

# 13. Stratégies d'évaluation des modèles

Frédéric Hourdin

L'évaluation des modèles de climat est un défi à plus d'un titre. D'abord en raison de l'observation elle-même d'un certain nombre de processus clefs mais aussi par la complexité et la variabilité du système climatique. Plus le modèle de climat devient réaliste, plus on prend en compte l'ensemble des processus impliqués, et plus il devient difficile de comprendre cet avatar du système réel.

## Un système difficile à observer

Beaucoup de processus fondamentaux du climat sont difficiles à observer, comme ceux qui se déroulent à l'intérieur des nuages ou au fond des océans. Au-delà de la difficulté de mesurer des propriétés localement, la seconde difficulté majeure est celle de l'échantillonnage. Le système étant variable à toutes les échelles de temps et d'espaces, il faudrait en théorie pouvoir l'observer partout et tout le temps. On est loin du compte.

Les pluies varient par exemple localement jusqu'à de très petites échelles spatiales. Pour avoir une estimation utilisable pour l'évaluation des modèles de précipitations par mesure directe en un endroit particulier de la planète, on déploie des

réseaux de plusieurs dizaines de pluviomètres sur une région de quelques dizaines de kilomètres. On ne peut évidemment pas reproduire cette méthode partout. Une solution permettant un meilleur échantillonnage est d'installer un radar au sol, capable d'observer la pluie sur un rayon d'une centaine de kilomètres autour de sa position. Mais la mesure déduite de l'écho sur les gouttes d'eau est évidemment beaucoup plus indirecte et nécessite des algorithmes faisant certaines hypothèses sur les distributions de taille des gouttes qui doivent, elles-mêmes être validées... Depuis l'espace, différentes mesures de rayonnement permettent également d'obtenir une information sur la pluie, avec une meilleure couverture spatiale, mais encore plus indirecte. Aujourd'hui, c'est un effort énorme de conception et de déploiement d'instruments au sol ou dans l'espace, doublé d'un effort tout aussi considérable pour combiner et inter-calibrer les différentes sources d'informations, qui permet de bénéficier de « climatologies » de précipitations utilisables pour l'évaluation des modèles.

Si, d'une façon générale, les observations satellites permettent d'avoir une meilleure couverture spatiale de la surface du globe, elles produisent des mesures beaucoup plus indirectes des propriétés physiques, qui nécessitent, pour remonter à ces propriétés, des algorithmes d'inversion ou d'as-

simulation compliqués (Cf. III.24). Une alternative consiste à faire voler, autour du climat virtuel du modèle, des satellites tout aussi virtuels : on calcule ce que verrait le satellite s'il observait les profils de température, d'humidité ou de nuages simulés par le modèle. On compare ensuite ces pseudo-observations aux observations réelles (figure 1).

## Analyses globales

Quand des jeux de données suffisamment représentatifs sont établis, il devient possible d'évaluer la capacité du modèle à représenter le climat réel. On considère alors ce modèle comme un « simulateur » du climat réel qui prédit heure après heure et souvent sur plusieurs dizaines ou centaines d'années l'état de l'atmosphère ou de l'océan en tous les points du globe. En un point donné, les champs ne sont pas directement comparables au jour le jour. L'évaluation consiste à vérifier que modèles et observations reproduisent des distributions statistiques équivalentes : même valeur moyenne des précipitations, même amplitude entre vague de froid ou de chaud, même intensité typique des dépressions dans les moyennes latitudes, etc. La validation des simulations climatiques sur les dernières décennies (Cf. IV.14) est un des éléments

importants pour la confiance que l'on peut attribuer aux modèles (Cf. VIII.5).

Cette validation « en bloc » des modèles permet en revanche difficilement de remonter aux causes de leurs défaillances. Il est donc nécessaire de décomposer le problème et de commencer par séparer le modèle complet entre ses différentes composantes. Un modèle d'atmosphère peut ainsi être couplé à un modèle d'océan ou forcé par des températures de surface observées. Un modèle d'océan peut quant à lui être forcé par des variables atmosphériques de surface (flux radiatif, frottement du vent...) observés. Les modèles de chimie atmosphérique peuvent, eux, être couplés à la circulation ou testés avec un transport imposé.

## Validation sur des campagnes

Une grande partie de la complexité de l'évaluation provient de la variabilité de la circulation atmosphérique qui fait qu'observations et

simulations ne peuvent être comparées qu'en termes statistiques. Mais, pour des besoins de validation, on peut contraindre le modèle atmosphérique à « suivre » la « trajectoire » observée : forcer la bonne succession de régimes d'ouest, de dépressions, de situations anticycloniques, etc. Pour ce faire, on force les vents du modèle atmosphérique à suivre jour après jour les observations (Cf. III.24). Le modèle de climat fonctionne presque comme un modèle de prévision du temps. On peut alors évaluer le modèle au jour le jour dans une région d'intérêt ou dans une zone où l'on dispose d'observations particulièrement intéressantes. De telles stratégies sont mises en œuvre dans le cadre de grandes campagnes de terrain comme la campagne AMMA d'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine qui s'est déroulée en 2006 en Afrique de l'Ouest. On concentre sur la même région une quantité très importante d'instruments : mesures de surface, profils verticaux météorologiques (avec des ballons ou des radiosondes), radars pluies, LIDAR (Laser rétrodiffusant), radiomètres, réseaux météorologiques de surface pour échantillonner les pluies, la pression, la température...

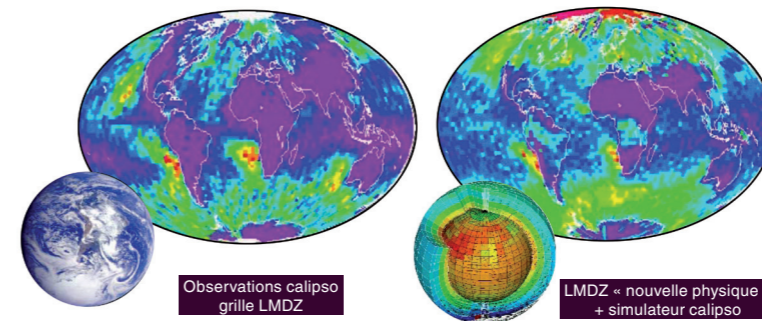
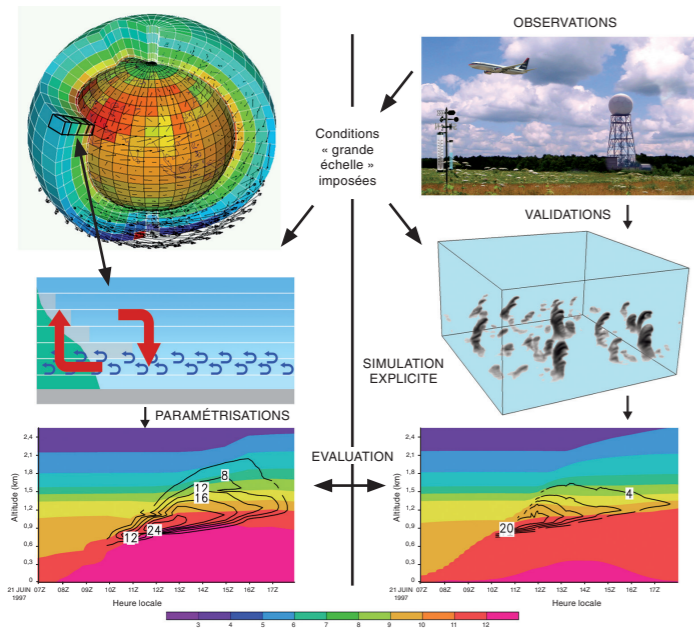


Fig. 1 – Comparaison des couvertures de nuages bas observées par un Laser rétrodiffusion embarqué à bord du tout récent satellite Calipso de la constellation de satellites A-train (Cf. IX.5) et les sorties d'un simulateur du même instrument branché sur les sorties d'un modèle de climat. Cet instrument est un des premiers qui permet d'avoir un accès direct et global à la couverture et aux propriétés de ces nuages bas ■

## Observation et simulations de processus clefs

Même dans ces configurations relativement bien documentées et contraintes, le système reste en général sous-observé, et les processus interagissant entre eux trop nombreux et imbriqués pour pouvoir atteindre directement les informations sur les pièces de notre modèle responsables des défauts observés. On fait alors appel à la « modélisation explicite » qui, grâce à un modèle tri-dimensionnel de maille beaucoup plus fine, permet de représenter explicitement les processus reproduits au travers de « paramétrisations » dans les modèles globaux (Cf. IV.6) et d'effectuer des simulations de références. Avec des mailles kilométriques, on commencera à représenter les gros nuages convectifs, associés aux pluies d'orage. Avec des mailles de 50 m, on commencera à bien résoudre les structures cohérentes de la couche limite turbulente ou les petits cumulus de beau temps. Ces simulations explicites, réalisées sur des domaines de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres, sont validées et ajustées en tirant profit de toutes les observations disponibles. Elles sont ensuite utilisées comme référence pour le développement et l'évaluation des modèles de climat. L'avantage par rapport à une utilisation directe des observations, est que ces modèles nous donnent une vision tri-dimensionnelle complète de toutes les variables, alors que les observations n'en n'ont en général qu'une vue très partielle.

Une autre stratégie d'évaluation consiste à se concentrer sur une situation mettant en avant un processus bien particulier (champ de cumulus, brouillard, naissance d'un orage...), à



**Fig. 2 – Validation des paramétrisations par rapport à des simulations explicites.** Sur le même domaine, on compare des simulations tri-dimensionnelles « explicites » des structures turbulentes et convectives obtenues avec un maillage fin (50-500 m) avec les paramétrisations du modèle de climat mises en œuvre dans une version uni-colonne. A gauche : vision idéalisée servant de base aux paramétrisations. A droite : instantané d'un champ de cumulus prédit par un modèle explicite (modèle MesoNH avec une maille de 50 m). On impose exactement les mêmes forçages grande échelle aux deux modèles. On montre un exemple de comparaison d'évolution de la nébulosité (contours, %) et humidité (couleurs) sur un cas de cycle diurne de la couche limite continentale avec développement de cumulus dans l'après midi obtenu avec les paramétrisations récentes du modèle du LMD (à gauche) et avec la simulation 3D explicite MesoNH (à droite) ■

mener une campagne d'observations ciblées (de quelques heures), à réaliser une simulation explicite avec une maille très fine et enfin, à comparer les résultats obtenus avec les modèles détaillés à ceux des paramétrisations mises en œuvre dans une version dite « unicolonne » du modèle de climat. Dans cette configuration, les apports de chaleur ou d'humidité par les colonnes extérieures ne sont plus calculés par le modèle global mais imposés comme un forçage (Cf. IV.6). On impose exactement les mêmes forçages à la colonne atmosphérique qu'aux bords de la simulation tri-dimensionnelle explicite à maillage serré (figure 2). Cette stratégie permet de décortiquer et de

comprendre les processus à l'œuvre, d'en bâtir une image idéalisée, qui va pouvoir ensuite servir de base aux développements ou à l'amélioration des paramétrisations. Autre avantage de la comparaison à des simulations de référence : on peut varier à loisir les forçages de la simulation explicite et vérifier si la paramétrisation développée répond correctement à ces changements de forçage, élément évidemment essentiel pour le couplage des paramétrisations avec la dynamique de grande échelle représentée au niveau du maillage tri-dimensionnel du modèle global.

Ce jeu à trois bandes, entre campagnes d'observations, simula-

tions explicites et paramétrisations constitue aujourd'hui une pierre d'angle pour l'évaluation et l'amélioration des modèles au niveau de la représentation des processus individuels.

## Exigences croissantes, contraintes nouvelles

On demande aujourd'hui aux modèles de climat de ne pas représenter uniquement les variables météorologiques de base, mais également le couplage du système météorologique avec la composition atmosphérique ou océanique, la végétation, la croissance des feuilles, le stockage de  $\text{CO}_2$ , etc. Ces contraintes nouvelles font évidemment peser un poids croissant sur le réalisme des paramétrisations. Un modèle de convection orageuse ne doit plus être seulement capable de bien représenter le chauffage de l'atmosphère par condensation ou la pluie. Il doit également bien représenter le transport vertical de constituants, le « lessivage » des poussières et espèces chimiques hydrophiles, les éclairs à l'origine d'une part de la chimie atmosphérique...

Il en est de même avec l'utilisation de plus en plus directe des sorties des modèles de climat en entrée des modèles de production agricole, de ressources en eau, etc. Ceux-ci nécessitent que soient bien représentées les précipitations (la pluie moyenne et la distribution statistique jusqu'à des échelles fines), le bilan en eau de surface, l'effet des nuages sur l'ensoleillement... En retour, ces exigences sont porteuses de nouvelles contraintes et de nouvelles possibilités d'évaluation des modèles sur des degrés de libertés pas encore explorés.