

0.1 Contexte

La région du Sahara/Sahel représente la première source mondiale d'émission de poussières minérales. Plus de la moitié des aérosols désertiques présents dans l'atmosphère provient de cette zone (Washington et al., 2003; Ginoux et al., 2004). La production de poussières dans cette région est influencée par des facteurs météorologiques (vents forts et faibles précipitations) ainsi que par les caractéristiques de surface telles que la rugosité, l'humidité et la végétation. Ces poussières désertiques sont générées par l'action mécanique du vent, une fois le seuil d'érosion atteint. Lorsque la vitesse du vent dépasse la force de friction nécessaire à la mise en mouvement des grains de sable, ceux-ci commencent par se déplacer horizontalement, puis les particules les plus fines sont entraînées en suspension dans l'atmosphère, formant ainsi des aérosols désertiques. Une fois émises, ces particules suivent le mouvement des masses d'air dans l'atmosphérique et peuvent parcourir de longues distances, sur des périodes allant de quelques heures à plusieurs jours selon les conditions météorologiques (Tegen et Lacis., 1996; Mahowald et al., 1999). Le transport de ces aérosols impacte la qualité de l'air, affecte la météorologie (Rodewell et Jung, 2008), le climat (Carslaw et al., 2010), l'ozone troposphérique (Jenkins et al., 2012). Les poussières influencent significativement le climat en modifiant le bilan radiatif de la Terre par diffusion, absorption et émission des radiations solaires et infrarouges terrestres (Sokolik et al., 2001; Tegen, 2003; Konare et al., 2008; Camara et al., 2010).

Étant donné l'importance des poussières désertiques, la majorité des Modèles Climatiques Globaux (GCM : Global Climate Model) utilisés pour étudier les changements climatiques intègrent désormais un module d'émission de poussières pour suivre le transport de ces aérosols et prendre en compte leurs effets. Depuis plusieurs années, un travail de développement de modèles intégrant les interactions entre aérosols désertiques et climat est mené en partenariat entre le LMD et le LPAO-SF, au travers de nombreuses thèses successives. Ces efforts ont permis d'obtenir de bonnes simulations des poussières en saison sèche dans le modèle climatique (LMDZ) développé au Laboratoire de Météorologie Dynamique. Cette thèse porte spécifiquement sur la représentation du soulèvement des poussières au Sahel pendant la saison des pluies, particulièrement aux tempêtes de poussières associées aux systèmes convectifs, connues sous le nom de « haboobs ».

Les haboobs sont de grandes tempêtes de sable qui surviennent pendant la saison des pluies au Sahel, souvent en amont des systèmes orageux. Ils sont générés par

Trop vague et non scientifique
soit tu enlèves soit tu précises

un phénomène météorologique appelé poche froide. Les poches froides se forment par l'évaporation des précipitations sous les cumulonimbus (gros nuages), créant des masses d'air froid. Plus denses que l'air environnant, ces masses s'effondrent et s'étalent horizontalement comme un courants de densité. En s'étalant, les poches froides soulèvent l'air environnant, ce qui peut entraîner la formation de nouvelles colonnes convectives et jouer un rôle crucial dans le maintien des orages. Leur propagation génère également de forts vents de surface, responsables du soulèvement de poussières. Ce processus constitue le principal mécanisme de soulèvement de poussières au Sahel durant la saison des pluies (Allen et al., 2015; Caton Harrison et al., 2019). Cependant, la plupart des GCM n'intègrent pas ces émissions de poussières liées aux poches froides en raison de l'absence de paramétrisation pour ces poches et les rafales de vent associées (Roberts et al., 2018; Knippertz et Todd, 2012; Marsham et al., 2011). Par conséquent, ces modèles sous-estiment les fortes quantités de poussières émises au Sahel pendant l'été (Marsham et al., 2011). Des recherches récentes indiquent que la sous-estimation des émissions de poussières par les modèles climatiques peut biaiser les projections de changement climatique ainsi que les évaluations de la sensibilité climatique (Kok et al., 2023). D'après Bergametti et al. (2022), il sera difficile d'obtenir des estimations fiables des émissions de poussières sahéniennes, pour les scénarios actuels ou futurs, tant que les modèles climatiques ne parviendront pas à représenter correctement les systèmes convectifs méso-échelles, notamment les poches froides en surface.

Ces dernières années, plusieurs approches de paramétrisation ont été proposées pour modéliser les haboobs. Par exemple, Cakmur et al. (2004) ont développé une paramétrisation des rafales de vent associées aux poches froides, basée sur le flux de masse des courants descendants et la fraction de surface affectée par les courants de densité, pour inclure les haboobs dans les modèles à convection paramétrée (c'est à dire les GCM). D'autres études ont élaboré un modèle de rafales de vent utilisant le flux de masse des schémas convectifs qui se répartissent radialement dans la poche froide (Pantillon et al., 2015). Lorsqu'elle est testée dans le modèle climatique Met Office Unified, cette paramétrisation améliore la distribution spatiale des tempêtes de poussières convectives en Afrique de l'Ouest (Pantillon et al., 2015). Cependant, on observe un décalage dans le cycle diurne des haboobs : dans les simulations de référence (convection explicitement résolue), le potentiel de soulèvement des poussières est maximal à 18 h, correspondant au pic de précipitations, alors que dans les simulations à convection paramétrée, ce pic apparaît vers 12 h, en raison d'un déclenchement trop précoce de la convection, avec une durée plus courte. Grandpeix et

étendre

Ce n'est pas la même chose

On change complètement de sujet
en parlant des paramétrisations de la
convection et des poches

611

Non. Beaucoup trop restreint

Cette partie doit être
deux fois plus longue

Lafore, (2010) ont proposé une paramétrisation basée sur une population de poches circulaires identiques qui sont refroidies par les courants descendants précipitants convectifs. L'introduction de cette paramétrisation dans le modèle de climat LMDZ a permis d'améliorer la représentation de la convection, notamment le cycle diurne des précipitations sur le Sahel (Rio et al., 2009). Cependant, cette paramétrisation des poches n'inclut pas les rafales de vent liées à leur étalement.

0.2 Objectifs

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, portée sur la modélisation des poches froides et du soulèvement de poussières associé à leur propagation, s'inscrit dans cet objectif. Elle vise principalement à améliorer la représentation du soulèvement des poussières désertiques dans le modèle climatique LMDZ. Pour mener à bien cette étude, nous nous sommes fixés trois objectifs spécifiques :

1. Évaluer et améliorer la paramétrisation des poches froides dans LMDZ
2. Développer une paramétrisation des rafales de vent associées aux poches froides pour le soulèvement des poussières
3. Tester et valider une paramétrisation de la dynamique de population des poches qui calcule l'évolution des poches

0.3 Organisation de la thèse

Après le chapitre introductif, le **chapitre 2** explore la question des poussières pendant la saison des pluies au Sahel. Dans la première section, nous proposons une revue générale de la dynamique atmosphérique en été au Sahel, afin d'illustrer les différents phénomènes qui interagissent pour créer des conditions propices à la convection profonde. Les sections suivantes discutent plus en détails les phénomènes de convection profonde et des poches froides. Enfin, ce chapitre propose une revue bibliographique sur le soulèvement des poussières, en abordant les principales zones sources et les facteurs météorologiques susceptibles de les activer, avec un accent particulier sur le rôle des poches froides dans ce processus.

Le **chapitre 3** est dédié à la présentation des outils utilisés dans le cadre de ces travaux. Nous débutons par une description du modèle climatique LMDZ, suivi d'une

discussion sur les simulations de référence, les Large Eddy Simulations (LES), qui ont servi de base pour l'évaluation du modèle de poches et le développement de la paramétrisation des rafales. Nous présentons également ⁴⁶ HighTune Explorer, l'outil employé pour calibrer les paramètres de nos modèles. Enfin, nous parlerons du modèle LMDZ-Dust, la version de LMDZ intégrant le soulèvement de poussières, et profitons de cette section pour faire un état de l'art sur la modélisation de ce phénomène.

Dans **chapitre 4**, nous présentons plus en détail le modèle de poches froides intégré dans LMDZ. Nous procédons ensuite à son évaluation en nous appuyant sur les LES, avant d'apporter des améliorations. L'outil HighTune Explorer est utilisé pour calibrer les paramètres associés au modèle de poches froides.

Dans **chapitre 5**, nous développons une paramétrisation ^{Sur des} des rafales de vent associées à l'étalement des poches froides, en nous basant LES et en utilisant l'outil HighTune Explorer pour calibrer les paramètres. Bien que cette paramétrisation soit conçue pour le soulèvement des poussières, elle pourrait également être appliquée à d'autres domaines, comme le soulèvement des vagues à la surface des océans.

Dans **chapitre 6**, nous présentons la paramétrisation de la dynamique des populations de poches froides, principalement développée par Jean-Yves Grandpeix. Ma contribution consiste à tester cette paramétrisation sur la version uni-colonne du modèle LMDZ et à l'évaluer par rapport aux LES, en utilisant le cadre d'évaluation présenté dans le chapitre 1.

Le **chapitre 7** présente enfin les conclusions et les perspectives ce travail.