

5.1 Introduction

Le contenu physique du modèle LMDZ connaît une amélioration continue, notamment grâce au développement de nouvelles paramétrisations. L'intégration des processus sous-nuageux via les paramétrisations des thermiques (Rio and Hourdin, 2008), qui modélisent la convection peu profonde, et des poches froides (Grandpeix and Lafore, 2010), représentant les courants de densité issus des descentes d'air non saturé générées par la convection profonde ont permis une amélioration de la représentation de la convection dans le modèle. Ces travaux ont servi de base au développement d'une "Nouvelle Physique" qui ne cesse d'être améliorée depuis. On s'attache ici à la prise en compte des rafales de vent induites par les poches froides et de celles générées par les thermiques. Dans la configuration LMDZ6A, la représentation du vent de surface dans une maille pour le soulèvement des poussières reste très simplifiée. Elle repose sur une distribution de Weibull, dont la vitesse maximale est arbitrairement fixée à deux fois la vitesse moyenne du vent à grande échelle. Ce chapitre propose un modèle de distribution du vent de surface au sein des poches froides, conçu pour intégrer les effets des rafales associées. Ce modèle est ensuite combiné à un modèle complémentaire décrivant la distribution du vent en dehors des poches, prenant en compte les rafales issues des thermiques (Sima et al., en préparation), afin d'obtenir une représentation complète du vent de surface au niveau de la maille. L'ensemble est d'abord testé et validé dans la version colonne unique de LMDZ, avant d'évaluer son impact sur le soulèvement de poussières. L'outil HTEXPLO est également utilisé ici pour calibrer les paramètres libres du modèle.

5.2 Modèle de distribution du vent à l'intérieur des poches

Le développement des paramétrisations physiques est un travail exigeant, qui nécessite une compréhension des phénomènes physiques à représenter. Aujourd'hui, cette compréhension peut s'appuyer sur une analyse approfondie des observations ou de simulations explicites dites LES. Ce travail inclut ensuite la conceptualisation de ces phénomènes, leur traduction en équations mathématiques continues puis discrétisées, ainsi que le réglage des paramètres libres découlant de cette paramétrisation avant son intégration dans le modèle climatique global. Ici, nous développons une paramétrisation des rafales de vent liées à l'étalement des poches froides, en s'inspirant des LES. Au lieu de présenter directement la version finale du modèle, comme cela se fait souvent, nous exposons chaque étape du processus de conception de la

OK

nouvelle paramétrisation. Cela permet non seulement d'expliquer notre démarche de modélisation, mais aussi d'illustrer l'énorme travail réalisé dans le développement des modèles. Nous détaillons ici les différentes tentatives de paramétrisation explorées avant d'aboutir à une version finale, présentée dans une autre section. Chaque tentative a représenté une avancée significative, permettant d'affiner notre compréhension et d'évoluer vers un modèle plus physique et plus pertinent.

↑ des distributions de vent dans les poches

5.2.1 Un premier modèle statistique

Nous avons commencé par utiliser les LES pour étudier le comportement du vent à l'intérieur des poches froides. Comme décrit dans le chapitre 2, les LES sont largement utilisées pour orienter le développement des paramétrisations des poches, car elles représentent bien les processus en jeu. Notre analyse ~~initiale~~ s'est focalisée sur les distributions du vent zonal à 10 m (u_{10m}) et du vent méridional à 10 m (v_{10m}) à l'intérieur des poches froides, pour chaque instant de la LES océanique SAM. Ces analyses montrent que ~~la distribution de~~ v_{10m} présente l'allure d'une distribution normale centrée sur zéro, tandis que la distribution de u_{10m} présente une forme de asymétrie du coté des valeurs négatives. Il s'agit d'une asymétrie du vent dans la direction du vent à grande échelle imposée dans la LES ($u = -5 \text{ m/s}$ et $v = 0 \text{ m/s}$). Cette asymétrie dans la distribution de u_{10m} suggère la présence de deux sous-distributions aux moyennes, variances et poids distincts. Ainsi, nous avons envisagé un premier modèle de distribution du vent au sein des poches, en supposant que la distribution de u_{10m} est la somme de deux lois gaussiennes, tandis que celle de v_{10m} suit une loi normale centrée sur 0 et de variance σ_v^2 . Dans ce modèle, les deux distributions gaussiennes (G_1 et G_2) qui forment le vent zonal sont caractérisées respectivement par les moyennes \bar{u}_1 et \bar{u}_2 et des variances σ_{u1}^2 et σ_{u2}^2 . Nous faisons l'hypothèse que la distribution gaussienne dont les vitesses de vent zonales ont les valeurs absolues les plus élevées, notée ici $G_1(\bar{u}_1, \sigma_{u1})$, correspond au front de rafale. Nous lui associons un poids α correspondant à la fraction de la poche couverte par les fronts de rafales ($\alpha < 1$). La fonction de densité de probabilité (PDF pour Probability Density Function en anglais) de la somme de ces deux distributions gaussiennes ($G_1(\bar{u}_1, \sigma_{u1})$ et $G_2(\bar{u}_2, \sigma_{u2})$) est alors donnée par la relation suivante.

$$P(u_{10m}) = \alpha G_1(\bar{u}_1, \sigma_{u1}) + (1 - \alpha) G_2(\bar{u}_2, \sigma_{u2}) \quad (5.2.1)$$

La densité de probabilité de la distribution de v_{10m} est, quant à elle, donnée par la

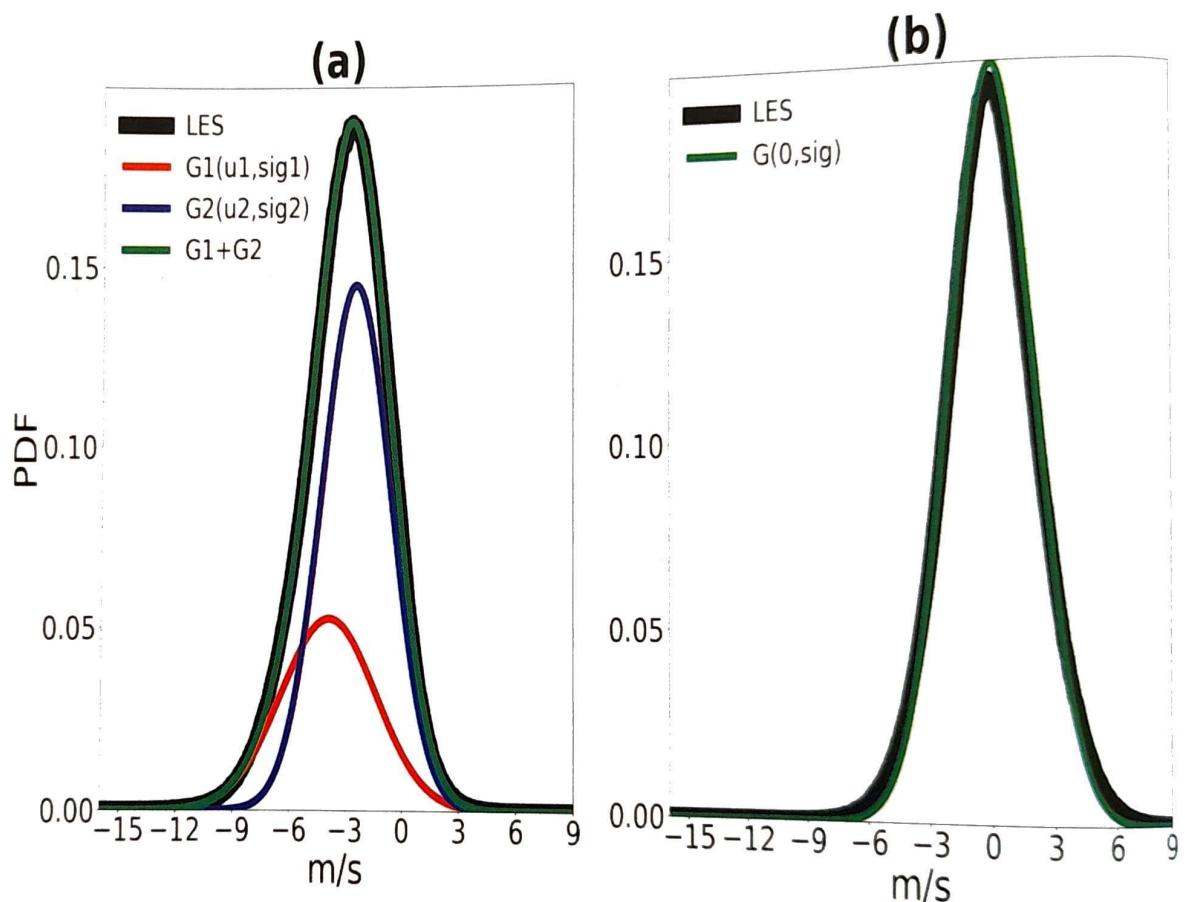


FIGURE 5.1 – Distribution des composantes zonale (u_{10m} , à gauche) et méridionale (v_{10m} , à droite) du vent à 10 m, calculées dans la LES et fournies par le modèle (en vert) de distribution du vent à 10 m dans les poches.

Dans le modèle, les moments de la dis

Les paramètres du modèle sont calculés à partir de la LES (Eqs 5.4) avec

$$\alpha = 0.35$$

relation suivante :

u_i \leftrightarrow $u^{(i)}$

\bar{u}_1 \leftrightarrow \bar{u} total

$P(v_{10m}) = G(0, \sigma_v)$

Incider sur le fait que ce sont les mêmes formules.

(5.2.2)

Nous arrivons ainsi à un modèle comportant six paramètres : $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \sigma_{u1}, \sigma_{u2}, \alpha$ et σ_v .

Une façon de contraindre ces paramètres est de s'appuyer sur différents moments de la distribution. Ici, on priviliege la moyenne (\bar{u}_{wk}), la variance ($\sigma_{u,wk}^2$) et le coefficient d'asymétrie ($m_{3,wk}$) de la distribution globale de u dans les poches, ainsi que la variance ($\sigma_{v,wk}^2$) de la distribution de v (de moyenne nulle et symétrique).

Si on note (u_i, v_i) une réalisation aléatoire de u et v , on a :

Je n'aime pas la notation \bar{u}_1 \bar{u}_2
alors que u_i a
 u_i pour les réalisations.

Je propose pour exemple $u^{(i)}$ pour les réalisations.

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_{wk} = \sum_{i=1}^n u_i P(u_i) \\ \sigma_{u,wk}^2 = \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u}_{wk})^2 P(u_i) \\ \sigma_{v,wk}^2 = \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v}_{wk})^2 P(v_i) \\ m_{3,wk} = \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u}_{wk})^3 P(u_i) \end{array} \right.$$

↳ (on priviliege les valeurs de u et v tirées en un point tiré uniformément dans le poche) ? ou est d'accord ?

mais $\bar{v}_{wk} = 0$

en tous cas u et v ne sont pas définis.

En partant du système d'équations 5.2.3, et après quelques étapes de calcul, nous obtenons les expressions de $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \sigma_{u1}, \sigma_{u2}$ et α à travers les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_1 = \bar{u}_{wk} - \alpha \delta \\ \bar{u}_2 = \bar{u}_{wk} + (1 - \alpha) \delta \\ \sigma_{u1}^2 = \sigma_{u,wk}^2 + \frac{m_{3,wk}}{3\alpha\delta} + \frac{(\alpha-1)(\alpha+1)\delta^2}{3} \\ \sigma_{u2}^2 = \sigma_{u,wk}^2 - \frac{m_{3,wk}}{3(1-\alpha)\delta} + \frac{\alpha(\alpha-2)\delta^2}{3} \end{array} \right.$$

où $\delta^2 = \sqrt{\frac{\sigma_u^2 - \sigma_v^2}{\alpha(1-\alpha)}}$

Puisque $\bar{u}_{wk}, \sigma_{u,wk}^2, \sigma_{v,wk}^2$ et $m_{3,wk}$ peuvent être directement calculés dans les LES, le seul paramètre inconnu est α . Dans le cadre de tests intermédiaires, nous avons

exploré plusieurs valeurs de α comprises entre 0 et 1, afin d'identifier celles permettant d'obtenir les meilleures distributions de u_{10m} et v_{10m} par rapport à celles de la LES. Les résultats montrent que le modèle reproduit bien les distributions des LES lorsque α est fixé à 0.35, aussi bien pour u_{10m} que pour v_{10m} (Fig. 5.1). L'analyse des distributions de u_{10m} montre que la sous-distribution $(G_1(\bar{u}_1, \sigma_1))$, qui donne les vents les plus forts selon la direction u , présente une largeur plus importante et un poids plus faible.

Bien que ces résultats soient satisfaisants, car le modèle reproduit bien les distributions de u_{10m} et v_{10m} calculées dans la LES, nous relevons deux limites majeures liées entre elles. D'une part, ce modèle repose uniquement sur des bases statistiques, sans fondement physique qui guide les modèles climatiques. D'autre part, aucun de ses paramètres n'est fourni directement par le modèle de poches, rendant ainsi leur ~~couplage impossible~~. Cette contrainte nous a conduits à travailler sur un autre modèle fondé sur des principes physiques et dont certains paramètres seront directement issus du modèle de poches froides.

non. Mais dès lors on n'a pas de modèle.

5.2.2 Deuxième modèle : introduction d'un vent radial

Nous analysons les cartes du module du vent à 10 m à un instant donné dans la LES océanique SAM ainsi que pour le cas continental AMMA. Sur ces cartes, nous superposons les contours des anomalies de température de surface à -0.2 K et -1 K afin d'identifier respectivement les poches dans les cas RCE et AMMA, comme vu dans le chapitre 4. Cette analyse révèle la présence de vents forts à l'avant de la poche, correspondant au front de rafales, et de vents plus faibles à l'arrière, aussi bien pour le cas RCE (Fig. 5.2) que pour le cas AMMA (Fig. 5.3). Dans le cas RCE, le vent dominant est uniforme verticalement, et orienté vers l'Est, dirigeant ainsi le front de rafales dans cette direction. Dans le cas AMMA, le vent dominant est très cisaillé et orienté vers le Nord, ce qui oriente sans doute la poche dans cette direction. La variation du vent à l'intérieur des poches peut-être vue comme la superposition de l'étalement avec le vent moyen dans la poche $(\bar{u}_{wk}, \bar{v}_{wk})$. À l'avant de la poche, l'étalement augmente son intensité, tandis qu'en arrière, cet étalement réduit la vitesse du vent. Cependant, les LES montrent que le vent moyen au sein de la poche diffère sensiblement du vent à grande échelle. Ceci est cohérent avec les travaux de Pantillon et al. (2015), qui supposent que la vitesse du vent dirigeant la poche est proportionnelle à celle du vent environnemental, mesurée à l'altitude d'origine du flux descendant qui l'alimente, avec un coefficient de proportionnalité estimé à 0.65.

A noter que

Non. Pas évidemment. *on disait 2 informatiques indépendantes*

Un vent radial qui croît linéairement et jusqu'au centre est ~~équivalent~~ EQUIVALENT à un vent radial à divergence nulle. On l'a montré.

Pour construire un modèle mathématique de cette distribution du vent, nous supposons que la poche est circulaire et que le vent responsable de son étalement est radial. Ce vent radial est supposé croître linéairement depuis le centre de la poche jusqu'à atteindre sa vitesse maximale (C_*) aux bords de la poche. Il est également supposé uniformément divergent horizontalement. À ce vent divergent vient s'ajouter une fluctuation de petite échelle, supposé de moyenne nulle et de distribution normale. La variance de la distribution associée à ces fluctuations turbulentes est différente et la figure 5.1 montre qu'elle est plus élevée dans le front de rafale que dans le reste de la poche. On note respectivement les écarts types associés σ_1 et σ_2 . Le vent total dans la poche est donc la somme du vent moyen dans la poche, d'un vent radial et de deux perturbations gaussiennes de variances σ_1^2 et σ_2^2 .

les analyses réalisées lors de la construction du modèle peuvent statistiques

Selon la direction du front de rafales (u), le modèle divise la poche en deux zones distinctes, séparées par une ligne droite représentant les zones de vent fort et de vent faible. Pour fixer les idées, on va supposer un vent dominant d'Est, le long de u , comme dans le cas RCE. Dans la direction perpendiculaire, la poche est également scindée en deux parties égales, chaque partie incluant une section des zones (1) et (2), ce qui segmente la poche en quatre sous-parties. La figure 5.4 illustre ce modèle de vent : la poche est subdivisée en deux zones principales (1) et (2) en fonction de la direction u du front de rafales, puis en deux moitiés égales (nord (n) et sud (s)), chacune de ces moitiés étant ensuite divisée en deux sous-parties (n_1, n_2, s_1 et s_2) dans la direction perpendiculaire à u . Dans la direction du front de rafales, la distribution du vent est calculée comme la somme de deux distributions gaussiennes, chacune associée à une zone spécifique. La moyenne de chaque distribution gaussienne correspond à la somme du vent moyen (\bar{u}_{wk}) dans la poche et du vent radial moyen (\bar{u}_r) calculé dans la zone considérée. Les distributions gaussiennes dans les zones 1 et 2 sont respectivement notées $G(\bar{u}_1; \sigma_1)$ et $G(\bar{u}_2; \sigma_2)$.

→ Non : ça peut être n'importe quelle direction de u ni dans celle de v .

Mais on a exprimé une formule pour les moyennes dans les zones (1) et (2) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_{11} = \bar{u}_{wk} + \bar{u}_{r1} \\ \bar{u}_{12} = \bar{u}_{wk} + \bar{u}_{r2} \end{array} \right.$$

pourquoi pas \bar{u}_1 (5.2.5)
plutôt que \bar{u}_{11} et \bar{u}_{12}

où \bar{u}_{r1} et \bar{u}_{r2} représentent les vents radiaux moyens calculés respectivement dans les zones 1 et 2 selon la direction du vent zonal (u). Ces vent radiaux moyens, déterminés

respectivement par les zones (1) et (2) de l'échelle concernée, sont montrés sur la figure 5.4 pour l'illustrer. Lequel on a apposé, pour fixer les idées.

à l'aide des expressions suivantes, sont proportionnels à C_* .

$$\begin{cases} \bar{u}_{r1} = -\frac{4 \sin^3(\beta)}{3(2\pi-2\beta+\sin(2\beta))} C_* \\ \bar{u}_{r2} = \frac{4 \sin^3(\beta)}{3(2\beta-\sin(2\beta))} C_* \end{cases} \quad (5.2.6)$$

où β est l'angle reliant le centre de la poche à l'intersection entre le cercle et le segment déterminant le front de la direction u est donnée par la relation suivante :

$$P(u_{10m}) = \alpha G(\bar{u}_{tot1}; \sigma_1) + (1 - \alpha) G(\bar{u}_{tot2}; \sigma_2) \quad (5.2.7)$$

où α est la fraction surfacique couverte par la zone (1). Sa valeur est donnée en fonction de β par la relation suivante.

$$\alpha = \frac{2\beta - \sin(2\beta)}{2\pi} \quad (5.2.8)$$

Dans la direction perpendiculaire à u , la distribution du vent à 10 m résulte de la somme de quatre distributions gaussiennes. La moyenne de chaque distributions est directement donnée par le vent radial moyen calculé dans la sous-partie considérée, puisque le vent moyen dans la poche est supposé nul dans la direction v_{10m} . Les vents radiaux moyens, calculés dans ces quatre sous-parties, sont également proportionnels à C_* et sont définis par les relations suivantes :

$$\begin{cases} \bar{v}_{rn1} = \frac{2(1+\cos(\beta))^2(2-\cos(\beta))}{3(2\pi-2\beta+\sin(2\beta))} C_* \\ \bar{v}_{rn2} = \frac{2(1-\cos(\beta))^2(2+\cos(\beta))}{3(2\beta-\sin(2\beta))} C_* \\ \bar{v}_{rs1} = -\bar{v}_{rn1} \\ \bar{v}_{rs2} = -\bar{v}_{rn2} \end{cases} \quad (5.2.9)$$

La densité de probabilité ($P(v_{10m})$) de la distribution du vent à 10 m à l'intérieur

des poches dans la direction v est donnée par la relation suivante :

$$P(v_{10m}) = 0.5[\alpha G(\bar{v}_{rn1}; \sigma_1) + (1-\alpha)G(\bar{v}_{rn2}; \sigma_2)] + 0.5[\alpha G(\bar{v}_{rs1}; \sigma_1) + (1-\alpha)G(\bar{v}_{rs2}; \sigma_2)] \quad (5.2.10)$$

ainsi dépend des libres

Le modèle est défini par cinq paramètres : \bar{u}_{wk} , C_* , σ_1 , σ_2 et β .

Le modèle représente plusieurs avancées par rapport au modèle précédent

À partir de là, on peut voir qu'on a beaucoup progressé. Les différents paramètres sont reliés à des caractéristiques physiques de la poche. Le couplage de ce modèle de distribution du vent avec celui des poches froides est désormais possible et peut s'effectuer à partir de la variable C_* , qui représente la vitesse d'étalement de la poche dans le modèle des poches froides. De plus, on observe que ce modèle repose désormais principalement sur des bases physiques.

→ deux et certains paramètres peuvent être fournis par

Nous ajustons maintenant les paramètres du modèle en fonction des distributions des vents u_{10m} et v_{10m} calculés dans la LES SAM. Plus précisément, nous ajustons les paramètres C_* et β en utilisant le test du χ^2 , défini par la relation suivante.

$$\chi^2 = \frac{\sum (LES - MODELE)^2}{MODELE} \quad (5.2.11)$$

→ afin de tester la pertinence du modèle

Nous testons ainsi plusieurs valeurs de β et C_* pour déterminer celles qui permettent au modèle de mieux correspondre à la LES. Dans ces tests, le vent moyen à 10 m dans la poche, \bar{u}_{wk} , est fixé à la valeur calculée dans la LES. Quant aux paramètres σ_1 et σ_2 , nous avons retenu les valeurs obtenues dans la section 5.2.1. Les résultats du test de χ^2 permettent d'identifier les valeurs de C_* et β (situées dans la bande bleu foncé) correspondant aux meilleures performances du test, conduisent aux distributions de u_{10m} et v_{10m} les plus proches des LES. En sélectionnant $C_* = 1.2$ m/s et $\beta = 1.8$ rad (équivalent d'une fraction du front de rafale $\alpha = 0.35$) dans cette bande, nous obtenons des distributions de u_{10m} et v_{10m} qui s'accordent bien avec celles des LES (Fig. 5.6). Ces résultats sont en accord avec ceux de la section 5.2.1, où les zones de vents forts étaient également associées à une fraction surfacique plus faible, estimée à 35%.

Deux limites persistent cependant.

Ces résultats montrent que le modèle fonctionne bien, mais une limitation majeure subsiste encore : la détermination de la PDF du module du vent. En effet, le mo-

→ Les premières sont que σ_1 et σ_2 et celle ne sont toujours pas couplée au modèle de poches. On fait des propositions sur ce devoir de sections suivantes.

modèle proposé ne fournit que les distributions de u_{10m} et v_{10m} . Nous avons tenté d'en déduire la distribution du module du vent à 10 m, mais cela a conduit à des calculs extrêmement complexes, laissant entrevoir également un coût numérique important. Face à la difficulté d'obtenir une expression analytique de la PDF du module du vent à 10 m, nous avons envisagé d'utiliser les techniques de Monte-Carlo. Avec cette méthode, on peut tirer aléatoirement des valeurs de u_{10m} et v_{10m} , puis calculer leur module pour en déduire sa distribution. Finalement, la simplicité de cette méthode nous a amenés à travailler sur une autre version du modèle, où il n'est plus nécessaire d'avoir les expressions analytiques des distributions du vent u_{10m} et v_{10m} et du module.

5.2.3 Troisième modèle : introduction d'une approche Monte-Carlo

Ce modèle reprend la physique du modèle précédent, où la poche est supposée circulaire et où le vent total est défini par la somme d'un vent moyen (\bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk}) dans la poche, d'un vent radial (u_r , v_r), et de deux perturbations gaussiennes de moyennes nulles et de variances respectives σ_1^2 et σ_2^2 selon qu'on est dans la zone du front de rafales (1) ou dans le reste de la poche (2). Cependant, une modification a été apportée à l'identification des zones (1) et (2). Dans cette version, le front de rafales et le reste de la poche ne sont plus séparés par une droite, mais par des isomodules du vent non perturbé en forme d'arcs de cercle. Cette approche est plutôt plus cohérente avec les LES comme on peut le voir dans les figures 5.2 et 5.3. Elle permet entre autre d'avoir un front de rafale circulaire autour du centre de la poche en cas de vent moyen nul. Avec ce choix, les zones (1) et (2) sont désormais définies en fonction d'un seuil du module du vent (w_s) non perturbé, qui correspond à la somme du vent radial et du vent moyen, sans inclure les fluctuations gaussiennes. La figure 5.7 représente un schéma conceptuel de cette nouvelle version du modèle de distribution du vent à 10 m à l'intérieur d'une poche froide.

Comme mentionné plus haut, nous utilisons la méthode de Monte-Carlo pour obtenir les distributions de u_{10m} , v_{10m} et du module du vent à 10 m à l'intérieur des poches sans avoir à dériver les formulations. Ce calcul s'effectue en plusieurs étapes, détaillées ci-dessous :

Calcul du vent non perturbé : nous commençons par tirer un point $m(x,y)$ uniformément dans la poche. En ce point, le vent ($u_{m,x}$ et $v_{m,x}$) non perturbé suivant x et y , est entièrement défini comme la somme du vent moyen dans la poche et du

où $R = 1$ ou 2

Calcul du vent total : enfin, nous additionnons les composantes du vent ($u_{m,x}$ et $v_{m,y}$) dans la poche avec les composantes du vent turbulent (u_{turbx} et v_{turbx}) pour obtenir le vent total au point $m(x,y)$ sur chaque axe, puis nous calculons le module du vent total en ce point.

$$\begin{cases} u_{mt,x} = u_{m,x} + u_{turbx} \\ v_{mt,y} = v_{m,y} + v_{turbx} \\ w_{mt} = \sqrt{(u_{mt,x})^2 + (v_{mt,y})^2} \end{cases} \quad (5.2.15)$$

*comme précédemment
ce n'est qu'un
paramètre si
on met les deux
sens du
vent moyen*

Le modèle ainsi défini dépend de six paramètres libres qui sont : \bar{u}_{wk} , \bar{v}_{wk} , C_* , w_s , σ_1 et σ_2

Des tests intermédiaires ont montré que le modèle reproduit bien les distributions de u_{10m} , v_{10m} et du module du vent à 10 m par rapport aux LES, lorsque l'on impose σ_1 , σ_2 (calculées dans la section 5.1), ainsi que \bar{u}_{wk} , \bar{v}_{wk} , C_* (estimés à partir des LES) et une valeur donnée de w_s . Ces résultats représentent une avancée majeure, car le modèle parvient désormais à donner les distributions de u_{10m} , v_{10m} et aussi du module du vent à 10 m dans les poches. ~~À ce stade, il est prêt à être implémenté dans le GCM. Dans ce cadre, le paramètre C_* correspondra à la vitesse d'étalement de la poche, calculée par le modèle des poches froides. w_s , σ_1 , σ_2 , \bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} resteront des paramètres libres, dont les valeurs pourront être fixées arbitrairement.~~

Reste à déterminer

Etant donné que la variance du vent varie selon que l'on se trouve dans la zone (1) ou (2), nous avons choisi de la paramétriser. Cela a conduit à une nouvelle version du modèle. Cette dernière, présentée dans la section suivante, est finalement celle retenue pour intégrer les rafales de vent associées aux poches dans LMDZ.

*Peu seulement
différence
(1) et (2).
Fondamentalement, ça dépend du vent*

5.2.4 Le modèle de distribution de vent dans les poches retenue

C'est le même ~~Le modèle repose sur la même physique que celui décrit précédemment dans la section 5.2.3. Le vent total dans la poche est défini comme la somme du vent moyen~~

On complète sa description.

Une dernière sophistication a été proposée pour le modèle, rendue pratique facilement par l'approche Monte-Carlo qui permet d'éviter d'avoir à déterminer les distributions analytiques. Plutôt que de spécifier deux écart-types différents σ_1 et σ_2 , l'un dans le

dans la poche $(\bar{u}_{wk}, \bar{v}_{wk})$, d'un vent radial (u_r, v_r) et un vent turbulent gaussien

Cependant, contrairement au modèle précédent, nous supposons ici que la variance du vent dépend du module (w_m) du vent non perturbé calculé dans la poche au point $m(x,y)$. Cette dépendance est décrite de façon assez classique par :

→ front de rafale et l'autre pour le reste de la poche

$$\sigma = k_{twk} w_m \quad (5.2.16)$$

Ce choix s'inspire des travaux de Panofsky et al. (1977), qui ont établi une relation entre σ et la vitesse de friction (u^*) dans des conditions de stabilité neutre, selon la formule suivante :

$$\sigma = 2.69 u^* \quad (5.2.17)$$

En appliquant la loi du profil logarithmique du vent sous conditions de stabilité neutre, u^* peut être exprimé en fonction du module de la vitesse du vent w :

$$u^* = \frac{k}{\ln(\frac{z}{z_0})} w \quad (5.2.18)$$

où $k = 0.4$

La combinaison des équations 5.2.17 et 5.2.18 donne alors une expression de σ en fonction de w sous la forme $\sigma = k_x w$, ce qui correspond à l'équation 5.2.16, où $k_x = k_{twk} = \frac{2.69k}{\ln(\frac{z}{z_0})}$.

Ce coefficient dépend donc de la rugosité de surface, ce qui implique qu'il peut varier selon le type de sol ou de couverture de la zone considérée.

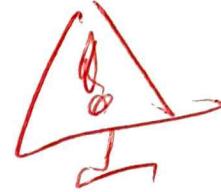
Avec ce calcul, la variance du vent varie en chaque point de la poche, alors que dans le modèle précédent, elle était considérée comme uniforme au sein des zones (1) et (2). Cette approche reste cohérente avec l'image physique selon laquelle la variance du vent ~~devrait être~~ plus élevée dans le front de rafales que dans le reste de la poche, puisque le vent non perturbé augmente avec le rayon de la poche en direction du front de rafales. Nous précisons également qu'avec cette version du modèle, il n'est plus nécessaire de comparer w_m au seuil de vent w_s pour déterminer si l'on se trouve en zone (1) ou en zone (2). Désormais, les vents turbulents sont directement donnés par les relations suivantes, valables aussi bien pour la zone (1) que pour la

→ le nombre de pente

Il faut redire comment on tire un point uniformément dans le disque

zone (2).

$$\begin{cases} u_{turbx} = \sigma z_x(0, 1) \\ v_{turbx} = \sigma z_y(0, 1) \end{cases}$$



(5.2.19)

Le calcul des distributions de u_{10m} , v_{10m} et du module du vent à 10 m à l'intérieur des poches, pour chaque tirage Monte-Carlo au point $m(x, y)$ dans cette dernière version du modèle, est résumé ci-dessous.

1. calcul du vent non perturbé dans la poche

On tire uniformément un point $m(x, y)$ dans la poche, puis on y calcule le vent comme la somme du vent moyen dans la poche et d'un vent radial.

En fait on tire k et θ , c'est ça ?
Mais k n'est pas tiré uniformément, c'est ça ?

$$\begin{cases} u_{m,x} = (\bar{u}_{wk} + x_m \frac{C_*}{R}) \\ v_{m,y} = (\bar{v}_{wk} + y_m \frac{C_*}{R}) \\ w_m = \sqrt{u_{m,x}^2 + v_{m,y}^2} \end{cases}$$

où $x_m = r \cos(\theta)$ et $y_m = r \sin(\theta)$

(5.2.20)

avec $r = kR$ où k est compris entre 0 et 1 ; θ varie entre 0 et 2π

2. calcul de la variance du vent

$$\sigma = k_{twk} w_m$$

(5.2.21)

où k_{twk} est un réel

3. calcul du vent turbulent

On tire une réalisation de u_{turbx} et v_{turbx} en suivant une loi normale.

$$\begin{cases} u_{turbx} = \sigma z_x(0, 1) \\ v_{turbx} = \sigma z_y(0, 1) \end{cases}$$

(5.2.22)

4. calcul du vent total dans la poche

Le vent total au point $m(x,y)$, ~~tiré uniformément~~, est obtenu en additionnant le vent non perturbé au vent turbulent.

$$\begin{cases} u_{mt,x} = u_{m,x} + u_{turbx} \\ v_{mt,y} = v_{m,y} + v_{turbx} \\ w_{mt} = \sqrt{(u_{mt,x})^2 + (v_{mt,y})^2} \end{cases} \quad (5.2.23)$$

du 1

Cette dernière version du modèle repose sur quatre paramètres : \bar{u}_{wk} , \bar{v}_{wk} , C_* et le coefficient k_{twk} .

modèle de poches froides (*)

Dans le cadre de l'implémentation dans le GCM, le paramètre C_* sera directement fourni par le ~~GCM~~, laissant k_{twk} , \bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} comme paramètres libres. Avant son implémentation dans le GCM, nous utilisons l'outil de calibration automatique (HighTune) pour identifier les valeurs de k_{twk} , \bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} permettant au modèle de produire des distributions de u_{10m} , v_{10m} et du module du vent à 10 m plus proches de celles des LES.

5.3 Le tuning

5.3.1 Le tuning du modèle de distribution du vent dans les poches

Dans cette section, nous utilisons l'outil de calibration automatique "HighTune Explorer" pour ajuster les paramètres du modèle de distribution du vent à 10 m à l'intérieur des poches froides. Cet outil est généralement utilisé pour ajuster les paramètres libres des paramétrisations déjà intégrées dans le GCM, aussi bien en mode 1D (Couvreux et al., 2021) qu'en mode 3D (Hourdin et al., 2021). Cet ajustement repose sur la comparaison décrite plus haut et utilisée au chapitre précédent pour calibrer le modèle de poches.

Ici, nous cherchons à ajuster la valeur des paramètres k_{twk} , \bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} afin d'ob-

~~OK~~ Fraction de la surface et la poche

~~OK~~ ~~que le vent dépasse 7 m/s~~

~~ou probabilité de ~~que~~ que le vent dans la poche dépasse 7 m/s~~

tenir des distributions optimales des composantes u_{10m} et v_{10m} ainsi que du module

du vent à 10 m du modèle par rapport aux LES sur les cas RCE et AMMA. Cet ajustement est réalisé avant l'implémentation du modèle de vent dans le GCM. Il s'agit d'ajuster les relations utilisées dans la paramétrisation directement sur la LES.

Dans la LES, les distributions sont obtenues en moyennant les résultats sur 24 instants pour le cas RCE. Pour le cas AMMA, elles sont calculées à l'instant de 18 h lorsque les poches sont bien développées et que le front de rafales est plus marqué.

Nous nous sommes indépendamment sur ces deux cas, car \bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} dépendent du cas considéré, et devront être reliés aux variables de la grande échelle. Mais nous espérons que k_{twk} soit relativement universel.

Bien. (peut être)
Tu vois que ce que tu dis au sujet de la moyenne et de la variance des distributions des u_{10m} et v_{10m} dans les métriques. La tolérance à l'erreur fixée est de 0.01 pour toutes les métriques. Pour le paramètre k_{twk} , nous avons défini une plage de valeurs comprise entre 0 et 1, aussi bien pour RCE que pour AMMA. Concernant les paramètres \bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} : Pour RCE, les plages de valeurs sont prises aux intervalles $[-6, 1]$ m/s pour \bar{u}_{wk} et $[-3, 3]$ m/s pour \bar{v}_{wk} . Pour AMMA, nous avons fixé une plage de $[-2, 2]$ m/s pour ces deux paramètres. Enfin, C_* , qui n'est pas pris comme paramètre libre, a été imposé à la valeur estimée dans les LES : 2.2 m/s pour RCE et 5 m/s pour AMMA.

~~la figure présente une seule des métriques : 57~~
~~correspondant à la moyenne et à la variance des distributions des u_{10m} et v_{10m}~~

Les figures 5.8 et 5.9 présentent les résultats de l'ajustement des paramètres k_{twk} ,

~~\bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} , obtenus à partir des neuf métriques définies pour le cas RCE, dont la fraction de probabilité du vent dépassant 7 m/s (s7), illustrée dans ces figures. On observe une évolution entre la vague 1 (Fig. 5.8), où les valeurs des paramètres choisis sont réparties sur l'ensemble de leur intervalle initial, et la vague 5 (Fig. 5.8), où elles se concentrent sur un espace plus restreint. Pour le coefficient k_{twk} , les valeurs sont contraintes entre 0.3 et 0.7 à la vague 5, suggérant que l'optimum se situe dans cet intervalle. De même, \bar{u}_{wk} est contraint entre -3.5 et -2.5 m/s. Par contre, \bar{v}_{wk} ne figure plus parmi les paramètres retenus à la vague 5, indiquant que sa variation n'a pas d'impact significatif sur les distributions du vent dans le cas RCE. Nous avons pratiquement les mêmes résultats avec les autres métriques.~~

Les figures 5.10a, b et c montrent que, avec les plages de valeurs des paramètres

relatif ou absolu ?

62

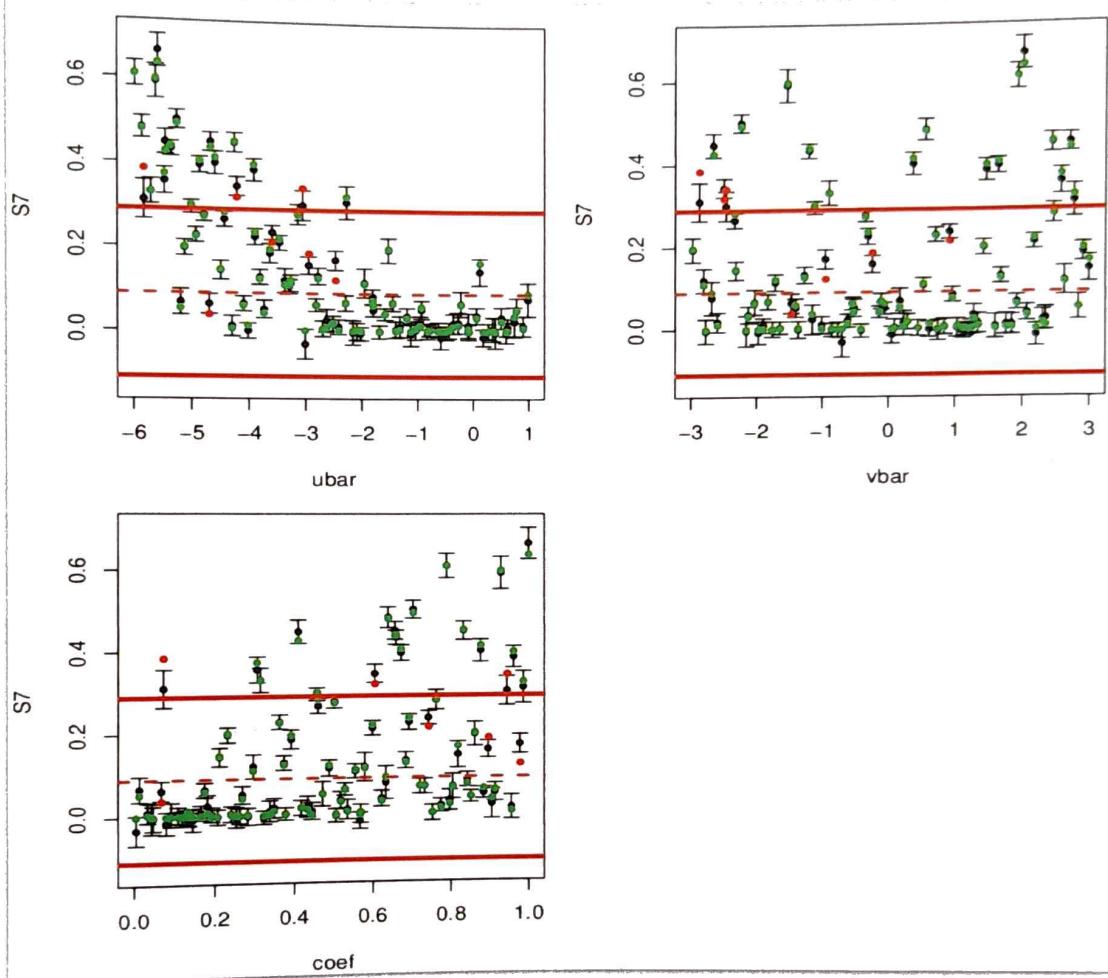


FIGURE 5.8 – Métrique s_7 (fraction de probabilité du vent > 7 m/s) en fonction des paramètres \bar{u}_{wk} (ubar), \bar{v}_{wk} (vbar) et le coefficient k_{twk} (coef) du modèle de distribution du vent dans les poches pour la vagues 1 du cas RCE. Chaque sous-figure présente 90 simulations. [Les points verts représentent les simulations acceptées (combinaison valide des paramètres et de s_7). Les Points rouges représentent simulations rejetées. La ligne rouge en pointillée indique la valeur cible de s_7 issue de la LES. Les lignes rouges pleines indiquent l'intervalle de confiance (deux fois la tolérance). Les Barres noires sont l'erreur standard de s_7 pour chaque valeur des paramètres.]

PAS DU TOUT !
 Les points verts et rouges correspondent
 au test statistique "Leave One Out" 100

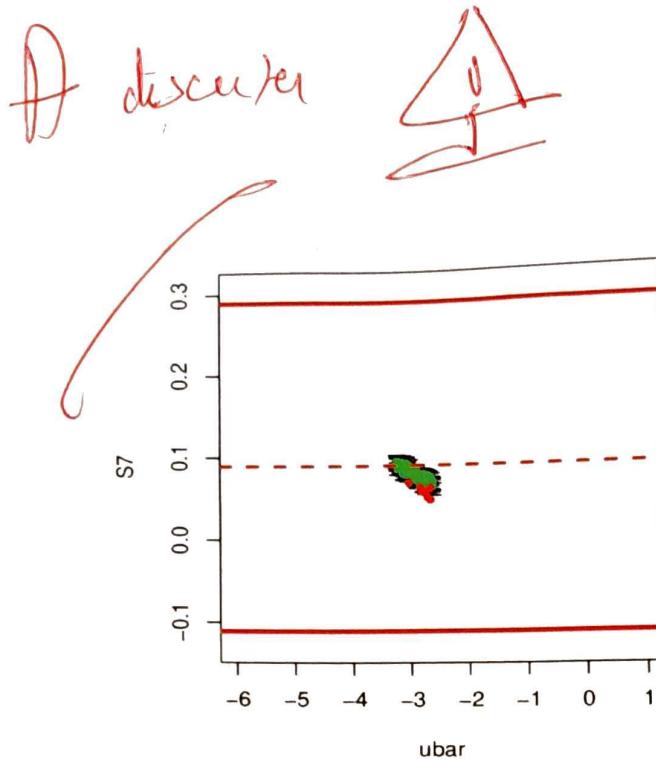


FIGURE 5.9 – Comme Fig 5.8 mais pour la vague 5 du cas RCE

fournies par la vague 5, le modèle reproduit bien les distributions du module du vent à 10 m, de u_{10m} et v_{10m} par rapport aux LES dans le cas RCE, respectivement.

Le tuning sur le cas AMMA, basé sur les onze métriques définies plus haut, dont $s9$, correspondant à la fraction de probabilité du vent dépassant 9 m/s (Fig. 5.11 et Fig. 5.12), atteint la convergence numérique un peu ? plus tôt que dans le cas RCE. Dans AMMA, cette convergence est obtenue dès la vague 3. Le passage de la vague 1 à la vague 3 indique que les valeurs optimales de k_{twk} se situent entre 0.8 et 0.9 (Fig. 5.11 et Fig. 5.12). Pour \bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} , les valeurs optimales sont estimées respectivement dans les intervalles [0,1] m/s ((Fig. 5.12) et [-1, 0.5] m/s (Fig. 5.12). Les tendances observées pour les autres métriques sont globalement similaires.

On observe que, avec les plages de valeurs fournies par la vague 3 pour les paramètres k_{twk} , \bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} , le modèle parvient à bien reproduire la queue de la distribution du module du vent, correspondant aux vents forts (Fig. 5.13a). Par contre, il ne représente pas bien les vents faibles (Fig. 5.13a). Les figures 5.13b et c révèlent également que les distributions de u_{10m} et v_{10m} ne sont pas aussi bien reproduites par le modèle. Ces limitations pourraient s'expliquer par l'absence de statistiques représentatives sur le cas AMMA. A l'instant choisi (18 h) dans la LES, seules trois poches sont présentes, ce qui n'offre pas une base statistique robuste. La capacité du modèle à bien représenter la queue de la distribution du module de vent demeure un résultat notable, puisque, comme évoqué précédemment, ce sont les vents forts qui jouent un rôle important dans le soulèvement des poussières.

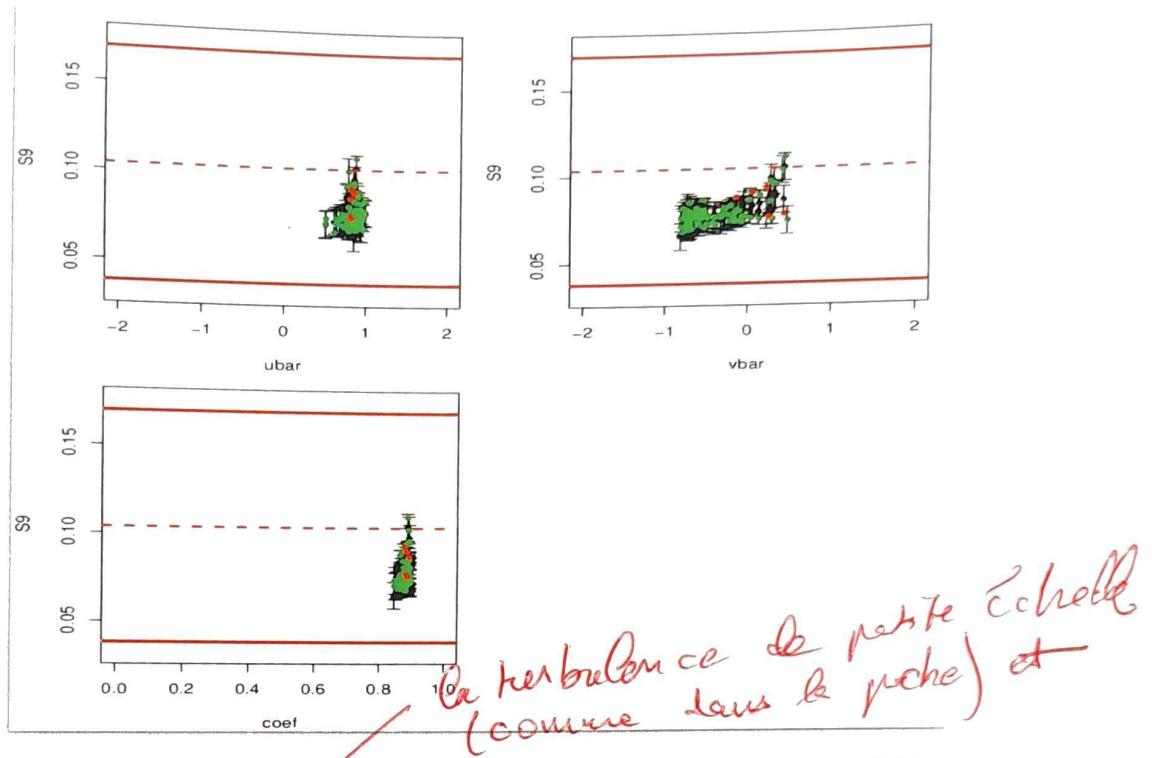


FIGURE 5.12 – Comme Fig 5.11 mais pour la vague 3 du cas AMMA

5.3.2 Le tuning du modèle de distribution du vent combiné

Le modèle de distribution du vent sous-maille présenté ci-dessus ne fournit que les distributions du vent à l'intérieur des poches. Or, dans le GCM, il faut fournir une distribution du vent sur l'ensemble de la maille. Pour y parvenir, nous avons combiné ce modèle avec un second modèle de distribution du vent sous-maille, applicable en dehors des poches froides et destiné à représenter les rafales générées par les thermiques. Comme discuté au chapitre 3, les thermiques sont généralement présentes en dehors des poches froides. Un travail a été réalisé par Adriana Sima, en parallèle de ce travail de thèse, pour représenter les rafales de vent pour les couches limites convectives. Dans ce modèle, le vent est représenté comme la somme du vent moyen dans la maille et d'un vent turbulent gaussien (que nous ne détaillerons pas ici). La variance (σ_{th}^2) du vent turbulent y est reliée à la vitesse de friction (u_*) et à une vitesse de convection (w_*) selon la relation suivante :

$$\sigma_{th}^2 = k_{uth} u_*^2 + k_{zth} w_*^2 \quad (5.3.1)$$

w_* est, quant à elle, reliée avec l'énergie (ALE_{bt}) de soulèvement due aux thermiques selon l'équation suivante.

$$w_* = \sqrt{2ALE_{bl}} \quad (5.3.2)$$

L'approche Monté Carlo permet à nouveau de combiner les deux modèles sans avoir à dériver analytiquement la PDF. La combinaison des deux modèles de distribution du vent s'effectue de la manière suivante : un nombre aléatoire nt est tiré uniformément entre 0 et 1. Ce nombre est ensuite comparé à la fraction de surface (σ_{wk} , fournie par le modèle de poches froides) couverte par les poches froides. Si $nt \leq \sigma_{wk}$, le modèle de distribution du vent à l'intérieur des poches est appliqué. Dans le cas contraire, c'est le modèle de distribution du vent en dehors des poches froides qui est utilisé.

Le modèle combiné comporte cinq paramètres libres : les coefficients k_{twk} , \bar{u}_{wk} , \bar{v}_{wk} , k_{th} et k_{zth} , puisque u_* et ALE_{bl} sont des variables du GCM.

Nous procédons ensuite à un tuning du modèle combiné afin d'ajuster ces paramètres libres et d'optimiser les distributions de u_{10m} , v_{10m} et du module du vent à 10 m dans le domaine données par le modèle par rapport à celles calculées dans les LES. Pour cela, nous utilisons les mêmes métriques que précédemment : la fraction de probabilité du vent dépassant un seuil de vitesse pour le module et la moyenne et la variance des distributions de u_{10m} et v_{10m} . Concernant le choix des paramètres, nous avons pris k_{twk} , σ_{th} et \bar{u}_{wk} . Dans le tuning, nous avons défini les plages de valeurs suivantes pour chacun des paramètres : k_{twk} entre 0 et 3 ; \bar{u}_{wk} entre -6 et 1 m/s ; σ_{th} entre 1 et 6. Comme précédemment, l'ajustement des paramètres du modèle combiné est réalisé indépendamment sur les cas RCE et AMMA. La valeur de σ_{wk} issue des LES est comparée ici au nombre aléatoire nt tiré dans $[0,1]$, afin de vérifier si le point $m(x, y)$, obtenu par Monte Carlo, se trouve dans une poche froide ou non. Comme présenté dans le chapitre 3, dans les LES, σ_{wk} vaut 0.22 pour le cas RCE et 0.12 pour le cas AMMA.

Pour le cas RCE, avec la métrique $s7$, l'évolution entre la vague 1 et la vague 5 montre que les valeurs optimales de k_{twk} se situent entre 0.3 et 0.6 (Fig 5.14 et Fig 5.15). Concernant \bar{u}_{wk} , les valeurs les plus adaptées sont comprises entre -4.5 et -2 m/s. Enfin, pour σ_{th} , les valeurs optimales se situent aux alentours de 1.3 à 2.

Pour le cas AMMA, l'analyse avec la métrique $s9$ indique que les valeurs optimales du coefficient k_{twk} se situent entre 0.4 et 0.9 (Fig. 5.17 et Fig 5.18). Concernant \bar{u}_{wk} ,

→ Tu pourras tracer les distributions best et y compris notamment de \bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} et tester la distribution obtenue avec le même k_{twk} mais $(\bar{u}_{wk}, \bar{v}_{wk}) = (u, v)$ de nouvelles paramétrisations physiques, grâce à son faible coût de calcul qui permet d'effectuer de nombreux tests. Les comparaisons sont ici plus exigeantes, car plusieurs paramétrisations interagissent et influencent les résultats. Nous procérons à la validation aussi bien du modèle de distribution du vent dans les poches que de sa version combinée, bien que l'objectif final soit d'utiliser cette dernière. Cela permet ~~de tout~~ de vérifier, à part, la pertinence du modèle de distribution du vent dans les poches une fois intégré au GCM.

c'est tellement important.

En plus on a hant le kota

ca dans le tuning avec les

5.4.1 Validation du modèle de distribution du vent dans les poches dans le SCM

Nous effectuons une simulation avec LMDZ 1D pour les cas AMMA et RCE, en appliquant le modèle de distribution du vent dans les poches à l'ensemble de la maille. Dans ces simulations, C_* est directement fourni par le GCM. En ce qui concerne les paramètres \bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} , nous les considérons, dans la suite de ce travail, comme le vent moyen à grande échelle issus du GCM. Cela malgré le fait que les LES indiquent que le vent moyen à l'intérieur des poches diffère de celui à l'échelle de la maille. \bar{u}_{wk} et \bar{v}_{wk} devraient donc en principe être paramétrés, mais cette question est laissée pour les perspectives de ce travail. Pour le coefficient k_{twk} , nous avons choisi une valeur dans les intervalles optimaux déterminés par le tuning dans la section 5.3.1 : [0.3 – 0.7] pour RCE et [0.8 – 0.9] pour AMMA. Plus précisément, nous avons fixé k_{twk} à 0.5 pour RCE et à 0.8 pour AMMA. Ces deux valeurs distinctes de k_{twk} ont été retenues pour rester dans la plage optimale et de mieux évaluer la performance du modèle une fois intégré dans le GCM. Mais la valeur de k_{twk} devrait être unique pour tous les cas.

Oui

Comme dans le chapitre 3, la comparaison entre LMDZ et LES dans le cas RCE repose sur l'analyse de la moyenne des instants après l'équilibre, c'est-à-dire entre les jours 41 et 43 de simulation. Pour le cas AMMA, la comparaison est effectuée à l'instant 18 h.

Les résultats montrent que les distributions du module du vent à 10 m dans les poches simulées par LMDZ sont globalement proches de celles obtenues avec LES, aussi bien pour les cas AMMA (Fig 5.20a) que RCE (Fig 5.20b), malgré certaines différences notables. Dans le cas AMMA, fixer le coefficient k (qui relie la vitesse d'étalement des poches C_* à leur énergie d'affaissement $WAPE$) à 0.66 améliore significativement la représentation des vents forts dans le modèle. Ce résultat confirme une nouvelle fois les conclusions du chapitre 3, où nous suggérons d'adopter une va-

Pas d'accord avec ce choix.

les cas RCE et AMMA. Ici, nous réalisons deux simulations avec LMDZ 1D : une première avec la version standard où la distribution du vent à 10 m dans la maille suit une distribution de Weibull (LMDZ WEIB). Une seconde simulation où le modèle combiné est activé (LMDZ MC). Dans ces simulations, les variables $\bar{u}_{wk} = u$, $\bar{v}_{wk} = v$, C_* , u_* , ALE_{bl} et σ_{wk} sont fournies par le GCM. Pour le paramètre libre k_{twk} , nous avons fixé une valeur commune de 0.5 pour les deux cas. Nous voyons que cette valeur se situe bien dans les intervalles optimaux déterminés lors du tuning du modèle combiné par rapport aux LES : [0.3 ; 0.6] pour le cas RCE et [0.4 ; 0.9] pour AMMA. Nous avons également fixé k_{zth} et k_{uh} respectivement à 1 et 2 pour les deux cas. Ces valeurs sont choisies de manières à ce que σ_{th} (défini par $\sigma_{th} = \sqrt{k_{th}u_*^2 + k_{zth}w_*^2}$) reste dans l'intervalle [1.3 ; 2], conformément aux résultats du tuning à la section 5.3.2. Aussi, nous avons directement fixé le coefficient k de C_* à 0.66 dans ces simulations. Les comparaisons entre LMDZ et LES sont effectuées sur les mêmes périodes que précédemment : en moyenne sur les jours 41, 42 et 43 pour RCE, et à l'instant 18h pour AMMA.

L'analyse des résultats révèle que, pour le cas AMMA, LMDZ WEIB surestime fortement les vents faibles et ne parvient pas à reproduire les vents forts, tandis que LMDZ MC offre une bonne correspondance avec la distribution du vent simulée par la LES (Fig. 5.21a). Ces résultats indiquent clairement l'absence des rafales associées aux poches froides dans la version standard de LMDZ. Sur le cas RCE, on observe également de meilleurs résultats avec LMDZ MC (Fig. 5.21b).

5.5 Conclusions

Y a pas besoin de simulation pour montrer ça - On n'avait pas de modèle -

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle de distribution du vent sous-maille qui intègre les rafales générées à la fois par les poches froides et par les thermiques. Le schéma des rafales associées aux poches a été principalement développé au cours de cette thèse, en s'appuyant sur des LES. Le schéma des rafales et des thermiques, quant à lui, a été développé parallèlement par Adriana Sima, et s'applique spécifiquement à l'extérieur des poches froides. Ces deux schémas sont combinés pour obtenir une distribution du vent complète au sein de la maille. La combinaison est réalisée à l'aide de la méthode de Monte Carlo pour éviter des formules analytiques complexes. Le modèle de rafales ainsi développé a été implémenté dans LMDZ et couplé avec les schémas de poches froides et de thermiques. Les tests de cette paramétrisation, effectués dans la version uni-colonne de LMDZ sur les cas

RCE et AMMA, montrent une meilleure représentation de la distribution du vent de surface par rapport aux LES, en comparaison avec la version standard de LMDZ qui utilise une distribution de Weibull, dans laquelle le vent maximal est arbitrairement défini deux fois du vent à grande échelle. Cette nouvelle paramétrisation permet donc de reproduire une distribution du vent de surface plus réaliste. Contrairement à l'ancienne distribution, exclusivement utilisée pour le soulèvement des poussières, ce nouveau schéma pourrait également être appliqué à d'autres phénomènes, tels que le soulèvement des vagues en milieu océanique. Dans le cadre de cette thèse, nous nous concentrerons uniquement sur son application au soulèvement des poussières, présentée dans la section suivante.



Dans ce tuning LES/LES
pourquoi ne pas fixer
l'uwth ceux valence de
la LES ?