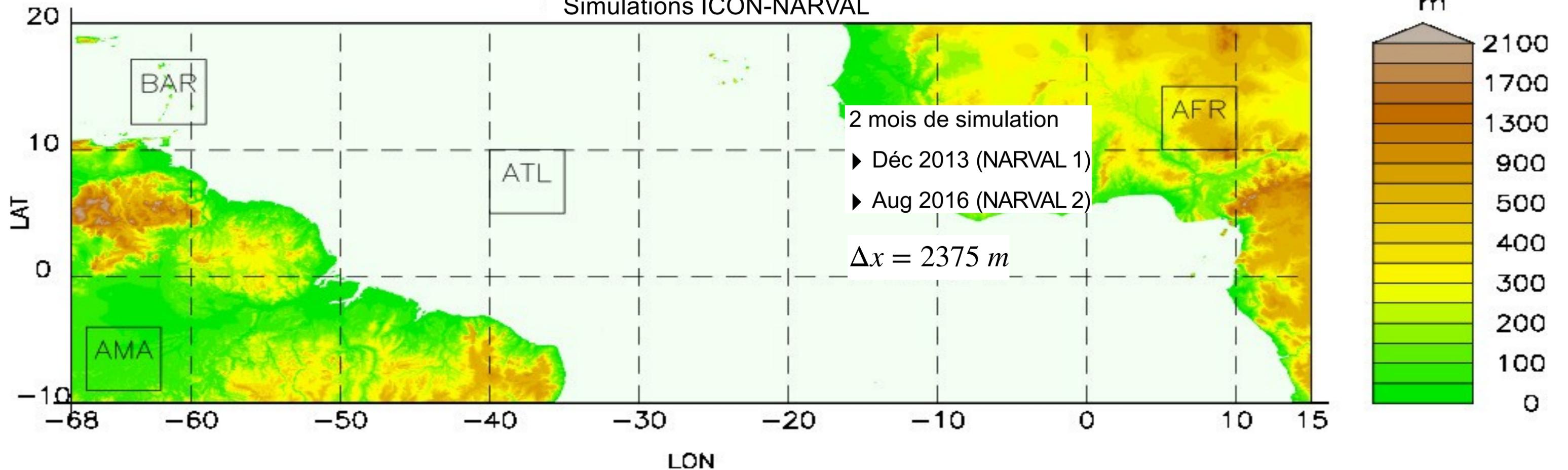
► Beaucoup mieux que $\theta_{v,10m}$ ou T_{10m} !

d_{mix} servira dans la suite de couche de référence dans laquelle on « moyennera » différentes variables

- $\theta_{v,mix}$
- $\vec{U}_{mix}(U_{mix}, V_{mix})$

Protocole

Simulations ICON-NARVAL



On choisit 4 scènes nuageuses de $5^\circ \times 5^\circ$ pour former des cas d'études très divers :

AMA = Amazonie le 01/12/2013 à 23:40 LT

BAR = Barbade le 01/12/2013 à 14:00 LT

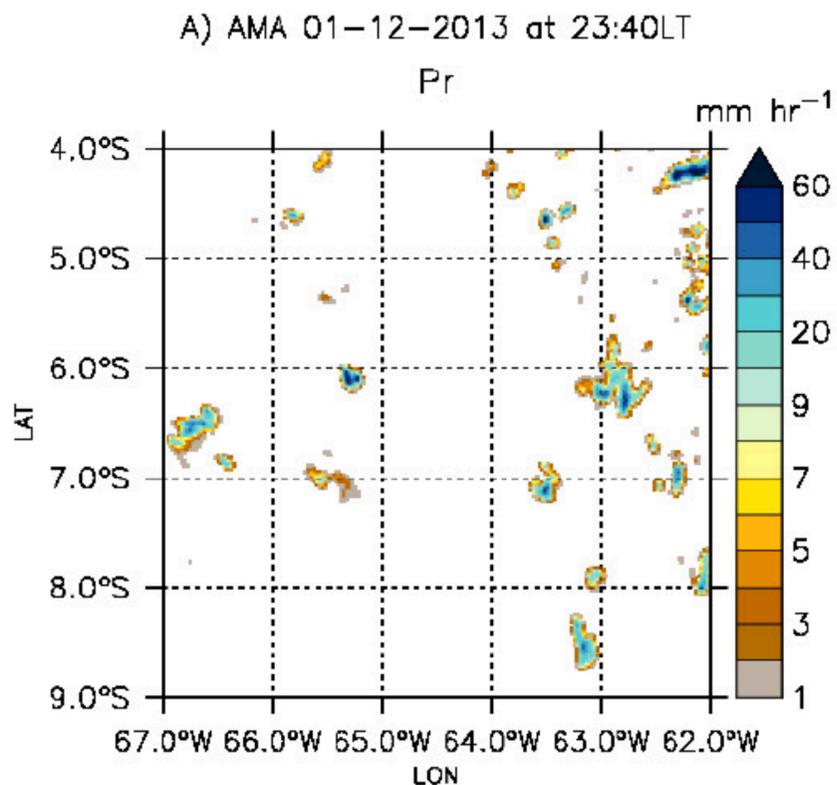
ATL = Atlantique tropical le 01/12/2013 à 20:30 LT

AFR = Afrique sahélienne le 01/08/2016 à 13:30 LT

Protocole

Cas **AMA**

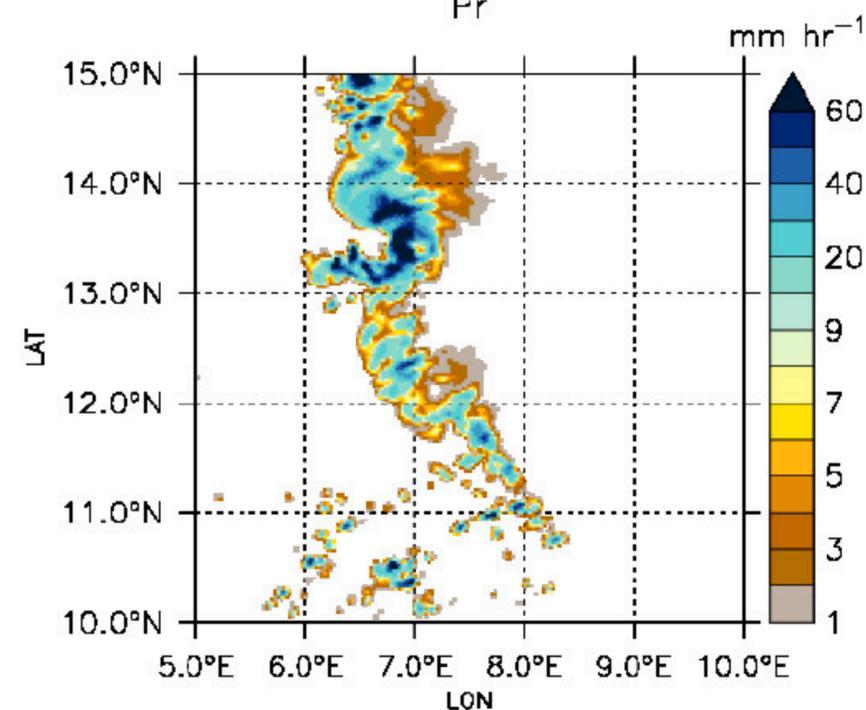
Forêt équatoriale
Nuit
Conv. profonde
Conv. « pop corn »
Vent faible
Cisaillement faible



B) AFR 02-08-2016 at 13:30LT

Cas **AFR**

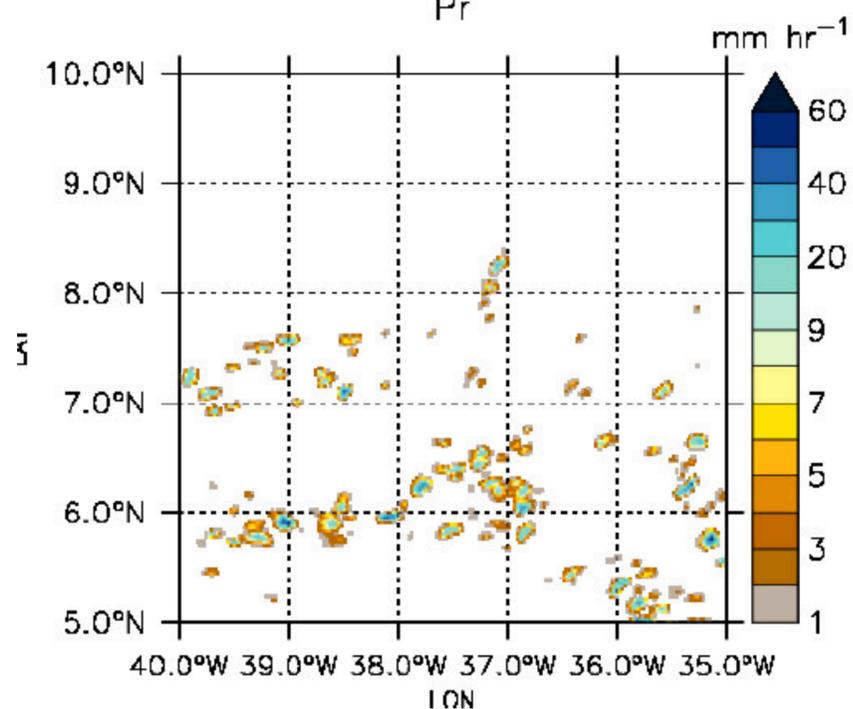
Région semi-aride
Jour
Conv. profonde
Ligne de grain
Vent modéré
Cisaillement fort



C) ATL 01-12-2013 at 20:30LT

Cas **ATL**

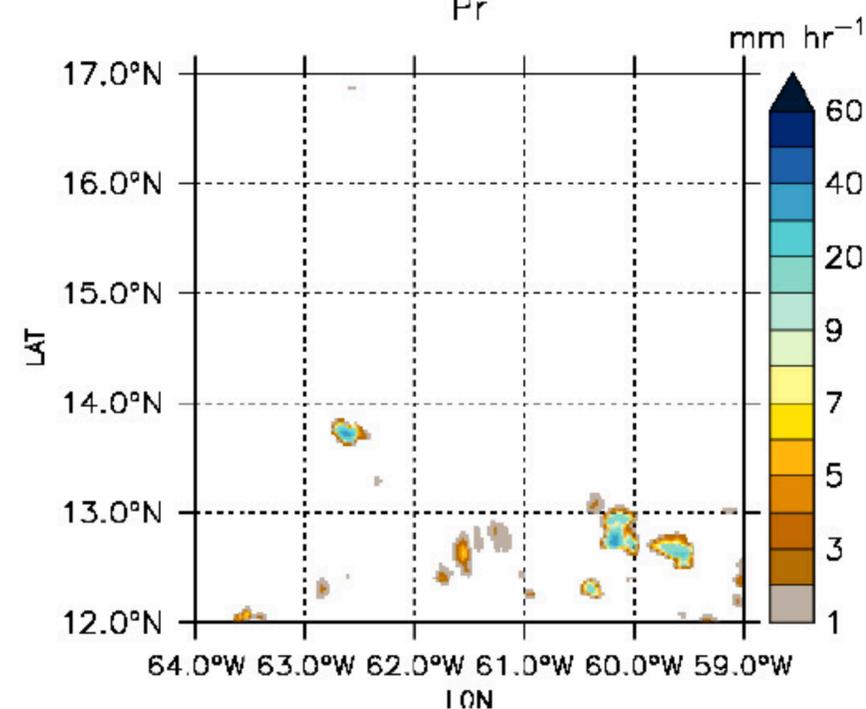
Océan
Nuit
Conv. profonde
Conv. « pop corn »
Vent modéré
Cisaillement faible



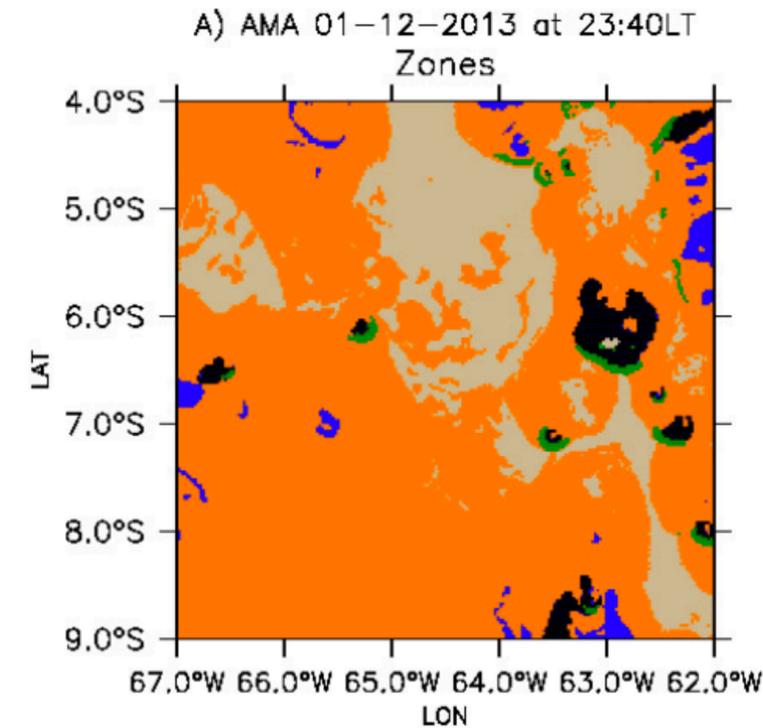
D) BAR 01-12-2013 at 14:00LT

Cas **BAR**

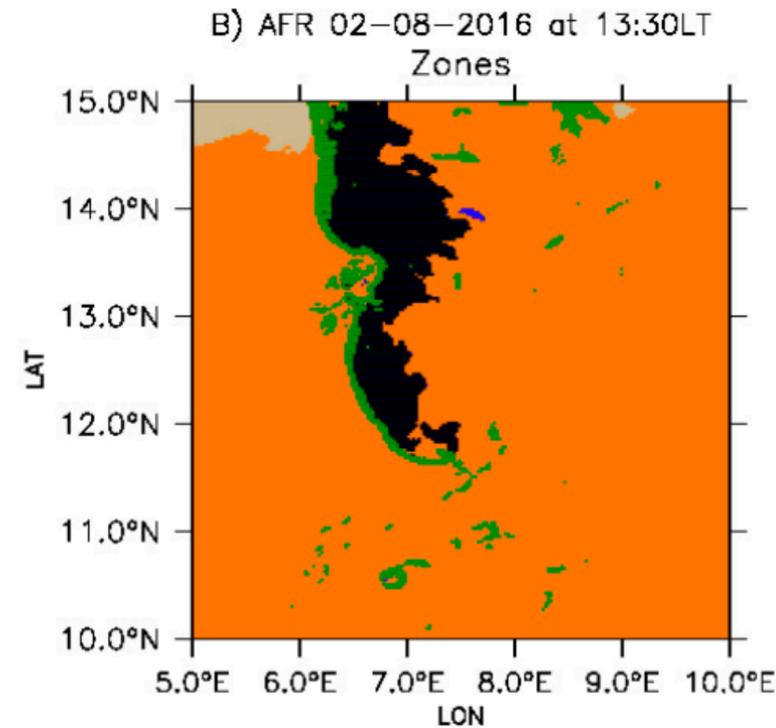
Océan
Jour
Conv. peu profonde
Precip. faibles
Vent fort
Cisaillement faible



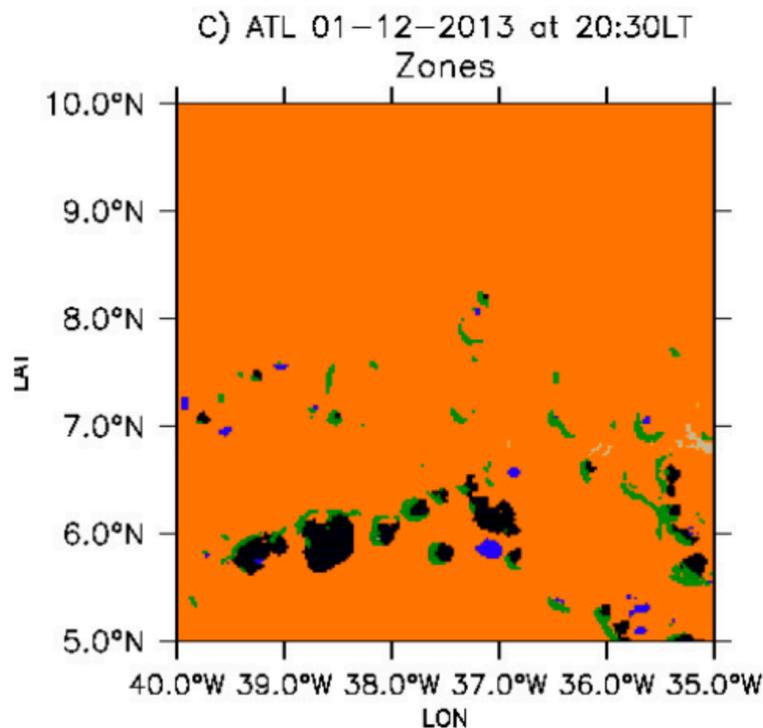
Le découpage du domaine en 5 régions



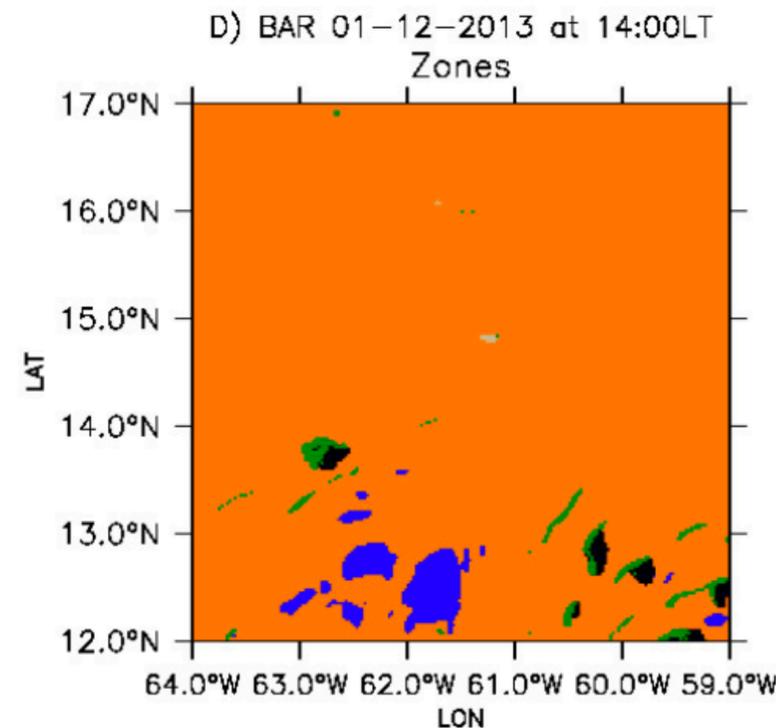
$N_{\text{dens}}=10$
 $f_{\text{dens}}=0.031$



$N_{\text{dens}}=3$
 $f_{\text{dens}}=0.088$



$N_{\text{dens}}=19$
 $f_{\text{dens}}=0.03$



$N_{\text{dens}}=5$
 $f_{\text{dens}}=0.0098$

GUST : Front de rafale

Régions de fort refroidissement par advection horizontale

$$-\vec{u}_{mix} \cdot \vec{\nabla} \theta_{v,mix} \leq -10^{-3} \text{ K s}^{-1} \quad \text{cohérent avec obs BCO}$$

COLD : Poches froides

Régions plus froides que le 1er quartile de $\theta_{v,mix}^{gust}$

$$\theta_{v,mix} \leq 1^{\text{st}} \text{quartile of } \theta_{v,mix}^{gust} \quad \text{arbitraire}$$

ENV : Environnement direct (en contact avec COLD)

Régions plus chaudes que COLD

$$\theta_{v,mix} > 1^{\text{st}} \text{quartile of } \theta_{v,mix}^{gust} \quad \text{cohérent avec paramétrisations}$$

OUT : Environnement lointain

Régions plus chaudes et/ou plus froides que GUST

$$\theta_{v,mix} > \text{Max } \theta_{v,mix}^{gust} \text{ ou } \theta_{v,mix} < \text{Min } \theta_{v,mix}^{gust} \quad \text{robustesse}$$

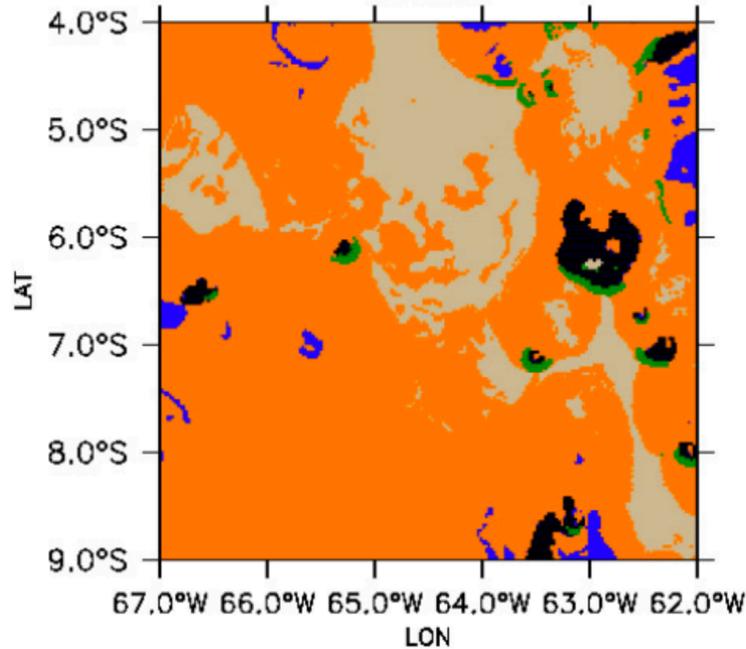
DENS : Courants de densité

Poches froides ayant au moins 1 gust au bord

cohérent avec paramétrisations

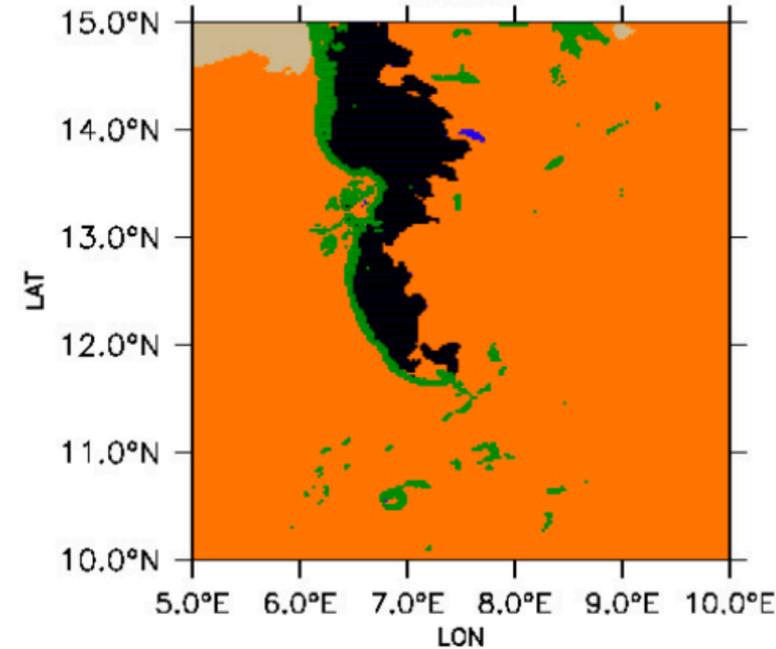
Conséquences importantes

A) AMA 01-12-2013 at 23:40LT
Zones



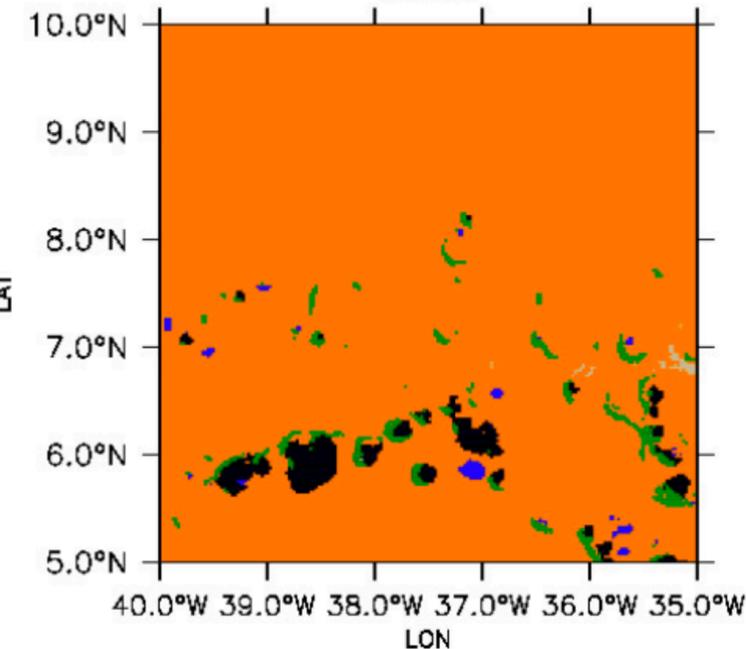
$N_{\text{dens}}=10$
 $f_{\text{dens}}=0.031$

B) AFR 02-08-2016 at 13:30LT
Zones



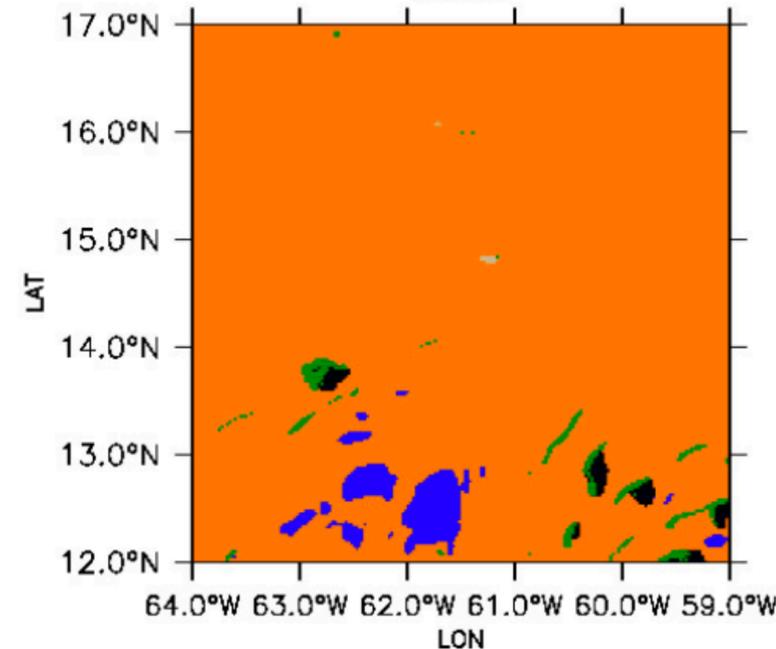
$N_{\text{dens}}=3$
 $f_{\text{dens}}=0.088$

C) ATL 01-12-2013 at 20:30LT
Zones



$N_{\text{dens}}=19$
 $f_{\text{dens}}=0.03$

D) BAR 01-12-2013 at 14:00LT
Zones



$N_{\text{dens}}=5$
 $f_{\text{dens}}=0.0098$

Toutes les poches froides ne sont pas des courants de densité

Tous les gusts ne sont pas rattachés à un courant de densité

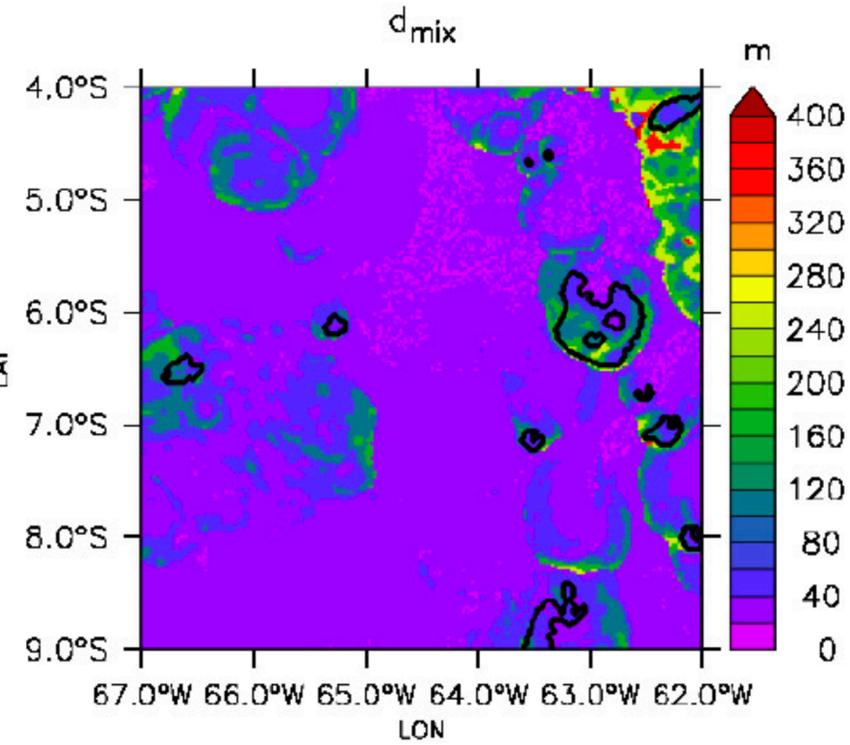
Les courants de densité ne se confondent pas avec le champ de précipitations

Leur forme et leur durée de vie ne sont pas entièrement associées avec celle du nuage source

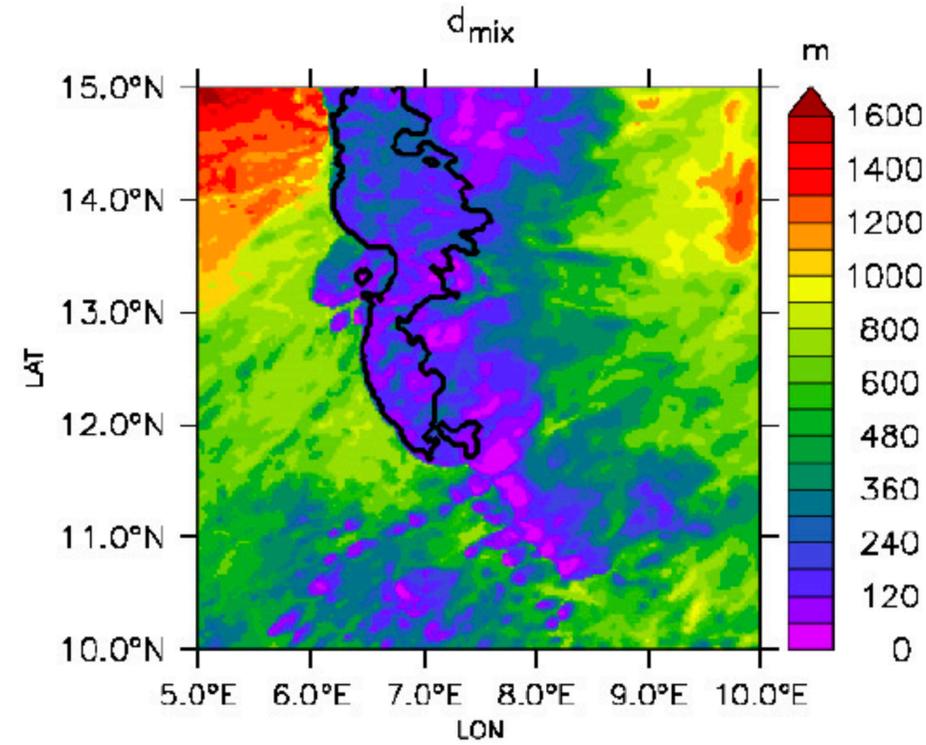
Le courant de densité est défini d'une manière indépendante du nuage qui l'a engendré

Couche de mélange d_{mix}

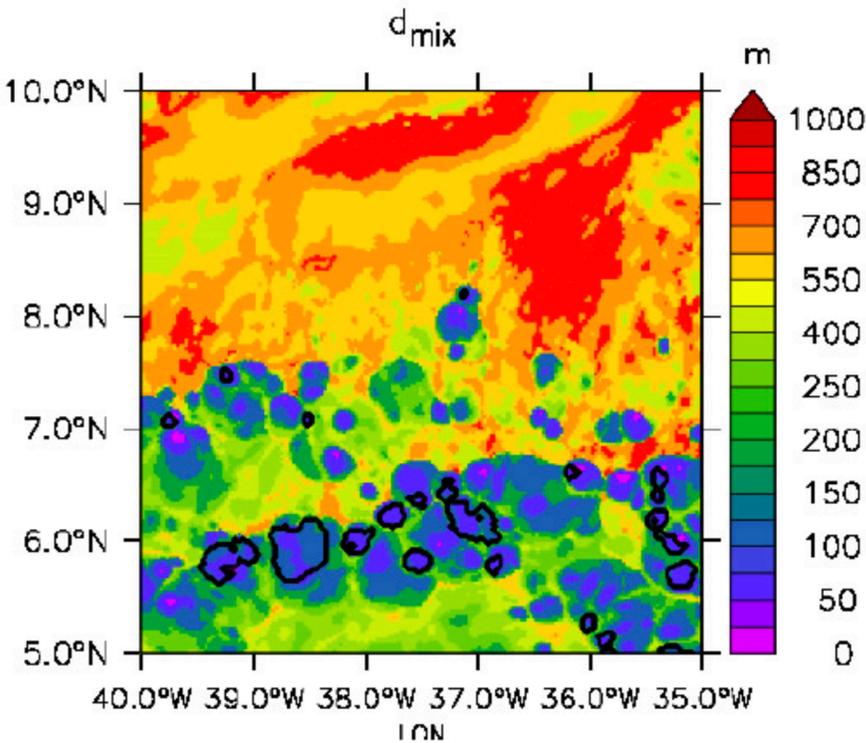
A) AMA 01-12-2013 at 23:40LT



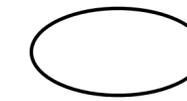
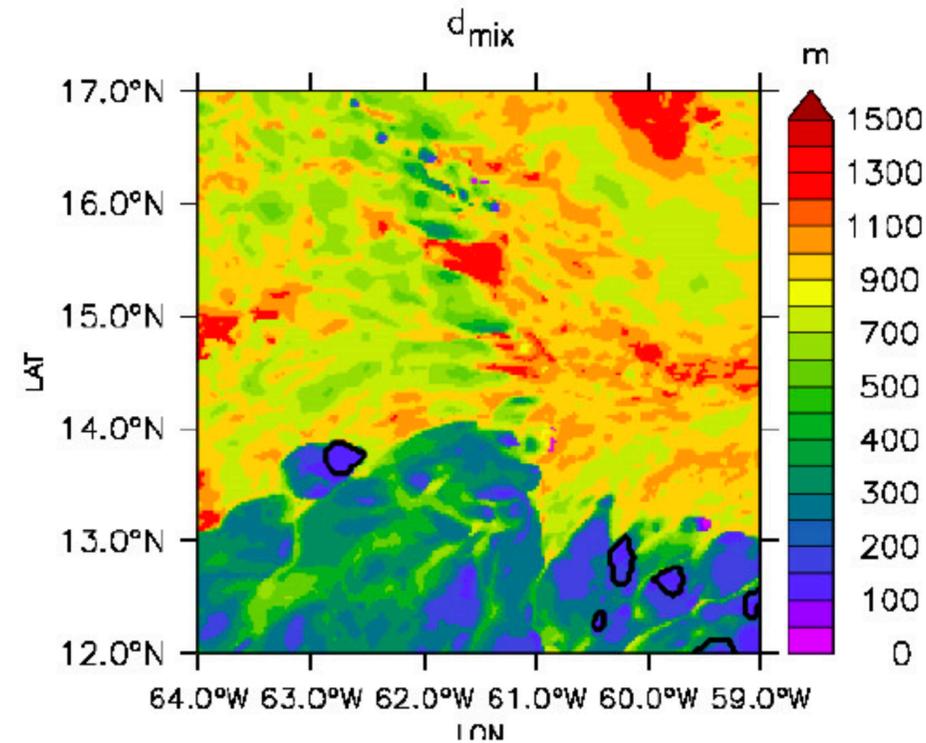
B) AFR 02-08-2016 at 13:30LT



C) ATL 01-12-2013 at 20:30LT



D) BAR 01-12-2013 at 14:00LT



Courants de densité

d_{mix} révèle l'empreinte des courants de densité

► Mieux que T_{surf} ou T_{10m}

Couche limite convective fortement diminuée

► Stratification associée à la subsidence

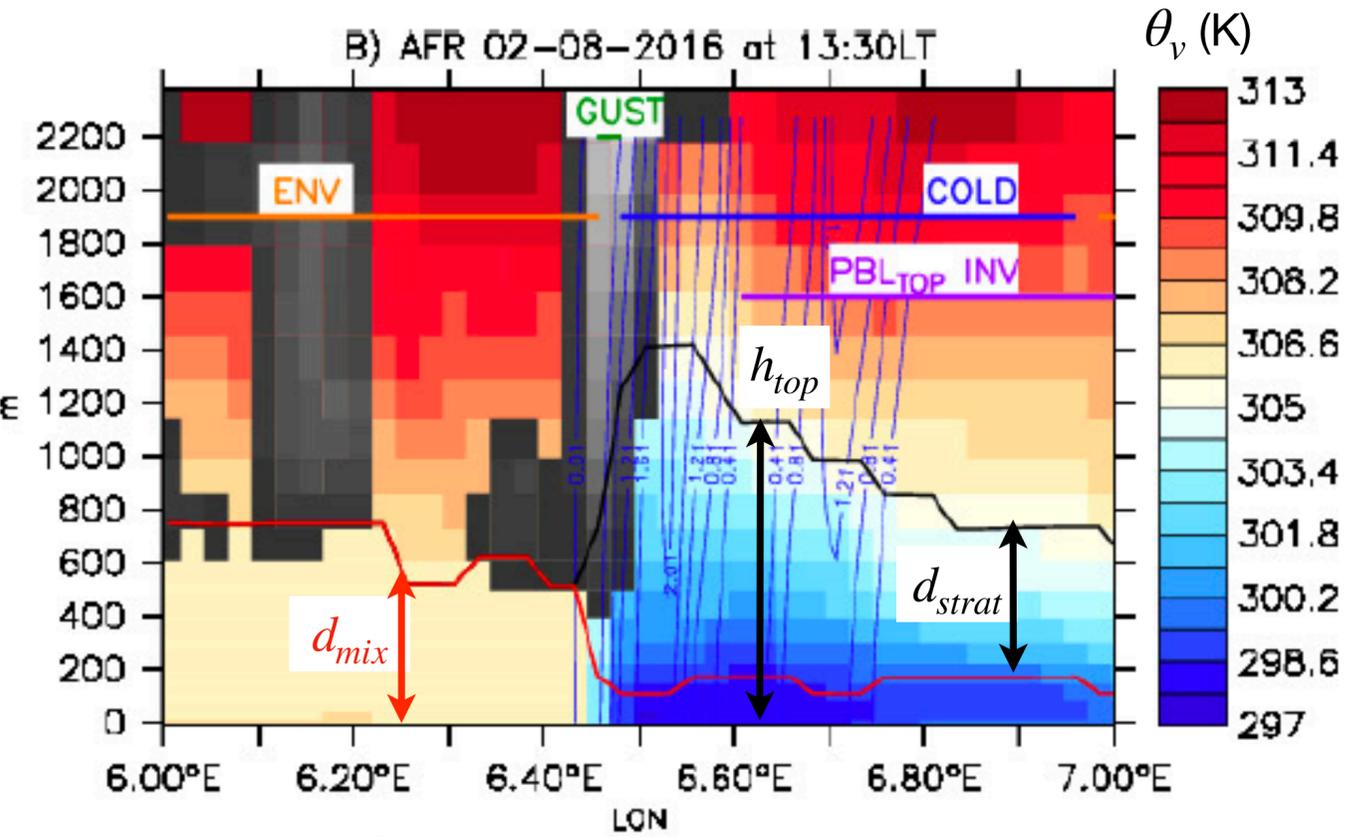
Couche limite de surface augmentée

► Turbulence associée à l'étalement

Les courants de densité suppriment les inversions nocturnes de surface (voir cas AMA en haut à gauche)

Le mélange turbulent à la surface est une propriété intrinsèque des courants de densité

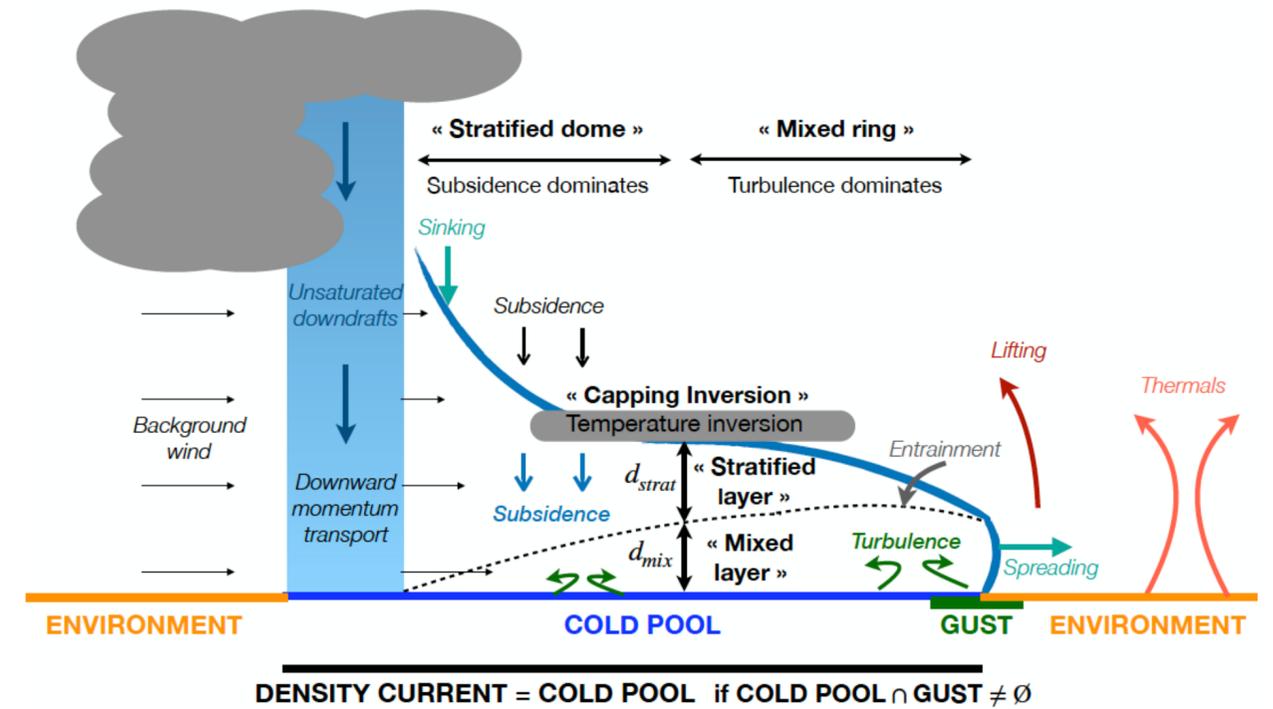
Coupes verticales : les 2 couches et les 2 régions



q_l (clouds)

q_r (rain)

PBL_{TOP}INV =
inversion de
température au
sommet



« Stratified dome » sous le rideau de pluie

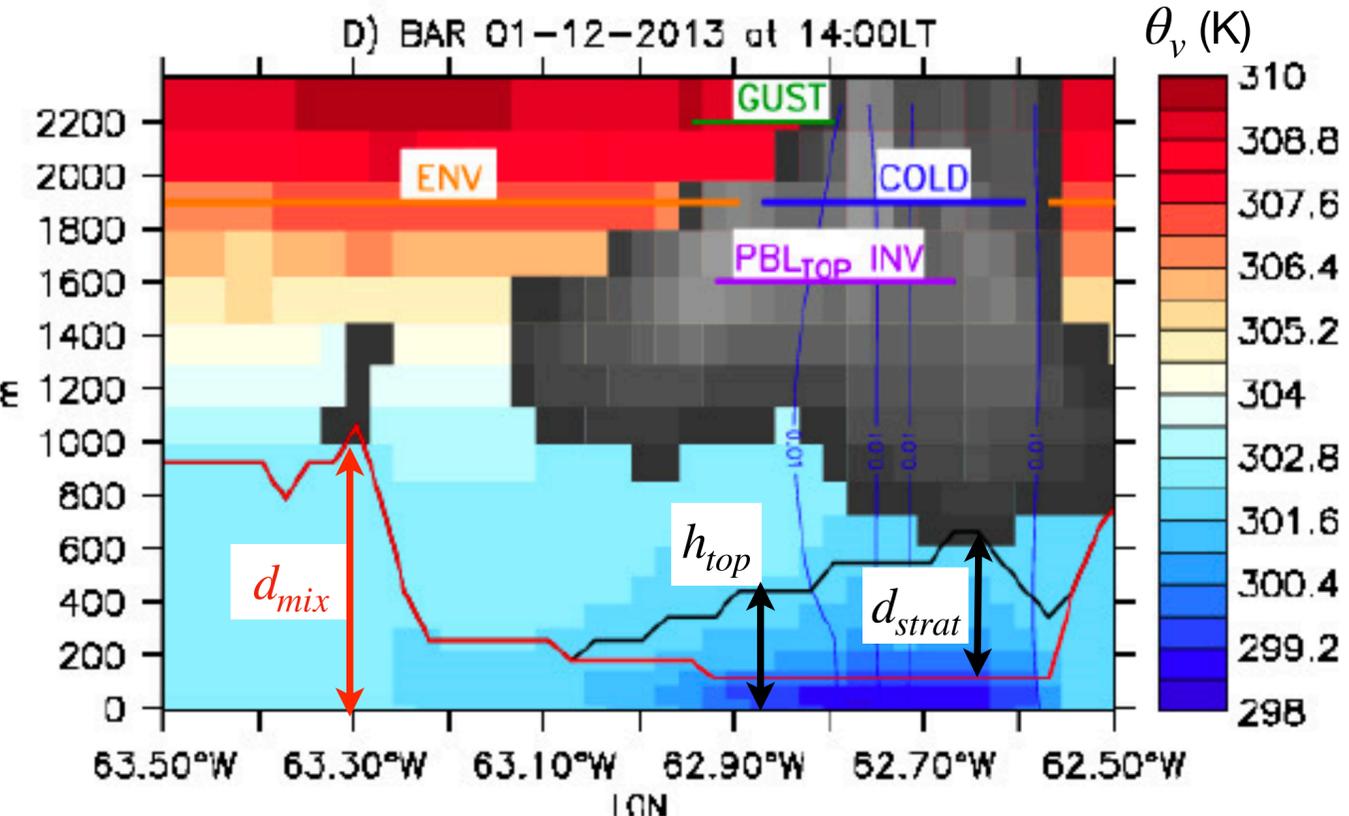
« Mixed ring » proche du front de rafale (moins clair ...)

Couche d'inversion de T au sommet

$h_{top} \sim h_{lcl}$: les courants de densité atteignent la base des nuages

Le modèle conceptuel est vérifié au 1er ordre

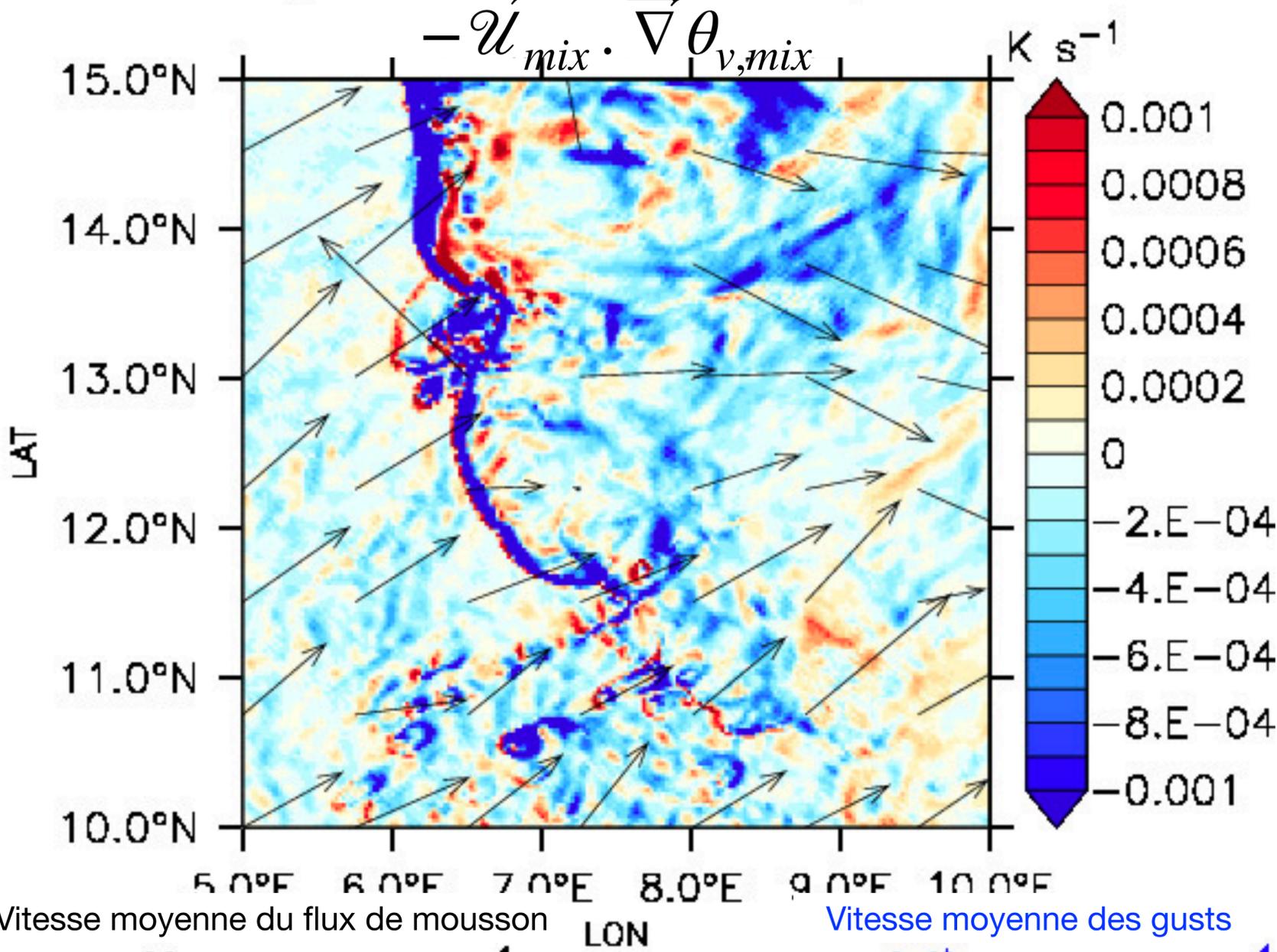
➡ Découpage en 2 couches très utile pour analyser la propagation !



Coupes horizontales : analyse du front de rafale pour la propagation

Advection horizontale de $\theta_{v,mix}$ (shaded) et vent de basses couches $\vec{U}_{mix}(U_{mix}, V_{mix})$ (vectors)

B) AFR 02-08-2016 at 13:30LT



GUST si $\frac{\partial \theta_{v,mix}}{\partial t} \sim -\vec{U}_{mix} \cdot \vec{\nabla} \theta_{v,mix} \leq -10^{-3} \text{ K s}^{-1}$

Propagation « upwind » (par rapport au flux de mousson) de la ligne de grain

Vitesse moyenne du flux de mousson

$$U_{mix}^{env} = 6.85 \text{ m s}^{-1}$$

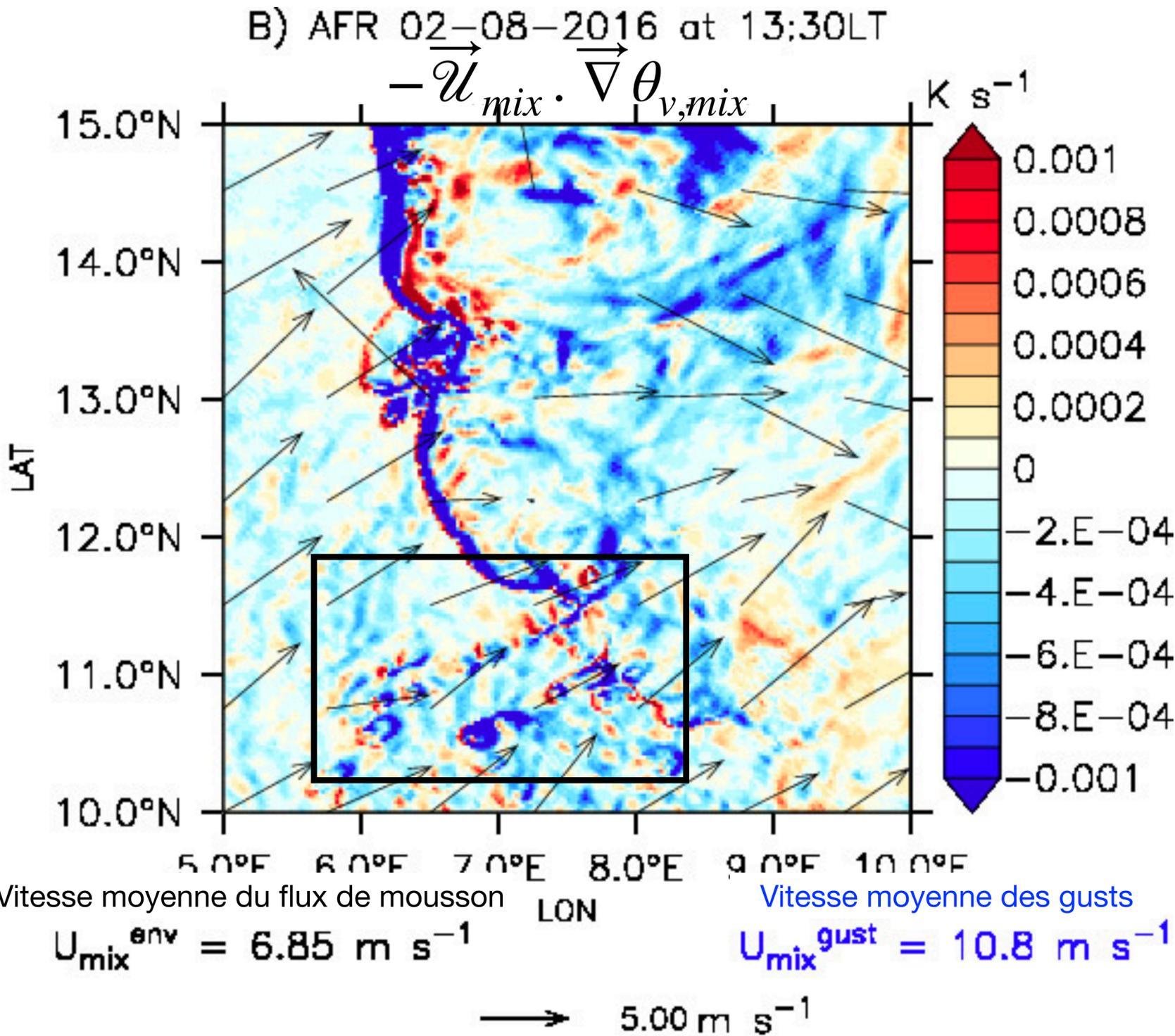
Vitesse moyenne des gusts

$$U_{mix}^{gust} = 10.8 \text{ m s}^{-1}$$

→ 5.00 m s⁻¹

Coupes horizontales : analyse du front de rafale pour la propagation

Advection horizontale de $\theta_{v,mix}$ (shaded) et vent de basses couches $\vec{U}_{mix}(U_{mix}, V_{mix})$ (vectors)



GUST si $\frac{\partial \theta_{v,mix}}{\partial t} \sim -\vec{U}_{mix} \cdot \nabla \theta_{v,mix} \leq -10^{-3} \text{ K s}^{-1}$

Propagation « upwind » (par rapport au flux de mousson) de la ligne de grain

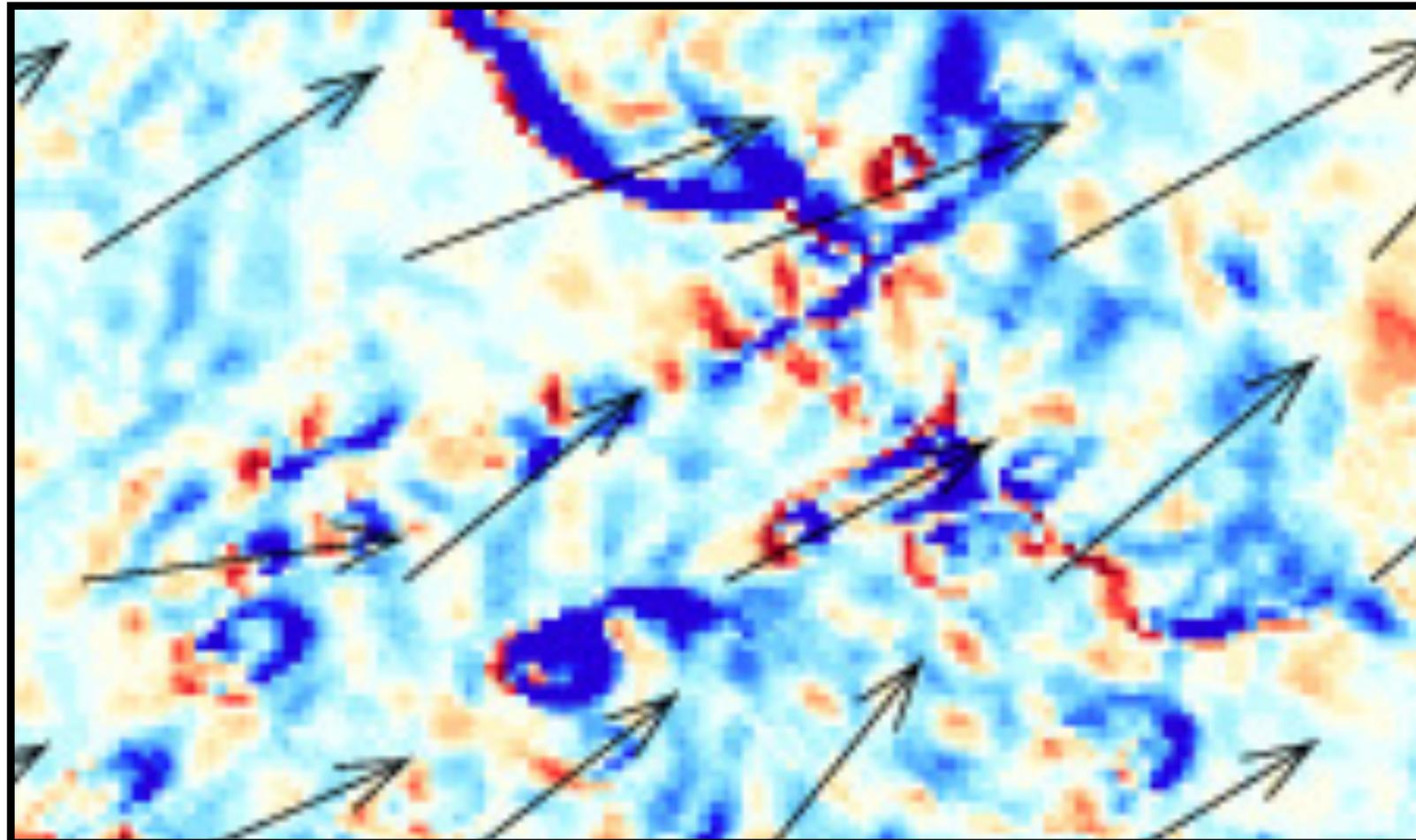
Qu'en est-il des cellules naissantes à l'avant ?

Coupes horizontales : analyse du front de rafale pour la propagation

Advection horizontale de $\theta_{v,mix}$ (shaded) et vent de basses couches $\vec{\mathcal{U}}_{mix}(U_{mix}, V_{mix})$ (vectors)

$$-\vec{\mathcal{U}}_{mix} \cdot \vec{\nabla} \theta_{v,mix}$$

GUST si $\frac{\partial \theta_{v,mix}}{\partial t} \sim -\vec{\mathcal{U}}_{mix} \cdot \vec{\nabla} \theta_{v,mix} \leq -10^{-3} \text{ K s}^{-1}$

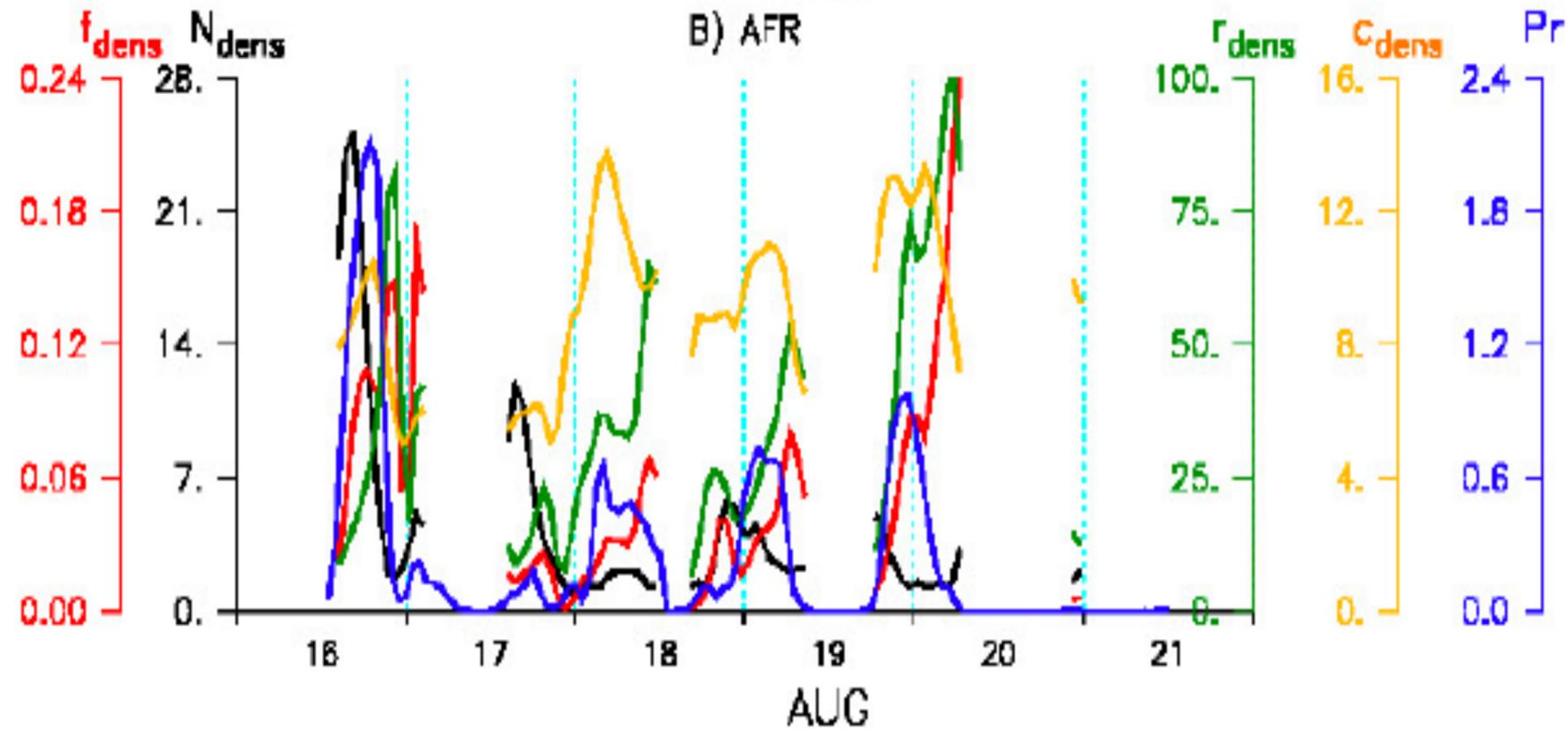


Propagation « upwind » (par rapport au flux de mousson) de la ligne de grain

On devine un déplacement « downwind » des cellules naissantes

Meilleure compréhension de la propagation de la convection en fonction du stade de son cycle de vie ?

Séries temporelles sur 6 jours



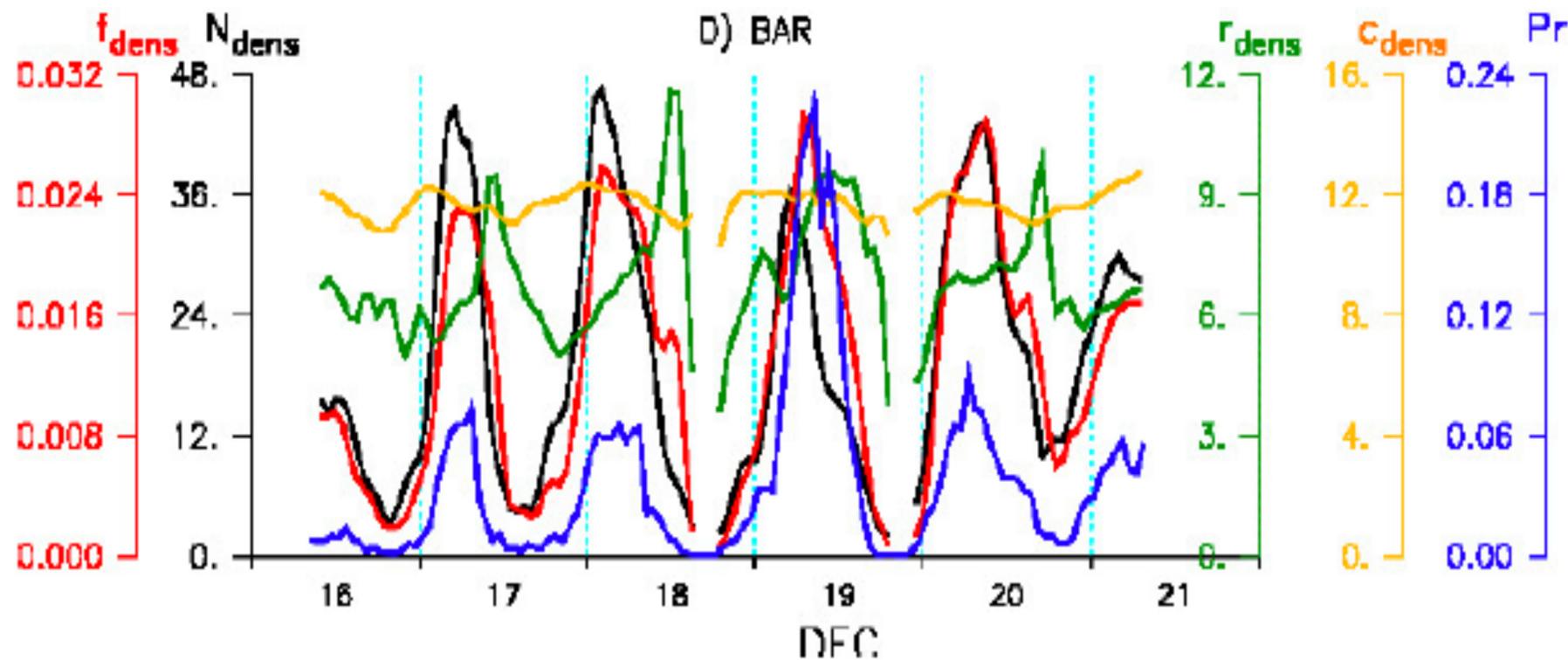
Fraction f_{dens}

Nombre N_{dens}

Rayon moyen r_{dens} (km)

Vitesse moyenne gusts c_{dens} ($m s^{-1}$)

Precipitations moyennes domaine Pr ($mm hr^{-1}$)



Pas de bruit haute fréquence des proxys

Cycle diurne des proxys sur la Barbade

Occurrence des courants de densités corrélée à celle des pluies

- Mais caractéristiques pas nécessairement corrélées à l'intensité des précipitations

Quelle co-variations des proxys en fonction des types d'organisation ?

Conclusions

Méthodologie construite à partir :

- ▶ de propriétés physiques établies
- ▶ de considérations observationnelles
- ▶ d'hypothèses physiques
- ▶ validées, a posteriori, sur des cas très variés

Méthodologie validée a posteriori

- ▶ par les séries temporelles de 6 jours
- ▶ sur des cas très variés
- ▶ par les observations EUREC4A

Des nouveaux proxys très utiles pour contraindre les paramétrisations et pour l'analyse de la dynamique de la convection :

- ▶ Scalaires : h_{mix} , h_{top} , f_{dens} , r_{dens} , c_{dens} , N_{dens} , $\Delta\Phi_{surf}$, ΔT_{surf} , Δq_{surf}
- ▶ Profils verticaux dans/hors courants de densité : $\Delta q(z)$, $\Delta T(z)$, $\Delta\omega(z)$
- ▶ Champs 2D moyennés sur d_{mix} ou d_{strat} : $\vec{u}_{mix}(U_{mix}, V_{mix})$, $\vec{u}_{strat}(U_{strat}, V_{strat})$, $\omega_{h_{mix}}$, $\omega_{h_{top}}$

Des perturbations de couche limite associée aux courants de densité qui méritent d'être explorées :

- ▶ **Possible inversion de température au sommet de la poche froide associée à la subsidence**
- ▶ **Possible inversion de température à la surface après l'effondrement du courant de densité**

Conclusions

Les courants de densité sont plus qu'un sous produit des précipitations, ils sont « déclenchés » par elles et suivent ensuite une dynamique qui leur est propre (rayonnement, vorticité, friction, etc.)

➔ **Les courants de densité ont introduit une mémoire à la convection profonde : quels termes de mémoire ont-ils à leur tour ?**