

## Résumé

*[Version à 3888 caractères]*

L'ajustement paramétrique, aussi appelé tuning ou calibration, est une étape essentielle du développement des modèles de circulation générale atmosphérique, utilisés tant pour la compréhension du climat que pour la réalisation de projections climatiques. Autrefois réalisée sur la base d'essais-erreurs, cette étape d'ajustement est bouleversée depuis une dizaine d'années par l'arrivée de méthodes objectives, ouvrant la voie à de nouvelles questions scientifiques : l'ajustement devient peu à peu une science à part entière. L'équipe développant le modèle atmosphérique LMDZ s'est depuis approprié la méthode d'History Matching with Iterative Refocusing (HMIR), et propose, en 2021, une première stratégie de tuning semi-automatique de son modèle basée sur cette approche. Cette stratégie repose sur un pré-conditionnement du tuning du modèle global, visant les flux radiatifs observés par satellite, par un tuning en mode unicolonne ; ~~dans l'objectif de~~. Elle vise à limiter les compensations d'erreurs en garantissant le bon comportement du modèle à l'échelle des processus sur un certain nombre de cas tests.

Cette thèse a pour objectif d'explorer les potentialités de la méthode d'HMIR pour l'ajustement et la modélisation du climat en général, afin notamment d'améliorer la simulation du climat global et/ou régional, de limiter les compensations d'erreurs dans le processus d'ajustement, et ~~de plus généralement aider~~ d'aider plus largement au développement des modèles de climat.

Dans un premier temps, la thèse explore le potentiel d'une configuration dite guidée-zoomée pour l'ajustement du modèle LMDZ, dans laquelle la dynamique du modèle est contrainte par une technique de guidage. L'objectif d'une telle configuration est (1) de séparer les erreurs provenant de la physique de celles issues de la dynamique du modèle, afin d'éviter les compensations d'erreurs entre les deux, et (2) de comparer ~~au~~ jour à jour les simulations à des données d'observation in situ co-localisées, ici celles du site du SIRTa situé en région parisienne. Cette étude met en évidence les difficultés de l'évaluation du modèle avec des observations locales, liées à leurs différences de représentativité spatio-temporelle, mais aussi à certains défauts structurels du modèle, comme la forte surestimation de la variabilité des pluies convectives. Pour contourner cette difficulté, une configuration de LMDZ est développée, dans laquelle la boucle de rétroaction de l'hydrologie du sol est coupée. Cette solution empêche toutefois le tuning conjoint des paramètres libres des modèles atmosphérique et de surface continentale, un des objectifs à l'origine du développement de cet exercice de tuning au SIRTa.

La thèse aborde ensuite la question des compensations d'erreurs entre paramétrisations des nuages et du transfert radiatif susceptibles d'émerger lors de l'ajustement des flux radiatifs du modèle global. Elle propose une méthodologie originale permettant une étude quantitative de ces compensations d'erreurs, rendue possible grâce à la faculté de la méthode d'HMIR à explorer et quantifier l'erreur paramétrique des modèles. Nous montrons ainsi que la paramétrisation des effets radiatifs 3D, proposée dans le code de rayonnement ecRad, permet d'éviter les compensations d'erreurs à l'échelle des processus sans pour autant avoir un impact important sur la simulation des flux radiatifs globaux. Cette étude illustre notamment comment la méthode d'HMIR peut guider des choix de modélisation.

Cette thèse a coïncidé avec l'appropriation de la méthode d'HMIR dans la communauté scientifique française de modélisation du climat. Elle a été l'occasion de pratiquer cette nouvelle méthode pour les expériences de cette thèse et également pour un panel plus large d'expériences auxquelles elle a contribué. Les réflexions et prises de recul nourries de cette pratique ~~seront~~ sont partagées dans la dernière partie de cette thèse.

**Mots clés** Tuning, Modélisation du climat, Interactions nuage-rayonnement, Couplage surface continentales-atmosphère

## Abstract

Parametric adjustment, also known as tuning or calibration, is an essential step in the development of general circulation models (GCMs) of the atmosphere, used both for understanding the climate system and for producing climate projections. Formerly carried out through trial and error, this adjustment process has been transformed over the past decade by the advent of objective methods, paving the way for new scientific questions : tuning is gradually becoming a science in its own right. The team developing the atmospheric model LMDZ has since adopted the History Matching with Iterative Refocusing (HMIR) method and, in 2021, proposed a first semi-automatic tuning strategy for its model based on this approach. This strategy relies on preconditioning the global model tuning—targeting radiative fluxes observed by satellites—through a single-column tuning stage, with the aim of limiting error compensations while ensuring that the model behaves correctly at the process scale for a set of test cases.

This thesis aims to explore the potential of the HMIR method for model tuning and, more broadly, for climate modelling, with the objectives of improving the simulation of global and/or regional climate, reducing error compensations in the tuning process, and more generally supporting the development of climate models.

This thesis starts by exploring the potential of a so-called nudged-zoomed configuration for tuning the LMDZ model, in which the model dynamics are constrained through a nudging technique. The goal of such a configuration is (1) to separate the errors arising from the physics from those stemming from the model dynamics, thereby avoiding compensations between the two, and (2) to compare the simulations on a day-to-day basis with co-located in situ observations, here those from the SIRTa site ~~near~~nearby Paris. This study highlights the difficulties of evaluating a GCM using local observations, related both to differences in spatiotemporal representativeness and to structural biases in the model, such as the strong overestimation of convective rainfall variability. To overcome this issue, a version of LMDZ was developed in which the soil hydrology feedback loop is cut off. However, this solution prevents the joint tuning of the free parameters of the atmospheric and land-surface models—one of the original objectives of this tuning experiment at SIRTa.

The thesis then addresses the issue of error compensations between cloud and radiative transfer parameterizations that may arise when tuning the global radiative fluxes. It proposes an original methodology for quantitatively studying such error compensations, made possible by the HMIR method's ability to explore and quantify model parametric uncertainty. We show that the parameterization of 3D radiative effects implemented in the ecRad radiation code helps to avoid process-scale error compensations without having a significant impact on the simulation of global radiative fluxes. This study illustrates how the HMIR method can guide model development decisions.

This thesis coincided with the adoption of the HMIR method within the French climate modelling community. It provided the opportunity to apply this new method to the experiments conducted for this work, as well as to a broader range of tuning experiments to which it contributed. The reflections and insights gained from this practice are shared in the final part of this thesis.

**Keywords** Tuning, Climate modeling, Cloud-radiation interaction, Land-atmosphere coupling

## Résumé Grand Public

*[1000 caractères maximum, n'apparaît pas dans la thèse : version à 996 caractères]*

Les modèles ~~de climat,~~ utilisés pour la compréhension du climat et la réalisation des projections climatiques ~~,~~ incluent dans leur formulation des paramètres incertains ~~,~~ dont la valeur doit être ~~déterminée~~ ajustée. Cette étape de modélisation, appelée ~~ajustement,~~ tuning ou calibration, connaît actuellement une transformation majeure ~~grâce à~~ avec l'arrivée de nouvelles méthodes. Celles-ci ouvrent la voie à une meilleure compréhension du climat et à une amélioration accélérée des modèles. Cette thèse explore les potentialités ~~d'~~ offertes par une de ces méthodes, appelée History Matching with Iterative Refocusing, en l'appliquant au modèle atmosphérique LMDZ ~~,~~ ~~et apporte une réflexion sur sa capacité à aider au développement des modèles~~. Elle explore ~~en particulier~~ la possibilité de contraindre les paramètres du modèle en utilisant les données d'un site d'observation et propose une méthodologie originale pour ~~identifier et comprendre l'impact~~ comprendre et quantifier les erreurs compensatoires découlant d'un processus ~~non modélisé~~ manquant, ici les effets 3D du transfert radiatif, sur la simulation d'autres processus, ici ~~des~~ les nuages.

## Plain Language Summary

*[1000 caractères maximum, n'apparaît pas dans la thèse]*

Climate models, used to understand the climate system and to produce climate projections, include uncertain parameters whose values must be determined. This modelling step, known as adjustment, tuning, or calibration, is currently undergoing a major transformation with the advent of new methods. These approaches pave the way for a better understanding of the climate and for improvements in model performance. This thesis explores the potential of one such method, called History Matching with Iterative Refocusing, by applying it to the atmospheric model LMDZ, and reflects on its ability to support model development. It particularly investigates the possibility of constraining model parameters using data from an observation site and proposes an original methodology to identify and understand the impact of an unmodelled process on the simulation of other processes, in this case, clouds.



# Bibliographie