

# 1 Positionnement de la thèse

**Le fait de considérer l'ajustement des modèles de climat comme une science à part entière dans les groupes de modélisations est très récent.** Cette question a été clairement explicitée à l'échelle internationale lors du Workshop de 2014 sur le tuning, qui en pave les premières directions de recherche (citation houarin2017). Dans les deux centres de modélisation français, la méthode objective d'HMIR a été choisie pour l'ajustement de leurs modèles de climat globaux respectifs IPSL-CM et ARPEGE-Climat. L'implémentation de cette méthode dans l'outil `htexplo`, et les premières études qui en ont découlé, ont eu lieu juste avant le début de cette thèse (citation couvreux2021,houarin2021,villefranque2021). De nombreuses perspectives de recherches restent à explorer concernant l'ajustement des modèles de climat avec des méthodes objectives, et en particulier avec la méthode d'HMIR. Cette thèse a pour objectif d'explorer les potentialités de cette méthode pour l'ajustement des modèles de climat, et pour la modélisation du climat en général, en l'appliquant au GCM atmosphérique LMDZ. C'est sans doute une des premières thèses à avoir comme objet d'étude central l'ajustement d'un GCM, ce qui constitue une étape dans l'élaboration de cette nouvelle science.

**La méthode d'HMIR a été choisi pour son potentiel à aborder de nouvelles questions scientifiques.** Elle présente l'avantage de pouvoir combiner des métriques portant sur différentes configurations du même modèle, offrant une gamme de possibilités de métriques très large pour l'ajustement des paramètres du modèle.

**Actuellement, l'ajustement de LMDZ se fait d'un côté au plus** roche des processus avec des métriques portant sur des cas un-unicolonne de convection peu profonde. Puis dans un second temps, des métriques sont ajoutées sur les flux radiatifs au sommet de l'atmosphère de simulation atmosphérique globales forcées, i. e. dans lesquelles les températures de surface de l'océan sont imposées.

Le premier jeu de métriques a pour but de garantir la bonne simulation des processus, ici de couche limite convective, et le deuxième de garantir la bonne simulation du climat. Ces deux jeux de métriques pourraient être enrichis au sein de cette stratégie en deux partie. Côté simulation du climat global, on pourrait s'imaginer contraindre une plus grande diversité de caractéristiques du climat, telles que des caractéristiques du climat à la surface (température, précipitations, humidité, rayonnement etc) qui est très observé et dont l'enjeu sociétal est fort, ou de viser spécifiquement les caractéristiques de phénomènes grande échelle tels que les moussons ou ENSO (*El-Niño Southern Oscillation*). On pourrait également enrichir la stratégie avec des métriques visant à réduire les biais systématiques du modèle atmosphérique, comme par exemple la simulation d'une double ITCZ, la trop faible variabilité des précipitations, les trop forte précipitations sur le continent maritime etc. Côté processus, on pourrait ajouter des métriques sur une plus grande diversité de cas uni-colonne, et contraindre ainsi une plus grande diversité de processus atmosphériques ; tel que les cas de couches limites stables pour la turbulence de petite échelle ou les cas

de convection profonde plus ou moins idéalisés.

**Combiner des métriques proches des processus avec des métriques orientées climat global est une manière d'éviter les compensations d'erreurs, c'est-à-dire d'éviter que le climat soit bien simulé pour les mauvaises raisons (c'est-à-dire pour les mauvais processus).**

La méthode d'HMIR a un fort potentiel à la fois pour étudier les compensations d'erreur - auxquelles une expérience de cette thèse est dédiée - mais aussi pour les éviter lors de l'ajustement du modèle. Pour ce dernier point, l'enjeu est à la fois de se doter de métriques au plus proche des processus, mais également d'assurer une continuité entre ces métriques et les métriques climatiques globales dans la stratégie d'ajustement du modèle. **Cela peut se faire en s'appuyant sur des configurations intermédiaires entre les configurations uni-colonne et la configuration climatique globale du modèle, comme cela est déjà pratiqué pour le développement et l'évaluation de LMDZ.**

Parmi la gamme des configurations intermédiaires possibles, nous proposons d'étudier le potentiel d'une configuration dite zoomée-guidée, où la dynamique atmosphérique est forcée par une technique de guidage et où la grille du modèle est affinée sur une région d'intérêt. La technique de guidage permet d'évaluer les paramétrisations physiques du modèle en imposant une succession de séquences météorologiques (synoptiques) proches des observations, et de séparer ainsi les erreurs causées par les paramétrisations physiques de celles causées par la dynamique atmosphérique du modèle. Cette séparation est moins forte que dans les utilisations uni-colonnes, un certain degré de liberté étant malgré tout laissé aux couplages physique-dynamique rapides, à l'intérieur de la région zoomée. Les simulations explorent en revanche un beaucoup plus grand nombre de situations météorologiques. L'utilisation de telles configurations pour l'ajustement du modèle pourrait ainsi permettre d'éviter, de contrôler et éventuellement de mieux comprendre les compensations d'erreurs qui peuvent émerger entre les parties dynamiques et physiques du modèle.

**L'utilisation d'une grille zoomée avec guidage** est fréquente pour simuler le climat d'une région d'intérêt, avec une grille plus fine sur cette région que la grille standard du modèle tout en limitant le coût de calcul des simulations. L'association de ces deux techniques permet d'imiter le fonctionnement d'un modèle régional à air limité avec le GCM atmosphérique LMDZ, en forçant la dynamique sur le bord du domaine du zoom grâce à un guidage fort. De telles configurations sont fréquemment utilisées pour la comparaison du modèle à des observations atmosphériques in-situ de campagne de mesures ou de site instrumentés. Les perspectives offertes par l'utilisation de ces données in-situ comme référence pour l'ajustement du modèle sont explorées dans cette thèse avec les observations du site instrumenté du Sirta, situé en région parisienne, et une configuration de LMDZ guidée et zoomée sur ce site instrumenté. Nous abordons également dans ces chapitres la possibilité de cibler spécifiquement le couplage entre le modèle d'atmosphère LMDZ et celui de surface continentales Orchidee, avec l'objectif d'ajuster conjointement les paramètres libres des deux

modèles (et non plus séparemment comme dans la stratégie de tuning actuel).

**L'autre grand aspect que nous abordons dans cette thèse concerne l'ajustement des flux radiatifs.** L'enjeu de continuité dans l'ajustement du modèle est particulièrement fort sur le transfert radiatif, qui est de première importance depuis l'échelle des processus jusqu'à l'échelle plus globale. Contraindre les flux radiatifs à l'échelle des processus sur des simulations uni-colonne est aujourd'hui possible grâce aux calculs de références radiatifs Monte Carlo développés par (citation villefranque2019a), qui fournissent des références radiatives associées aux scènes nuageuses simulées par LES. De plus, l'amélioration de la simulation des nuages bas dans LMDZ grâce au développement d'une paramétrisation de la couche limite convective en flux de masse (citation hourdin2002,hourdin2005,jam2013,hourdin2019), et l'arrivée du nouveau modèle de transfert radiatif eCrad proposant notamment différentes hypothèses de prise en compte des nuages par le modèle de transfert radiatif, constituent aujourd'hui un contexte très favorable à l'étude des interactions entre nuages bas et rayonnement dans LMDZ. **Nous proposons des les étudier dans la perspective de comprendre les compensations d'erreurs possibles entre les différentes paramétrisations des nuages bas et du transfert radiatif, qui peuvent émerger lors de l'ajustement des flux radiatif du modèle global.** Ces compensations d'erreurs sont notamment suspectées d'être à l'origine du biais de nuages bas trop peu courant et trop réfléchissant présent dans de nombreux modèles de climat globaux (citation konsta2022,nam2012). Ces expériences sont également l'occasion de mettre en pratique une première étude des compensations d'erreurs avec la méthode d'HMIR. Le travail d'interfaçage du nouveau modèle de transfert radiatif eCrad avec LMDZ a eu lieu au cours de cette thèse, et cette étude est donc également motivée par le besoin de réajuster (tuner) le modèle après l'introduction de cette nouvelle paramétrisation.

Cette thèse a été l'occasion de pratiquer la méthode d'HMIR pour le tuning de LMDZ, et également d'observer l'appropriation et la pratique de cette méthode dans le centre de modélisation de l'IPSL. **Cette thèse comporte donc une part de réflexivité sur les expériences mises en place spécifiquement à cette occasion mais également concernant des expériences de tuning auxquelles j'ai contribué, de façon plus ou moins significative, pendant cette période.** Ces expériences couvrent un large spectre, allant du développement de nouvelles paramétrisations à la mise en place du modèle couplé pour le prochain exercice d'intercomparaison des modèles de climat, enrichissant une prise de recul sur notre pratique du tuning et de la modélisation du climat en général.