

Le « pari » de l'amélioration des paramétrisations dans les modèles de climat

Pratiques, débats et visions de modélisateurs

Hélène Guillemot, Centre Alexandre Koyré (CNRS – EHESS)

Introduction¹

Comment améliorer les prévisions du climat futur et accroître la confiance que nous leur accordons ? Comment faire évoluer les modèles numériques, instruments essentiels des sciences du climat et uniques outils de prévision des futurs changements climatiques ? Le principal moteur de la modélisation du climat semble être la croissance exponentielle de la puissance des ordinateurs : on parle désormais de « modèles de système Terre » incluant toujours plus de milieux, de composantes physiques, chimiques et biologiques, avec une résolution spatiale croissante, dans le but, en particulier, de fournir des prévisions fiables du changement climatique à échelle régionale. Cependant, ces tendances ne sont pas hégémoniques, et dans la communauté des sciences du climat, les débats font rage sur les stratégies de développement des modèles.

En effet, malgré des progrès importants des moyens de calcul et d'observation ainsi que de l'organisation et des méthodes de recherche en modélisation, les prévisions du changement climatique semblent progresser moins vite que la puissance des ordinateurs. Les climatologues savent depuis longtemps que les défauts et les incertitudes des simulations sont principalement imputables aux représentations de processus physiques tels que les nuages ou la convection dans les modèles. Ces paramétrisations sont donc au cœur de débats animés : sont-elles dans une impasse (Randall et al. 2003) ? Pourquoi le développement des modèles ne se traduit-il pas par de meilleures prévisions ?²

Dans ce chapitre, on retracera l'élaboration d'une nouvelle paramétrisation – la représentation de la convection et des nuages - au cœur du modèle du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) du CNRS à Paris, ce qui nous permettra de mettre en évidence les pratiques, les choix et les points de vue des chercheurs de ce groupe sur le développement des modèles, mais aussi d'évoquer les stratégies d'autres groupes de modélisation. On verra que ces différentes approches, qui s'enracinent dans des pratiques et des institutions différentes, mettent en jeu des conceptions variées des modèles, de leurs rôles, de leurs usages et de leurs limites.

La première partie de ce chapitre porte sur le développement de la nouvelle paramétrisation du modèle de climat du LMD : après avoir rappelé la structure duale de ces modèles, on retrace les étapes successives du développement de la nouvelle paramétrisation du LMD – conception, construction et validation à l'aide de modèles à haute résolution, implémentation dans le modèle - en insistant sur les collaborations scientifiques et les changements de vision des processus climatiques qui en résultent. Dans la deuxième section, on revient sur les choix impliqués dans ce travail de paramétrisation, les débats dans lesquels il s'inscrit, et sur les stratégies différentes mises en œuvre par d'autres groupes de modélisation. La troisième section ouvrira plus largement sur les visions de la modélisation qui président à ces pratiques, en particulier sur le rôle de la « compréhension physique » revendiqué par ces chercheurs, sur son articulation avec la prévision du changement climatique, et sur les cultures et statuts institutionnels liés à cette conception de la modélisation.

I- Refonte d'une paramétrisation au cœur du modèle

En 2011, après plus de dix ans de travail, la nouvelle paramétrisation mise au point par les chercheurs du LMD (Hourdin *et al.* 2012) a été implantée dans leur modèle d'atmosphère, LMDZ³. Ainsi munie d'une « nouvelle physique », la nouvelle version de LMDZ a été prête à temps pour participer (aux côtés de l'ancienne version) à la 5^{ème} phase du projet d'intercomparaison des modèles couplés CMIP5 - donc au dernier rapport de l'IPCC. Le projet CMIP coordonne au niveau mondial les simulations des modèles de climat, dont les résultats sont synthétisés dans les rapports de l'IPCC : le 5^{ème} rapport du Working Group 1 de l'IPCC sur les observations et les prévisions du changement climatique, rendu à l'automne 2013, se base sur les simulations CMIP5 réalisées par une vingtaine de groupes de modélisation dans le monde. En France, deux centres de recherche développent des modèles de climat : l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) à Paris, dont fait partie le LMD pour la partie

¹ Ce travail est financé par le projet ANR ClimaConf.

² Il faut préciser le sens des mots « modèle » et « simulation » dans ce texte, car ces termes prennent des significations différentes selon les langues et les communautés scientifiques. Suivant l'usage chez les modélisateurs du climat, modèle désigne un programme destiné à tourner sur un ordinateur en calculant des algorithmes pas à pas (on parlera par exemple du modèle du LMD). Simulation désigne le résultat du calcul réalisé au moyen de ce modèle (par exemple, une simulation du climat du XXI^e siècle avec le modèle de Météo-France).

³ Le Z de LMDZ signifie zoom, car ce modèle permet de raffiner le maillage sur une région du globe.

atmosphérique du Earth System Model ; et le Centre National de Recherche Météorologique (CNRM) de Météo-France, l'organisme français de prévision du temps basé à Toulouse.

I-1- La structure duale des modèles de climat

Pour saisir les enjeux de la nouvelle paramétrisation physique du LMD, il faut rappeler la place des paramétrisations dans les modèles de climat.

Les modèles atmosphériques – qu'ils soient des modèles de climat ou des modèles pour la prévision météorologique – simulent l'écoulement de l'atmosphère représentée par un maillage à trois dimensions ; c'est pourquoi on les a appelés modèles de circulation générale (Global Circulation Model - GCM). L'ordinateur calcule, pour chaque maille et à chaque pas de temps, la valeur des variables caractérisant l'état atmosphérique moyen dans la maille (température, vent, humidité), à partir de leurs valeurs au pas de temps précédent, en résolvant les algorithmes constituant les modèles. Les modèles atmosphériques sont organisés en deux parties : une partie dite « dynamique » décrivant les mouvements des masses d'air à l'échelle des mailles avec des algorithmes qui discrétisent les lois de la dynamique des fluides (équations de Navier-Stokes) ; et une partie dite « physique » qui traite des différents processus influant sur le temps ou le climat (convection, rayonnement, écoulement de l'eau dans le sol...) qui se produisent à des échelles variées mais inférieures à la maille des modèles (une maille horizontale de modèle de climat mesure une centaine de kilomètre). Ces processus ne sont donc pas calculés *explicitement*, contrairement à la dynamique, mais sont représentés par des « paramétrisations » qui calculent à l'échelle de la maille leur impact *statistique* sur les variables du modèle. La partie dynamique reproduit les mouvements horizontaux de l'atmosphère, tandis que la partie physique peut être vue comme une juxtaposition de colonnes d'atmosphère indépendantes. En pratique, les équations de la partie dynamique comportent des « termes sources » déterminés, à chaque pas de temps et pour chaque maille, par les paramétrisations physiques.

La dynamique atmosphérique représente un système (l'atmosphère globale) qui fonctionne comme un tout et obéit à des lois fondamentales à grande échelle (conservation de l'énergie, de la masse, de l'eau...). Avec les paramétrisations, en revanche, d'autres théories et d'autres formalismes sont incorporés dans les modèles de climat. Véritables petits modèles dans le modèle, avec leurs propres variables internes et leurs propres équations, les paramétrisations sont extrêmement diverses : certaines sont plus ou moins directement issues de théories physiques (par exemple pour les échanges de rayonnement), d'autres sont des représentations plus empiriques ou phénoménologiques (pour les écosystèmes végétaux par exemple). Ainsi, les GCM exploitent toutes les possibilités offertes par les ordinateurs : les capacités de calcul (les algorithmes tirés de la dynamique des fluides, non linéaires, ne peuvent donc pas être résolus analytiquement et sont calculés pas à pas), le traitement de quantités phénoménales de données, et aussi la faculté d'établir des liens, des « zones d'échange » (*trading zone*) entre domaines scientifiques différents (Galison 1996), en faisant évoluer ensemble, interagir et rétroagir des « *bodies of knowledge of increasing epistemic complexity and heterogeneity* » (Grameslberger 2010).

Les modèles de climat (ou de temps) reposent donc sur un découplage entre les phénomènes à grande échelle et ceux de petite échelle, dont l'effet doit pouvoir être représenté statistiquement. Dans la réalité, cependant, ce découplage n'est pas parfait ; en outre la dualité entre échelle globale et échelle des processus ne doit pas être essentialisée : considérer seulement deux niveaux de description des phénomènes résulte d'une convention commode. Reste que cette dualité structure profondément la modélisation du climat ; elle subsiste depuis ses débuts, alors que les modèles ont considérablement évolué en taille et en complexité⁴.

Au cours de leur demi-siècle d'histoire, les modèles de climat ont été développés à la fois en améliorant les représentations des processus climatiques essentiels et en intégrant de nouvelles composantes pour prendre en compte davantage de milieux et de phénomènes. Les paramétrisations principales, présentes dès les premiers modèles, concernent les échanges de rayonnement, la « couche limite » (couche d'air en contact avec la surface), la convection, les nuages et les précipitations, et enfin les interactions avec les surfaces. Ces paramétrisations jouent un rôle majeur : toutes les composantes du climat dépendent d'elles, et elles influent directement sur les impacts du changement climatique (via les changements de précipitations notamment). En outre, ces paramétrisations sont reconnues comme les principales sources d'incertitude des projections du climat futur. Les modèles de climat ont en effet des sensibilités⁵ différentes à l'accroissement de gaz à effet de serre, et la plus grande part de cette dispersion est imputable aux rétroactions des nuages : les processus impliqués dans ces rétroactions nuageuses sont complexes, mal compris et représentés différemment selon les modèles, ce qui conduit à de grandes différences dans les réponses des nuages au réchauffement.

⁴ C'est en raison du découplage entre ces deux échelles, la grande échelle et celle des processus, que la résolution spatiale des modèles n'a pas beaucoup augmenté au cours des années – elle est restée de l'ordre de quelques centaines de kilomètres : l'accroissement considérable de puissance des ordinateurs a été utilisé pour augmenter la durée des simulations, le nombre de processus représentés ou le raffinement des paramétrisations.

⁵ On appelle sensibilité du climat la hausse de température moyenne de la surface du globe résultant d'un doublement du taux de CO₂ atmosphérique

De façon générale, améliorer des paramétrisations consiste à remplacer des paramètres fixés ou ajustés par des sous-modèles de processus physiques (qui évidemment comportent aussi des paramètres empiriques ou ajustés, à un niveau plus profond). Par exemple la convection, qui joue un rôle essentiel de transport d'énergie et de stabilisation de l'atmosphère, a été représentée dans les premiers modèles de climat comme un ajustement des équilibres à grande échelle, transportant l'énergie et l'humidité vers les hautes couches atmosphériques et éliminant l'eau (au-delà d'un seuil de saturation) par condensation et précipitation. Puis elle a été décrite en représentant ses mécanismes et ses interactions avec d'autres processus. De même, les premiers modèles n'avaient pas de nuages, puis la couverture nuageuse a été imposée, avant d'être calculée plus finement dans les paramétrisations.

I-2- Représenter les turbulences de surface, les cumulus de beau temps et les orages tropicaux

Plutôt qu'une nouvelle paramétrisation, c'est un nouveau « bloc » de paramétrisations qui a été développé et récemment implanté dans le modèle du LMD. Sont en effet maintenant regroupés la représentation de la turbulence dans la couche limite (jusqu'à 10 à 100 m d'altitude), la convection à haute altitude avec ses énormes cumulus d'orages, appelée convection profonde (10 à 20 km), mais aussi un phénomène d'échelle intermédiaire jusqu'alors non décrit : les mouvements atmosphériques dans la couche limite organisés en cellules convectives (1 à 3 km de hauteur), « panaches thermiques » qui produisent les petits cumulus de beau temps.

La « nouvelle physique » comporte aussi d'autres nouveautés : la formulation des turbulences est remaniée, et surtout la représentation de la convection profonde a été profondément modifiée. La décision de changer cette paramétrisation a été motivée par un défaut récurrent du modèle du LMD (et de la plupart des GCM): le décalage des précipitations dans les Tropiques. Dans les modèles, les pluies se déclenchaient à midi, alors qu'elles tombent préférentiellement l'après midi dans le monde réel – un grave biais, révélateur d'une mauvaise représentation du phénomène et qui rejaillit sur le bilan d'énergie dans les Tropiques. Le chercheur du LMD, L1⁶, qui travaille sur la convection tropicale a compris l'origine de ce défaut il y a près de quinze ans, en discutant avec un collègue du CNRM de Météo France, M1, spécialiste de l'étude des nuages à petite échelle : ce décalage est dû à des phénomènes internes aux nuages, déjà observés et étudiés par les scientifiques des climats tropicaux mais non pris en compte dans les modèles globaux. Pour le décrire en quelques mots : de grosses poches d'air froid sont engendrés sous les cumulonimbus par la ré-évaporation des précipitations ; ces poches, en soulevant l'air à l'avant du front des orages, créent des « courants de densité » qui déclenchent et alimentent la convection, ce qui entretient les poches froides etc. La nouvelle paramétrisation décrit le déclenchement, l'intensité, l'entretien de la convection et son organisation spatiale à moyenne échelle, en introduisant deux nouvelles variables liées à la couche limite.

La « nouvelle physique » est le fruit de plus de dix ans de travail à la fois individuel, collaboratif et collectif. Travail de conceptualisation d'abord : les paramétrisations ne représentent pas la totalité des processus, mais seulement ceux dont les scientifiques considèrent qu'ils jouent un rôle important – par exemple ici les poches froides et les panaches thermiques. Il s'agit de concevoir une représentation idéalisée de la phénoménologie des processus et de mettre en équations ces mécanismes⁷, ainsi que leurs interactions (quelles caractéristiques de la couche limite jouent sur la convection profonde, comment se couplent les différents types de nuages). Il faut aussi relier cette paramétrisation à la dynamique de grande échelle (ce qu'on appelle « fermeture ») - étape cruciale et l'une des principales difficultés selon les modélisateurs.

Alors que les paramétrisations physiques ont longtemps été basées sur des équilibres thermodynamique globaux, la Nouvelle Physique est fondée sur des études détaillées de véritables processus physiques :

« Ce couplage entre les poches froides (engendrées par la convection) et la convection (déclenchée à son tour et alimentée par les poches froides) permet pour la première fois d'obtenir un cycle de la convection qui a une vie autonome et n'est pas directement asservi aux conditions de grande échelle » (Hourdin et al. 2012).

Pour ce « changement de paradigme dans le développement des paramétrisations » (Jakob 2010), les collaborations entre les communautés du climat et celles des processus climatiques ont joué un rôle important.

I-3- Collaborations entre modélisation à grande et à petite échelle

Le développement de la nouvelle physique a mobilisé plusieurs chercheurs du LMD - et suscité plusieurs thèses - et il s'est aussi largement appuyé sur une collaboration avec les chercheurs du CNRM de Météo-France qui étudient les processus nuageux en développant et utilisant des modèles atmosphériques à haute résolution.

⁶ Dans ce texte, les acteurs sont identifiés par une lettre signalant leur institution (L pour LMD, M pour le CNRM de Météo-France) suivie d'un numéro

⁷ Le chercheur du LMD L1 explique ainsi qu' « il s'agissait de mettre en équation ce qu'il y avait dans la tête de M1 » (le collègue de Météo-France spécialiste des processus nuageux).

La modélisation numérique détaillée des nuages et de la convection a pris un essor considérable dans les années 1980. Ces modèles à aires limitées calculent à partir des équations de la dynamique les mouvements verticaux de convection dans les nuages, qui sont paramétrisés dans les GCM⁸. On en distingue deux types: les « Cloud Resolving Models » (CRM - mailles de l'ordre du kilomètre, domaine de 100 à 1000 km de large) et les « Large Eddy Simulations » (LES - mailles de 10 à 100 m, domaine de 10 à 200 km de large). Météo-France a ainsi développé un modèle appelé Méso-NH dont la résolution peut aller de quelques mètres au kilomètre, outil utilisé par de nombreuses communautés de recherche. Des modèles de ce type ont permis d'étudier et de simuler toutes les catégories de nuages dans de nombreux types de climats, ainsi que leur organisation collective à plus grande échelle (lignes de grain, tempêtes...).

A partir des années 1990, on a cherché à faire bénéficier les modèles globaux, de prévision du temps mais aussi de climat, des connaissances acquises par la modélisation détaillée des nuages et de la convection. Les programmes EUROCS (European Project On Cloud Systems) et GCSS (GEWEX Cloud System Study), lancé en 1992 par le World Climate Research Programme (WCRP)⁹ visent à susciter des collaborations entre scientifiques des modèles globaux et des modèles détaillés, autour des données d'observation issues de satellites et de campagnes de terrain. Depuis 40 ans¹⁰ sont en effet organisées d'énormes expériences en plein air, mobilisant souvent plusieurs équipes internationales et des instruments transportés par bateaux, avions, ballons et satellites, afin d'observer de la façon la plus complète possible, pendant quelques jours ou semaines, un processus atmosphérique particulier (tempêtes dans l'Atlantique, orages de mousson en Afrique de l'ouest etc.). Les données issues de ces campagnes sont utilisées comme cas d'étude pour la modélisation détaillée des processus, et les programmes GCSS et EUROCS ont pour objectif de les utiliser également pour améliorer la paramétrisation des nuages dans les GCM.

Le changement de paramétrisation du LMD s'inscrit dans cette dynamique mondiale. Cependant, passer d'études locales au développement d'une paramétrisation par définition globale soulève des difficultés fondamentales. L1 raconte qu'il avait été fortement impressionné par la présentation, par une « star » de la modélisation des processus nuageux, d'une simulation à haute résolution, lors d'une conférence en 2010. Sur l'écran défilait en animation la convection et les orages tropicaux simulés pendant 24 heures dans une « boîte » de 200 km de large avec une résolution de 100 m.

« C'était le silence, tout le monde était épaté. On voyait plein de petits courants de densité qui se rencontraient, qui s'emboîtaient sur les continents, dans les lignes de grain, qui fusionnaient, collisionnaient et grouillaient sur les océans... »

Conclusion de l'orateur quant à la possibilité de représenter ceci par une paramétrisation: « ce n'est pas réalisable » ! Les modélisateurs du LMD ont pourtant tenté de réaliser cette paramétrisation, c'est à dire de relever le défi de passer d'une simulation d'une journée à petite échelle à une vision grande échelle, comme l'explique L1 :

« Une paramétrisation doit valoir pour le monde entier. On part du principe que tous les orages du monde ont des courants de densité (...) Il faut plaquer une vision moyenne sur les simulations explicites, décrire statistiquement des populations de poches froides et de courants de densité »

Les climatologues ont recours aux modèles à haute résolution pour la conceptualisation de la paramétrisation, mais aussi pour sa validation, suivant une méthodologie maintenant bien éprouvée. Résumons rapidement le principe de cette méthode. On choisit des études de cas représentatives de différents aspects du phénomène à paramétriser ; par exemple une campagne qui permet d'étudier la convection au dessus des océans, une autre qui observe les lignes de grain etc. Pour chaque étude de cas, on réalise une simulation avec un CRM de résolution 10 km (ou avec un modèle plus détaillé pour paramétriser la couche limite). Par exemple une de ces études de cas choisie parce que typique de la convection dans les régions arides, est une journée d'orage dans la région de Niamey (Niger), le 6 juillet 2006, observée en détail dans le cadre de la campagne internationale AMMA¹¹. La simulation à haute résolution de ce cas est initialisée et validée par les mesures de terrain, puis on utilise cette simulation finement ajustée comme référence pour tester la paramétrisation. Pour cela, cette paramétrisation est incorporée dans une version 1D du modèle (dite « uni-colonne »), constituée d'une seule maille horizontale avec toutes les couches verticales superposées. Les échanges avec l'extérieur fournis comme

⁸ Les modèles globaux sont fondés sur « l'approximation hydrostatique », c'est-à-dire qu'ils négligent l'accélération verticale des masses d'air et ne calculent pas les mouvements de convection, qui sont paramétrisés. Les modèles à haute résolution, dits non hydrostatiques, prennent en compte les variations de pression dans la dimension verticale et calculent explicitement la convection.

⁹ GCSS est un sous-programme de GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment), l'un des principaux programmes de recherche du WCRP – organisme essentiel dans la stratégie et l'organisation de la recherche sur le climat à l'échelle mondiale.

¹⁰ La première grande expérience internationale de terrain est GATE (GARP Atlantic Experiment), conduite en 1974 dans le sud de l'océan Atlantique pour étudier l'atmosphère tropicale, dans le cadre du projet GARP (Global Atmospheric Research Program), lancé en 1967, programme international de recherche sur le climat qui a précédé le WCRP.

¹¹ AMMA est un programme international qui étudie la mousson ouest-africaine, sa variabilité et ses liens avec les aspects socio-économiques

« forçages » (chaleur, humidité...) sont les mêmes pour le modèle colonne et pour la simulation détaillée, et l'on peut ainsi comparer la simulation issue de la paramétrisation et la simulation à haute résolution.

Dans cette méthodologie, les modèles détaillés servent d'intermédiaire entre les données de terrain et la paramétrisation : ils fournissent des jeux de variables complets et homogènes, plus faciles à comparer que les observations directes, éparées et lacunaires. D'autre part un modèle uni-colonne est beaucoup moins lourd à utiliser qu'un GCM tout en contenant toute la physique, ce qui permet aisément de varier les forçages pour tester la paramétrisation sur plusieurs cas, car « pour être qualifié pour la modélisation 3D, une paramétrisation doit être valide à la fois sur les océans et sur les continents, des pôles à l'équateur, sur les déserts et sur les zones humides » (Hourdin et al. 2012). Après avoir testé la paramétrisation dans plusieurs cas 1D représentant des conditions différentes, on l'évalue avec le modèle entier (on peut aussi valider la paramétrisation en mode « prévision du temps » en la comparant avec des observations météo). Cette méthodologie est aujourd'hui devenue systématique pour le développement de paramétrisations.

I-4- Les bouleversements d'une nouvelle paramétrisation

La dernière étape est l'implémentation dans le modèle, et c'est aussi l'une des plus difficiles. Les paramétrisations développées dans le cadre d'études de processus ont souvent engendré de mauvaises simulations climatiques dans un premier temps. Ceci s'explique par les « compensations d'erreurs » : même si la paramétrisation antérieure était moins bonne, ses défauts étaient compensés par les erreurs des autres paramétrisations, pour engendrer un climat correct en apparence. Quand on modifie un paramètre, on change cet agencement en mettant en jeu de nouvelles rétroactions. Cette interdépendance des paramétrisations met en évidence le caractère « communautaire » du modèle. Comme l'explique un climatologue de Météo-France (M2), bien que résultant de conceptions individuelles, les paramétrisations « développent des comportements collectifs » qui contribuent à faire du modèle « l'expertise d'un groupe ».

Il est donc essentiel que les différentes paramétrisations d'un modèle soient cohérentes, correspondent à des découpages et à des représentations des processus bien harmonisés. C'est pourquoi le développement d'une nouvelle paramétrisation requiert, après le travail de conception, une longue phase de mise au point et de réglages (*tuning*). Une partie de ce travail est réalisé en testant la paramétrisation dans un modèle unicolonne, qui contient aussi les autres paramétrisations. Mais en lâchant la paramétrisation dans un modèle 3D complet, de nouveaux défauts apparaissent et d'autres réglages sont nécessaires.

Quel changement dans les simulations a finalement produit la nouvelle paramétrisation du modèle du LMD ? Quelles sont les différences par rapport à l'ancienne paramétrisation ? Les changements sont importants, ce qui n'est pas surprenant car les processus représentés affectent tous les aspects du climat et interviennent dans la circulation à grande échelle comme dans toutes les paramétrisations. On observe des améliorations, mais aussi quelques détériorations. La « nouvelle physique » améliore nettement les aspects sur lesquels ont porté les efforts, en particulier la représentation des nuages de couche limite et la variabilité des précipitations (auparavant bien trop faible) ; et le cycle des précipitations tropicales n'est plus décalé. En revanche, le modèle nouvelle version présente les défauts communs à la plupart des modèles couplés océan-atmosphère, et parfois même amplifie ces biais : décalage de zones de pluies, circulation océanique mal reproduite.

Un résultat intéressant est que la nouvelle et l'ancienne physiques engendrent des sensibilités tout-à-fait différentes à l'accroissement de CO₂. Alors que le modèle du LMD version standard a une sensibilité élevée (par rapport à la moyenne des GCM couplés), avec le nouvelle physique la sensibilité devient parmi les plus basses... Cette différence doit être interprétée en détail ; mais elle ne surprend pas a priori puisque la nouvelle paramétrisation modifie beaucoup la représentation des nuages bas, dont on sait qu'ils jouent un rôle important dans la sensibilité climatique.

II- Débats sur l'évolution de la modélisation du climat

La nouvelle paramétrisation représente une évolution majeure pour le modèle du LMD et même, aux dires de l'un de ses concepteurs (L2), « une modification radicale de la vision des processus sous-jacents ». Mais l'amélioration des paramétrisations centrales n'est pas la seule voie de développement des modèles envisagée aujourd'hui. Il existe un important débat sur le développement des modèles dans la communauté des modélisateurs du climat : de plusieurs workshops et colloques ont été organisés à ce sujet, notamment par le WCRP ; des articles ont été publiés, par des chercheurs ou des groupes désireux de faire avancer leurs visions de l'évolution souhaitable de la modélisation du climat.

II-1- Rareté des nouvelles paramétrisations

Malgré d'important progrès des modèles, la fourchette d'incertitude sur la sensibilité du climat ne s'est pas réduite depuis les premiers rapports GIEC (1,5 à 4,5 degrés), et les principaux défauts des modèles ne montrent guère d'évolution entre les derniers exercices d'intercomparaison CMIP3 et CMIP5. Les climatologues savent que la plupart de ces défauts peuvent être attribués à la mauvaise représentation des processus sous-grille, des nuages et de la convection en particulier. Pour ne prendre qu'un exemple, on sait très mal simuler les précipitations dans les régions tropicales et leur évolution dans un climat plus chaud, ce qui constitue un problème majeur pour les prévisions du changement climatique.

Pourquoi ces biais persistants ? Les évolutions des sciences du climat semblent pourtant favoriser développement des paramétrisations physiques. Durant les décennies 1990 et 2000, l'amélioration de ces paramétrisations du cœur des modèles a été un peu délaissée au profit de la complexification des modèles et du couplage avec d'autres composantes du système Terre (glace de mer, végétation, chimie atmosphérique, etc.) (Dahan 2010)¹². Certains ont critiqué cette « sur-représentation de nouvelles composantes qui accroissent la complexité, bien souvent sans traiter les problèmes importants ou anciens » (Jakob *et al.* 2010). Plusieurs modélisateurs du LMD regrettaient aussi cette tendance. Ainsi qu'explique un chercheur du LMD (L3) :

C'est difficile de justifier de travailler sur de vieilles questions. Si tu n'aboutis pas, il faut changer de sujet. Donc il faut définir de nouvelles niches en permanence. Et puis quand un problème est nouveau, le système est mal contraint au départ, on a des réponses fortes ; donc ça donne des papiers plus faciles à faire....

Mais depuis quelques années, il y a une « prise de conscience » croissante du besoin d'améliorer le cœur des modèles. « Au niveau du WCRP en tout cas, c'est un message qu'on a essayé de faire passer, et qui commence à passer » dit une chercheuse du LMD (L4). Les paramétrisations physiques centrales, des nuages et de la convection en particulier, sont considérées comme particulièrement critiques pour la qualité des simulations - donc pour la recherche sur les impacts du changement climatique. Les paramétrisations plus « périphériques » (celles de la végétation, par exemple) dépendent elles aussi de la qualité des représentations des processus centraux.

Autre circonstance favorable à l'amélioration des paramétrisations: on dispose aujourd'hui d'une gamme d'observations sans précédent – grâce à la fois aux réseaux au sol, aux satellites (avec des combinaisons détection active et passive qui mesurent des propriétés des nuages inaccessibles jusqu'ici) et aux campagnes de terrain, au point qu'on parle d'un « âge d'or » des observations. Et pourtant, malgré ces conditions apparemment favorables et cette forte demande d'amélioration des paramétrisations, les refontes des paramétrisations du cœur du modèle – comme la nouvelle physique du LMD – restent relativement rares. En fait, ces nouvelles observations et ces programmes de recherche ont fait progresser la compréhension des processus, mais ils se sont assez rarement traduits par des développements de paramétrisations des modèles – ce qui constitue pourtant leur principale justification¹³. Pourquoi ce décalage entre une demande croissante et le peu d'amélioration?

Plusieurs raisons sont avancées par les modélisateurs pour expliquer ce paradoxe. D'abord - on l'a vu plus haut - la difficulté, la quantité de travail, le temps exigés par la conception d'une nouvelle paramétrisation, mais aussi par sa mise en cohérence avec les autres paramétrisations et son implémentation. « Changer de façon radicale une paramétrisation fondamentale remet en cause l'ensemble du modèle » souligne un chercheur du LMD-(L2) - un modèle que les scientifiques connaissent bien, avec lequel ils sont habitués à travailler. Ce coût élevé n'incite pas à remettre en chantier des paramétrisations rodées de longue date. Autre facteurs invoqués (mais ces raisons sont évidemment liées) : le faible nombre de « développeurs » par rapport aux « utilisateurs »¹⁴. Enfin on incrimine le manque d'incitation : malgré les discours et les programmes, le changement climatique tire la recherche vers les prévisions régionales et les impacts, plus que vers le développement de paramétrisations. Ce type d'activité est réputé peu gratifiant sur le plan académique : il suscite moins de publications que les expériences numériques ou les simulations; et s'attaquer à des questions « anciennes » est moins valorisé que d'ouvrir de nouveaux domaines, on l'a dit – et s'accorde moins aux critères actuels de financements de la recherche (Jakob 2010). Cependant, les développeurs du LMD récusent en partie cette vision négative, et affirment aujourd'hui que leur travail est devenu gratifiant et qu'il est récompensé à long terme ; plusieurs jeunes chercheurs ont fait leur thèse sur la nouvelle paramétrisation, ils ont publié des articles, et l'un d'eux a été recruté. La nouvelle paramétrisation a fait évoluer les idées, la compréhension, les outils et les méthodes, affirment ces chercheurs ; elle a créé une dynamique autour de problématiques communes.

¹² Ces scientifiques ne s'opposent pas à la nécessité d'ajouter des composants aux modèles, car on ne peut tester l'importance de nouveaux facteurs pour le climat que par des expériences numériques. Mais selon eux, des arbitrages sont ensuite nécessaires pour tirer les leçons de ces expériences, car la complexification du modèle ne se justifie qu'en fonction de questions scientifiques et « si la boucle du phénomène change » (L1).

¹³ "Observations from field programs will be used to develop and validate the cloud-resolving models, which in turn will be used as test-beds to develop the parameterizations for the large-scale models" (GCSS Team, 1993).

¹⁴ Christian Jakob, lors d'une grande conférence du World Climate Research Program à Denver (Etats-Unis) en 2011, a comparé les développeurs de modèles à une espèce en voie de disparition. Quand il a demandé en assemblée plénière qui, parmi ses collègues, avait changé le code de leurs modèles depuis deux ans, une vingtaine de mains se sont levées sur plus de mille chercheurs présents ...

II-2 Le « gap » entre processus et climat

Non seulement les nouvelles paramétrisations sont rares, mais souvent elles n'améliorent pas les problèmes récurrents des modèles. En fait, selon le modélisateur Christian Jakob (2010), il existe une forme de déconnexion entre ces deux grands domaines de la modélisation du climat, les études des processus climatiques et l'évaluation des modèles : « Le choix des études de processus à réaliser pour le développement des modèles n'est que faiblement connectée aux erreurs des modèles ». Des modélisateurs du LMD vont dans le même sens, comme cette jeune chercheuse (L5) :

Je suis allée à un colloque GCSS à Boulder sur les études de processus, passionnant. J'ai demandé : où discute-t-on de l'impact qu'ont les paramétrisations dans les modèles, à grande échelle et sur le long terme, sur le climat, et de pourquoi les modèles ne s'améliorent pas ? On m'a répondu : on en parlera au workshop sur les erreurs systématiques des modèles à Exeter. J'y suis allée. On se demandait quels étaient les biais des modèles de climat, mais ce n'était pas non plus l'endroit où se demande à quoi sont dus ces biais... Mais ce n'est pas une question facile, on ne sait pas faire ça. On a l'impression qu'il manque une activité entre ces deux communautés.

Renforcer les liens et la coordination entre le domaine des processus et celui du climat est primordial, plaident ces chercheurs. Mais le problème est en réalité plus profond, et touche sans doute à une caractéristique fondamentale de la modélisation du climat selon des climatologues : le « fossé entre processus et climat à grande échelle » ; autrement dit le fait que l'on ne sache pas attribuer les caractéristiques des simulations à des composantes précises du modèle qui les a produites, en raison de la multitude de processus et de leurs interactions à différentes échelles de temps et d'espace. Comme le résume un rapport du WCRP « le développement des modèles est freiné par un manque de compréhension de la façon dont la mauvaise représentation des processus nuageux et de la dynamique à l'échelle des nuages contribue aux biais des modèles concernant les structures de la circulation à grande échelle et influence les projections du climat futur ». En outre, l'influence des différents processus physiques en jeu varie selon l'échelle de temps (diurne, saisonnière, interannuelle, décennale...). Si bien que même quand une nouvelle paramétrisation parvient bien à reproduire un aspect du climat présent, rien ne garantit qu'il en sera de même pour le climat futur, car les paramètres essentiels ne sont pas nécessairement les mêmes. Ainsi, on ignore si les améliorations de la paramétrisation du modèle du LMD ont une influence sur les prévisions de changement climatique à long terme... C'est en cela que l'amélioration des paramétrisations représente, selon certains climatologues, un « pari ».

II-3 Super-paramétrisation et super-modèles

Devant la difficulté du problème, certains climatologues prônent aujourd'hui des voies de développement des modèles qui ne passent pas par les paramétrisations. Dans un article intitulé « Sortir de l'impasse de la paramétrisation des nuages » (*Breaking the cloud parameterization deadlock*), quatre des spécialistes de la physique des nuages les plus fameux dans la communauté, considérant la somme considérable de connaissances accumulées sur les processus nuageux et convectifs et leur faible représentation dans les modèles de climat, affirment qu'il est impossible, « avec les approches actuelles » de « paramétriser toute cette complexité avec une précision suffisante ». « Le problème de la paramétrisation des nuages est dans une impasse au sens où la lenteur de nos progrès est inacceptable. Il faut une stratégie nouvelle et différente » affirment les auteurs (Randall *et al.* 2003). Ils proposent une solution, appelée « super-paramétrisation », sorte d'hybride entre une paramétrisation et un calcul explicite consistant à remplacer dans chaque maille la paramétrisation des nuages par un modèle local à haute résolution de type CRM à deux dimensions. Une autre stratégie a été avancée au World Modelling Summit for Climate Prediction en 2008 à Reading (UK), et reprise dans une « déclaration » des organisateurs du sommet sous le titre « une révolution dans la prévision du climat est à la fois nécessaire et possible » (Shukla *et al.* 2009). Ils préconisent de lancer un « projet mondial de prévision du climat » doté d'ordinateurs « au moins mille fois plus puissants que ceux disponibles aujourd'hui » afin de développer des modèles à résolution de l'ordre du kilomètre, capables de calculer explicitement la convection ou même les tourbillons - autrement dit d'étendre au globe entier les modèles détaillés de type LES. Ces super-modèles, englobant de nombreux processus biogéochimiques, pourraient fournir « une prévision du climat opérationnelle à toutes les échelles de temps, particulièrement à échéance décennale ou multi-décennale » - ce qu'on appelle la « prédiction sans couture » fusionnant la prévision du temps et du climat.

Ce projet titanesque a suscité des débats plutôt « agités », selon des participants au Modelling Summit. Les super-modèles soulèvent plusieurs types d'objections. S'ils calculent explicitement la convection, même les modèles à haute résolution contiennent des paramétrisations, comme celles de la turbulence ou des processus microphysiques. Deuxièmement, ces modèles ne seront pas disponibles avant plusieurs décades. Ensuite, si l'idée de prédiction sans couture est jugée intéressante - car il n'y a pas de frontière physique entre modélisation du temps et du climat - en revanche, des scientifiques du climat « demeurent sceptiques quant au bénéfice global d'un modèle « taille unique » » (*'one size fits all' model*) (Knutti 2010). Selon eux, un bon modèle de temps ne

l'est pas toujours pour le climat (et vice-versa) ; les objectifs, les façons de travailler sont différentes. Autre sujet sensible : celui du risque d'hégémonie de super-modèles internationaux, privilégiant certains objectifs et stratégies, au détriment d'un pluralisme de la modélisation. L'enjeu de cette « fin de la démocratie des modèles » (Knutti 2010) est à la fois politique et scientifique, et touche la diversité des approches, l'autonomie des choix scientifiques et la qualité des prévisions. Surtout, il n'est pas garanti que des modèles à très haute résolution produiraient un bon climat simulé : il y a des débats sur les échelles de temps et d'espace pertinentes pour ces modèles. Un avis souvent rencontré est que la haute résolution ne résoudra certainement pas tous les problèmes et en soulèvera probablement de nouveaux.

Mais il est sans doute des objections plus profondes : calculer les phénomènes atmosphériques à partir de lois qui les régissent ne constitue pas forcément l'objectif ultime de la recherche. Les scientifiques veulent aussi comprendre les mécanismes dominants, ce qui est une fonction des paramétrisations. Celles-ci, en effet, « résument la compréhension du système » (L4). Une paramétrisation « décompose le problème et propose une grille de lecture » (L2). Avec les modèles explicites détaillés, en revanche, il est plus difficile de saisir quels processus sont en jeu : « on ne peut pas « débrancher » un mécanisme pour tester des hypothèses », ce que permet une paramétrisation, qui distingue les différents processus et les variables de couplage (L2). C'est la conception même du rôle des paramétrisations qui est ici en jeu, mais aussi de la capacité des modèles à comprendre et prévoir le changement climatique.

III- Visions de la modélisation et cultures de laboratoires

III- 1 Comprendre grâce à un spectre de modèles

Le développement de la nouvelle paramétrisation du modèle LMDZ s'enracine dans une culture du laboratoire, un « style de pensée » partagé par les scientifiques du LMD qu'acquiert aussi les jeunes chercheurs socialisés au sein de ce groupe (Fleck 2008), comme le raconte l'une d'eux (L5) :

Au LMD il y a une culture de labo assez forte. Même quand ils font des choses différentes, il ont une façon de voir commune, une approche très basée sur la compréhension des processus, plus qu'ailleurs. (...) J'ai baigné là-dedans, j'en ai été imprégnée. Et j'ai aussi apporté ma pierre.

Cette culture commune se manifeste dans les discours, dans les pratiques mais aussi dans les dispositifs matériels et l'organisation du laboratoire. Le développement de la nouvelle paramétrisation coïncide avec la mise en place au LMD, à la fin des années 2000, d'une gestion plus rigoureuse des modèles¹⁵. Le laboratoire dispose désormais d'une panoplie de versions simplifiées du modèle global bien à jour - modèle d'atmosphère seule, « aqua-planète » (entièrement recouverte d'eau), modèles à deux dimensions, modèle uni-colonne etc. – qui ont des systèmes climatiques plus simples et moins de variabilités que le GCM (pas de saisons, pas de moussons, pas de El Nino, pas de dynamique etc.) tout en conservant des éléments essentiels. Les chercheurs utilisent ce spectre de modèles de différentes complexités aux deux « bouts » de la modélisation : pour le développement des paramétrisations - on l'a vu dans la première partie - et pour les analyses globales des simulations – afin par exemple d'identifier les mécanismes climatiques « robustes », qu'on retrouve dans toutes les configurations, même très simples.

Cette stratégie est défendue dans un « position paper » écrit par neuf climatologues (dont deux chercheurs français du LMD) qui a été présenté à une conférence du WCRP en 2011 (Bony *et al.* 2011). Ce paper prend comme point de départ un rapport de 1979 sur les effets de l'accroissement du CO₂ rédigé sous la direction de Jule Charney¹⁶ (Charney *et al.* 1979). Le « rapport Charney » est resté célèbre pour avoir donné la première estimation quantifiée de la sensibilité du climat (3 degrés), des différents forçages et rétroactions, et identifié les principales sources d'incertitude des modèles ; or ses conclusions restent pour une bonne part valables aujourd'hui. Si le rapport Charney a été aussi « incroyablement visionnaire » il y a 35 ans, explique le position paper, c'est grâce à « son insistance sur l'importance de la compréhension physique acquise au travers de l'utilisation de théories et de modèles simples, à la fois pour eux mêmes et pour aider à interpréter les résultats des Modèles de Circulation Générale ».

La compréhension physique est présentée ici comme la condition sine qua non de progrès dans la prévision du changement climatique. Puisqu'on ne dispose pas d'observations du climat futur, « la confiance dans notre prédictions demeurera de façon disproportionnée dépendante de notre compréhension » argumente le position paper. Ces climatologues affirment ainsi une convergence entre les objectifs de connaissance et de

¹⁵ Une équipe de scientifiques assure la coordination, les contrôles et les réglages nécessaires au « phasage » des différentes versions du modèle ainsi que des interfaces avec le modèle de Système Terre de l'IPSL. Cette organisation rigoureuse constitue une nouveauté au LMD, où les chercheurs avaient traditionnellement une réputation d'« électrons libres ». Il y a encore peu d'années, coexistaient plusieurs variantes du modèle et des paramétrisations peu documentées et pérennisées (Guillemot 2007).

¹⁶ Le météorologue américain Jule Charney (1917-1981), dont les recherches théoriques ont été fondatrices pour la modélisation de l'atmosphère, a dirigé le Meteorological Project, où il a mené à bien la première prévision numérique du temps en 1955.

prévision et construisent les questions de recherche pour aligner ces différentes préoccupations (Latour 1995). Il faut noter que les scientifiques du climat qui soutiennent d'autres stratégies de modélisation affirment eux aussi l'importance de l'objectif de connaissance, à côté de l'impératif de prévision (Shukla *et al.* 2009). Autrement dit le débat ne s'inscrit pas aujourd'hui dans une dichotomie comprendre versus prédire : tous les climatologues prétendent faire les deux, et dépasser cette opposition.

III-2 Différentes conceptions de la modélisation

Comment caractériser les différentes approches de la modélisation du climat qu'on a esquissé dans ce texte ? Dans les années 1990 des chercheurs en STS ont étudié des communautés de modélisateurs et en ont proposé des typologies. Ainsi, une enquête sociologique sur l'utilisation des « ajustements de flux » dans le couplage entre modèles d'océan et d'atmosphère a montré l'importance de la finalité sociale de la recherche pour donner « des standards implicites de l'adéquation des modèles », et a conduit à distinguer les climatologues « puristes » des « pragmatiques » (Shackley *et al.* 1999). Un autre travail a défini deux « styles de vie épistémiques », celui des « prophètes du climat » et celui des « constructeurs de modèles » (Shackley 2001). Les débats analysés dans ces articles (et dans quelques autres) présentent des similarités avec ceux d'aujourd'hui : on retrouve la critique de la fuite en avant vers la complexité, le souci de la diversité des modèles, ou la nécessité de comprendre pour prévoir le climat futur. Mais si certains arguments demeurent, les évolutions scientifiques et sociales déplacent les questions comme les lignes de démarcation; et les catégories définies dans ces travaux ne semblent pas bien correspondre aux oppositions actuelles.

Pour analyser les différences de conceptions du développement des modèles, on partira plutôt de l'article sur « l'impasse de la paramétrisation des nuages » déjà cité (Randall *et al.* 2003). Les auteurs soulignent d'emblée la spécificité des modèles de climat :

Even though the basic physical equations in which we have the most confidence describe small-scale processes, in practice it is the effects of those small-scale processes that are incorporated into our models through the use of uncertain closure assumptions. It is ironic that we cannot represent the effects of the small-scale processes by making direct use of the well-known equations that govern them.

Et plus loin :

Cloud parameterization developers (...) are trying to compute the statistics of these processes that matter for the large-scale circulation and climate, without directly representing the cloud processes at their 'native' space and time scales.

Le choix des mots est éloquent : pour les auteurs, il y a quelque chose d'anormal, de scandaleux presque, à représenter les processus nuageux par des paramétrisations au lieu d'utiliser les « équations physiques de base dans lesquels nous avons la plus grande confiance » « à leurs échelles de temps et d'espace naturelle (*native*) ». De même, il leur apparaît presque choquant de représenter séparément des phénomènes qui ne sont pas séparés dans la réalité. Se dégage ici la vision d'un climat dont les processus intriqués sont régis par les mêmes lois fondamentales, et qu'il convient de représenter conformément à sa nature réelle, de façon continue et unifiée. Le plaidoyer de Shukla et ses collègues (2009) pour une « révolution dans la prévision du climat » grâce à d'énormes modèles de Système Terre sans couture et à très haute résolution relève d'une vision semblable.

La conception qui se dégage des discours et pratiques du LMD, mais aussi du position paper, est différente ; plutôt que sur les continuités, elle met l'accent sur le découpage des problèmes, l'identification des phénomènes essentiels et la représentation des principaux processus pour améliorer la confiance dans les prévisions.

III-3 Holisme et découpages

La *hiérarchisation* des questions prioritaires et le *découpage* des problèmes et des phénomènes jouent un rôle majeur dans les pratiques des chercheurs du LMD. Il s'agit de déterminer les processus importants à représenter dans les paramétrisations, les principaux mécanismes climatiques dans les analyses de simulations, ou les composants qui jouent un rôle primordial (par exemple, identifier le type de nuages qui sont les principaux responsables des incertitudes des modèles (Bony et Dufresne 2005)). Cette hiérarchisation suppose de trier et de choisir ce qui est inclus dans le modèle (selon le principe que « ce qui est écarté du modèle est souvent une meilleure indication de notre compréhension que ce qu'on y ajoute » (Bony et al. 2011)) et suppose aussi de découper les phénomènes. On a vu plus haut un exemple de tel découpage dans le cas de la nouvelle paramétrisation du LMD, avec la représentation des « panaches thermiques » dans la couche limite, qui a conduit à distinguer trois échelles différentes et à reconsidérer les frontières entre les processus. Ces frontières n'existent pas dans la modélisation détaillée, où l'on passe de façon continue du cumulonimbus au cumulus. Si certains découpages opérés dans les paramétrisations semblent correspondre à des frontières « naturelles » séparant des phénomènes bien identifiés, d'autres font débat chez les spécialistes.

Ces pratiques de modélisation conduisant à hiérarchiser les priorités, identifier les facteurs principaux, découper les phénomènes et décomposer les problèmes en sous problèmes plus tractables peuvent être vues

comme des façons de déjouer l'intrication des processus climatiques. Des philosophes ont considéré que ce « holisme » caractéristique des modèles de climat, qui rend presque impossible d'attribuer des caractéristiques des simulations du climat à des composantes précises du modèle, les rend « analytiquement impénétrables » (Lenhard and Winsberg 2010). Pourtant, l'analyse du travail des modélisateurs suggère plutôt que le holisme des modèles, loin d'interdire la compréhension, renforce la nécessité d'inventer des méthodologies sophistiquées pour le contourner (Guillemot 2014).

III-4 La paramétrisation comme talon d'Achille ou comme outil heuristique

Il est communément admis que la partie dynamique des modèles, fondée sur les lois physiques, en constitue la partie la plus solide tandis que les paramétrisations, incomplètes et entachées d'erreur, en sont le « talon d'Achille » et représentent un « pis aller », en attendant d'avoir des ordinateurs assez puissants pour résoudre les équations de la dynamique des fluides à petite échelle. Mais cette manière de voir n'est pas seule en lice. A la fin du XIX^{ème} siècle, à côté des physiciens qui considéraient la météorologie comme une application de la dynamique des fluides, des empiristes pensaient qu'elle devait être fondée sur une véritable théorie dérivée inductivement des données d'observation (Nebeker 1995). L'invention de l'ordinateur dans les années 1940, en mettant fin au « schisme entre théorie et applications », en dynamique des fluides en particulier, a consacré la victoire des GCM (Gramelsberger 2010). Mais les débats n'ont jamais cessé et d'autres approches ont été proposées, méthodes statistiques pour Norbert Wiener (Dahan 2010) ou encore « paradigme systémique » s'opposant au « paradigme dynamique », pour Barry Salzmann par exemple (Crucifix 2010). La résolution d'équations pas à pas par ordinateur n'est donc ni une nécessité ni un idéal universel et peut être vue au contraire comme l'abandon d'une ambition plus haute, d'une compréhension plus synthétique du climat.

De la même façon, pour certains climatologues, ce ne sont pas les paramétrisations qui constituent un moindre mal mais au contraire c'est la résolution numérique des équations qui peut représenter un renoncement par rapport à une compréhension plus profonde des processus. Une scientifique de Météo France (M3) explique (à propos de la modélisation de la circulation océanique) :

Si vous prenez un modèle de 2 Km de résolution, vous avez des résultats superbes, qui reprennent les observations (...). Mais c'est frustrant : si on est obligé de le résoudre explicitement par l'ordinateur, ça veut dire qu'on n'a pas compris la physique qu'il y a derrière (...) On sait que l'activité de sous-maille est importante pour contrôler la circulation générale, mais on ne sait pas écrire de loi de transformation (...).

Pour cette chercheuse, malgré ses « résultats superbes », la résolution explicite a quelque chose de « frustrant », par rapport à des « lois de transformation » exprimant une meilleure compréhension. On retrouve là le rôle heuristique des paramétrisations, évoqué plus haut. C'est dans la paramétrisation que s'éprouve la compréhension : « paramétriser, c'est mettre en équation et modéliser pour savoir si on a compris ; si on a pris en compte les ingrédients clés » selon L5.

Des modélisateurs du LMD se disent donc surpris par la rareté des nouvelles paramétrisations, ils se sont « sentis seuls, à travailler en essayant de faire des choses physiques ». Ils sont déçus par les réticences exprimées par les scientifiques parmi les plus renommés de la paramétrisation des nuages, par une forme de renoncement de leur part. Une jeune chercheuse, L5, raconte son désarroi lors d'un workshop sur les modèles de climat où elle espérait discuter de questions de physique avec d'éminents collègues :

Le plus choquant c'était le discours ambiant : « développer des paramétrisations, c'est trop risqué, c'est difficile ; il ne faut pas le faire ». Alors que c'est ça qui devrait être motivant, c'est pour cela que je l'ai fait : c'est ouvert, c'est un défi !

III-5 Un pari sur la capacité à isoler l'essentiel

Si l'on cherche à préciser les lignes de partage à partir des différences qu'on vient d'identifier, il apparaît que ce qui sépare les scientifiques est leur confiance dans la capacité à isoler les processus essentiels. Pour les uns (dont les chercheurs du LMD cités), il est possible d'identifier ces éléments en utilisant des modèles idéalisés comme grille de lecture. Cette conviction est ancrée dans une certaine vision du climat : si le climat est complexe, il présente des patterns, des comportements organisés à toutes les échelles. Malgré la non-linéarité, la variabilité, le nombre de facteurs et de processus en jeu, « il n'y a pas que du bruit, il y a une organisation, c'est pas n'importe quoi. Il y a un objet à étudier, on n'est pas en train d'additionner les processus sans but » dit un chercheur du LMD (L6). L'atmosphère exhibe des « modes dominants », et le travail d'un climatologue consiste à repérer, expliquer et reproduire ces structures ou ces comportements « simples » ; ce qui nécessite de mobiliser à la fois modèles simples et modèles complexes, comme l'explique ce chercheur (L6).

D'une certaine manière la nature choisit des modes dominants, et on a besoin des modèles complexes pour aller comprendre comment et pourquoi (...) Mais la compréhension qu'on a avec les modèles complexes n'est vraiment bien établie que quand on a été capable d'aller jusqu'à un schéma conceptuel. A partir de cette complexité, il faut arriver petit à petit à tirer quelques idées simples sur le fonctionnement de ce qu'on étudie,

quelque chose qu'on peut expliquer avec des mots (...) Et si on domine l'enchaînement entre simple et compliqué, on pense qu'on comprend les choses.

Autrement dit la nature « fait des choses simples de façon compliquée » (Arakawa 2000), et ces modélisateurs pensent qu'on peut se focaliser sur des aspects relativement « simples » du comportement de la nature pour essayer de comprendre et de reproduire en la modélisant cette simplicité apparente. Mais s'il y a des modes dominants, ce sont les climatologues qui les identifient, choisissent de les extraire du complexe. Les séparations entre processus, les éléments à prendre en compte, la hiérarchie entre phénomènes ne sont pas des données indiscutables : ils doivent être définis et justifiés en fonction des questions posées et des échelles étudiées. Les contraintes globales définissent ce qui est important au premier ordre, mais non ce qui se joue au deuxième ordre.

D'autres scientifiques sont au contraire convaincus que la complexité des processus et de leurs interactions condamne ces tentatives de schémas conceptuels. Ils ne renoncent pas à la compréhension en soi, mais à l'exprimer dans les paramétrisations. Ils sont d'avis que « les GCMs cherchent à imiter la façon compliquée que la nature a de faire des choses simples » (Arakawa 2000) : le modèle est davantage vu comme une boîte noire, et le travail de simplification est délégué à l'ordinateur. La recherche de compréhension ne se situe pas au niveau des paramétrisations et de leurs effets, mais en aval - à celui des climats régionaux, des impacts etc.

Une part des désaccords dépasse la question des paramétrisations et porte sur le développement des modèles en général (que ce soit par les paramétrisations, par les superparamétrisations ou la haute résolution). Des climatologues, dans la mouvance du position paper présenté plus haut, déplorant le « fossé entre simulation et compréhension en modélisation du climat » (Held 2005), pensent que le développement des modèles seul ne parviendra pas à résoudre les questions posées par la prévision du climat. Une chercheuse du LMD exprime cette conviction (L4) :

Depuis les débuts de la modélisation, on avait l'idée qu'on va développer les GCM, augmenter la résolution etc. et que naturellement on va s'approcher de la solution, de la vérité. Et on réalise que le chemin est long, très long... On a beau augmenter la résolution, la complexité etc., on sera toujours très loin de la vérité. Mais c'est une approche qui est toujours très ancrée chez nous, une approche d'ingénierie, je ne sais pas (...) Je pense que ce n'est pas comme ça qu'on va y arriver (...) C'est beaucoup plus en comprenant ce qui se passe, qu'on va pouvoir anticiper quelque chose qui se rapproche de la solution (...)

Il faudrait imaginer des approches spécifiques, passer par une étape intermédiaire qui permettrait de décomposer le problème, de développer une grille de lecture plus simple entre le climat à grande échelle et la représentation des processus à petite échelle.

La détermination des processus dominants dans les processus, ou des relations « simples » entre climat et processus, pose de multiples questions. Peut-on toujours isoler de tels mécanismes ? Peut-on réaliser les approximations nécessaires ? Ce sont les pratiques des modélisateurs qui apporteront les réponses. On peut faire l'hypothèse (qui exigerait de plus amples développements) que la capacité à extraire des processus dominants ou à réaliser des découpages pertinents dépend sans doute davantage des attentes cognitives et de la façon dont les questions sont posées que des propriétés intrinsèques du climat (Ruphy 2003, Varenne 2013).

III-6 Pratiques et institutions multi-échelles

Les visions, les pratiques et les « styles de vie épistémiques » des modélisateurs dépendent de nombreux facteurs sociaux et institutionnels, parmi lesquels la formation disciplinaire, les objectifs de la recherche, les outils disponibles, les financements, les collaborations académiques et les cultures de recherche (Shackley 2001). Les stratégies de développement de modèles ne peuvent pas être comprises indépendamment de ces facteurs.

Le travail de modélisation implique plusieurs échelles de collaboration, on l'a vu : collaborations avec quelques chercheurs de domaines proches qui apportent leur expertise pour le développement ; travail collectif sur, autour, avec le modèle, nécessitant une gestion rigoureuse ; mise en place de programmes de recherche au sein de groupes internationaux... Ces activités se déroulent dans des cadres institutionnels eux aussi multi-échelle. Le premier niveau est celui des laboratoires, qui ont leurs histoires, leur organisation et leur culture propres. Ainsi le LMD a une tradition de recherche individuelle, peu structurée et peu hiérarchique, et le CNRM une culture d'ingénieurs très influencée par la prévision opérationnelle – même si ces différences tendent à s'estomper (Guillemot 2007). Le deuxième niveau est celui des centres de recherche auxquels appartiennent les scientifiques – ici le CNRS et Météo-France. C'est à leur propre initiative que deux chercheurs du LMD et du CNRM (L1 et M1) ont travaillé ensemble pendant une dizaine d'années pour développer la paramétrisation de la convection ; mais ce sont les institutions qui ont fourni les conditions de possibilité de ces choix scientifiques. Les organismes intervenaient peu dans les orientations scientifiques, tout en encourageant les coopérations. Le directeur du CNRM en particulier, après avoir tenté sans succès de faire fusionner le modèle de climat de Météo-

France et celui du LMD, était soucieux d'harmoniser les efforts et d'encourager les coopérations entre les deux centres (Guillemot 2007). M1 appartient à une unité mixte avec le CNRS, créée au CNRM pour favoriser ces coopérations.

L1, qui a travaillé plus de dix ans à plein temps sur cette paramétrisation, estime que c'est là « un luxe extraordinaire ». Le statut du CNRS a joué un rôle déterminant dans la possibilité de mener à bien la nouvelle physique, en permettant aux scientifiques de sacrifier au besoin, pour un temps, les publications et de travailler plusieurs années sur une paramétrisation qu'ils jugent importante, alors que cette orientation n'était généralement pas considérée comme prioritaire. Ces chercheurs peuvent se passer de financements par projet, qui favorisent d'autres voies de recherche. Comme l'affirme l'un d'eux (L2) « Faire une nouvelle paramétrisation de la couche limite, c'est infaisable, il faut être au CNRS pour avoir le temps de faire ce genre de choses ! ». Ce chercheur dit avoir consacré une énergie considérable à « protéger son groupe » de projets scientifiques qu'il estime peu intéressants pour lesquels ils étaient sollicités.

Ces choix n'auraient évidemment pas été possibles dans n'importe quel cadre institutionnel. Les chercheurs proposent des stratégies et partagent des « styles de pensée » (Fleck 2008) en phase avec des attentes portées par leur organisme. Les rivalités entre types d'institutions, qui ont leurs propres instruments, modes de fonctionnement, façon de travailler et leurs propres visions des sciences, jouent ici un rôle important - pour la modélisation du climat, la concurrence entre les laboratoires de recherche et les centres de prévision opérationnels. Ainsi le choix des prévisions décennales ou de la stratégie « sans couture » est le fait de chercheurs travaillant dans des centres de prévision du temps, désireux d'utiliser les savoir-faire et expertises de ce domaine. Ces scientifiques anticipent et encouragent les attentes des politiques, supposées vouloir s'appuyer sur des simulations à haute résolution et à échelle décennale ou pluri-décennale pour prendre des décisions (en matière d'adaptation par exemple). Cette co-construction est encouragée par des financements enclins à favoriser les solutions les plus « technophile ».

L'échelle nationale est aussi importante et l'organisation de la recherche sur le climat diffère beaucoup d'un pays à l'autre. La situation française est caractérisée par l'existence de deux GCM développés par des centres différents et par de faibles interventions du niveau politique dans la recherche sur le changement climatique (Guillemot 2007). Le niveau international enfin est décisif – qu'il s'agisse des expériences de terrain et des infrastructures d'observation (Edwards 2010) ou de la forte structuration de la communauté scientifique dans des programmes de recherche mondiaux comme le WCRP. On a vu que des programmes comme EUROCS et GCSS ont fourni des études de processus et des modélisations détaillées, mais aussi une dynamique intellectuelle collaborative favorable au développement des paramétrisations. L'articulation de ces différentes échelles permet de rendre compte de la pluralité des déterminations pour les choix scientifiques en modélisation.

Ces niveaux ne sont évidemment pas étanches, ni indépendants. Les mêmes scientifiques circulent d'un niveau à l'autre, entrent dans des collaborations, tentent d'influencer un programme de recherche international, impulsent un projet ou y participent.

Conclusion (*provisoire, à remanier*)

Ce texte ne prétendait pas décrire l'éventail des positions sur les avancées des modèles de climat, ce qui nécessiterait une enquête plus large auprès des différents groupes de modélisation. Il voulait, à partir du travail des scientifiques mettant au point une nouvelle paramétrisation physique dans un laboratoire français, montrer que les choix de modélisation engagent des conceptions épistémiques sur les modèles, et des ontologies - car les visions du climat, de sa complexité et de sa prédictibilité, sont inséparables des méthodes et instruments pour l'étudier – et sont façonnés par des pratiques scientifiques, elles-mêmes rendues possibles par des conditions sociales et des facteurs institutionnels.

L'avenir de la modélisation du climat n'est pas tracé à l'avance et même si des tendances semblent dominer, la question reste débattue et ouverte. Les sciences du climat sont des disciplines assez récemment institutionnalisées dont les contours, les objectifs et les méthodologies sont encore peu stabilisées, à la fois « universelles, hégémoniques et faiblement enracinées » (Jasanoff and Wynne, 1998). La recherche est orientée par des logiques diverses et interdépendantes, en particulier par des avancées technologiques des calculateurs et des observations et par des demandes politiques pressantes. Les débats sur le développement des modèles de climat montrent que les pratiques scientifiques, les déterminations institutionnelles et sociales et les questions scientifiques et épistémologiques sont intimement mêlées.

Le nouveau mode de production de connaissances engendré par la modélisation par ordinateur permet de prédire le temps et le climat, mais oblige conjointement à repenser ce que comprendre veut dire, et quelles sont les relations entre compréhension et prévision.

Akio Arakawa, « A personal perspective on the early years of general circulation modeling at UCLA », in: Randall, D.J., Ed., *General Circulation Model ; Development - Past, Present and Future* (Int. Geophys. S, Vol. 70), Academic Press, 2000, p. 2-65.

Amy Dahan Dalmedico, « History and epistemology of models : meteorology as a case study (1946-1963) », *Arch. Hist. Exact Sci.* 55, 2001, p. 395-422.

Amy Dahan Dalmedico, "Putting the Earth System in a numerical box? The evolution from climate modeling toward climate change", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 41, issue 3, 2010, p. 282-292

Sandrine Bony & Jean-Louis Dufresne, « Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models », *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20806, 2005, DOI: 10.1029/2005GL023851

Sandrine Bony, Bjorn Stevens, Isaac Held, John Mitchell, Jean-Louis Dufresne, Kerry Emanuel, Pierre Friedlingstein, S. Griffies and Catherine Senior. « Carbon Dioxide and Climate : Perspectives on a Scientific Assessment », 2011. Available on the WCRP Open Science Conference website : <http://www.wcrp-climate.org/conference2011/positionpapers.html>

Jule H. Charney *et al.*, « Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment. » *National Academy of Science*, 1979.

Michel Crucifix. La climatologie aujourd'hui, *Revue des questions scientifiques*, 182 (1). 2011. p.3-32.

Paul Edwards, *A Vast Machine, Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*, The MIT Press, 2010

Ludwik Fleck, *Genèse et développement d'un fait scientifique*, Paris, Flammarion, 2008.

Peter Galison, "Computer simulations and the trading zone", in Galison P. and Stump D. (dir), *The disunity of science : boundaries, context and power*, Stanford, Stanford University Press, 1996

GCSS Team : The GEWEX Cloud System Study (GCSS). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74, 387–399. 1993

Gabriele Gramelsberger, « Conceiving processes in atmospheric models : General equations, subscale parameterizations, and 'superparameterizations' », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, vol. 41, 2010, issue 3, p. 233-241.

Hélène Guillemot, « La modélisation du climat en France des années 1970 aux années 2000. Histoire, pratiques, enjeux politiques », PhD dissertation, École des Hautes Études en Sciences Sociales, Paris, 2007

Hélène Guillemot, "Connections between climate simulations and observation in climate computer modeling. Scientist's practices and "bottom-up epistemology" lessons", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41, issue 3, 2010, p. 242-252.

Hélène Guillemot, « Comprendre le climat pour le prévoir ? Sur quelques débats, stratégies et pratiques de climatologues modélisateurs », *Modéliser et simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, Frank Varenne et Marc Silberstein (dir.), Editions Matériologiques, Paris, 2014

Isaac Held, « The Gap between Simulation and Understanding in Climate Modeling », *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 1609–1614, 2005

Frédéric Hourdin, Jean-Yves Grandpeix, Catherine Rio, Sandrine Bony, Arnaud Jam, Frédérique Cheruy, Nicolas Rochetin, Laurent Fairhead, Abderrahmane Idelkadi, Ionela Musat, Jean-Louis Dufresne, Alain Lahellec, Marie-Pierre Lefebvre, Romain Roehrig, « LMDZ5B : the atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection », *Clim. Dyn.*, 2012. doi:10.1007/s00382-012-1343-y

Christian Jakob, « Accelerating progress in global atmospheric model development through improved parameterizations - Challenges, opportunities and strategies », *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 91, 2010, p. 869-875

Sheila Jasanoff and Brian Wynne B, « Science and decisionmaking ». In: S. Rayner, EL Malone (eds.) *Human choice and climate change* Vol. 1. Batelle Press, Columbus, Ohio, 1998, p. 1-87.

Bruno Latour, *La science en action*, Paris, Gallimard, 1995.

Reto Knutti, « The end of model democracy? », *Climatic Change*, 102:395–404, 2010, DOI 10.1007/s10584-010-9800-2

Johannes Lenhard & Eric Winsberg, « Holism and Entrenchment and the future of climate model pluralism », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, vol. 41, issue 3, 2010, p. 253-262

Frederik Nebeker, « *Calculating the weather : meteorology in the 20th century* », International Geophysics Series, Vol 60, Academic Press, 1995

David Randall, Marat Khairoutdinov, Akiro Arakawa, and Wojciech Grabowski, « Breaking the Cloud Parameterization Deadlock », *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 2003, p.1547-1564.

Stéphanie Ruphy. Is the World Really “Dappled”? A Response to Cartwright’s Charge against “Cross-Wise Reduction”, *Philosophy of Science* 70 (1):57-67 (2003)

Simon Shackley, « Epistemic Lifestyles in Climate Change Modeling », in *Changing the atmosphere : expert knowledge and environmental governance*, Clark Miller and Paul Edwards (dir.), MIT Press, 2001

Simon Shackley, James Risbey, Peter Stone, Brian Wynne, « Adjusting to policy expectations in climate change modeling », *Climatic Change*, 43 (2), 1999, p. 413-454.

Jagadish Shukla, R. Hagedorn, M. Miller, T. N. Palmer, B. Hoskins, J. Kinter, J. Marotzke, J. Slingo, « Strategies: Revolution in Climate Prediction is Both Necessary and Possible: A Declaration at the World Modelling Summit for Climate Prediction », *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90, 2009, p. 175–178

Frank Varenne, « Modèles et simulations dans l’enquête scientifique : variétés traditionnelles et mutations contemporaines », in *Modéliser et simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation – Tome 1*, Frank Varenne et Marc Silberstein (dir.), Editions Matériologiques, Paris, 2013