

posent sur le flux de masse convectif issu du GCM, où la convection est elle-même paramétrée. La représentation des haboobs va donc dépendre de la capacité de ces paramétrisations à bien reproduire la convection.

Dans le modèle LMDZ, un effort a été réalisé pour améliorer la représentation de la convection, notamment grâce à la paramétrisation des poches froides développée par Grandpeix and Lafore (2010). Ce schéma a permis une nette amélioration de la convection dans LMDZ, en particulier la représentation du cycle diurne des précipitations sur continent (Rio et al., 2009). Le modèle repose sur une population de poches froides, supposées circulaires et identiques, qui se refroidissent sous l'effet de l'évaporation des précipitations dans les courants descendants convectifs. Dans la version du modèle disponible au début de cette thèse, le nombre de poches présentes dans une maille est fixé arbitrairement, tandis que leur fraction surfacique évolue dans la maille en fonction de leur vitesse d'étalement. Cette paramétrisation ne prenait pas en compte jusqu'à présent les rafales de vent engendrées par l'étalement de ces poches froides.

0.2 Objectifs de la thèse

Si on veut que les projections climatiques soient utilisées de façon pertinente pour éclairer les réponses à apporter aux conséquences régionales du réchauffement global, il est important de prioriser le développement et l'amélioration des modèles. Cette thèse porte sur la modélisation des poches froides et du soulèvement de poussières associé à leur propagation, et s'inscrit dans cet objectif général. Elle vise principalement à améliorer la représentation des poussières désertiques dans les modèles climatiques. Pour ~~mener~~ atteindre cet objectif, nous mobilisons des outils et des approches récemment adoptés par la communauté pour accélérer le développement des modèles climatiques, face à l'intensification des effets du changement climatique. L'un des freins ~~majeurs~~ au développement des paramétrisations résidait ~~jusqu'à bien cette étude, nous l'avons structurée en trois parties. Dans un premier temps, nous évaluons et améliorons la paramétrisation récemment~~ dans un manque de compréhension fine de certains processus atmosphériques. L'utilisation croissante des LES (Large Eddy Simulations) contribue à la réduction progressive de ce déficit, en permettant une représentation explicite de la turbulence dans la couche limite atmosphérique et en fournissant des données tridimensionnelles propices à une analyse détaillée des mécanismes en jeu. Bien qu'elles comportent des limitations, les LES constituent aujourd'hui un complément essentiel aux observations,

peu souvent rares et ne fournissant pas d'information tridimensionnelle, ce qui ne permet une analyse fine des mécanismes atmosphériques. Par le passé, les paramétrisations étaient souvent développées à partir de l'intuition du modélisateur ou basées sur des formulations empiriques, ce qui, bien que parfois pertinent, ne garantissait pas le réalisme des simulations. Aujourd'hui, les LES permettent au modélisateur de se faire une image physique plus réaliste des processus, ouvrant la voie au développement de nouvelles paramétrisations ~~entièrement~~ originales, sans dépendre de schémas préexistants. Dans cette même dynamique visant à accélérer le développement des modèles, l'outil High-Tune Explorer a été conçu pour ajuster automatiquement les paramètres libres. Il libère ainsi le modélisateur des longues phases d'ajustement manuel, afin qu'il puisse se concentrer sur l'essentiel : l'amélioration de la physique des modèles. Cette thèse s'appuie sur ces outils innovants pour atteindre un objectif général divisé en trois parties spécifiques. La première partie consiste à évaluer le schéma des poches froides dans LMDZ, en proposant le modèle LMDZ en s'appuyant, pour la première fois, sur des LES afin d'en fournir une évaluation détaillée de ce schéma basée sur des LES (Large Eddy Simulations). La-, tant sur son aspect physique que sur les propriétés des poches qu'il simule. Dans la deuxième partie ~~est consacrée au développement d'une~~, nous développons une nouvelle paramétrisation des rafales de vent associées à l'étalement des aux poches froides, qui va être couplée avec le schéma des poches s'appuyant principalement sur les LES et sans recours à des schémas préexistants. Dans ces deux premières parties, l'outil Hig-Tune Explorer est utilisé pour ajuster les paramètres libres des modèles. Enfin, la troisième partie s'attache est consacrée à tester la capacité du modèle de rafales de vent à simuler le soulèvement des simulations de poussières permettant d'évaluer les performances de cette nouvelle paramétrisation des rafales pour simuler les émissions de poussières. Cette thèse offre désertiques. Les LES sont également l'opportunité de tester et valider une nouvelle utilisée pour évaluer une paramétrisation de la dynamique de population des poches froides, développé par Jean-Yves Grandjean. Cette paramétrisation permet de calculer l'évolution de-, actuellement en phase de test, visant à calculer de manière plus physique la densité surfacique des poches (nombre de poches par unité de surface), qui est actuellement jusque-là imposée dans LMDZ. Cette dernière partie étude est présentée en annexe.

0.3 Organisation de la thèse

Après le chapitre introductif, le chapitre 2 expose les grands facteurs qui régissent le soulèvement et le transport des poussières pendant la saison des pluies au

Mal dit
je ne comprends pas

daïne du vent, signes caractéristiques du passage d'une poche froide. En développant un outil de détection automatique des épisodes de virga, Kalesse-Los et al. (2023) suggèrent son utilisation pour l'étude des poches froides et de l'organisation des nuage, ce qui estime que ces phénomènes constituent un mécanisme potentiel dans la formation des poches froides.

0.7.2 Caractérisations et détections des poches

Caractérisations

Les caractéristiques des poches froides ont été étudiées à la fois par observation et par modélisation. Leur apparition est marquée par une chute soudaine de la température, une hausse du point de rosée et une accélération du vent (Knippertz et al., 2007; Miller et al., 2008). Lors d'observations faites durant la campagne AMMA, (~~Provod et al., 2016~~) Provod et al. (2016) ont montré qu'au Sahel, le passage des poches froides est associé à des baisses de température de 2 à 14°C, une augmentation de pression de 0 à 8 hPa et des rafales de vent de 3 à 22 m/s. Ces résultats concordent avec ceux de (~~Senghor et al., 2021~~) Senghor et al. (2021), qui ont observé une chute brutale de la température de surface de 9°C et une forte accélération des vents au Sénégal lors d'un passage d'une poche froide en juin 2018. De même, Allen et al. (2015) ont détecté le passage d'une poche froide à Bordj-Badji Mokhtar dans le sud de l'Algérie en observant des variations soudaines de la vitesse du vent à 10 m. D'autres études indiquent que le passage d'un courant de densité se caractérise généralement par une chute rapide de température, une hausse de pression, des vents forts et un changement dans la direction du vent (McDonald and Weiss, 2021).

Détections

Il n'existe pas de cadre commun pour identifier objectivement les poches froides dans les observations et les modèles numériques. Ces dernières années, plusieurs études ont exploré le développement de méthodes pour identifier et suivre les poches froides. Par exemple, Young et al. (1995) ont proposé une méthode basée sur le taux de précipitations, définissant le début d'une poche froide par un taux de pluie d'au moins 2 mm/h, et la fin lorsque la température de surface retrouve son niveau initial. Ce seuil a été inspiré d'une étude antérieure de Barnes and Garstang (1982), qui montrait que seuls les taux de précipitations supérieurs à 2 mm/h étaient liés aux courants de densité provoqués par la pluie. Drager and van den Heever (2017) ont également proposé une méthode de détection fondée sur le taux de précipitations en surface et les gradients radiaux de température potentielle. Feng et al. (2015)

juxtaposées, qui n'interagissent pas entre elles. À l'intérieur de chaque colonne, les variables sont supposées homogènes statistiquement sur le plan horizontal.

0.11.2 Les paramétrisations physiques

Le modèle LMDZ intègre plusieurs paramétrisations physiques. Parmi ~~elles, on peut citer les paramétrisation de la turbulence, de la convection et des nuages, qui reposent sur une approche multi-échelle, ou basée sur des objets.~~

~~La turbulence de petite échelle, principalement active près de la surface, est prise en compte selon le~~ celles-ci, on retrouve le schéma de Mellor and Yamada (1974), ~~via une approche de diffusion turbulente où~~ transfert radiatif de Fouquart (1980) pour le rayonnement solaire, ainsi que celui de Morcrette and Fouquart (1985) pour le rayonnement terrestre. Il intègre également trois paramétrisations des ondes de gravité : les ondes orographiques selon le schéma de Lott and Miller (1997), celles générées par la convection (Lott and Guez, 2013), et enfin celles associées aux fronts et aux jets (De la Cámara and Lott, 2015). Ces paramétrisations ont permis d'améliorer la ~~diffusivité turbulente dépend d'une équation pronostique de~~ représentation de la circulation dans la troposphère et l'atmosphère moyenne.

Les flux de surface en eau (évapotranspiration), en énergie (flux de chaleur latente et sensible) et en quantité de mouvement dans LMDZ sont simulés via un modèle de surface continentale ORCHIDEE (Polcher et al., 1998). Un schéma de turbulence basé sur l'énergie cinétique turbulente ~~. Une paramétrisation spécifique de type flux de masse, le modèle de panache thermique (thermal plume model), représente le transport vertical par les panaches thermiques organisés, cellules ou rouleaux,~~ (TKE), développé par Mellor and Yamada (1974), est ensuite utilisé pour représenter les échanges verticaux de chaleur, d'humidité et de moment entre la surface et les premiers niveaux de l'atmosphère, en particulier dans la couche limite ~~convective~~ (Hourdin et al., 2002; Rio and Hourdin, 2008). ~~Ce~~ atmosphérique. En plus de ce schéma censé représenter une turbulence à petite échelle aléatoire, LMDZ comprend 3 schémas dédiés à la représentation des mouvements sous maille associées à la convection : un schéma pour la convection peu profonde ou ~~le~~ modèle ~~a ensuite été couplé des~~ thermiques^U (Rio and Hourdin, 2008), un autre pour la convection profonde (Emanuel, 1991), et un troisième dédié aux poches froides (Grandpeix and Lafore, 2010). Les schémas relatifs aux thermiques et à ~~une~~ la convection profonde seront abordés dans les sections suivantes, tandis qu'une présentation détaillée du modèle des poches froides sera proposée au chapitre 4. Concernant la représentation ~~statistique bi-gaussienne de la distribution~~ des nuages, LMDZ utilise un schéma basé sur une distribution bimodale de l'eau sous-maille (Jam et al., 2013).

Table des figures

Il n'y a jamais eu de version "tout ou rien" des schémas de nuages dans les modèles de chimie.

Cette approche permet de calculer la couverture nuageuse sur une fraction seulement de la maille, en fonction de la probabilité de saturation issue de cette distribution, contrairement à l'ancienne méthode dite "tout ou rien", basée uniquement sur la valeur moyenne de l'humidité, ce qui a fortement amélioré la relative. Le couplage de ce schéma avec le modèle des thermiques, qui fournit une représentation des nuages de type cumulus et stratocumulus (Jam et al., 2013; Hourdin et al., 2019). La convection profonde est quant à elle représentée à l'aide plus réaliste de la turbulence dans la couche limite, a permis d'une version modifiée du schéma améliorer significativement la représentation de la couverture nuageuse ainsi que la quantité d'Emanuel (1991) eau condensée dans LMDZ.

Le modèle des thermiques

Le modèle des thermiques, développé par Rio and Hourdin (2008), permet de représenter les nuages bas structures organisées de la convection (rouleaux et cellules), ainsi que le cycle diurne des nuages convectifs transport vertical de chaleur, d'humidité et de moment associé à la turbulence de petite échelle dans la couche limite convective. Il repose sur une approche combinant une diffusion classique et un schéma de flux de masse. Dans ce modèle, chaque maille est divisée en deux parties : un panache thermique ascendant, caractérisé par un flux de masse $f = -\alpha \rho w_u$ (où α représente la fraction de surface couverte par le panache, ρ la masse volumique de l'air et w_u la vitesse verticale), et une subsidence compensatoire dans l'environnement, avec un flux de masse opposé f . La variation verticale du flux de masse (f) dépend du taux d'entraînement (e) au sein du panache et du déentraînement (d), selon la relation suivante.

$$\frac{\partial f}{\partial z} = e - d \quad (0.11.1)$$

Le modèle des thermiques représente un ensemble de thermiques secs et nuageux par une thermique unique, dont les propriétés sont égales aux moyennes des caractéristiques thermiques sur la maille. Une amélioration notable a été apportée par Rochetin et al. (2014), avec l'introduction d'une représentation statistique de la distribution des thermiques nuageux, ainsi que par l'ajout du déclenchement stochastique de la convection profonde.

Le flux total de sandblasting, est ensuite obtenu en faisant la somme du flux $F_{v,i}$ sur les 3 modes d'aérosol :

$$F_{v,i} = \sum \int F_{v,i} dD_p \quad (0.14.9)$$

0.14.2 LMDZ-SPLA

Le modèle climatique LMDZ est couplé au modèle simplifié d'aérosols SPLA (Huneus et al., 2009). SPLA simule plusieurs types de traceurs : les précurseurs gazeux d'aérosols, le sel marin en mode grossier (diamètre compris entre 1 et 40 μm), les aérosols en mode fin, ainsi que les poussières divisées en trois classes : super-grossières (6 à 30 μm), grossières (1 à 6 μm) et fines (inférieures à 1 μm) (Huneus et al., 2009; Escribano et al., 2016). Il est à noter que les poussières en mode fin sont intégrées ~~aux traceurs d'aérosols en mode fin~~ au traceur "mode fin" une fois les émissions effectuées.

Le Module de Production de Poussières (DPP) utilisé dans SPLA est issu du modèle de qualité de l'air CHIMERE-DUST (Escribano et al., 2016). Son intégration dans SPLA repose sur une adaptation du DPP ~~de~~ décrit par Hourdin et al. (2015), qui calcule les émissions de poussières principalement sur les régions désertiques du Sahara et de la péninsule Arabique. Le DPP combine un schéma de flux de saltation développé par Marticorena and Bergametti (1995) (Eq. 0.14.7) avec un modèle de sablage proposé par Alfaro and Gomes (2001) (Eq. 0.14.9). Les vitesses de frottement seuil sont déterminées selon la formulation de Marticorena et al. (2010) (Eq. 0.14.5).

OK mais me dit

Les émissions de poussières ne se produisent que dans les zones du domaine où la vitesse du vent est suffisamment élevée pour entraîner le soulèvement de particules, et non uniformément sur l'ensemble de la maille. Pour en tenir compte, LMDZ-SPLA utilise une distribution du vent de surface au lieu de se baser sur la valeur moyenne du vent dans la maille. La variabilité du vent de surface y est représentée à l'aide d'une distribution de Weibull, utilisée dans la plupart des modèles de climat (Pavia and O'Brien, 1986; Zender et al., 2003; Cakmur et al., 2004). Cette distribution est définie par la fonction de densité de probabilité (PDF) suivante :

$$p(U(kwb)) = \frac{k}{A} \left(\frac{U(kwb)}{A} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{U(kwb)}{A} \right)^k \right] \quad (0.14.10)$$

où

- K est un paramètre sans dimension (K=3) indiquant l'allure de la distribution

- N est le nombre de pas de la distribution ($N = 12$)
- A est la vitesse du vent à 10 m du modèle
- $U(kwb)$ est la vitesse du vent à 10 m dans la distribution

N n'apparaît pas dans l'équation. C'est un choix numérique de séparation en "bins".

Dans LMDZ, le vent maximum de cette distribution est fixé arbitrairement à deux fois de la vitesse du vent à grande échelle.

En améliorant le modèle LMDZ-SPLA ainsi complété,

Hourdin et al. (2015) ont montré que l'introduction du modèle des thermiques dans LMDZ améliore significativement la représentation du cycle diurne du vent de surface, ainsi que celle des émissions de poussières en hiver. La figure 12, tirée de Hourdin et al. (2015), illustre bien ces résultats. Elle présente une comparaison du cycle diurne du vent à 10 m, moyenné sur les mois de janvier à mars 2006, sur les stations Cinzana et Banizoumbou, entre les observations, les réanalyses ERA-Interim, et différentes configurations de LMDZ. La version de LMDZ avec physique standard (SP) ne comprend pas le schéma des thermiques et utilise le vent moyen de maille pour calculer les émissions de poussières. Les versions dites "nouvelle physique" (NP), incluant NP3 et NP48, intègrent le modèle des thermiques ainsi qu'une distribution de Weibull pour représenter la variabilité du vent de surface. La différence entre NP3 et NP48 réside dans leur résolution horizontale : NP3 utilise une grille plus fine (environ 1.25 degrés), contre une grille plus grossière pour NP48 (environ 2.5 degrés). Les simulations NP reproduisent bien la phase et l'amplitude du cycle diurne du vent à 10 m, et avec même une meilleure performance que les réanalyses. Les bons résultats obtenus avec NP3 et NP48 sont étroitement liés à l'effet du modèle des thermiques. Comme expliqué plus haut, ce schéma permet le transport vertical de la quantité de mouvement horizontale. Dès le lever du soleil, les panaches thermiques se développent. Lorsqu'ils atteignent le jet de basse couche, formé souvent durant la nuit à quelques mètres au-dessus du sol, ils ramènent vers la surface les vents fort du jet, renforçant ainsi significativement le vent de surface. Cette dynamique, bien capturée par le modèle, a permis de reproduire d'obtenir une bonne simulation des émissions de poussières en saison sèche.

0.15 Les observations

Les données d'observations d'aérosols utilisées dans le cadre de thèse pour valider nos simulations de poussières sont celles de l'épaisseur optique des aérosols (AOT, pour Aerosol Optical Thickness), issue du réseau AERONET ainsi que des données de concentrations de PM_{10} , à savoir particules de diamètres inférieures à