

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides</b>	<b>1</b>
1.1	Introduction . . . . .	2
1.2	Le modèle des poches froides . . . . .	2
1.3	Prise en compte de l'effet des poches froides sur la convection . . . . .	6
1.4	Évaluation des équations internes du modèle des poches à partir des LES . . . . .	8
1.4.1	<b>Les échantillonnages</b> Distinction des régions de poches froides de leur environnement . . . . .	8
1.4.2	Échantillonnages des profils verticaux des écarts de poches . . . . .	12
1.4.3	Calcul de la vitesse d'étalement, $C_*$ , à partir de l'échantillonnage de la divergence du vent . . . . .	13
1.4.4	Calcul de l'énergie d'affaissement, WAPE, à partir de l'anomalie de température virtuelle . . . . .	14
1.4.5	Calcul des vitesses verticales du front de rafale selon les formulations ALP et ALE. . . . .	14
1.4.6	Validation des lois phénoménologiques . . . . .	17
1.5	<b>Comparaison entre LES et Évaluation dans la configuration uni-colonne de LMDZstandard</b> . . . . .	20
1.5.1	<b>Les profils de <math>\delta T</math>, <math>\delta q</math> et <math>\delta w</math></b> . . . . .	20
1.5.1	Les profils de $\delta T$ , $\delta q$ et $\delta w$ . . . . .	22
1.5.2	<b>Les variables WAPE, ALE<sub>wk</sub>, <math>C_*</math> et ALP<sub>wk</sub></b> WAPE, ALE et ALP . . . . .	24
1.6	Les améliorations du modèle des poches froides . . . . .	25
1.6.1	Coefficient $k$ . . . . .	25
1.6.2	L'altitude $h_m$ . . . . .	26
1.6.3	Activation des thermiques dans tout le domaine . . . . .	27
1.7	Effet des modifications sur les variables de la grande échelle . . . . .	30
1.8	Tuning des paramètres libres . . . . .	30
1.9	Conclusions . . . . .	32
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>35</b>

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison des variables $WAPE$ , $ALE_{wk}$ , $C_*$ et $ALP_{wk}$ obtenues directement à partir du vent résolu dans les LES (valeurs échantillonées E), avec celles calculées à partir des formulations de la paramétrisation (valeurs paramétrées P). Les valeurs E sont dérivées de la vitesse verticale à la base du nuage ( $w_b$ ) pour $ALE_{wk}$ et $ALP_{wk}$ , et la divergence moyenne du vent à 10 m dans les poches pour $C_*$ , échantillonées directement dans les LES. Les valeurs P sont calculées à partir de la $WAPE$ déduite de $\delta\theta_v$ , lui-même échantillonné dans les mêmes LES, en considérant les coefficients $k = 0.33$ et $k = 0.66$ . Les analyses sont effectuées sur les deux LES océaniques en RCE réalisées avec les modèles SAM et MesoNH et sur la LES continental du cas AMMA réalisée avec le modèle MesoNH. . . . .	19
1.2	Comparaison des variables $WAPE$ , $ALE_{wk}$ , $C_*$ et $ALP_{wk}$ calculées échantillonées dans les LES à partir des échantillonnages et simulées dans LMDZ contrôle (LMDZ CTRL) sur le cas océanique en RCE et le cas continental (AMMA) . . . . .	25
1.3	Description des simulations effectuées avec LMDZ dans la configuration standard et avec diverses modifications . . . . .	29
1.4	Comparaison des variables $WAPE$ , $ALE_{wk}$ , $C_*$ et $ALP_{wk}$ calculées à partir des échantillonnages échantillonées dans les LES, avec celles simulées dans LMDZ contrôle (LMDZ CTRL), LMDZ avec l'ajustement du coefficient $k$ à 0.66 (V1), LMDZ avec la baisse d'altitude ( $h_m$ ) à laquelle la subsidence des masses d'air dans les poches est nulles (V2) et LMDZ avec l'activation des thermiques dans tout le domaine (V3) sur le cas RCE et sur le cas AMMA. . . . .	29

# Table des figures

1.1	Schéma conceptuel d'un courant de densité (Grandpeix and Lafore, 2010). . . . .	3
1.2	Moyenne glissante (avec une boîte $3.25 \text{ km} \times 3.25 \text{ km}$ ) de la divergence du vent à 10 m ( $\text{div}(\overrightarrow{V_{10m}})$ ) (en $10^3 \text{ s}^{-1}$ ). Avec cette unité, une valeur de 1 correspond à un changement d'intensité du vent de $1 \text{ m.s}^{-1}$ sur 1 km. Les panneaux a et b correspondent à deux états différents du cas étudié avec le modèle LES SAM réalisé sur la RCE océanique. Des contours des anomalies de température à 10 m, à -0.4 K (en vert), -0.2 K (en rouge) et 0 K (en noir), sont superposés sur le champ de divergence lissé. . . . .	10
1.3	Même chose que la Fig. 1.2, pour deux instants successifs, 17h10 (a) et 18h00 (b), de la LES MESONH réalisée sur le cas AMMA. Les contours superposés correspondent à des anomalies de température à 10 m de -1 K (en vert), -0.5 K (en rouge) et 0 K (en noir). . . . .	11
1.4	Profils verticaux de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur des poches froides calculés sur un instant des LES (SAM et MESONH) du cas RCE et à instant 18h de la LES MESONH du cas AMMA. . . . .	15
1.5	Profil vertical de l'eau condensée moyennée horizontalement sur les LES en RCE océanique réalisée avec les modèles SAM et MesoNH et la LES continental du cas AMMA réalisée avec le modèle MesoNH. . . . .	17
1.6	Cartes d'anomalie de température à 10 m ( $T_{10m}$ ), lissées horizontalement sur $2.5 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$ , représentées sur un instant de la LES SAM du cas RCE (a) et sur l'instant 18h de la LES du cas AMMA. Les contours noirs indiquent les seuils d'anomalie de $T_{10m}$ : -0.2 K pour le cas RCE et -1 K pour le cas AMMA. La couleur rouge représente les ascendances présentes sur les fronts de rafales, identifiées à partir des vitesses verticales à la base des nuages ( $w_b$ ) dans le masque des fronts de rafales. Ce masque est défini à partir d'un seuil appliqué à la moyenne glissante de $w_b$ . Pour le cas RCE, la moyenne est effectuée avec une boîte de $1.25 \text{ km} \times 1.25 \text{ km}$ et les valeurs $\tilde{w}_b > 0.6 \text{ m/s}$ sont retenues (respectivement $2 \text{ km} \times 2 \text{ km} \tilde{w}_b > 2 \text{ m/s}$ pour le cas AMMA). Les points verts représentent les thermiques, définis comme les zones où $w_b$ est positif en dehors du masque des fronts de rafales. . . . .	18

1.7	Profils verticaux de $\delta T$ , $\delta q$ et $\delta w$ calculés dans les LES et simulés dans LMDZ contrôle (LMDZ CTRL) sur le cas RCE (a, b, c) et sur le cas AMMA (d, e, f). . . . .	23
1.8	Profils verticaux de $\delta T$ , $\delta q$ et $\delta w$ calculés dans les LES et simulées dans LMDZ contrôle (LMDZ CTRL), LMDZ avec l'ajustement du coefficient $k$ à 0.66 (LMDZ V1), LMDZ avec la baisse de l'altitude ( $h_m$ ) à laquelle la subsidence des masses d'air dans la poche s'annule (LMDZ V2) , LMDZ avec l'ajustement de la fraction surfacique des descentes précipiantes, $\sigma_{dz}$ , à 0.02 (LMDZ V3) et LMDZ avec l'activation des thermiques dans tout le domaine (LMDZ V4V3) sur le cas RCE (a, b, c) et sur le cas AMMA (d, e, f). . . . .	28
1.9	Profils verticaux de la température potentielle ( $\theta$ ) , et de l'humidité spécifique ( $qv$ ) et de la fraction nuageuse ( $rneb$ ) calculés dans les LES et simulées dans LMDZ contrôle (LMDZ CTRL), LMDZ avec l'ajustement du coefficient $k$ à 0.66 (LMDZ V1), LMDZ avec la baisse de l'altitude ( $h_m$ ) à laquelle la subsidence des masses d'air dans la poche s'annule (LMDZ V2) , LMDZ avec l'ajustement de la fraction surfacique des descentes précipiantes, $\sigma_{dz}$ , à 0.02 (LMDZ V3) et LMDZ avec l'activation des thermiques dans tout le domaine (LMDZ V4V3) sur le cas RCE (a, b, c) et sur le cas AMMA (d, e, f). . . . .	31
1.10	Profils verticaux de $\delta T$ , $\delta q$ et $\delta w$ calculés dans les LES et simulés dans LMDZ TUNING, LMDZ avec l'ajustement du coefficient $k$ à 0.66 (V1), LMDZ avec la baisse d'altitude ( $h_m$ ) à laquelle la subsidence des masses d'air dans les poches froides est nulle (V2) et LMDZ avec l'activation des thermiques dans tout le domaine (V3) sur le cas RCE (a, b, c) et sur le cas AMMA (d, e, f). . . . .	33
1.11	Profils verticaux de température potentielle ( $\theta$ ) et d'humidité spécifique ( $qv$ ) calculés dans les LES et simulés dans LMDZ TUNING, avec l'ajustement du coefficient $k$ à 0.66 (V1), LMDZ avec la baisse d'altitude ( $h_m$ ) à laquelle la subsidence des masses d'air dans les poches froides est nulle (V2) et LMDZ avec l'activation des thermiques dans tout le domaine (V3) sur le cas RCE (a, b, c) et sur le cas AMMA (d, e, f). . . . .	34

# Chapitre 1

## Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

## 1.1 Introduction

jamais réalisée jusque là

Dans ce premier chapitre des résultats, nous proposons une évaluation détaillée du modèle des poches froides développé par Grandpeix and Lafore (2010), désigné ici sous le nom de modèle GL10, ~~en nous appuyant~~. Pour la première fois, cette évaluation s'appuie sur des LES. Ce modèle n'a encore jamais fait l'objet d'une évaluation fine, bien que son intégration dans le modèle LMDZ ait contribué à une meilleure représentation de la convection (Rio et al., 2009). Le chapitre débute par une présentation complète détaillée du modèle GL10, ainsi que de son couplage avec le schéma de convection profonde. Nous procémons ensuite à ~~Un échantillonnage est ensuite réalisé afin de calculer l'évaluation de ses équations internes ensemble~~ des variables internes du modèle dans ~~des~~ LES, permettant de valider la formulation physique du schéma avec une validation basée entièrement sur des comparaisons entre LES. Une validation plus exigeante est menée dans la configuration uni-colonne de LMDZ, en comparant les variables simulées à ~~l'aide des~~ LES. Des comparaisons entre les résultats issus de LMDZ et ceux obtenus par LES sont ensuite réalisées celles issues des LES. Enfin, des améliorations sont proposées pour corriger les biais identifiés, avant de proposer des améliorations. Le chapitre se termine par une conclusion conclure ce chapitre. de cas de convection profonde sur océan et sur continent

Dans une première phase, nous évaluons certaines relations à la base de la paramétrisation en calculant les différents termes directement dans les LES. Dans une seconde phase, plus exigeante pour la paramétrisation,

## 1.2 Le modèle des poches froides

nous comparons avec la LES les résultats du simulation avec les résultats d'une simulation réalisée avec LMDZ

Le modèle des poches froides représente une population de poches circulaires et en mode unicoline.

identiques (appelées wakes) sur un plan infini contenant la maille du modèle. Tous les wakes ont la même hauteur, le même rayon, et les mêmes profils verticaux des variables thermodynamiques. Leurs centres sont répartis statistiquement avec une densité uniforme notée  $D_{wk}$ . Les poches froides divisent l'espace en deux parties : (i) l'intérieur des poches (w), où se trouvent les courants descendants convectifs pré-cipitants. Dans ces courants descendants, la réévaporation des précipitations génère un fort refroidissement et une forte flottabilité négative ; (ii) l'extérieur des poches (x), qui contient l'air chaud alimentant les courants convectifs saturés (Fig. 1.1). Le sommet de la poche ( $h_{wk}$ ) est défini comme l'altitude à laquelle la différence de température entre (w) et (x) devient nulle. En dessous de ce niveau, les poches sont plus froides que leur environnement : elles s'effondrent et s'étalent horizontalement car ~~ils~~ elles sont plus denses que l'air environnant. La frontière entre la poche froide et l'environnement est considérée comme infiniment mince, et en chaque point de cette frontière, la poche s'étale à une vitesse  $C$ . Cette vitesse  $C$  est considérée comme une

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

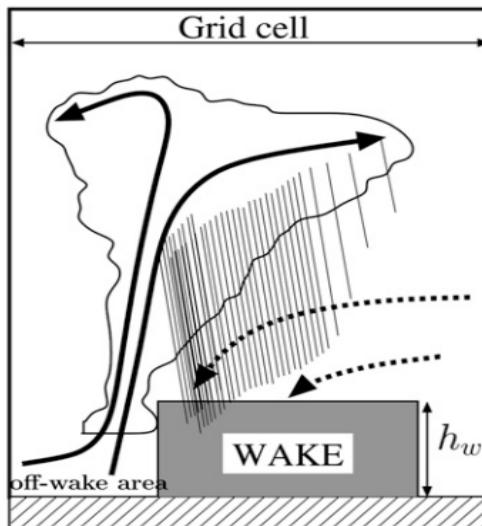


FIGURE 1.1 – Schéma conceptuel d'un courant de densité (Grandpeix and Lafore, 2010).

variable aléatoire dont la moyenne  $C_*$  détermine la vitesse moyenne d'étalement de la poche froide. Dans le modèle GL10,  $C_*$  est proportionnelle à la racine carrée de l'énergie potentielle disponible dans la poche, c'est-à-dire l'énergie d'effondrement de la poche froide, appelée *WAPE* (Wake Available Potential Energy), définie comme suit :

$$WAPE = g \int \frac{\delta \rho}{\bar{\rho}} = -g \int_0^{h_{wk}} \frac{\delta \theta_v}{\bar{\theta}_v} dz \quad (1.2.1)$$

de sorte que :

$$C_* = k \sqrt{2WAPE} \quad (1.2.2)$$

où  $\rho$  est la densité de l'air ;  $\theta_v$  est la température potentielle virtuelle.

$\delta X$  représente la différence de la variable  $X$  entre l'intérieur (w) et l'extérieur (x) du cold pool ( $\delta X = \delta X_w - \delta X_x$ ) et  $\bar{X}$  désigne la moyenne de cette variable sur l'ensemble du domaine.

Le coefficient  $k$  de l'équation 1.2.2, généralement compris entre 0 et 1, dépend de la structure des poches froides. À partir de simulations CRM (Cloud Resolving Models) 3D, Lafore (2000) (communication orale) a estimé ce coefficient à 0.33 dans le cas d'une structure linéaire telle que les lignes de grain. C'est la valeur utilisée dans le modèle GL10.

Le taux d'étalement des poches froides est donné par  $C_*$  à partir de la relation suivante :

$$\partial_t \sigma_{wk} = 2\pi r C_* D_{wk} = 2C_* \sqrt{\pi D_{wk} \sigma_{wk}} \quad (1.2.3)$$

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

où

$\sigma_{wk}$  est la fraction de surface couverte par les poches froides ( $\sigma_{wk} = D_{wk}\pi r^2$ ).

En raison du cycle de vie complexe des poches (incluant leur naissance, leur mort, collisions et fusions), le calcul de leur évolution nécessite un autre travail de paramétrisation. Dans ce chapitre, leur densité est imposée. La paramétrisation de la densité des poches est abordée ~~dans le chapitre ?? en Annexe B~~. Dans la configuration 6A de LMDZ, cette densité est imposée à  $10.10^{-10}$  soit 10 poches sur  $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$  sur océan tandis que sur continent, elle est imposée à  $8.10^{-12}$  soit ~~environ~~ ~~8 poches sur~~ ~~c'est exact, puisqu'on l'impose~~ 1000 km  $\times$  1000 km. Dans le modèle GL10, les poches apparaissent initialement avec une fraction surfacique de 2 % et évoluent au fil du temps selon l'équation 1.2.3. L'évolution de  $\sigma_{wk}$  est arbitrairement limitée à un maximum de 40 % de la taille de la maille ( $\sigma_{wk} \leq 0.4$ ).

Il est supposé que sous le sommet de la poche ( $h_{wk}$ ), le profil de vitesse verticale associé à l'affaissement de la poche résulte uniquement de l'étalement de la poche à la surface sans entraînement ( $e_w$ ) ni détrainement ( $d_w$ ) latéral entre la poche et son environnement. Au-dessus de ~~la poche, on suppose une subsidence de méso-échelle initiée sous le nuage stratiforme (à une altitude  $h_m$  fixée ce niveau, la subsidence est alimentée à 600 hPa dans le modèle GL10)~~, entraînée par l'évaporation des ~~la~~ fois par la nécessité de maintenir la subsidence dans la poche froide (via l'équation de continuité de la masse d'air) et par la réévaporation supplémentaire des précipitations ~~et qui amène  $\theta_e$  de la moyenne troposphère au-dessus de  $h_{wk}$ .  $h_m$  est considérée comme l'altitude au-dessus de laquelle les différences thermodynamiques entre les poches froides et leur extérieur deviennent négligeables, sauf au sein des courants conveetifs (courants saturés en (x), courants descendants non saturés en (w)). Dans le modèle GL10, la forme du profil de l'écart sous les nuages stratiformes. Le profil vertical de la différence de vitesse verticale (notée  $\delta\omega(P)$ ) entre (w) et (x) est imposée comme~~, est défini comme une fonction linéaire par morceaux de la pression :  $\delta\omega$  augmente linéairement à partir de zéro à la surface jusqu'à ~~à un maximum~~ une valeur maximale à la hauteur  $h_{wk}$ . Entre ~~,~~, puis décroît linéairement entre  $h_{wk}$  et une hauteur maximale  $h_m$ , ~~δω décroît linéairement~~ à laquelle elle s'annule. La subsidence verticale, qui s'intensifie donc vers le bas entre  $h_m$  et  $h_{wk}$ , est alimentée par un entraînement latéral ( $e_w > 0$ ) sans détrainement. Cet entraînement latéral représente la composante horizontale de la circulation méso-échelle, connue pour faire pénétrer de l'air provenant de la basse ou de la moyenne troposphère dans la poche froide. ~~À  $h_m$ , sommet du modèle de la poche froide,  $\delta X$  s'annule pour toutes les pas d'accent sur les majuscules~~

## Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

---

$\sigma_{wk}$  est la fraction de surface couverte par les poches froides ( $\sigma_{wk} = D_{wk}\pi r^2$ ).

En raison du cycle de vie complexe des poches (incluant leur naissance, leur mort, collisions et fusions), le calcul de leur évolution nécessite un autre travail de paramétrisation. Dans ce chapitre, leur densité est imposée. La paramétrisation de la densité des poches est abordée [dans le chapitre ??](#) en Annexe B. Dans la configuration 6A de LMDZ, cette densité est imposée à  $10.10^{-10}$  soit 10 poches sur  $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$  sur océan tandis que sur continent, elle est imposée à  $8.10^{-12}$  soit environ 8 poches sur  $1000 \text{ km} \times 1000 \text{ km}$ . Dans le modèle GL10, les poches apparaissent initialement avec une fraction surfacique de 2 % et évoluent au fil du temps selon l'équation 1.2.3. L'évolution de  $\sigma_{wk}$  est arbitrairement limitée à un maximum de 40 % de la taille de la maille ( $\sigma_{wk} \leq 0.4$ ).

Il est supposé que sous le sommet de la poche ( $h_{wk}$ ), le profil de vitesse verticale associé à l'affaissement de la poche résulte uniquement de l'étalement de la poche à la surface sans entraînement ( $e_w$ ) ni détrainement ( $d_w$ ) latéral entre la poche et son environnement. Au-dessus de [la poche, on suppose une subsidence de méso-échelle initiée sous le nuage stratiforme \(à une altitude  \$h\_m\$  fixée ce niveau, la subsidence est alimentée à 600 hPa dans le modèle GL10\)](#), entraînée par l'évaporation des [la fois par la nécessité de maintenir la subsidence dans la poche froide \(via l'équation de continuité de la masse d'air\) et par la réévaporation supplémentaire des précipitations et qui amène  \$\theta\_e\$  de la moyenne troposphère au-dessus de  \$h\_{wk}\$ .  \$h\_m\$  est considérée comme l'altitude au-dessus de laquelle les différences thermodynamiques entre les poches froides et leur extérieur deviennent négligeables, sauf au sein des courants conveetifs \(courants saturés en \(x\), courants descendants non saturés en \(w\)\). Dans le modèle GL10, la forme du profil de l'écart sous les nuages stratiformes. Le profil vertical de la différence de vitesse verticale \(notée  \$\delta\omega\(P\)\$ \) entre \(w\) et \(x\) est imposée comme](#), est défini comme une fonction linéaire par morceaux de la pression :  $\delta\omega$  augmente linéairement à partir de zéro à la surface jusqu'à [à un maximum une valeur maximale à la hauteur  \$h\_{wk}\$ . Entre](#), puis décroît linéairement entre  $h_{wk}$  et [une hauteur maximale  \$h\_m\$ ,  \$\delta\omega\$  décroît linéairement](#), à laquelle elle s'annule. La subsidence verticale, qui s'intensifie donc vers le bas entre  $h_m$  et  $h_{wk}$ , est alimentée par un entraînement latéral ( $e_w > 0$ ) sans détrainement. Cet entraînement latéral représente la composante horizontale de la circulation méso-échelle, connue pour faire pénétrer de l'air provenant de la basse ou de la moyenne troposphère dans la poche froide. À  $h_m$ , sommet du modèle de la poche froide,  $\delta X$  s'annule pour toutes les

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

variables d'état de la poche froide.

Dans le modèle GL10, il existait une différence de vitesse non nulle ( $\delta\omega^{cv}$ ) à  $h_m$ , ce qui explique la différence des flux de masse convectifs entre (w) et (x). Dans la version utilisée dans cette thèse, cette différence est désormais nulle ( $\delta\omega^{cv} = 0$ ) au-dessus de ce niveau.

L'évolution de l'écart de température potentielle ( $\delta\theta$ ) entre (w) et (x) est contrôlée par le chauffage différentiel ( $\delta Q_1^{cv}$ ,  $\delta Q_1^{wk}$ ) dues à la convection profonde et aux poches, ainsi que par l'amortissement dû aux ondes de gravité ( $\tau_{gw}$ ). L'écart d'humidité ( $\delta q$ ) suit une évolution similaire, mais sans l'effet d'amortissement des ondes de gravité. Les sources de chaleur y sont remplacées par des sources d'humidité ( $\delta Q_2^{cv}$  pour la convection et  $\delta Q_2^{wk}$  pour les poches).

$$\begin{cases} \partial_t \delta\theta = -\bar{\omega} \partial_p \delta\theta + \frac{\delta Q_1^{wk} + \delta Q_1^{cv}}{C_p} - \frac{K_{gw}}{\tau_{gw}} \delta\theta, \\ \partial_t \delta q = -\bar{\omega} \partial_p \delta q + \frac{\delta Q_2^{wk} + \delta Q_2^{cv}}{L_v}. \end{cases} \quad (1.2.4)$$

où  $\tau_{gw} = \frac{\sqrt{\sqrt{\sigma_{wk}} - (1 - \sqrt{\sigma_{wk}})}}{4Nz\sqrt{D_{wk}}}$

$$\tau_{gw} = \frac{\sqrt{\sqrt{\sigma_{wk}} - (1 - \sqrt{\sigma_{wk}})}}{4Nz\sqrt{D_{wk}}} \quad (1.2.5)$$

$\tau_{gw}$  représente est estimé comme le temps nécessaire à une onde de vitesse  $Nz$  pour parcourir une distance égale à la moyenne géométrique de la taille de la poche froide et de l'intervalle entre les poches froides.  $C_p$  représente la capacité thermique de l'air sec,  $N$  désigne la fréquence de Brunt–Väisälä, et  $z$  correspond à l'altitude.  $K_{gw}$  est l'efficacité des ondes de gravité. Enfin,  $L_v$  désigne la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

$\delta Q_1^{wk}$  (respectivement  $\delta Q_2^{wk}$ ) dépendent de l'entraînement ( $e_w$ ) d'air sec, de l'advection différentielle de  $\bar{\theta}$  (respectivement  $\bar{q}$ ) et de  $\delta\theta$  (respectivement  $\delta q$ ).

$$\begin{cases} \frac{\delta Q_1^{wk}}{C_p} = \frac{e_w}{\sigma_{wk}} \delta\theta - \delta\omega \partial_p \bar{\theta} - (1 - 2\sigma_{wk}) \delta\omega \partial_p \delta\theta \\ \frac{\delta Q_2^{wk}}{L_v} = \frac{e_w}{\sigma_{wk}} \delta q - \delta\omega \partial_p \bar{q} - (1 - 2\sigma_{wk}) \delta\omega \partial_p \delta q \end{cases} \quad (1.2.6)$$

De même,  $\delta Q_1^{cv}$  (respectivement  $\delta Q_2^{cv}$ ) sont influencées par les tendances de chauffage.

## Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

fage associées aux courants insaturés ( $Q_{cv}^{1,unsat}$ , ou  $Q_{cv}^{2,unsat}$  pour l'humidité) et aux courants saturés ( $Q_{cv}^{1,sat}$ , ou  $Q_{cv}^{2,sat}$  pour l'humidité).

$$\begin{cases} \frac{\delta Q_1^{wk}}{C_p} = \frac{e_w}{\sigma_{wk}} \delta\theta - \delta\omega \partial_p \bar{\theta} - (1 - 2\sigma_{wk}) \delta\omega \partial_p \delta\theta \\ \frac{\delta Q_2^{wk}}{L_v} = \frac{e_w}{\sigma_{wk}} \delta q - \delta\omega \partial_p \bar{q} - (1 - 2\sigma_{wk}) \delta\omega \partial_p \delta q \end{cases}$$

$$\begin{cases} \delta Q_1^{cv} = \frac{Q_{cv}^{1,unsat}}{\sigma_{wk}} - \frac{Q_{cv}^{1,sat}}{1-\sigma_{wk}} \\ \delta Q_2^{cv} = \frac{Q_{cv}^{2,unsat}}{\sigma_{wk}} - \frac{Q_{cv}^{2,sat}}{1-\sigma_{wk}} \end{cases} \quad (1.2.7)$$

On est d'accord que c'est là qu'on ajoute le terme Q1th quand on a splitting de la convection peu profonde ? Je pense qu'il faut en parler là ne première fois. A DISCUTER  
 $Q_{cv}^{x,unsat}$  et  $Q_{cv}^{x,sat}$  ( $x = 1, 2$ ) sont donnés par le schéma de convection profonde mais nous n'entrerons pas dans les détails ici tel que présenté dans Emanuel (1991).

L'entraînement est déterminé à partir du gradient vertical de  $\delta\omega$  et du taux d'étallement de la poche, selon la relation suivante :

$$e_w = \sigma_{wk} (1 - \sigma_{wk}) \partial_p \delta\omega + \partial_t \sigma_{wk} \quad (1.2.8)$$

L'équation 1.2.4, via les variables  $\delta Q_1^{cv}$  et  $\delta Q_2^{cv}$ , décrit l'impact de la convection profonde sur les poches froides qui se traduit par leur refroidissement dû aux descentes précipitantes, comme discuté plus haut. C'est bizarre de dire ça si loin de l'Eq 1.2.4, non ?

Le modèle des poches froides est maintenant décrit au complet. Il comporte :

- trois variables pronostiques, issues directement des équations du modèle : les profils de  $\delta\theta$  et  $\delta q$  et  $\sigma_{wk}$ .
- deux variables diagnostiques, calculées à partir du profil de  $\delta\theta$  :  $h_{wk}$ ,  $C_*$  et *WAPE*
- deux paramètres libres : le coefficient  $k$ , la densité  $D_{wk}$  et  $\tau_{gw}$ .  
Sur qu'il n'y en n'a pas d'autres ?

### 1.3 Prise en compte de l'effet des poches froides sur la convection

Pour prendre en compte l'effet des poches froides sur la convection, notamment l'ascendance au niveau de leurs fronts de rafales, Grandpeix et al. (2010) intro-

## Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

---

duisent deux nouvelles variables : l'énergie de soulèvement ( $ALE_{wk}$ ), intervenant dans le déclenchement de la convection, et une puissance de soulèvement ( $ALP_{wk}$ ), déterminant l'intensité de la convection.

pour Available Lifting Energy en anglais  
pour available lifting power

Pour calculer  $ALE_{wk}$ , le modèle suppose que la plus grande vitesse ( $C_{max}$ ) sur le contour de la poche va donner le déclenchement de la convection. Il est supposé être proportionnelle à la racine carrée de la  $WAPE$ , avec un coefficient ~~ici~~ de proportionnalité ~~plus élevé~~ (estimé arbitrairement à 1), ce qui conduit à la relation suivante :

jimagine que tu voulais dire plus élevé que pour WAPE. Mais alors il faut le dire explicitement et si possible donner une explication. Je pense qu'on en avait donné au tableau.

$$C_{max} = k' \sqrt{2WAPE} \quad (1.3.1)$$

où  $k' = 1$

L'énergie de soulèvement associée aux poches est ainsi exprimée par la relation suivante :

$$ALE_{wk} = \frac{1}{2} C_{max}^2 \quad (1.3.2)$$

La combinaison des équations (1.3.2) et (1.3.1) donne l'expression de  $ALE_{wk}$  ci-dessous :

$$ALE_{wk} = k'^2 WAPE \quad (1.3.3)$$

Avec  $k' = 1$ , cette équation dit que, dans le modèle des poches froides, l'énergie de soulèvement des masses d'air due aux poches est égale à l'énergie d'affaissement.

$ALP_{wk}$  est calculée en supposant que la poche exerce une puissance horizontale sur l'air environnant pendant son étalement. Cette puissance horizontale est ensuite convertie en puissance verticale. Lors de cette conversion, le modèle suppose qu'une grande partie de la puissance horizontale se dissipe, et que seulement 25 % contribuent à renforcer l'intensité de la convection.

Chaque poche engendre sa propre puissance de soulèvement, en fonction de sa vitesse d'étalement ( $C_*$ ), de sa hauteur ( $h_{wk}$ ) et de la longueur ( $L_g$ ) de son front de rafales. La puissance totale ( $ALP_{wk}$ ) des poches froides est le produit de la puissance fournie par chaque poche ~~et de leur par la~~ densité de nombre de poches ( $D_{wk}$ ).

$$ALP_{wk} = \epsilon \frac{1}{2} \rho C_*^3 h_{wk} L_g D_{wk} \quad (1.3.4)$$

où  $\epsilon = 0.25$  est l'efficacité de soulèvement

$$L_g = 2\pi r \quad (1.3.5)$$

$$\sigma_{wk} = D_{wk}\pi r^2 \quad (1.3.6)$$

Ensuite, la puissance de soulèvement  $ALP_{wk}$  s'écrit :

$$ALP_{wk} = \epsilon \rho C_*^3 h_{wk} \sqrt{\sigma_{wk} D_{wk} \pi} \quad (1.3.7)$$

## 1.4 Évaluation des équations internes du modèle des poches à partir des LES

Dans cette partie de résultats, on s'attache à analyser le fonctionnement des poches froides à partir des LES et à vérifier certaines des équations internes à la paramétrisation.

### 1.4.1 ~~Les échantillonnages~~ Distinction des régions de poches froides de leur environnement

Afin d'utiliser les LES pour l'étude et la modélisation des poches froides, le premier défi est la séparation des poches et de leur environnement. En effet, il n'existe pas un cadre établi à priori pour identifier objectivement les poches froides dans les observations et dans les modèles numériques (Rochetin et al., 2021) et les choix peuvent dépendre en partie de l'image physique qu'on se fait des poches, et également pour l'usage qui est en fait ici, de l'image sous jacente à la paramétrisation. La première méthode d'identification des poches froides proposée par Young et al. (1995) est basée sur le taux de précipitations en surface. Dans les études plus récentes comme celles de Provod et al. (2016); Zuidema et al. (2017); Vogel et al. (2021); Rochetin et al. (2021); Touzé-Peiffer et al. (2022), la détection des poches froides est plus proche d'une détection orientée courant de densité, dans laquelle les variations de température, de pression et de vent sont prises en compte. ~~Dans les cas présentés ici cependant, les conditions aux limites sont idéalisées de façon à s'approcher des hypothèses de stationnarité statistiques sous-jacentes~~

## Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

à la décomposition entre noyau dynamique et paramétrisations. Du fait de cette homogénéité, les poches sont identifiables de façon assez immédiates et en partie indépendamment de ces choix. Dans ces cas précis, elles peuvent être facilement détectées à partir de l'anomalie de température à 10 m ( $T_{10m}$ ), puisque les températures de surface sont uniformes. Notons aussi que contrairement à d'autres études, on ne cherche pas ici à isoler des "objets de poches" individuels, mais seulement de savoir si on est

Dans la présente étude, l'objectif n'est pas d'isoler des « objets individuels » de poches froides », mais simplement de déterminer si une maille du modèle se situe à l'intérieur ou à l'extérieur d'une poche froide. ~~Lei, les poches sont donc simplement~~ Par ailleurs, les conditions aux limites sont idéalisées afin de respecter l'hypothèse d'homogénéité statistique qui sous-tend la décomposition de Reynolds entre le cœur dynamique et les paramétrisations physiques. Dans ce cas idéalisé avec une température de surface uniforme, les poches froides peuvent être identifiées ~~comme la partie du domaine où~~ de manière relativement immédiate en appliquant un seuil à l'anomalie ~~de~~ (écart par rapport à la moyenne du domaine) de la température ~~est inférieure à un seuil~~ 10 mètres au-dessus de la surface ( $T_{10m}$ ), c'est-à-dire au premier niveau du modèle.

La carte de Fig. 1.2 et Fig. 1.3 présentent une moyenne glissante horizontale, avec une boîte de  $3.25 \text{ km} \times 3.25 \text{ km}$ , de la divergence du vent à 10 m, ~~lissée sur une boîte de  $3.25 \text{ km} \times 3.25 \text{ km}$ , permet d'identifier à l'œil ( $V_{10m}$ ) au-dessus de la surface.~~ À partir de ces cartes, les centres et les fronts de rafales des poches, ~~représentés respectivement par les~~ froides peuvent être facilement identifiés, correspondant respectivement aux ~~maximums et minimums de divergence~~ <sup>a</sup> ~~du vent à 10 m~~ (Fig. 1.2 et Fig. 1.3). Nous superposons à cette carte des contours d'anomalie de  $T_{10m}$  avec différentes valeurs pour déterminer un seuil optimal de cette anomalie. Ce seuil optimal correspond à la valeur du contour de l'anomalie de  $T_{10m}$  qui entoure les centres des poches et suit mieux les fronts de rafale. Les maximums. Les maxima de divergence du vent de surface indiquent ~~les centre de poches qui correspondent à l'endroit~~ le centre des poches froides, là où ~~s'effectue l'effondrement des~~ les masses d'air froid s'effondrent. Les précipitations sont généralement co-localisées avec ces ~~maximums de divergence~~ maxima de divergence (non montrées). La convergence ~~du vent des vents~~ assez forte observée autour des centres ~~de poches~~, quant à elle, des poches froides correspond à la forte ascendance des masses d'air créée en amont du front de ~~rafale en rafales~~ à la périphérie de la poche ~~froide~~.

Que ce soit sur la LES en RCE ou Les deux LES du cas RCE et la LES du cas AMMA, ~~on remarque~~ montrent des regroupements de poches froides (ou des centres

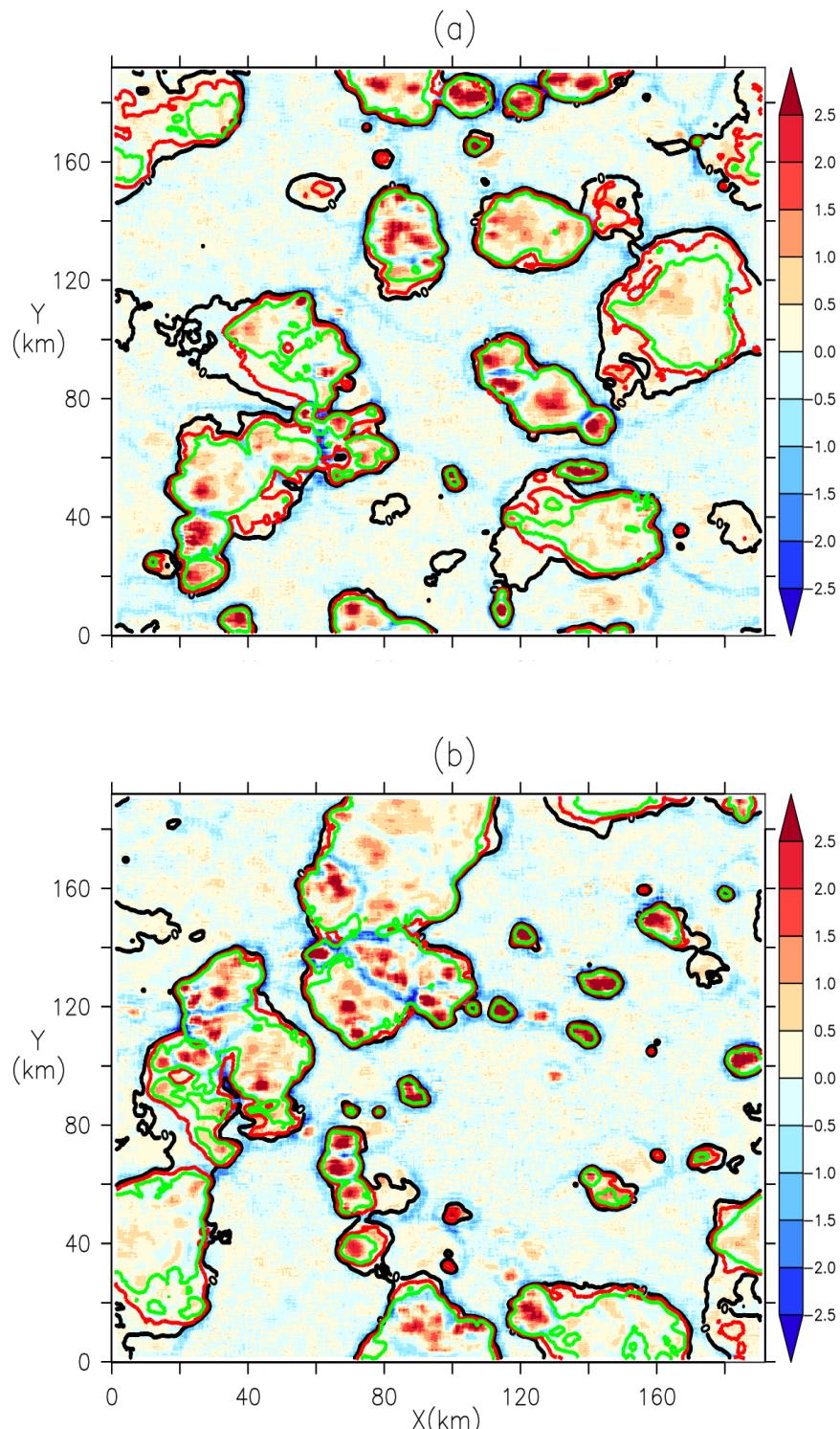


FIGURE 1.2 – Moyenne glissante (avec une boîte  $3.25 \text{ km} \times 3.25 \text{ km}$ ) de la divergence du vent à 10 m ( $\text{div}(\overrightarrow{V_{10m}})$ ) (en  $10^3 \text{ s}^{-1}$ ). Avec cette unité, une valeur de 1 correspond à un changement d'intensité du vent de  $1 \text{ m.s}^{-1}$  sur 1 km. Les panneaux a et b correspondent à deux états différents du cas étudié avec le modèle LES SAM réalisé sur la RCE océanique. Des contours des anomalies de température à 10 m, à  $-0.4 \text{ K}$  (en vert),  $-0.2 \text{ K}$  (en rouge) et  $0 \text{ K}$  (en noir), sont superposés sur le champ de divergence lissé.

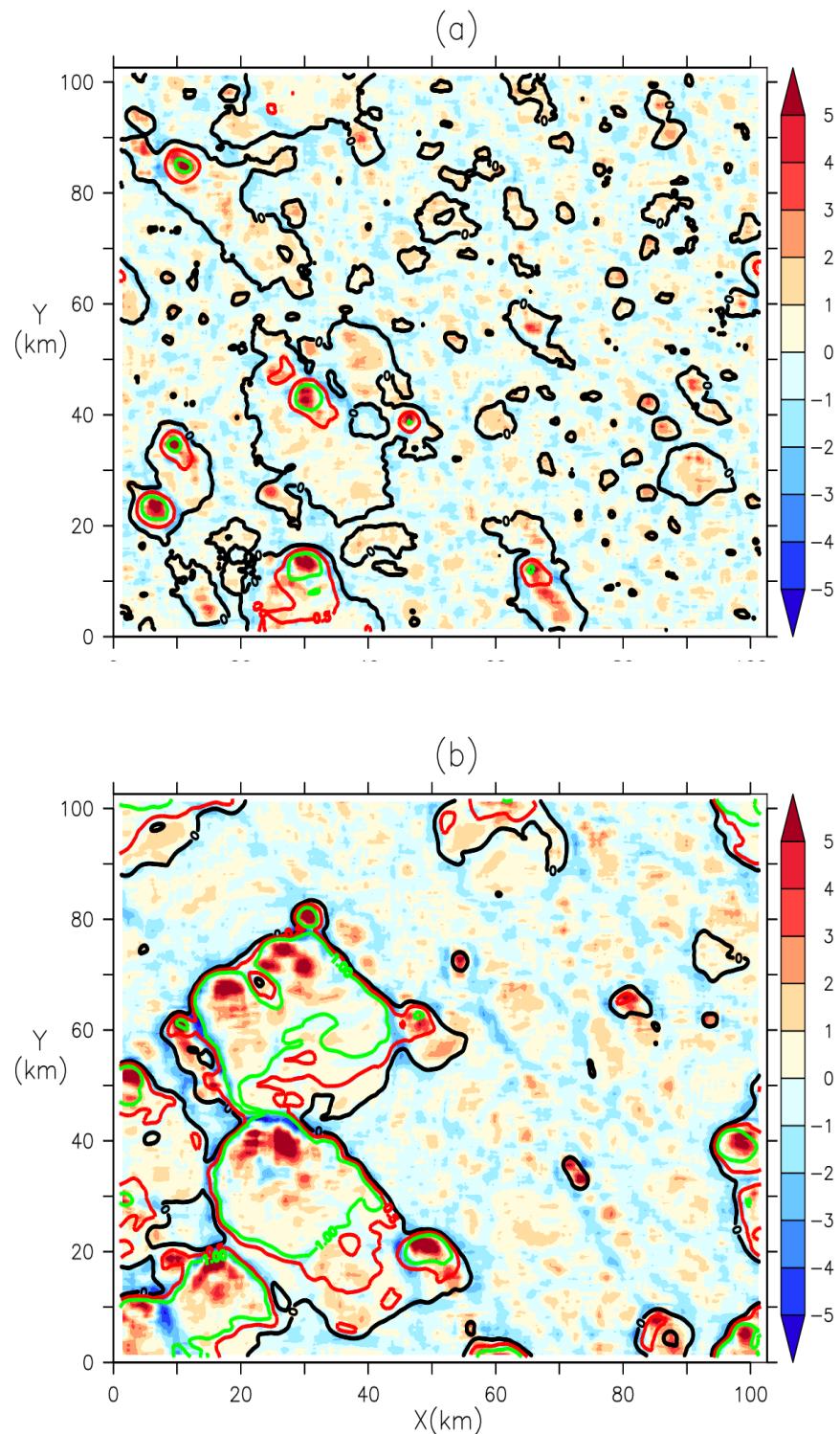


FIGURE 1.3 – Même chose que la Fig. 1.2, pour deux instants successifs, 17h10 (a) et 18h00 (b), de la LES MESONH réalisée sur le cas AMMA. Les contours superposés correspondent à des anomalies de température à 10 m de -1 K (en vert), -0.5 K (en rouge) et 0 K (en noir).

## Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

---

de poches froides très proches) formant un front de rafale-rafales commun. Cela peut s'expliquer par le fait que, lors de leur propagation, les poches froides peuvent fusionner pour créer une poche unique et plus grande. On observe seule poche froide plus étendue. On peut également observer que la convergence du vent des vents est généralement plus intense entre les centres des poches froides regroupées, indiquant que l'ascendance des ascendances des masses d'air associée-associées aux fronts de rafales est plus marquée lors de la rencontre de ces poches. Cela est en accord avec certaines études qui indiquent que le déclenchement de la l'initiation de convection sur les fronts de rafales est plus efficace lorsque deux ou plusieurs poches se heurtent (Torri and Kuang, 2019; Haerter and Schlemmer, 2018; Feng et al., 2015). Pour fixer les valeurs de froides entrent en collision (Torri and Kuang, 2019; Haerter and Schlemmer, 2018).

Nous superposons à cette carte les contours d'anomalie de  $T_{10m}$ , on a tenu compte des caractéristiques distinctes des poches sur l'océan et sur le continent. Les valeurs de l'anomalie de  $T_{10m}$  utilisées sont plus élevées sur le cas RCE (0 K, -0.2 K et -0.4 K) et légèrement plus basses sur le cas AMMA (0 K, -0.5 K et -1 K), car les poches y sont plus froides. Sur avec différentes valeurs afin de déterminer un seuil optimal pour cette anomalie. Dans le cas RCE, on constate que les valeurs de l'anomalie de  $T_{10m}$  à 0 K inclut parfois des régions sans centres de poches, là froides, où la divergence du vent des vents de surface est faible (Fig 1.2a et 1.2b). Cela suggère que ce seuil est peut-être trop élevé pour identifier précisément les poches sur ce cas. Les figures 1.2a et 1.2b montrent également, tandis que les contours d'anomalies de  $T_{10m}$  avec des seuils de anomalie à -0.2 K et -0.4 K entourent assez bien les centres des poches, mais ceux avec un seuil de -0.2 K suit mieux les bords des poches. Sur froides. Dans le cas AMMA, la figure 1.3a montre clairement que le seuil de 0 K est trop élevé pour identifier les poches. De son côté froides. En revanche, la figure 1.3b indique montre que le seuil de -1 K suit mieux les fronts de rafales des poches froides que celui de -0.5 K. D'après Sur la base de ces analyses, on retient nous retenons les seuils d'anomalie de  $T_{10m}$  à -0.2 K et -1 K pour identifier les poches respectivement sur le froides respectivement dans les cas RCE et le cas AMMA. Nous effectuons des échantillonnages afin de calculer certaines variables du modèle de poches froides dans les LES. Nous déterminons dans un premier temps AMMA.

### 1.4.2 Échantillonnages des profils verticaux des écarts de poches

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

---

Une fois la valeur seuil fixée pour l'anomalie de  $T_{10m}$ , nous séparons l'ensemble du domaine tridimensionnel LES entre la région de la poche froide (w) et le reste du domaine (x). À partir de cette séparation, nous pouvons calculer les moyennes horizontales sur chaque sous-domaine,  $X_W$  à l'intérieur des poches froides et  $X_X$  à l'extérieur, puis en déduire l'écart associée  $\delta X = X_W - X_X$ . Ce procédé d'échantillonnage permet de calculer les profils verticaux des écarts ~~de~~ entre (w) et (x) pour la température ( $\delta T$ ), ~~et~~ l'humidité ( $\delta q$ ) ~~et~~ la vitesse verticale ( $\delta w$ ) ~~entre~~ (w) ~~et~~ (x). Pour ce faire, nous appliquons un masque calculé  $\delta w$ . Des exemples d'anomalies de température sont illustrés à la Fig. 1.4.

À noter que nous appliquons le même masque de surface à ~~partir du seuil identifié précédemment sur l'anomalie de  $T_{10m}$ . Il est appliqué sur toute la colonne pour la détermination des~~ verticales pour déterminer les profils verticaux. Cette ~~vision de cylindre~~ verticale est évidemment questionnable. Mais elle semble bien s'appliquer, au moins aux cas étudiés ici. **Calcul de la vitesse d'étalement,  $C_*$**

### 1.4.3 Calcul de la vitesse d'étalement, $C_*$ , à partir de l'échantillonnage de la divergence du vent

Il est supposé dans la paramétrisation que les poches sont des disques identiques de même rayon ( $r$ ). Cette hypothèse permet de déterminer facilement  $C_*$  par le théorème de la divergence.

$$\int \int \underline{\text{div}(\vec{V}_{10})} \text{div}(\vec{V}_{10m}) dS_{wk} = C_* L_g \quad (1.4.1)$$

$$C_* = \frac{\underline{\text{div}(\vec{V}_{10})} S_{wk}}{\underline{L_g}} \frac{\underline{\text{div}(\vec{V}_{10m})} S_{wk}}{\underline{L_g}} \quad (1.4.2)$$

où  $S_{wk}$  est la surface de la poche

$$S_{wk} = \pi r^2 \quad (1.4.3)$$

Les équations 1.3.5, 1.3.6 et 1.4.3 permettent d'exprimer  $C_*$  en fonction de la diver-

## Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

---

gence moyenne du vent à 10 m, de la fraction surfacique ( $\sigma_{wk}$ ) et de la densité ( $D_{wk}$ ) des poches par la relation :

$$C_* = \frac{1}{2} \overline{\text{div}} \left( \overrightarrow{V_{10m}} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{wk}}{D_{wk}\pi}} \quad (1.4.4)$$

Pour appliquer ce calcul de  $C_*$  dans les LES, nous prenons la moyenne horizontale de la divergence du vent à 10 m dans ( $w$ ).  $\sigma_{wk}$  calculée dans les LES est 0.12 sur le cas AMMA et 0.25 sur le cas RCE. Pour déterminer  $D_{wk}$ , nous avons manuellement compté les centres des poches visibles sur les cartes de divergence du vent à 10 m (Fig. 1.2 et 1.3), car nous n'avons pas utilisé dans cette étude les méthodes de détection des poches qui pourraient générer automatiquement leur nombre. Nous trouvons environ une densité,  $D_{wk}$ , égale à 5 poches sur 100 km  $\times$  100 km sur le cas RCE et sur le cas AMMA.

Je pense qu'une détection automatique ne changerait pas grand chose. A la main ou automatiquement, ca serait surtout pas mal de calculer comment les grandeurs dépendent du choix de la valeur de  $D_{wk}$ .

On voit ici **1.4.4 Calcul de l'énergie d'affaissement, WAPE, à partir de que c'est en**

1/Racine\_carrée( $D$ ) l'anomalie de température virtuelle

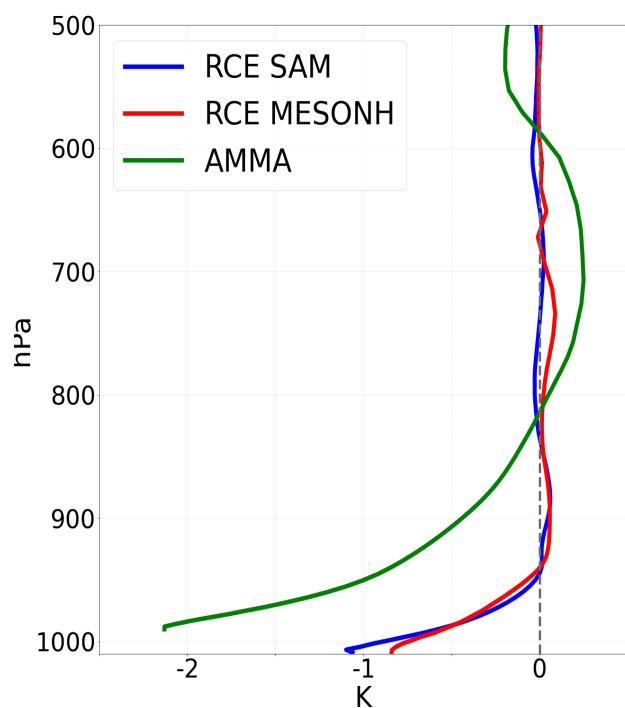
20% d'erreur sur  $D$  fait 10% d'erreur sur  $C_*$ . Ca aurait pu être bien de mettre une idée de l'incertitude dans les tableaux

Nous calculons finalement l'énergie d'affaissement ( $WAPE$ ) de la poche dans les LES en utilisant la formule (1.2.1) proposée par Grandpeix and Lafore (2010). Le travail consiste à déterminer  $\overline{\theta_v}$ , ainsi que les profils de  $\delta\theta_v$  et  $h_{wk}$  dans les LES. Pour ce faire, nous avons d'abord calculé  $\theta_v$  dans les LES, puis déduit  $\overline{\theta_v}$  et le profil de  $\delta\theta_v$ . Concernant la détermination de  $h_{wk}$ , comme suggéré par Grandpeix and Lafore (2010), nous prenons cette hauteur à l'altitude où le profil de  $\delta T$  s'annule. Cette altitude se situe autour de 950 hPa (environ 600 m) dans le cas RCE océanique et vers de 800 hPa (environ 2 km) dans le cas AMMA (Fig. 1.4).

### 1.4.5 Calcul des vitesses verticales du front de rafale selon les formulations ALP et ALE.

Ici, nous calculons les variables liées à l'énergie ( $ALE_{wk}$ ) et à la puissance ( $ALP_{wk}$ ) de soulèvement associées aux poches froides dans les LES. Pour ce faire, nous ~~procédon~~~~s en plusieurs étapes~~ :

1. ~~Nous~~ déterminons d'abord une hauteur moyenne de la base des nuages à laquelle nous extrayons les vitesses verticales  $w_b(x, y)$ . Cette hauteur correspond à l'altitude à laquelle le profil moyen de l'eau condensée atteint sa première valeur non nulle. Elle est ~~observée~~~~estimée~~ à environ 950 hPa sur les deux



$\delta_T$

FIGURE 1.4 – Profils verticaux de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur des poches froides calculés sur un instant des LES (SAM et MESONH) du cas RCE et à instant 18h de la LES MESONH du cas AMMA.

## Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

---

LES océaniques (SAM et MesoNH) et à environ 750 hPa sur le LES du cas AMMA (MESONH) (comme le montre la Fig. 1.5).

2. Nous, qui présente le profil vertical de l'eau condensée moyennée horizontalement pour les deux cas. Ensuite, nous séparons ensuite les courants ascendants sur fronts de rafales de ceux associés aux panaches thermiques. Les courants ascendants sur fronts de rafales étant à la fois plus forts et plus cohérents horizontalement que les thermiques observés dans l'environnement des poches froides, nous avons défini un masque basé sur un seuil de  $w_b$  lissé horizontalement sur  $1.25 \text{ km} \times 1.25 \text{ km}$  (RCE) et  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  (AMMA). Les valeurs de  $w_b$  lissées sont notées  $\tilde{w}_b(x, y)$  dans la suite du texte. Après plusieurs analyses, nous avons retenu des seuils de  $\tilde{w}_b(x, y)$  de 0.6 m/s pour le cas RCE et de 2 m/s pour le cas AMMA pour identifier les fronts de rafales.

La figure 1.6 présente les cartes d'anomalie de  $T_{10m}$ , lissées horizontalement sur une grille de  $2.5 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$ , pour les cas RCE et AMMA. Sur ces cartes, nous avons superposé les contours des anomalies de  $T_{10m}$  utilisées pour identifier les poches (-0.2 K pour RCE et -1 K pour AMMA), ainsi que les ascendances sur les fronts de rafales (en rouge) et les thermiques (en vert). On voit à l'œil que les fronts de rafales calculés avec les seuils de  $\tilde{w}_b(x, y)$  à 0.6 m/s (RCE) et à 2 m/s (AMMA) coïncident bien avec les contours des poches identifiées avec ces seuils d'anomalie de  $T_{10m}$ . Il apparaît également que la majorité des thermiques se situent ~~à l'extérieur~~ dans l'environnement des poches froides aussi bien pour le cas RCE que le cas AMMA (Fig. 1.6). Cela vient valider à posteriori, un choix qui avait été fait dans la version 6A du modèle en ne calculant que l'effet des thermiques qu'à l'extérieur des poches.

Enfin, pour déterminer  $ALE_{wk}$ , nous prenons le maximum de l'énergie cinétique dans le domaine en ne considérant que les  $w_b(x, y)$  dans le masque des fronts de rafales ( $w_{bgust}(x, y)$ ), car c'est le maximum de vitesse verticale sur le front de rafale qui déclenche la convection. Quant à  $ALP_{wk}$ , qui représente la moyenne des puissances de soulèvement fournies par l'ensemble des poches dans le domaine, elle est calculée à partir de la moyenne horizontale du cube de  $w_{bgust}$ , pondérée par la fraction de surface ( $\sigma_{gust}$ ) couverte par les fronts de rafales. Le masque appliqué sur les fronts de rafales a permis de calculer  $\sigma_{gust}$  qui vaut 0.017 sur le cas RCE et 0.067 sur le cas AMMA pour les instants présentés dans la figure 1.6.

$$ALE_{wk} = \max\left(\frac{1}{2}w_{bgust}^2\right) \quad (1.4.5)$$

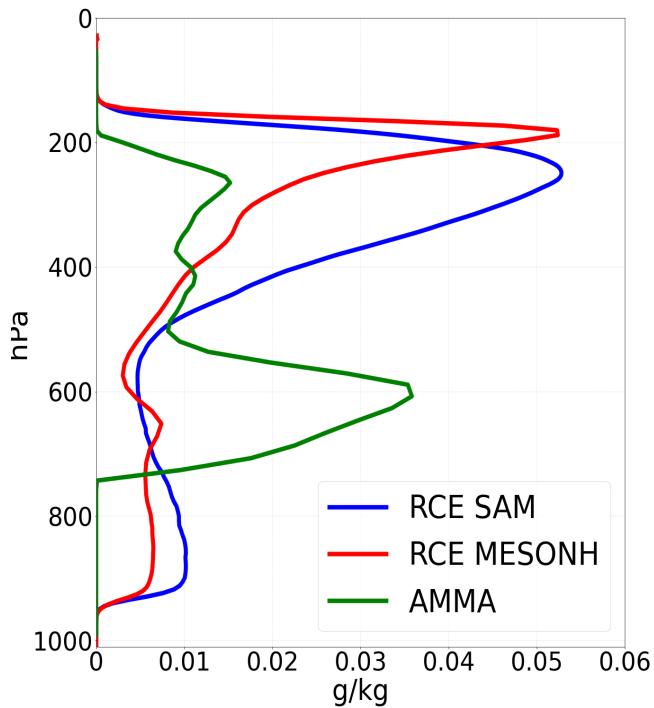


FIGURE 1.5 – Profil vertical de l'eau condensée moyennée horizontalement sur les LES en RCE océanique réalisée avec les modèles SAM et MesoNH et la LES continental du cas AMMA réalisée avec le modèle MesoNH.

Je pense bien de regrouper cette figure avec 1.4 pour avoir les profils de  $\Delta_T$  et nuages côté à côté. Attention "hPa" est coupé. Tu pourrais même peut-être mettre le  $\Delta_q$

$$ALP_{wk} = \sigma_{gust} \frac{1}{2} \rho w_{bgust}^3 \quad (1.4.6)$$

#### 1.4.6 Validation des lois phénoménologiques

Les paramétrisations physiques sont définies par des ensembles d'équations mathématiques destinées à représenter les processus sous mailles au sein d'une colonne du modèle. La formulation de ces équations repose à la fois sur une compréhension phénoménologique des processus concernés et sur des principes fondamentaux de la physique. On peut valider ces paramétrisations en bloc, ou par morceaux, en isolant certaines équations ou relations entre variables internes, ou entre variables internes et variables d'état du GCM. Les LES offrent la possibilité d'effectuer une validation et un ajustement à priori de ces lois.

Dans le modèle GL10, les variables  $ALE_{wk}$ ,  $ALP_{wk}$  et  $C_*$  sont déterminées à partir

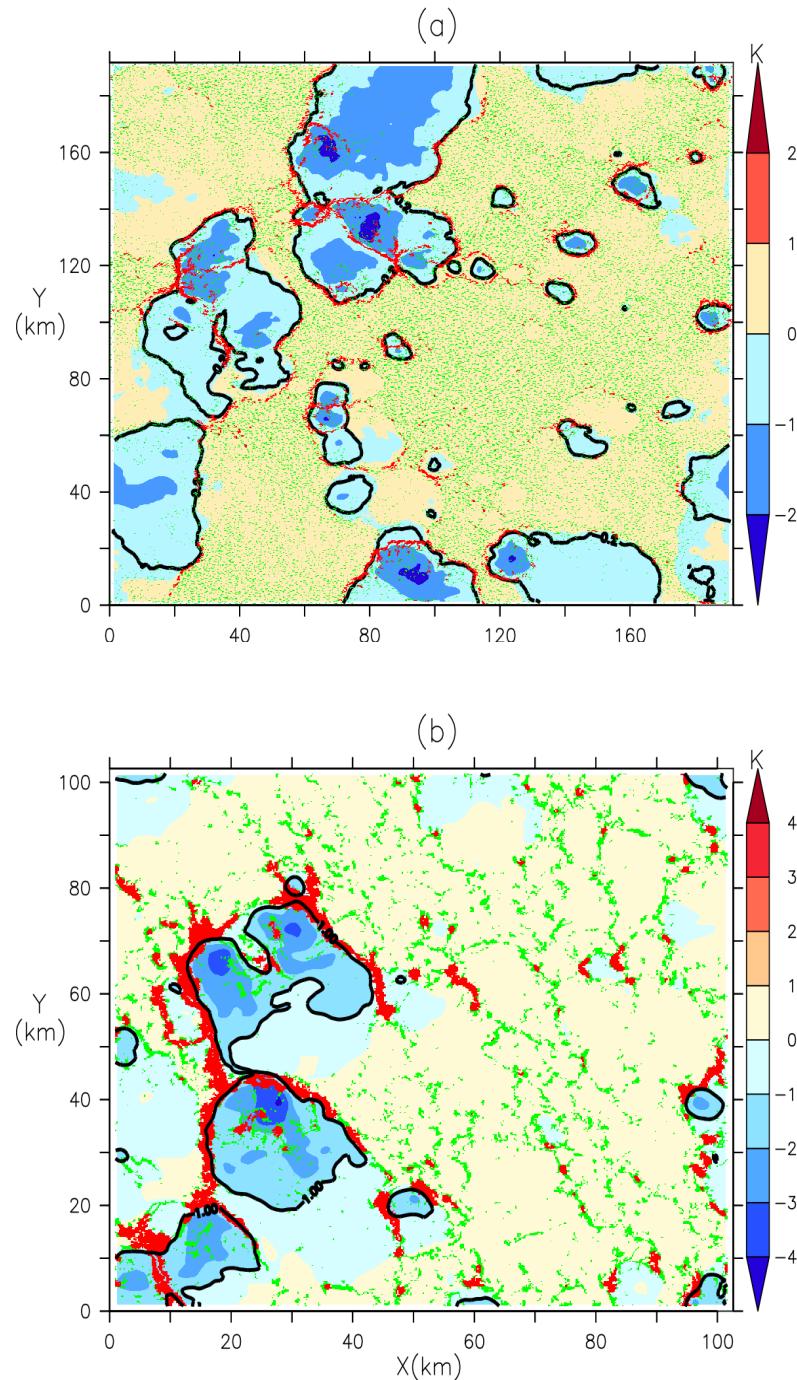


FIGURE 1.6 – Cartes d'anomalie de température à 10 m ( $T_{10m}$ ), lissées horizontalement sur  $2.5 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$ , représentées sur un instant de la LES SAM du cas RCE (a) et sur l'instant 18h de la LES du cas AMMA. Les contours noirs indiquent les seuils d'anomalie de  $T_{10m}$  : -0.2 K pour le cas RCE et -1 K pour le cas AMMA. La couleur rouge représente les ascendances présentes sur les fronts de rafales, identifiées à partir des vitesses verticales à la base des nuages ( $w_b$ ) dans le masque des fronts de rafales. Ce masque est défini à partir d'un seuil appliqué à la moyenne glissante de  $w_b$ . Pour le cas RCE, la moyenne est effectuée avec une boîte de  $1.25 \text{ km} \times 1.25 \text{ km}$  et les valeurs  $\tilde{w}_b > 0.6 \text{ m/s}$  sont retenues (respectivement  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$   $\tilde{w}_b > 2 \text{ m/s}$  pour le cas AMMA). Les points verts représentent les thermiques, définis comme les zones où  $w_b$  est positif en dehors du masque des fronts de rafales.

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

de l'énergie d'effondrement (affaissement,  $WAPE$ ) (voir les équations 1.2.2, 1.3.3 et 1.3.7), sur la base d'hypothèses dérivées des lois physiques. Ici, nous comparons les valeurs de  $ALE_{wk}$ ,  $ALP_{wk}$  et  $C_*$  calculées à partir de . Nous comparons dans le Tableau 1.4.1 les valeurs obtenues, utilisant les formulations de la paramétrisation (valeur paramétrée P), basées sur la  $WAPE$  déduit de  $\delta\theta_v$  échantillonné dans la LES, avec celles obtenues directement à partir de du vent résolu dans la même LES (valeur échantillonnée E) : la vitesse verticale à la base des nuages près des fronts de rafales ( $w_{bgust}$  du nuage ( $w_b$ ) pour  $ALE_{wk}$  et  $ALP_{wk}$ , et à partir de et la divergence moyenne du vent à 10 m dans les poches froides pour  $C_*$ .

Le tableau 1.1 montre que, pour les LES du cas RCE réalisées avec MesoNH et du cas AMMA, les Les valeurs de  $ALE_{wk}$  calculées à partir de  $w_{bgust}$  et de  $WAPE$  issue des profils de  $\delta\theta_v$  selon les deux méthodes sont très proches. Dans la LES du cas RCE réalisée avec SAM, La plus grande erreur correspond à une sous-estimation d'environ 30% de  $ALE_{wk}$  calculée à partir de  $w_{bgust}$  est légèrement supérieur à la  $WAPE$  issue du profil de  $\delta\theta_v$  (tableau 1.1). Cependant, même dans ce cas,  $ALE_{wk}$  déterminé comparée à partir de  $w_{bgust}$  reste comparable l'estimation à la  $WAPE$  dérivé du profil de  $\delta\theta_v$  partir de  $w_b$ . Ces résultats pour les trois LES confirmé sont compatibles avec l'hypothèse d'égalité entre  $ALE_{wk}$  et la  $WAPE$ , telle qu'estimée par la paramétrisation.

TABLEAU 1.1 – Comparaison des variables  $WAPE$ ,  $ALE_{wk}$ ,  $C_*$  et  $ALP_{wk}$  obtenues directement à partir du vent résolu dans les LES (valeurs échantillonnées E), avec celles calculées à partir des formulations de la paramétrisation (valeurs paramétrées P). Les valeurs E sont dérivées de la vitesse verticale à la base du nuage ( $w_b$ ) pour  $ALE_{wk}$  et  $ALP_{wk}$ , et la divergence moyenne du vent à 10 m dans les poches pour  $C_*$ , échantillonnées directement dans les LES. Les valeurs P sont calculées à partir de la  $WAPE$  déduite de  $\delta\theta_v$ , lui-même échantillonné dans les mêmes LES, en considérant les coefficients  $k = 0.33$  et  $k = 0.66$ . Les analyses sont effectuées sur les deux LES océaniques en RCE réalisées avec les modèles SAM et MesoNH et sur la LES continental du cas AMMA réalisée avec le modèle MesoNH.

	$WAPE$ (J/Kg)	$ALE_{wk}$ (J/kg) (E)	$C_*$ (m/s) (FPP) $k=0.33$	$C_*$ (m/s) (E)	$C_*$ (m/s) (FPP) $k=0.66$	$ALP_{wk}$ (J/kg) (FPP) $k=0.33$	$ALP_{wk}$ (J/kg) (E)	$ALP_{wk}$ (J/kg) (FPP) $k=0.66$
RCE SAM	7.962	10.460	1.315	2.228	2.630	0.008	0.054	0.071
RCE MESO	7.912	6.965	1.313	2.264	2.625	0.008	0.020	0.071
AMMA MESO	34.250	33.480	2.727	4.939	5.454	0.104	0.982	0.831

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

---

En ce qui concerne  $C_*$ , le tableau 1.1. Le Tableau 1.4.1 montre que, pour les trois LES, ses valeurs calculées les valeurs de  $C_*$  obtenues à partir de la WAPE sont systématiquement inférieures à celles obtenues à partir de la divergence moyenne du vent à 10 m dans les poches. Cette différence pourrait être due à une sous-estimation du coefficient  $k$ , fixé ici à 0.33. En fixant  $k$  à 0.66, les calculs de  $C_*$  basés sur la WAPE deviennent comparables à celles obtenues à partir de la divergence moyenne du vent à 10 m dans les poches, notamment pour les cas RCE et AMMA (tableau 1.1). Comme discuté plus haut, la valeur de 0.33 a été retenue suite à une communication orale de Lafore (2000). Mais d'autres études proposent des valeurs différentes : Lafore and Moncrieff (1989) estiment  $k$  à 0.68 sur la base de simulations CRM de lignes de grains en 2D, tandis que Bryan (2005) l'évaluent à 0.5 à partir d'observations de poches froides lors de l'expérience BAMEX dans les Grandes Plaines américaines. Ces résultats sont donc compatibles avec l'hypothèse du modèle qui postule que l'énergie cinétique de la poche résulte de la transformation de la WAPE en énergie cinétique avec un coefficient  $k$  compatible avec des estimations publiées.

Le tableau Tableau 1.1 montre également que, pour les trois cas LES, les valeurs de  $ALP_{wk}$  calculées avec  $C_*$  obtenue à partir de WAPE sont au moins trois fois inférieures à celles obtenues avec  $w_{bgust}w_b$ . Deux coefficients interviennent dans le calcul de  $ALP_{wk}$  avec la formule de paramétrisation : le coefficient  $k$  et l'efficacité de soulèvement  $\epsilon$ , imposés respectivement à 0.33 et 0.25. Cependant, utiliser  $k=0.66$  dans le calcul de  $C_*$  et conserver  $\epsilon$  à sa valeur nominale de 0.25 permet de concilier les différentes estimations. Ceci est compatible avec l'hypothèse de la paramétrisation selon laquelle 25 % de la puissance horizontale fournie par les poches froides lors de leur propagation servirait à renforcer l'intensité de la convection, tandis qu'une grande partie se dissipe.

## 1.5 Comparaison entre LES et Évaluation dans la configuration uni-colonne de LMDZstandard

### 1.5.1 Les profils de $\delta T$ , $\delta q$ et $\delta w$

Dans cette partie section, nous évaluons les profils de  $\delta T$ ,  $\delta q$  et  $\delta w$  calculés dans les LES par rapport à ceux simulés avec LMDZ la paramétrisation des poches dans la configuration 1D de LMDZ (LMDZ CTRL). La comparaison est nettement plus exigeante que celles montrées dans la section précédente dans la mesure où ici plus exigeante, car toutes les paramétrisations interagissent entre elles pour aboutir aux

## Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

---

valeurs simulées plusieurs heures (AMMA) ou jours (RCE) après l'initialisation. Pour les LES en RCE, nous représentons les profils une fois atteint un régime quasi-stationnaire. C'est ce régime quasi-stationnaire que cible le cadre de l'équilibre radiatif convection. En ce qui concerne la LES du cas AMMA, des analyses intermédiaires montrent que les poches apparaissent l'après-midi vers 17h avec des températures relativement basses et se développent au cours de la journée. En raison des variations des caractéristiques des poches à différents moments sur le continent, nous moyennons les résultats sur les 7 instants disponibles entre 17h et 18h pour simplifier nos analyses. Pour comparer avec le modèle, nous réalisons une simulation de contrôle de LMDZ en version uni-colonne (LMDZ CTRL) pour le cas RCE et le cas AMMA. Ces simulations de LMDZ, et l'état de l'atmosphère au moment de l'évaluation dépend de l'interaction de l'ensemble de ces paramétrisations au cours des heures précédentes (cas AMMA) ou des jours précédents (cas RCE). Les simulations LMDZ CTRL sont réalisées avec exactement les mêmes conditions initiales et aux limites que les LES correspondantes pour les deux cas. Pour le cas RCE, nous effectuons une simulation LMDZ CTRL sur 44 jours afin d'atteindre un quasi-équilibre. Présentons les diagnostics une fois qu'un état quasi-stationnaire a été atteint, en moyennant les résultats entre les jours 40 et 44. Pour le cas AMMA, les simulations LMDZ CTRL sont réalisées sur la journée du 10 juillet 2006, de 6h à 6h00 à minuit.

Pour le Dans la LES du cas AMMA, le seuil ( $S_{trig}$ ) de la taille des nuages contrôlant le déclenchement de la convection profonde est ajusté de manière à ce que la convection se déclenche au même moment que dans les LES afin de permettre une comparaison précise. En effet les poches apparaissent dans l'après-midi, vers 17h00, avec des températures relativement basses. En raison des variations des caractéristiques des poches froides au cours des heures suivantes, nous faisons une moyenne des résultats sur les 7 instants disponibles entre 17h00 et 18h00, afin de simplifier nos analyses. Dans la configuration standard de LMDZ, la convection se déclenche avant 14h dans le cas AMMA avec la configuration standard de LMDZ, tandis que dans les LES, elle se produit vers 17h. Pour obtenir un déclenchement simultané à celui des LES, nous avons effectué des tests en modifiant la valeur de  $S_{trig}$ . Ces tests ont permis d'obtenir . Pour retarder le déclenchement de la convection dans la simulation LMDZ du cas AMMA à 16h50 en fixant profond, comme observé dans la LES, le seuil de taille des nuages  $S_{trig}$ , un paramètre libre du modèle présentant une grande incertitude, est ajusté à 24 km<sup>2</sup>.<sup>2</sup> pour comparaison plus précise.

Afin de faciliter les comparaisons entre LMDZ et LES, nous imposons également, dans les simulations LMDZ CTRL, la densité des poches estimée dans les la LES.

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

Nous fixons ainsi une densité de 5 poches par  $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ , ~~tant sur le km~~, aussi bien pour les cas RCE que AMMA. Pour représenter les profils de  $\delta T$ ,  $\delta q$  et  $\delta w$  dans LMDZ CTRL pour le cas RCE, nous effectuons une moyenne temporelle entre le ~~41<sup>e</sup> et le 43<sup>e</sup>~~ ~~41<sup>e</sup> et le 43<sup>e</sup>~~ jour de simulation, afin de ~~comparer avec les LES aux mêmes instants~~ pouvoir comparer avec la LES sur la même période. Pour le cas AMMA, nous ~~effectuons~~ ~~faisons~~ une moyenne entre ~~17h et 18h~~ ~~17h00 et 18h00~~, comme dans la LES. Profils verticaux de  $\delta T$ ,  $\delta q$  et  $\delta w$  calculés dans les LES et simulés dans LMDZ contrôle (LMDZ CTRL) sur le cas RCE (a, b, c) et sur le cas AMMA (d, e, f). C'est un bout d'une légende de la figure ???

## 1.5.1 Les profils de $\delta T$ , $\delta q$ et $\delta w$

L'analyse des profils de  $\delta T$  dans les LES confirment que les poches sont plus froides à la surface avec des températures qui augmentent vers le sommet aussi bien sur le cas RCE (Fig. 1.7a) que sur le cas AMMA (Fig. 1.7d). Les poches froides sont environ trois fois plus profondes dans ~~AMMA~~ ~~te cas~~ (Fig. 1.7a) que pour le cas RCE (Fig. 1.7d). Dans les LES, on observe que les températures des poches froides pour le cas AMMA (autour de  $-2\text{ K}$ ) sont relativement proches de celles du cas RCE (autour de  $-1.2\text{ K}$ ). Cependant, les observations indiquent que les poches sont significativement plus froides au-dessus du continent qu'au-dessus de l'océan. Les résultats obtenus avec la LES pour le cas AMMA pourraient s'expliquer par le fait que l'analyse est réalisée ~~dès les premiers instants suivant l'apparition~~ au stade initial de la formation des poches. Pour ce même cas, les observations révèlent une chute de température d'environ  $-5\text{ K}$  lors du passage de la poche froide (Lothon et al., 2011). Il convient également de noter que le cas AMMA correspond à un épisode de convection continentale particulièrement faible et atypique. Les profils  $\delta q$  indiquent qu'en surface, les poches froides sont plus humides que leur environnement dans le cas RCE (Fig. 1.7b), tandis que dans le cas AMMA, elles sont légèrement plus sèches (Fig. 1.7e). Le fait que les poches soient également plus sèches en surface que leur environnement dans le cas AMMA pourrait également s'expliquer par le fait que l'analyse a été réalisée à un moment où les poches n'étaient pas encore totalement développées, comme mentionné plus haut. Dans les deux cas, l'humidité au sein des poches ~~A corriger en fonction de l'analyse de la nouvelle LES AMMA~~ froides diminue avec l'altitude jusqu'à leur sommet, où elles sont asséchées par la subsidence des masses d'air sec en bassins froids (Fig. 1.7c et Fig. 1.7f). Dans le cas RCE, cette subsidence disparaît en dessous de 800 hPa (Fig. 1.7c), tandis que pour le cas AMMA, elle disparaît à un niveau plus élevé, autour de 600 hPa (Fig. 1.7f).

Nous passons maintenant aux comparaisons des profils de  $\delta T$ ,  $\delta q$  et  $\delta w$  simulés

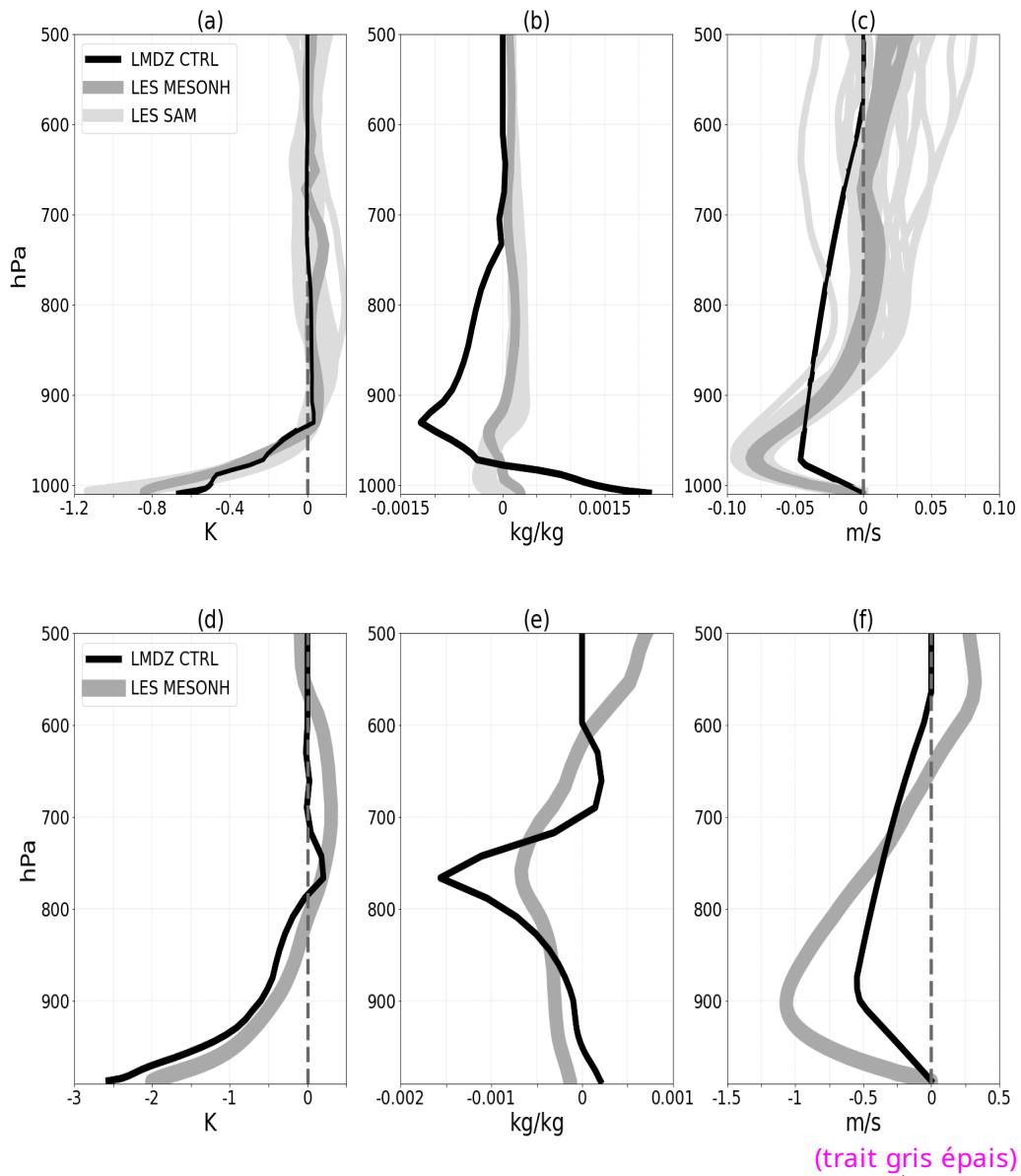


FIGURE 1.7 – Profils verticaux de  $\delta T$ ,  $\delta q$  et  $\delta w$  calculés dans les LES et simulés dans LMDZ contrôle (LMDZ CTRL) sur le cas RCE (a, b, c) et sur le cas AMMA (d, e, f).

trait noir,  
trait gris épais

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

---

par LMDZ CTRL à ceux calculés dans les LES. Les profils  $\delta T$  simulés avec LMDZ CTRL sont qualitativement cohérents avec les LES, avec un sommet des poches (où  $\delta T$  s'annule) à peu près à la bonne altitude. Les poches froides simulées avec LMDZ CTRL sont cependant plus chaudes que les LES pour le cas RCE (Fig. 1.7a), et légèrement plus froides en surface que la LES pour le cas AMMA (Fig. 1.7d). En cohérence avec les LES, les poches froides sont également plus humides en surface et plus sèches près de leur sommet (Fig. 1.7b et Fig. 1.7e). Cependant, les variations de  $\delta q$  sont beaucoup plus importantes dans LMDZ CTRL que dans les LES. En particulier, les poches froides sont beaucoup trop sèches à leur sommet dans LMDZ. Dans les deux cas, les poches sont associées à une subsidence. La hauteur à laquelle commence la subsidence des masses d'air dans les poches froides, fixée à 600 hPa dans LMDZ CTRL, est trop élevée par rapport à LES pour le cas RCE (Fig. 1.7e).

## 1.5.2 ~~Les variables WAPE, $ALE_{wk}$ , $C_*$ et $ALP_{wk}$~~ WAPE, ALE et ALP

Dans cette section, nous comparons les variables  $WAPE$ ,  $ALE_{wk}$ ,  $C_*$  et  $ALP_{wk}$  calculées dans les LES avec celles simulées par LMDZ CTRL pour les cas RCE et AMMA. ~~Comme les profils verticaux, les~~ Les résultats sont moyennés sur les jours suivant l'atteinte de l'équilibre (jours 41, 42 et 43) pour RCE et sur les instants disponibles entre 17h et 18h pour AMMA.

Le ~~tableau~~ Tableau 1.2 montre que, pour le cas RCE, la variable  $WAPE$  simulée par LMDZ CTRL est nettement inférieure à celles des LES SAM et MesoNH, avec un écart d'au moins un facteur 2. Ces faibles valeurs de  $WAPE$  dans LMDZ CTRL entraînent également des  $ALE_{wk}$  faibles par rapport aux LES ~~SAM et MesoNH~~ (~~tableau~~ (Tableau 1.2)). En effet, les  $ALE_{wk}$  sur le cas RCE sont au moins deux fois plus faibles dans LMDZ CTRL que dans les LES. ~~Pour~~ <sup>À</sup> l'inverse, pour le cas AMMA, la  $WAPE$  simulée par le modèle ~~est globalement en accord avec les valeurs~~ ~~calculées dans les LES (tableau 1.2)~~, ce qui permet au modèle d'obtenir des ~~les~~, et par conséquent  $ALE_{wk}$  ~~comparables à celles des LES pour ce cas (tableau~~, sont relativement proches des valeurs déduites de la LES (Tableau 1.2). ~~La~~ En revanche, la valeur de  $C_*$  simulée par LMDZ CTRL est ~~également~~ au moins trois fois plus petite que ~~dans les~~ celles des LES pour tous les cas (~~tableau~~ Tableau 1.2). Cela conduit à une valeur de  $ALP_{wk}$  dix fois plus petite que ~~dans~~ les LES.

Plusieurs divergences ont été identifiées entre les propriétés des poches froides para-

## Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

TABLEAU 1.2 – Comparaison des variables  $WAPE$ ,  $ALE_{wk}$ ,  $C_*$  et  $ALP_{wk}$  calculées échantillonnées dans les LES à partir des échantillonnages et simulées dans LMDZ contrôle (LMDZ CTRL) sur le cas océanique en RCE et le cas continental (AMMA)

	$WAPE$ (J/Kg)	$ALE_{wk}$ (J/kg)	$C_*$ (m/s)	$ALP_{wk}$ (J/kg)
RCE				
LES SAM	7.962	10.460	2.228	0.054
LES MESONH	7.912	6.965	2.264	0.020
LMDZ CTRL	2.957	2.957	0.802	0.001
AMMA				
LES MESONH	34.250	33.480	4.939	0.982
LMDZ CTRL	30.430	30.430	2.574	0.042

meétrées et celles échantillonnées dans les LES. En particulier, elles sont trop humides près de la surface et trop sèches à leur sommet, ce qui est associé à une subsidence débutant trop haut, du moins dans le cas RCE. Les variables telles que  $WAPE$ ,  $ALE_{wk}$ ,  $C_*$  et  $ALP_{wk}$  sont globalement sous-estimées. Diverses modifications de la paramétrisation des poches froides sont explorées dans la section suivante afin d'améliorer le comportement du modèle.

Soit tu en dis plus en expliquant qu'on peut penser que ca vient d'une subsidence débutant trop haut soit tu attends la discussion du test de sensibilité sur wk\_pupper

## 1.6 Les améliorations du modèle des poches froides

Ici, nous commençons par corriger les écarts observés identifiés entre la LES et le modèle concernant la valeur du coefficient  $k$  et l'altitude  $h_m$ , afin d'évaluer leur impact sur la variation de la température et de l'humidité des poches, avant d'explorer d'autres pistes.

### 1.6.1 Coefficient $k$

Nous présentons ici l'impact de l'augmentation du coefficient  $k$  de 0.33 à 0.66 (simulation LMDZ V1) sur les profils de  $\delta T$ ,  $\delta q$ ,  $\delta w$  ainsi que sur les variables  $C_*$ ,  $WAPE$ ,  $ALP_{wk}$  et  $ALE_{wk}$ .

Dans le cas RCE, cette modification améliore nettement le profil de  $\delta w$  sous  $h_{wk}$  (Fig. 1.8c). Cette amélioration est directement liée à une augmentation de  $C_*$  (Tableau 1.4), car le profil de  $\delta w$  sous  $h_{wk}$  dépend de l'étalement des poches froides. L'augmentation de  $C_*$  pourrait être associée à une subsidence plus forte de la masse d'air dans la poche froide, ce qui contribuerait à un léger assèchement près de la surface (Fig. 1.8b). Des effets similaires, bien que moins marqués, sont observés pour les profils de  $\delta w$  et  $\delta q$  dans le cas AMMA (Fig. 1.8e,f). Néanmoins, l'augmentation de

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

$k$  conduit également à une amélioration de  $C_*$  pour ce cas (Tableau 1.4). L'amélioration de  $C_*$  dans les deux cas, RCE et AMMA, conduit également à une meilleure représentation de  $ALP_{wk}$  (augmentation d'un facteur 6 pour RCE et d'un facteur 10 pour AMMA), même si cette variable reste sous-estimée (Tableau 1.4). Cependant, malgré cette modification de  $k$ , les poches froides restent trop sèches à leur sommet et plus humides en surface, dans les deux cas (Fig. 1.8b,e). Dans le cas RCE, elles restent également moins froides dans LMDZ V1 que dans les LES (Fig. 1.8a). Pour le cas AMMA, on observe un léger aplatissement du profil de  $\delta T$ , qui reste néanmoins globalement cohérent avec la LES (Fig. 1.8d). L'impact sur les profils  $\delta T$  dans les cas AMMA et RCE est à l'origine de la diminution des valeurs de  $WAPE$  et  $ALE_{wk}$  pour ces deux cas (Tableau 1.4).

## 1.6.2 L'altitude $h_m$

N'anticipe pas sur le fait que c'est la subsidence d'air sec le problème.

Dans les sections précédentes, nous avons constaté que l'altitude ( $h_m$ ) à laquelle l'écart de vitesse verticale  $\delta w$  la subsidence des masses d'air sec dans la poche s'annule est observée dans les LES en dessous de 800 hPa pour le cas RCE et en dessous de 600 hPa pour le cas AMMA. Par contre, comme Comme évoqué plus haut, cette altitude  $h_m$  était fixée arbitrairement à 600 hPa dans le modèle GL10. Dans la version V2, outre le changement de la valeur de  $k$  de 0.33 à 0.66, nous calculons  $h_m$  comme  $\alpha h_{wk}$  avec  $\alpha = 3$  ( $\alpha$  est considéré comme un nouveau paramètre libre dans la section suivante). Un léger ajustement de  $h_{wk}$  a également été réalisé grâce au nouveau schéma numérique proposé pour son calcul, dont les détails sont discutés en annexe. Cet ajustement n'a toutefois pas d'impact sur les profils verticaux de  $\delta q$  et  $\delta T$ .

Les comparaisons entre les simulations LMDZ V2 et les LES montrent une meilleure représentation des profils  $\delta q$  au sommet des poches froides dans les cas RCE et AMMA (Fig. 1.8b et Fig. 1.8e). Ces résultats montrent que le biais sec au sommet des poches dans la version originale était dû à l'advection d'air sec provenant d'une altitude trop élevée. Le fait que le modèle soit capable de reproduire de manière cohérente le profil d'humidité au sommet des poches lors de l'ajustement de  $h_m$  valide la physique implémentée dans ce schéma des poches froides. Cela révèle qu'une limitation de ce schéma réside dans le choix de la valeur d'un paramètre (la hauteur au-dessus de 600 hPa) plutôt que dans la formulation elle-même. Cette modification réduit également légèrement l'humidité à la surface des poches dans le cas RCE. Nous observons cependant que les poches restent toujours plus humides en surface dans la LMDZ V2 que dans la LES. Concernant les profils  $\delta T$ , Fig. 1.8a et Fig. 1.8d indiquent que cette modification a un impact très limité dans les cas AMMA et RCE.

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

Le ~~tableau~~ Tableau 1.4 montre aussi que la modification de  $h_m$  affecte faiblement les variables  $WAPE$ ,  $C_*$ ,  $ALE_{wk}$  et  $ALP_{wk}$  pour ces deux cas.

## 1.6.3 Activation des thermiques dans tout le domaine

Pour comprendre l'origine du biais humide en surface des poches dans LMDZ, nous testons ~~le fait~~ d'activer les thermiques dans tout le domaine. Dans la configuration standard de LMDZ, les thermiques n'interagissent qu'avec les profils de température et d'humidité en dehors des poches. Ce choix avait été fait à l'origine pour tenir compte du fait que l'atmosphère est plus stable à l'intérieur des poches, ce qui inhiberait la convection dans ces régions. ~~Dans la~~ La version V3, ~~nous faisons interagir les thermiques~~ est identique à la version V2, à la différence près que les thermiques sont considérées comme interagissant avec les profils moyens de ~~température et d'humidité moyens dans la maille~~, ~~en partant de la version V2~~ sans effet des thermiques sur les écarts de température et d'humidité des poches. Pour le cas RCE, les simulations LMDZ V3 montrent une nette diminution de l'humidité en surface des poches, se rapprochant mieux des LES (Fig. 1.8b). Ce résultat est attendu car le transport vertical par les thermiques assèche systématiquement la surface ~~Diallo et al. (2017)~~ (Diallo et al., 2017). Nous observons aussi une légère modification du profil de  $\delta q$  au sommet des poches. Pour le cas AMMA, cette modification n'a presque aucun effet (Fig. 1.8e), probablement à cause de la durée trop courte de la simulation. En test 3D sur 30 jours, les poches s'assèchent aussi nettement sur le continent avec cette modification. Ces résultats suggèrent un rôle clé des thermiques dans la régulation de l'humidité en surface, via le mélange de l'air humide avec l'air sec au-dessus.

~~il semble que~~ Pour représenter cet effet dans le modèle, on pourrait intégrer des thermiques peu profonds, non nuageux, assurant simplement ce mélange.

~~Je ne me souviens plus de quels tests il s'agit. Mais c'est embêtant de dire ça sans montrer les résultats.~~

Des tests intermédiaires ont permis d'évaluer l'impact du flux d'évaporation en surface sur l'humidité des poches, en activant le "splitting", qui différencie ce flux entre (w) et (x). Dans la configuration standard, ce flux est traité uniformément pour les deux régions. Les tests ont montré un effet limité de ce flux sur l'humidité des poches pour RCE. Ce test n'a pas été réalisé pour AMMA, car LMDZ ne le permet pas encore sur le continent. Il serait cependant pertinent de l'explorer.

~~Les simulations de LMDZ~~

~~Dans la version V3 montrent un refroidissement des poches froides par les thermiques pour le cas RCE, bien que les poches demeurent moins froides par rapport aux~~, les poches sont plus froides que dans la version V2, mais restent néanmoins moins froides que dans la LES (Fig. 1.8a). Ce refroidissement entraîne une augmentation

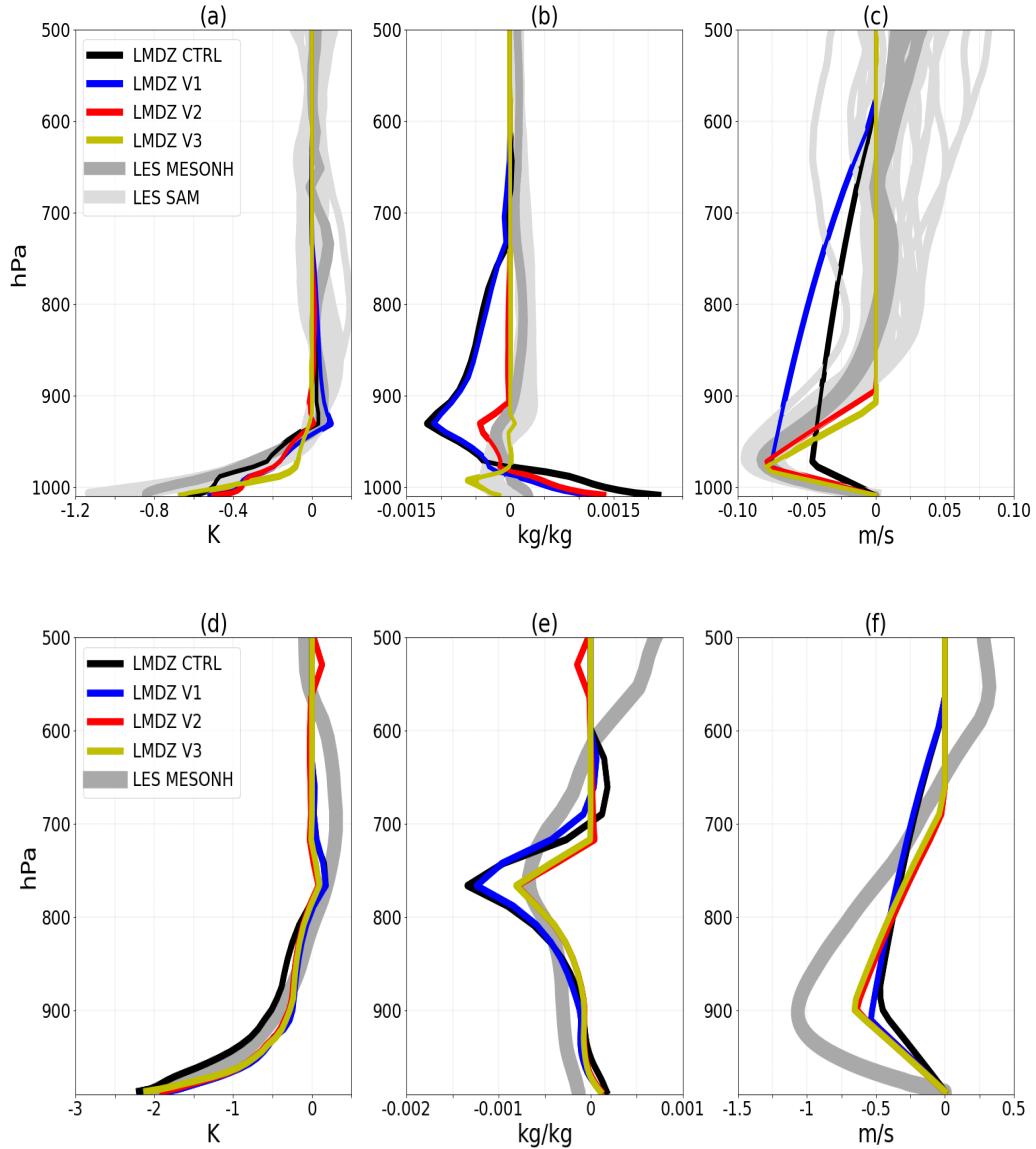


FIGURE 1.8 – Profils verticaux de  $\delta T$ ,  $\delta q$  et  $\delta w$  calculés dans les LES et simulées dans LMDZ contrôle (LMDZ CTRL), LMDZ avec l’ajustement du coefficient  $k$  à 0.66 (LMDZ V1), LMDZ avec la baisse de l’altitude ( $h_m$ ) à laquelle la subsidence des masses d’air dans la poche s’annule (LMDZ V2), LMDZ avec l’ajustement de la fraction surfacique des descentes précipitantes,  $\sigma_{dz}$ , à 0.02 (LMDZ V3) et LMDZ avec l’activation des thermiques dans tout le domaine (LMDZ V4V3) sur le cas RCE (a, b, c) et sur le cas AMMA (d, e, f).

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

des variables  $WAPE$ ,  $C_*$ ,  $ALE_{wk}$  et  $ALP_{wk}$  pour ce cas (Tableau 1.4). Pour le cas AMMA, cette modification a peu d'effet, tant sur le profil de  $\delta T$  que sur les variables associées (Fig. 1.8e, Tableau 1.4). Par contre, les tests 3D ont montré également un refroidissement des poches froides continentales lorsque les thermiques sont activés sur l'ensemble du domaine.

Il faut peut-être les montrer du coup. Au moins dans la thèse mais peut être aussi dans le papier ... A DISCUTER

TABLEAU 1.3 – Description des simulations effectuées avec LMDZ dans la configuration standard et avec diverses modifications

Simulations	Protocoles
LMDZ CTRL	simulation de LMDZ avec la configuration standard en imposant $D_{wk}$ à $510^{-10}$
LMDZ V1	LMDZ CTRL + le changement de $k$ à 0.66
LMDZ V2	LMDZ V1 + la baisse de $h_m$
LMDZ V3	LMDZ V2 + activation des thermiques dans tout le domaine

TABLEAU 1.4 – Comparaison des variables  $WAPE$ ,  $ALE_{wk}$ ,  $C_*$  et  $ALP_{wk}$  calculées à partir des échantillonnages échantillonnées dans les LES, avec celles simulées dans la simulation de LMDZ contrôle (LMDZ CTRL), LMDZ avec l'ajustement du coefficient  $k$  à 0.66 (V1), LMDZ avec la baisse d'altitude ( $h_m$ ) à laquelle la subsidence des masses d'air dans les poches est nulles (V2) et LMDZ avec l'activation des thermiques dans tout le domaine (V3) sur le cas RCE et sur le cas AMMA.

	$WAPE$ (J/Kg)	$ALE_{wk}$ (J/kg)	$C_*$ (m/s)	$ALP_{wk}$ (W/m <sup>2</sup> )
RCE				
LES SAM	7.962	10.460	2.228	0.054
LES MESONH	7.912	6.965	2.264	0.020
LMDZ CTRL	2.957	2.957	0.802	0.001
LMDZ V1	2.528	2.528	1.484	0.006
LMDZ V2	2.465	2.465	1.465	0.006
LMDZ V3	3.408	3.408	1.723	0.009
AMMA				
LES MESONH	34.250	33.480	4.939	0.982
LMDZ CTRL	30.430	30.430	2.574	0.042
LMDZ V1	22.020	22.020	4.380	0.479
LMDZ V2	20.580	20.580	4.234	0.399
LMDZ V3	20.640	20.640	4.240	0.404

## 1.7 Effet des modifications sur les variables de la grande échelle

On a évalué ci-dessus la représentation des poches froides elle-même et présenté quelques pistes d'amélioration.

Bien que les modifications présentées ci-dessus aient amélioré la représentation des poches froides dans le modèle, il est également essentiel d'examiner leur impact sur les variables à grande échelle. Dans cette section, nous analysons l'effet de ces modifications sur des variables telles que les profils de température potentielle ( $\theta$ ) et d'humidité spécifique ( $qv$ ). Pour cela, les mêmes profils sont recalculés dans le les LES pour les cas RCE et AMMA, puis comparés à ceux obtenus dans chaque version modifiée de LMDZ. Les profils de  $\theta$  et  $qv$  dans le les LES sont calculés par une moyenne horizontale de ces variables sur le domaine.

Fig. 1.9 et Fig. 1.9c montrent que les modifications introduites dans les versions V1, V2 et V3 ont un faible impact sur les profils  $\theta$  dans les cas RCE et AMMA. Globalement, toutes les simulations (LMDZ versions de LMDZ (CTRL, V1, V2 et V3) parviennent à bien reproduire les profils  $\theta$  sur les deux cas, bien qu'un léger biais chaud soit observé autour de 200 hPa dans le cas RCE. Par contre Dans le cas RCE, les versions V2 et V3 entraînent provoquent un assèchement de la moyenne troposphère dans le cas RCE (Fig. 1.9b). Pour, tandis que dans le cas AMMA, les trois versions modifiées versions V1, V2 et V3 ont peu d'effet sur les profils d'humidité (Fig. 1.9d). Il apparaît cependant que LMDZ ne reproduit pas suffisamment les profils d'humidité dans toutes les simulations. Dans le cas RCE, un biais sec est clairement visible observé dans la couche limite, ainsi qu'entre 800 et 400 hPa, pour les versions LMDZ CTRL, V1, V2 et V3 (Fig. 1.9b). Pour le cas AMMA, un biais humide est observé dans la couche limite et au-dessus de 600 hPa, tandis qu'un biais sec est présent entre 700 et 600 hPa. Pour corriger ces biais observés dans le modèle, ainsi que dans les poches chaudes simulées dans le cas RCE, un tuning des paramètres est effectué. (Fig. 1.9d).

On voit cependant que les modifications ne jouent pas suffisamment sur les profils moyens pour réduire ces biais de façon significative.

## 1.8 Tuning des paramètres libres

Le Les tests présentés ci-dessus montrent des pistes possibles pour améliorer la paramétrisation des poches froides. Cependant, tous les tests sous-estiment l'anomalie froide de température à l'intérieur des poches, et par conséquent  $WAPE$ ,  $ALE_{wk}$ ,  $C_*$  et  $ALP_{wk}$ .

Étant donné que le modèle des poches froides étant est couplé au modèle de convection profonde, le profil de  $\delta T$  pourrait peut être influencé par ce dernier. Ainsi, plus de vingt (20) paramètres libres ont été sélectionnés, incluant à la fois ceux liés au

Afin de tenter de voir comment des modifications d'autres paramétrisations pourraient contribuer à réduire ces biais, nous avons réalisé des simulations de calibration 30 automatique avec l'outil hexplo. En pratique, une vingtaine de

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

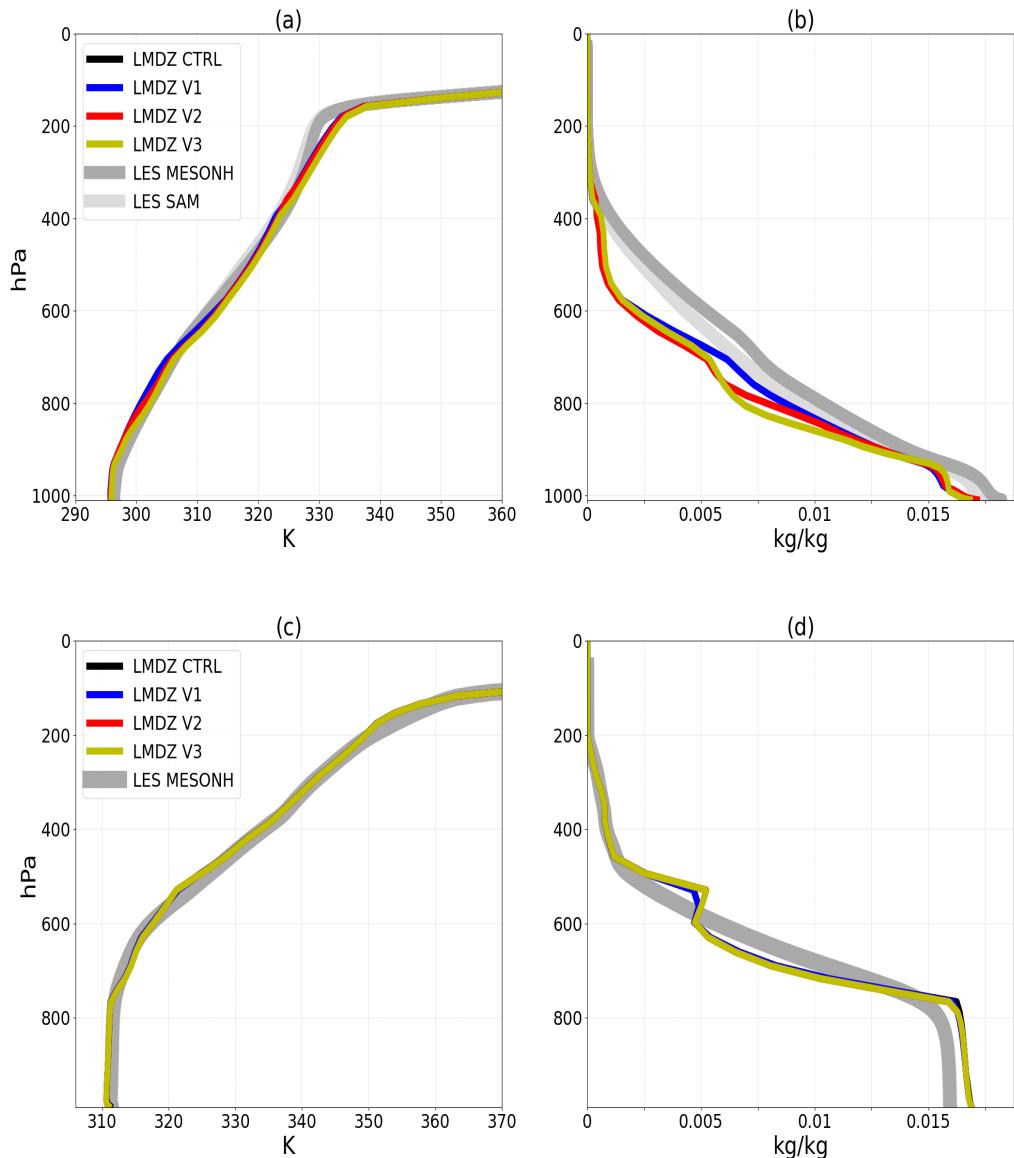


FIGURE 1.9 – Profils verticaux de la température potentielle ( $\theta$ ) , et de l'humidité spécifique ( $qv$ ) et de la fraction nuageuse ( $rneb$ ) calculés dans les LES et simulées dans LMDZ contrôle (LMDZ CTRL), LMDZ avec l'ajustement du coefficient  $k$  à 0.66 (LMDZ V1), LMDZ avec la baisse de l'altitude ( $h_m$ ) à laquelle la subsidence des masses d'air dans la poche s'annule (LMDZ V2) , LMDZ avec l'ajustement de la fraction surfacique des descentes précipitantes,  $\sigma_{dz}$ , à 0.02 (LMDZ V3) et LMDZ avec l'activation des thermiques dans tout le domaine (LMDZ V4V3) sur le cas RCE (a, b, c) et sur le cas AMMA (d, e, f).

# Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

paramétrisations de la convection et des nuages  
modèle des poches froides ainsi qu'et ceux associés aux schémas de convection. Les métriques retenues sont les profils de  $\delta T$ ,  $q_v - q_v$  et  $\theta$ , évalués par des à partir de moyennes verticales à différents niveaux et des de moyennes temporelles (entre 17h et 18h 17h00 et 18h00 pour le cas AMMA, et entre les jours 41 et 43 pour le cas RCE). Dans ces tests de tuning, seules les modifications affectant les coefficients  $k$  et  $h_m$  ont été intégrées. Les ajustements liés aux thermiques ne sont pas pris en compte ici, car, dans LMDZ v3V3, notre objectif est uniquement de mettre en évidence leur rôle dans l'assèchement des poches froides en surface. Nous suggérons que des ce point soit abordé dans de futurs travaux de paramétrisation complémentaires traitent de ce point.

Les résultats obtenus après tuning montrent , comme dans la configuration V2.

Le tuning conduit à une nette amélioration de la température des poches dans le cas RCE (Fig. 1.10a). Les, les profils  $\delta q$  et  $\delta w$  restent également restant bien représentés pour ce cas (Fig. 1.10b,c). Fig. 1.11b et Fig. 1.11d illustrent également une amélioration significative des profils d'humidité pour les cas RCE et AMMA. Cependant, un biais humide persiste dans la couche limite pour le cas AMMA (Fig. 1.11d), accompagné d'un léger refroidissement dans cette même couche (Fig. 1.11c). Une légère augmentation de la température des poches et un assèchement à leur sommet sont également observés obtenus dans AMMA (Fig. 1.10d,c). Cependant, l'obtention d'Malgré les défauts qui subsistent, les améliorations apportées à la paramétrisation des poches froides conduisent à une meilleure représentation des profils d'propriétés de ces poches ainsi que des profils d'humidité dans les deux cas, tout en améliorant la représentation des bassins froids, notamment dans le cas RCE, constitue un résultat satisfaisant. Les. Ainsi, les modifications proposées et les valeurs des paramètres optimisés résultant de ce réglage réajustées issues du tuning peuvent désormais être utilisées dans la version 3D du modèle LMDZ.

Globalement, cette section va trop vite en besogne. Prends le temps de bien présenter ce qu'on fait et pourquoi. Et les résultats sont encourageants mais la WAPE diminue beaucoup sur AMMA. Il faudra regarder les autres heures. De toutes façons, il faut finaliser ça à la fois pour le chapitre et pour le papier. Il manque encore beaucoup de chose pour dire que le modèle peut être utilisé en 3D. Il est sûrement prêt à être testé en 3D. Et en fait il faudrait peut être montrer une ou deux figures de tests préliminaires dont tu parles déjà plus haut.

Dans ce chapitre, nous avons réalisé pour la première fois une évaluation approfondie détaillée du modèle des poches froides dans LMDZ, en nous s'appuyant sur des LES pour la première fois. Nous avons évalué la physique sous-jacente du modèle, ses variables internes ainsi que celles utilisées dans le couplage avec le schéma de convection profonde. Les analyses basées sur les LES confirment la pertinence des hypothèses à la base de cette paramétrisation. Nous montrons également que la version initiale du modèle représente bien, au premier ordre, les caractéristiques des poches froides, bien que certains biais aient été identifiés. Ces biais ont été corrigés grâce à en partie

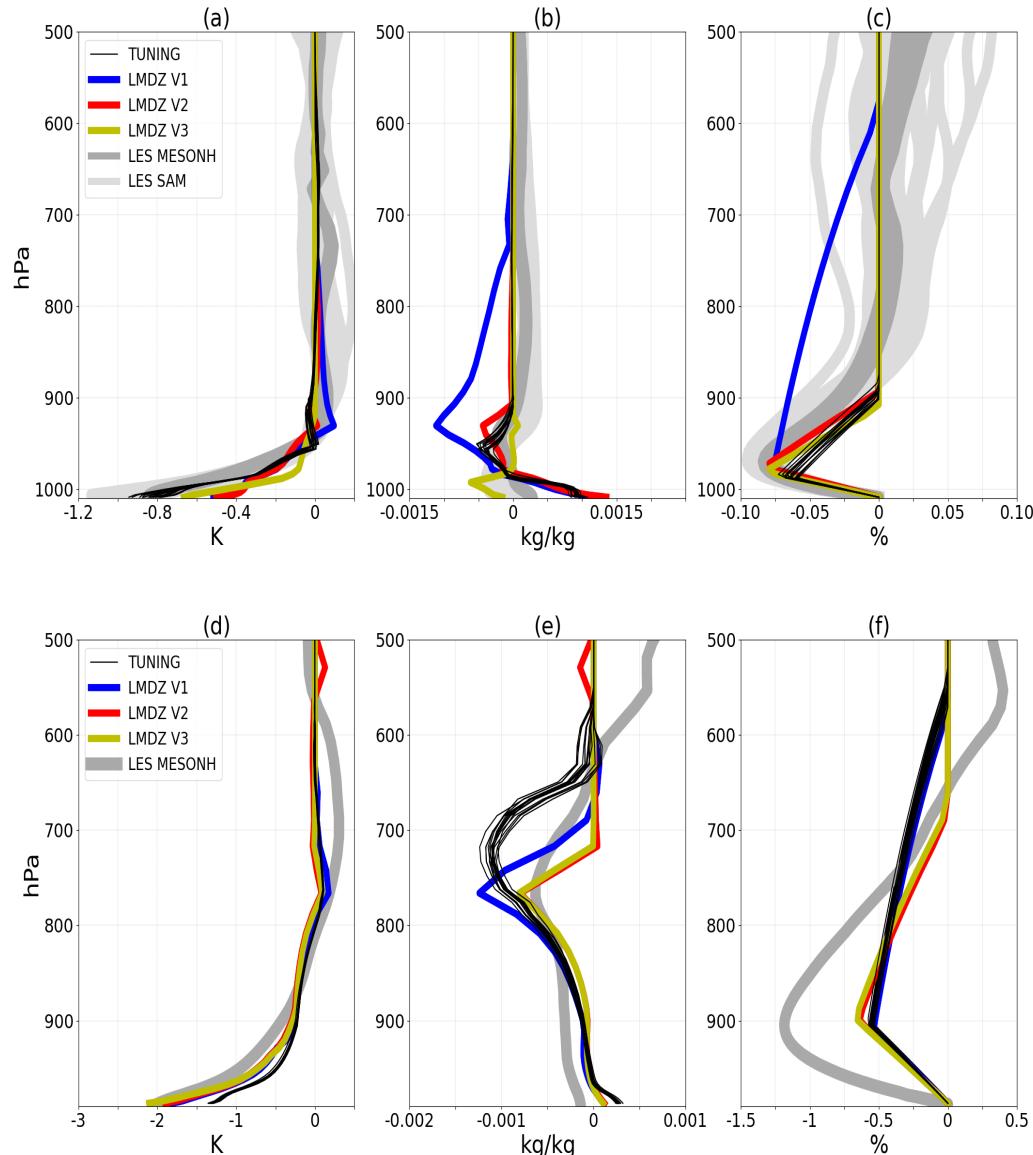


FIGURE 1.10 – Profils verticaux de  $\delta T$ ,  $\delta q$  et  $\delta w$  calculés dans les LES et simulés dans LMDZ TUNING, LMDZ avec l'ajustement du coefficient  $k$  à 0.66 (V1), LMDZ avec la baisse d'altitude ( $h_m$ ) à laquelle la subsidence des masses d'air dans les poches froides est nulle (V2) et LMDZ avec l'activation des thermiques dans tout le domaine (V3) sur le cas RCE (a, b, c) et sur le cas AMMA (d, e, f).

Tu présentes 10 courbes noires alors que tu n'as pas du tout présenté l'idée de vague de tuning, de PPEs ...  
Compléter.

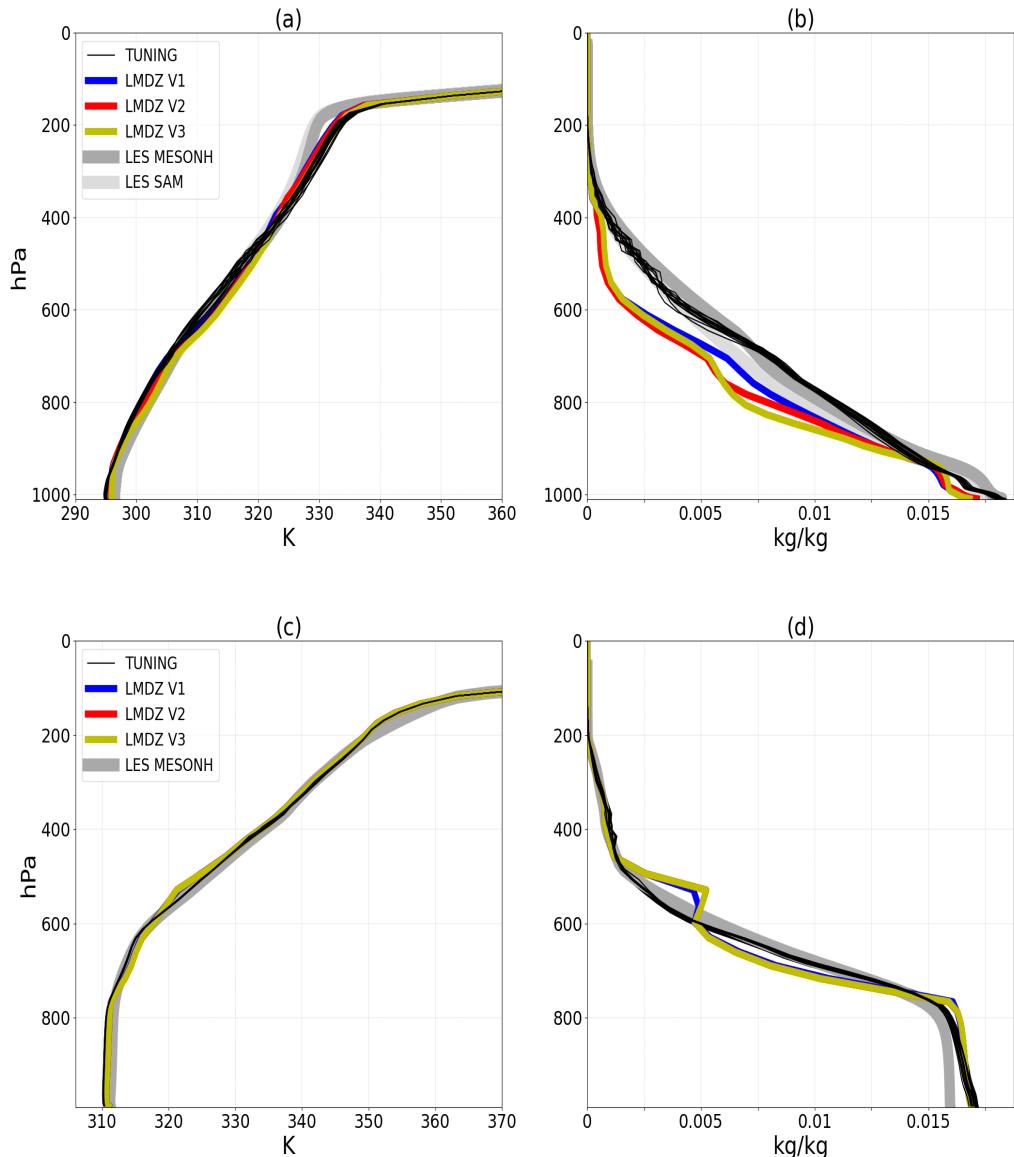


FIGURE 1.11 – Profils verticaux de température potentielle ( $\theta$ ) et d’humidité spécifique ( $qv$ ) calculés dans les LES et simulés dans LMDZ TUNING, avec l’ajustement du coefficient  $k$  à 0.66 (V1), LMDZ avec la baisse d’altitude ( $h_m$ ) à laquelle la subsidence des masses d’air dans les poches froides est nulle (V2) et LMDZ avec l’activation des thermiques dans tout le domaine (V3) sur le cas RCE (a, b, c) et sur le cas AMMA (d, e, f).

## Chapitre 1. Évaluation et amélioration de la paramétrisation des poches froides

---

des modifications substantielles apportées sur le schéma des poches froides et à un réajustement de certains paramètres libres. Les défauts persistants peuvent être corrigés en introduisant un mélange thermique au sein des poches froides et en prenant en compte l'évolution de leur densité de manière plus physique.

On suspecte que les

sur les poches froides

vertical par les

Ce dernier aspect est traité dans l'Annexe A

# Bibliographie

- Bryan, G. H. (2005). Spurious convective organization in simulated squall lines owing to moist absolutely unstable layers. *Monthly weather review*, 133(7) :1978–1997.
- Diallo, F., Hourdin, F., Rio, C., Traore, A.-K., Mellul, L., Guichard, F., and Kergoat, L. (2017). The surface energy budget computed at the grid-scale of a climate model challenged by station data in west africa. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(7) :2710–2738.
- Emanuel, K. A. (1991). A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *Journal of Atmospheric Sciences*, 48(21) :2313–2329.
- Feng, Z., Hagos, S., Rowe, A. K., Burleyson, C. D., Martini, M. N., and de Szoeke, S. P. (2015). Mechanisms of convective cloud organization by cold pools over tropical warm ocean during the amie/dynamo field campaign. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7(2) :357–381.
- Grandpeix, J.-Y. and Lafore, J.-P. (2010). A density current parameterization coupled with emanuel’s convection scheme. part i : The models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(4) :881–897.
- Grandpeix, J.-Y., Lafore, J.-P., and Cheruy, F. (2010). A density current parameterization coupled with emanuel’s convection scheme. part ii : 1d simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(4) :898–922.
- Haerter, J. O. and Schlemmer, L. (2018). Intensified cold pool dynamics under stronger surface heating. *Geophysical Research Letters*, 45(12) :6299–6310.
- Lafore, J.-P. and Moncrieff, M. W. (1989). A numerical investigation of the organization and interaction of the convective and stratiform regions of tropical squall lines. *Journal of Atmospheric Sciences*, 46(4) :521–544.
- Lothon, M., Campistron, B., Chong, M., Couvreux, F., Guichard, F., Rio, C., and Williams, E. (2011). Life cycle of a mesoscale circular gust front observed by a c-band doppler radar in west africa. *Monthly weather review*, 139(5) :1370–1388.

## Bibliographie

---

- Provod, M., Marsham, J., Parker, D., and Birch, C. (2016). A characterization of cold pools in the west african sahel. *Monthly Weather Review*, 144(5) :1923–1934.
- Rio, C., Hourdin, F., Grandpeix, J.-Y., and Lafore, J.-P. (2009). Shifting the diurnal cycle of parameterized deep convection over land. *Geophysical Research Letters*, 36(7).
- Rochetin, N., Hohenegger, C., Touzé-Peiffer, L., and Villefranque, N. (2021). A physically based definition of convectively generated density currents : Detection and characterization in convection-permitting simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(7) :e2020MS002402.
- Torri, G. and Kuang, Z. (2019). On cold pool collisions in tropical boundary layers. *Geophysical Research Letters*, 46(1) :399–407.
- Touzé-Peiffer, L., Vogel, R., and Rochetin, N. (2022). Cold pools observed during eurec 4 a : Detection and characterization from atmospheric soundings. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 61(5) :593–610.
- Vogel, R., Konow, H., Schulz, H., and Zuidema, P. (2021). A climatology of trade-wind cumulus cold pools and their link to mesoscale cloud organization. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(21) :16609–16630.
- Young, G. S., Perugini, S. M., and Fairall, C. (1995). Convective wakes in the equatorial western pacific during toga. *Monthly Weather Review*, 123(1) :110–123.
- Zuidema, P., Torri, G., Muller, C., and Chandra, A. (2017). A survey of precipitation-induced atmospheric cold pools over oceans and their interactions with the larger-scale environment. *Surveys in Geophysics*, 38(6) :1283–1305.