9. Estimation de la confiance dans les résultats de simulation

Sandrine Bony

Depuis les premières simulations numériques de changement climatique réalisées dans les années 1970, il est toujours apparu que les modèles s'accordaient sur certains résultats et divergeaient sur d'autres. Aussi, ils réussissent très bien à simuler certains aspects du climat (*e.g.* les principales caractéristiques observées, la plupart des modes de variabilité naturelle, la répartition des températures et la localisation des principales zones pluvieuses ou désertiques, etc.), alors qu'ils montrent plus de difficultés à simuler d'autres aspects (*e.g.* la distribution précise des précipitations à l'échelle régionale, le cycle diurne de la convection atmosphérique sur les continents tropicaux, etc.). Cette ambivalence, centrale dans la question de la confiance accordée aux résultats de modèles et aux projections de changement climatique en particulier, conditionne fortement la façon dont les chercheurs en modélisation du climat travaillent et s'organisent à l'échelle internationale.

Pour tester la dépendance potentielle des simulations climatiques à la formulation des modèles (résolution spatiale, paramétrisations physiques, etc.), les modélisateurs du climat ont toujours eu le souci de réaliser des « tests de sensibilité » des simulations à des paramètres du modèle mal contraints ou à des processus physiques mal connus. En outre, depuis la fin des années 1980, la communauté internationale s'est organisée pour réaliser de façon coordonnée des simulations utilisant les mêmes conditions aux limites et les mêmes forçages extérieurs afin de pouvoir comparer les résultats des différents modèles les uns aux autres et, le cas échéant, de les comparer aux observations en utilisant des diagnostiques communs.

Inter-comparaisons des modèles

Au tout début des exercices internationaux de comparaison de modèles, l'un des espoirs était de déterminer les meilleurs modèles et par la suite de définir les projections climatiques les plus crédibles. Mais la réalité s'est avérée plus compliquée. Tout d'abord, il n'existe pas vraiment de « meilleur » modèle : un modèle peut être excellent dans la simulation de certains aspects du climat et moins bon pour d'autres. Ensuite, la qualité du climat simulé dépend d'une multitude de processus et d'interactions entre ces processus, et par conséquent il est très difficile d'attribuer un défaut ou une qualité du modèle à une paramétrisation physique particulière. Enfin, il n'existe pas de relation simple entre la capacité d'un modèle à reproduire certains aspects du climat observé et l'évolution du climat prédite par ce modèle : ainsi deux modèles simulant de façon également réaliste les caractéristiques moyennes du climat présent peuvent simuler des projections climatiques très différentes.

Malgré cela, les exercices d'inter-comparaison de modèles tels que le projet « CMIP » (Coupled Models Intercomparison Project) du Programme Mondial de Recherches sur le Climat, s'avèrent très utiles. Ils permettent d'abord de *coordonner* la communauté internationale en modélisation climatique. Plus récemment, l'archivage dans une base de données commune et librement accessible des résultats de simulation de l'ensemble des modèles climatiques développés de part le monde a donné un élan et une étendue extraordinaire aux activités d'évaluation et d'analyse. Les modèles ne sont plus seulement évalués par ceux qui les ont développés mais aussi par des milliers de personnes extérieures, en particulier des non-modélisateurs, spécialisés dans l'étude de tel ou tel aspect du système climatique ou dans l'utilisation des simulations climatiques pour divers domaines d'application. Enfin, la comparaison les unes aux autres des différentes simulations de modèles aide à distinguer la part des résultats commune à chacun des modèles – qui semble donc la plus robuste –, de la part des résultats qui varie d'un modèle à l'autre et est donc plus incertaine.

Robustesse des résultats

L'analyse et l'interprétation de la dispersion des résultats entre les modèles constituent un enjeu important : elles permettent de quantifier une partie des incertitudes associées aux résultats de simulation climatique et de déterminer les limites de notre confiance dans les différents résultats, et leurs conditions d'utilisation. Surtout, elles concentrent l'essentiel du travail des chercheurs, car c'est en identifiant l'origine de cette dispersion que l'on peut mettre le doigt sur les processus physiques représentés de la façon la plus incertaine dans les modèles, ou que l'on peut définir des stratégies de développement et d'évaluation des modèles.

S'agissant de projections climatiques par exemple, les modèles s'accordent tous sur le fait qu'une augmentation du CO_2 dans l'atmosphère induit un réchauffement global du climat, plus important dans les régions polaires qu'aux basses latitudes et plus fort au-dessus des continents qu'au-dessus des océans. Il est également accompagné d'un refroidissement de la stratosphère, d'une augmentation du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère, des changements dans l'intensité et la position des maxima et des minima de précipitation, etc. En revanche, certains aspects des projections diffèrent largement entre les modèles : l'amplitude du réchauffement global, la réponse des nuages, la position précise des changements régionaux de précipitation et la réponse des moussons (figure 1), la modification du nombre et de l'intensité des tempêtes et des cyclones tropicaux, etc.

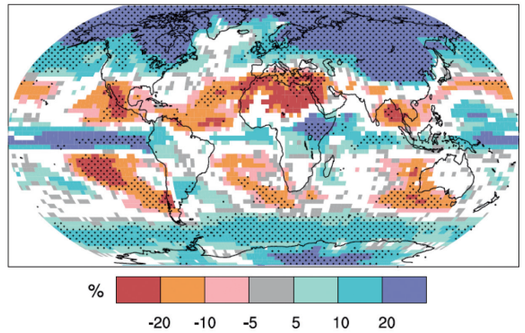

Fig. 1 – **Changements relatifs (en %) de la précipitation pour l'hiver boréal de la période 2090-2099 par rapport à la période 1980-1999.** Les couleurs indiquent la moyenne des résultats de modèles ayant participé aux expériences d'inter-comparaison CMIP. Les zones blanches indiquent les zones où moins de 66 % des modèles s'accordent sur le signe des changements, et les pointillés les zones où plus de 90 % des modèles s'accordent sur le signe des changements simulés. Source : GIEC 2007 ■

La reproductibilité d'un résultat par différents modèles ne suffit pas nécessairement à le rendre crédible.. Il peut en effet traduire un comportement erroné de l'ensemble des modèles, ou l'absence dans tous les modèles d'un processus critique. En fait, un résultat robuste est considéré comme d'autant plus crédible qu'il est cohérent avec les observations disponibles, qu'il peut s'interpréter physiquement, et qu'il peut se retrouver dans une hiérarchie de modèles de complexités différentes. Par exemple, l'amplification des changements de température par les variations de vapeur d'eau est considérée comme un résultat robuste et crédible des modèles car elle s'explique bien au premier ordre par la relation thermodynamique de Clausius-Clapeyron et par les théories fondamentales du transfert radiatif dans l'atmosphère. Elle dépend également peu des paramètres les plus incertains des modèles, elle est cohérente avec les variations de vapeur d'eau et de température observées sur une vaste gamme d'échelle de temps et elle est prédite par toute une hiérarchie de modèles allant des modèles simples conceptuels ou théoriques aux modèles méso-échelle très complexes. En particulier, l'expérience montre qu'un résultat est d'autant plus robuste qu'il est contraint par des mécanismes physiques tellement fondamentaux ou de tellement grande échelle (conservation de l'énergie ou lois de la thermodynamique) que les modèles les reproduisent nécessairement. Cependant, même si au premier ordre ce résultat est robuste et crédible, les recherches continuent pour savoir dans quelle mesure le deuxième ordre de cette rétroaction est correctement simulé par les modèles, et s'il peut être affecté par des processus physiques non encore représentés dans les modèles climatiques.

Incertitudes des projections climatiques

La dispersion inter-modèles des projections climatiques a différentes origines et la contribution relative de chacune d'entre elles dépend des échelles spatiales et temporelles considérées. Deux facteurs principaux contribuent à la dispersion : la formulation des modèles (en particulier la représentation des processus physiques) et la variabilité naturelle

du climat simulée par chacun des modèles (qui module géographiquement et temporellement les anomalies climatiques, mais de façon non synchronisée entre les différents modèles). S'agissant de projections climatiques à l'échelle de la fin du siècle, une autre cause de dispersion des résultats est l'incertitude sur les scénarios d'évolution des gaz à effet de serre.

Etant donné le grand nombre de processus physiques pouvant a priori contribuer à la dispersion des projections climatiques, il importe d'identifier et de hiérarchiser le rôle effectif de ces différents processus. Cela requiert l'analyse détaillée des simulations au travers de méthodologies spécialement développées pour discriminer ou mettre en évidence l'effet de certains processus (figure 2). Cela peut requérir aussi l'analyse de la dispersion du même ensemble de modèles pour des simulations réalisées dans des configurations plus simples (telles que les aqua-planètes) ou des expériences de sensibilité à des perturbations idéalisées. C'est ainsi que le rôle critique des interactions entre nuages et rayonnement sur la sensibilité climatique a été mis en évidence à la fin des années 1980.

La compréhension d'un résultat de simulation en termes de processus physiques aide considérablement à estimer sa crédibilité : s'il dépend de processus mal compris ou de paramètres mal contraints, notre confiance dans ce résultat sera moindre que dans le cas où un résultat de simulation résulte en premier lieu de lois physiques simples ou de processus évalués de manière rigoureuse et approfondie dans les modèles. L'analyse physique des résultats de simulation constitue donc une composante fondamentale des activités de modélisation du climat.

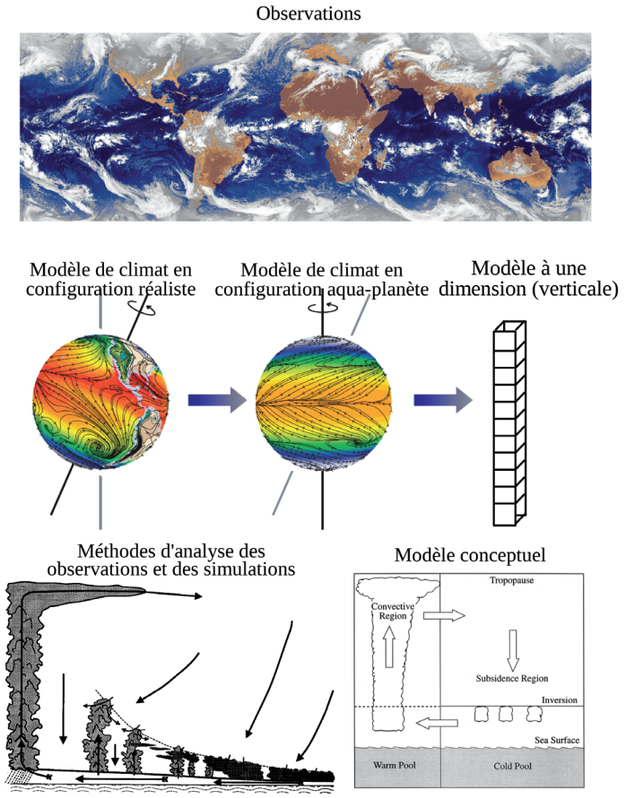

Fig. 2 – **Différentes approches utilisées pour comprendre les résultats de simulation climatique et estimer la confiance dans ces résultats :** l'analyse d'observations, l'analyse des résultats de simulation au travers d'une hierarchie de modèles utilisant la même physique mais dans des configurations plus ou moins idéalisées, l'utilisation de méthodologies d'analyse des observations et des simulations permettant de mieux discriminer le rôle des différents processus physiques et hierarchiser les sources de dispersion inter-modèles, l'utilisation de modèles conceptuels ou théoriques pour interpréter les résultats de modèles ■

Conclusion

Les incertitudes quant à la dispersion des résultats de modèles n'ont rien de tabou dans la communauté des modélisateurs. Au contraire, elles font l'objet d'un grand nombre de travaux de recherche et motivent un développement continu des modèles. Elles sont révélatrices de l'état de nos connaissances en matière de processus physiques et de leur représentation numérique à une échelle compatible avec les possibilités de calcul disponibles.

Il importe cependant de réaliser que la présence d'incertitudes sur certains résultats n'a rien d'incompatible avec notre confiance dans d'autres résultats. En effet les résultats de modélisation ressemblent davantage à un puzzle qu'à un château de cartes : le fait d'avoir des incertitudes sur la position de telle ou telle pièce n'empêche pas d'être confiant sur la position des autres pièces, du fait notamment de la cohérence de leur position par rapport à de nombreuses pièces adjacentes et au motif d'ensemble.