

Disponible en ligne sur www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Sociologie du travail ■■ (2006) ■■■

SOCIOLOGIE
DU TRAVAIL<http://france.elsevier.com/direct/SOCTRA/>

Changement climatique : Dynamiques scientifiques, expertise, enjeux géopolitiques

Climatic change: scientific dynamics, expert evaluation, and geopolitical stakes

Amy Dahan Dalmedico *, Hélène Guillemot

Centre Alexandre Koyré (EHESS-CNRS-MNHN), Pavillon Chevreul, 57, Rue Cuvier, 75005 Paris, France

Résumé

En moins de trente ans, le changement climatique d'origine anthropique est devenu un enjeu, tant scientifique que géopolitique, majeur, concernant un nombre croissant de communautés de recherche, de partenaires et d'acteurs politiques. Une instance intergouvernementale d'expertise très singulière – le Groupe Intergouvernemental d'Etude du Climat (GIEC) – a joué un rôle déterminant dans la reconfiguration du champ et tend aujourd'hui à devenir un idéal-type pour d'autres projets d'expertise internationale. L'objet principal de cet article est d'étudier la transformation du régime climatique, le rôle du GIEC, et les répercussions de cette évolution sur la communauté des sciences du climat en France.
  2006 Elsevier SAS. Tous droits r eserv es.

Abstract

In less than thirty years, climate change became a both scientific and geopolitical crucial stake, concerning a great variety of research groups, epistemic communities, and political actors. An international organisation of scientific assessment– the International Panel of Climate Change (IPCC)– played a key role in the domain and tends to become a paradigmatic model for other international scientific assessments. In this paper, we wanted to analyse this evolution of climate change regime, the IPCC, and the feedbacks of this evolution in France on the climate sciences community.
  2006 Elsevier SAS. Tous droits r eserv es.

Mots clés : Changement climatique ; Modèles ; Simulations numériques ; Expertise ; GIEC

Keywords: Climate change; Models; Simulations; Assessment; IPCC

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : dahan@damesme.cnrs.fr (A. Dahan Dalmedico).

1. Introduction

La modélisation numérique du climat de la planète Terre est un domaine scientifique qui s'est développé depuis les années soixante, en étant tiré par plusieurs dynamiques : puissance des moyens de calcul, instrumentation, importance croissante de la prévision météorologique, essor des géosciences, montée de la conscience environnementale. Cette méthodologie issue de la « filière météorologique » reste à la base de toutes les approches ultérieures du domaine.

Vers la fin des années 1980, le problème de l'effet anthropique des gaz à effet de serre émerge sur la scène politique internationale. Une instance intergouvernementale d'expertise très singulière, le Groupe Intergouvernemental d'Etude du Climat (GIEC), est créé en 1988. Sa structuration en trois groupes de travail, les études qu'il suscite, l'agenda qu'il définit, tendent à reconfigurer l'ensemble du champ. Après le sommet de la Terre de Rio en 1992, des conventions des Nations Unies sur le climat sont réunies annuellement et deviennent des arènes de négociations internationales sur le sujet. Le changement climatique d'origine anthropique devient un enjeu scientifique et géopolitique majeur, et le nombre des communautés de recherche (relevant de sciences dures, de l'étude des écosystèmes, de la socio-économie, etc.), des partenaires et des acteurs (négoceurs politiques, ONG, etc.) concernés par son développement ne cesse d'augmenter et de se diversifier.

L'expression de *régime* a été utilisée pour caractériser les modes de production des savoirs scientifiques contemporains qui se déploient pour résoudre une question, non seulement technique, mais en liens organiques avec des pratiques industrielles, des choix économiques, des régulations politiques et juridiques, ou encore des débats éthiques et sociaux¹. En reprenant cette terminologie, notre thèse est que le régime du changement climatique devient de plus en plus hétérogène et multiple, et se caractérise par une *hybridation* croissante de dynamiques scientifiques propres et de dynamiques politiques.

L'objet principal de cet article est d'étudier comment cette transformation de régime est intervenue au cours des quinze ou vingt dernières années à l'échelle internationale, le rôle déterminant qu'y a joué le GIEC, et quelles en ont été les répercussions en France. Nous avons choisi de nous intéresser principalement à la communauté des « sciences du climat » parce que nous l'avons étudiée bien plus précisément que les autres communautés de recherche impliquées² ; d'ailleurs, les interactions sont trop nombreuses pour qu'on puisse espérer les embrasser toutes ici et donner une description complète du champ³. Une des questions principales est alors de savoir comment, dans le contexte national français, la communauté

¹ Clark Miller (2001a) a utilisé le terme à propos de *l'international weather regime* mis en place par les météorologistes après la deuxième guerre mondiale. Voir aussi Daniel Bodansky (2001). Commentant les ouvrages de M. Gibbons et al. (1994) et H. Nowotny et al. (2001), Dominique Pestre (2003) a thématisé l'expression de « régime ». Voir C. Paradeise, note de synthèse non publiée sur la notion de régime.

² Hélène Guillemot prépare une thèse au Centre Alexandre Koyré sur l'histoire de la modélisation du climat en France. Elle a notamment conduit plusieurs dizaines d'entretiens approfondis avec des chercheurs français des divers laboratoires et pôles de recherche mentionnés dans cet article. Voir également Dahan Dalmedico (2001, 2005a, 2005b), Dahan Dalmedico (à paraître), Dahan Dalmedico et Guillemot (à paraître).

³ Il existe une vaste littérature sur « changement climatique et politique ». Elle vient soit des *Science and Technological Studies* (Jasanoff et Wynne, 1998 ; Edwards et Schneider, 2001 ; Miller, 2001a, 2001b, 2004), soit de spécialistes de politique internationale (Paterson, 1996 ; Luterbacher et Sprinz, 2001), soit de chercheurs en politique de la science et de l'environnement (Pielke, 1997, 2001 ; Sarewitz, 2004).

scientifique, ses principales institutions, et les divers pouvoirs ont répondu à cette reconfiguration du paysage.

Pour suivre cette évolution, nous commençons par une brève présentation et mise en perspective historique de la modélisation du climat entre les années 1950 et 1980. Dans la deuxième partie, nous analysons l'ascension du changement climatique sur la scène géopolitique internationale (entre 1988 et 2000 environ), en portant une attention privilégiée au GIEC, son fonctionnement et ses interactions, tant avec la communauté scientifique qu'avec les politiques, et enfin son rôle de pilotage de la recherche. La troisième partie est consacrée aux modalités scientifiques et institutionnelles selon lesquelles la communauté scientifique du climat en France aborde les nouvelles questions du changement climatique. Dans la dernière partie, nous revenons au niveau géopolitique pour expliciter de nouveaux enjeux apparus récemment et tirer quelques leçons de ce régime.

2. La modélisation du climat des années 1950 aux années 1980

La modélisation numérique du climat est née juste après la Seconde Guerre mondiale, comme la prévision numérique du temps et comme l'ordinateur.

2.1. Prévision numérique du temps et circulation générale de l'atmosphère

Dès le début du 20^e siècle, le physicien norvégien Vilhelm Bjerknes et le britannique Lewis Richardson avaient formulé les principes et les équations d'une prévision du temps fondée sur le calcul de l'évolution de l'atmosphère à partir des lois fondamentales de la physique⁴. Mais c'est l'avènement de l'ordinateur qui a permis de mener à bien ce projet. En 1945, John von Neumann voit dans la météorologie un domaine d'application idéal pour les nouveaux calculateurs : la météorologie pose des problèmes non linéaires de dynamique des fluides, exige une grande puissance de calcul et son importance pratique et stratégique n'est plus à démontrer⁵. De plus, le développement rapide, durant la guerre, des réseaux d'observation en altitude et des moyens de télécommunication assure le flux de données nécessaire à l'établissement des prévisions. Sous l'impulsion de von Neumann, le Meteorological Project est lancé, en 1946, à Princeton, en relation étroite avec la construction du nouvel ordinateur Johnniac. En sept ou huit ans, l'équipe dirigée par Jules Charney obtient une prévision du temps opérationnelle pour tout le territoire des Etats-Unis⁶.

Mais le calcul par ordinateur permet aussi d'effectuer facilement des « expériences numériques », autrement dit de tester des hypothèses sur les mécanismes climatiques ; et il est bientôt admis que l'amélioration de la prévision du temps passe par une meilleure compréhension des mécanismes généraux du climat. Dès le début des années 1950, les scientifiques de Princeton développent, à côté des modèles de prévision, des modèles de circulation générale (*global circulation models*, GCM), dont l'objectif est de reproduire les propriétés moyennes des mouvements de l'atmosphère. Ces GCM sont les ancêtres directs des modèles de climat actuels. Le premier modèle numérique de circulation générale de l'atmosphère fut achevé par Norman Phillips en 1955 à Princeton. A partir de formulations simplifiées des équations de la dynamique, il parvenait à reproduire les grands traits de la circulation à l'échelle du globe (courants jets, perturbations, et transports d'énergie). Ce succès a institué la circulation de l'atmosphère

⁴ Sur l'évolution de la météorologie dans ses différents aspects au long des 19^e et 20^e siècles, voir Nebeker (1995).

⁵ Sur von Neumann, voir Aspray (1990).

⁶ Sur le Meteorological Project, voir Aspray (1990), pp. 121-154 et Dahan Dalmedico (2001), pp. 395-422.

comme thème de recherche majeur. Sur proposition de von Neumann, le *Weather Bureau* américain se dote dans la foulée d'une *General Circulation Research Section*, qui deviendra en 1960 le *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL), l'un des principaux laboratoires américains de modélisation du climat.

2.2. Modèles de circulation générale et modèles simples

C'est dans les années 1970 que s'effectue la convergence entre les modélisations du climat et du temps : les modèles opérationnels de prévision, jusqu'alors régionaux puis hémisphériques, deviennent sphériques et capables de reproduire la circulation globale de l'atmosphère. Les modèles de circulation générale deviennent de véritables modèles de climat, intégrant des représentations des surfaces qui leur permettent de retrouver les températures et de faire des prévisions à long terme. Désormais, des modèles de circulation générale seront utilisés pour prévoir le temps et pour étudier le climat.

Les GCM dévolus à la prévision à court terme ou à la modélisation du climat ont des fondements similaires : ils cherchent à simuler les mouvements de l'atmosphère en se basant sur les lois de la physique. L'atmosphère est représentée par un maillage à trois dimensions, et l'ordinateur calcule, pour chaque maille et à chaque pas de temps, les variables caractérisant l'état atmosphérique (température, pression, vent, humidité...) à partir de leurs valeurs au pas de temps précédent, en résolvant les algorithmes constituant le modèle. Celui-ci comprend deux parties distinctes : une partie *dynamique* décrivant les mouvements des masses d'air, dont les algorithmes sont tirés des équations de la mécanique des fluides ; et une partie *physique* qui décrit les échanges verticaux entre l'atmosphère et l'espace, et entre l'atmosphère et les surfaces océanique et continentales – échange de rayonnements, de chaleur, de quantités de mouvement, d'eau... Ces phénomènes se situent à une échelle bien inférieure à la taille de la maille ; ils sont donc traités indirectement, par des paramètres par lesquels est estimé statistiquement leur effet climatique à l'échelle de la maille. Sont ainsi « paramétrisés » des processus physiques (mais aussi chimiques, voire biologiques) comme la convection moyenne ou profonde, la turbulence près de la surface, les échanges radiatifs, l'évapotranspiration sur un couvert végétal, etc.

Le développement des deux parties du modèle relève donc de tâches assez différentes. Dans la partie dynamique, il s'agit de formuler les algorithmes de sorte qu'ils puissent être intégrés par ordinateur et soient stables, exacts, maniables ; c'est un travail mathématique et numérique, dans lequel les choix d'algorithmes dépendent des contraintes imposées par les capacités de l'ordinateur. Pour la partie physique, les paramétrisations relèvent davantage d'un travail de physicien, et varient beaucoup suivant les processus à représenter et selon les questions posées – il n'existe pas de méthodologie générale. Les validations de ces paramétrisations (sur lesquelles nous ne pouvons nous étendre ici) requièrent une grande part des efforts des modélisateurs. Si leurs noyaux dynamiques sont très semblables, les modèles de prévision et ceux de climat diffèrent surtout par leurs parties physiques et donc leurs paramétrisations, car les processus d'échange les plus importants ne sont pas les mêmes à court et à long terme.

Comme la prévision numérique du temps, la modélisation du climat fut tributaire de l'existence de calculateurs performants. Au début des années 1950, la prévision numérique se développe autour de trois pôles principaux : les Etats-Unis, la Suède et le Royaume Uni. La suprématie américaine est incontestable ; c'est le pays qui dispose du plus grand nombre de chercheurs, de la puissance de calcul et des centres les plus performants. En France, le manque

d'ordinateurs retarde le développement des premiers modèles de prévision comme de ceux du climat jusqu'au début des années 1970.

En fait, les GCM ne sont pas les seuls modèles climatiques. Dans les années 1940 à 60, certains physiciens utilisaient des modèles numériques plus simples (Kandel, 2002 ; Manabe, 1997), à zéro ou une dimension, sans dynamique, qui calculaient des bilans globaux des effets radiatifs ou des échanges thermiques. De tels modèles permettaient déjà, par exemple, de reproduire l'accroissement global de l'effet de serre par les émissions humaines de gaz carbonique. Si les GCM, plus complets et « réalistes », deviennent rapidement les outils de référence et si la « filière météorologique » s'impose dans tout le domaine climatique, les chercheurs du climat continuent de faire appel à des modèles simplifiés pour étudier un phénomène isolé ou réaliser des expériences numériques plus rapides. En effet, la lourdeur croissante des GCM les rend parfois aussi difficiles à saisir que le climat réel, et l'on a besoin de recourir, selon le mot d'un climatologue, à « un 'méta-modèle' schématisé pour comprendre ce qui se passe dans le modèle complexe »⁷.

2.3. *Les dynamiques multiples de la modélisation du climat*

De ses débuts jusqu'aux années 1980, la modélisation du climat n'a pas été guidée par la question du changement climatique, mais elle n'a pas non plus été animée exclusivement par des questionnements scientifiques internes. Les sciences du climat ont obéi à des dynamiques multiples où se sont mêlées les interrogations fondamentales, les évolutions techniques ou encore la demande sociale. Comme la prévision du temps, la modélisation du climat fut d'abord tirée par deux technologies en plein essor : les ordinateurs, dont la puissance de calcul a augmenté exponentiellement, et l'observation par satellite, dotée de moyens considérables.

Les sciences du climat furent aussi entraînées par l'évolution des sciences de la Terre. Océanographie, géophysique, géochimie, sismologie, ou paléoclimatologie connaissent un essor considérable, depuis l'institution de l'Année géophysique internationale en 1957. Les géosciences bénéficient de programmes d'exploration impulsés par les Etats-Unis (cartographie magnétique des océans en particulier) et de nouvelles techniques d'investigation (méthodes de datation isotopiques, tomographie sismique, résonance magnétique...) La modélisation sur ordinateur s'étend à la convection dans le manteau terrestre, aux mouvements des plaques tectoniques, à la circulation des courants marins.

Les climatologues entretiennent des liens très étroits avec la paléoclimatologie, qui connaît, au cours des années 1970 et 80, une série de découvertes importantes : mise en évidence des cycles glaciaires à partir de carottes sédimentaires ; confirmation des théories de Milankovitch sur l'origine astronomique de ces cycles ; révélation, par des carottages dans les glaces, de la rapidité des variations climatiques... Ces travaux fournissent aux modélisateurs du climat des thèmes de recherche et des références pour valider leurs modèles.

Enfin, la connaissance du climat a eu dès l'origine des objectifs sociaux. Le premier d'entre eux est révélateur de l'état d'esprit d'après-guerre : il faut étudier le climat pour être capable ensuite de le contrôler, de le modifier délibérément – voire de l'utiliser comme arme. John von Neumann fut l'un des premiers à souligner le caractère stratégique du contrôle du climat. Les recherches théoriques et expérimentales (déclenchement de pluies, détournement d'ouragan) furent largement subventionnées aux Etats-Unis. Pourtant, au début des années 1970, ces projets sont peu à peu abandonnés ; un revirement associé à des changements profonds de menta-

⁷ Interview de Robert Kandel, du LMD, 10 juillet 2001.

lité des sociétés occidentales, dans leurs rapports à la nature, à la technologie et au progrès (Kwa, 2001).

Dès les années 1970, un nouveau facteur exerce une influence grandissante sur la modélisation du climat : les préoccupations environnementales. Avant la Seconde Guerre mondiale, le climat était globalement perçu comme plutôt stable, peu susceptible d'être influencé par les activités humaines. Un tournant s'amorce dans les années 1950, avec la menace de l'arme nucléaire ; puis les pollutions chimiques et industrielles sont dénoncées par le mouvement environnementaliste, et des craintes se font jour sur la fragilité du climat et l'impact des activités humaines sur son évolution. Toutefois, l'effet de serre n'est pas alors la question dominante : depuis l'article d'Arrhénius de 1896, le réchauffement par effet de serre d'origine anthropique avait été abordé dans plusieurs articles et rapports, mais cette thèse restait contestée et concurrencée par d'autres théories (comme celle d'un refroidissement dû aux aérosols, pouvant déclencher une nouvelle glaciation)⁸. D'autres dangers menacent le climat, qui semblent tout aussi graves et plus immédiats : la sécheresse au Sahel des années 1975, les pluies acides, l'hiver nucléaire, le trou d'ozone.

3. L'ascension géopolitique du changement climatique

Sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale (WMO) se tient en 1979 une première conférence mondiale sur le climat. Elle lance un programme de recherche (World Climate Program) et jette les bases de trois rencontres qui se tiendront en 1980, 83 et 85 à Villach en Autriche. C'est à Villach que l'idée d'une instance intergouvernementale d'expertise sur le sujet du changement climatique a émergé. Deux autres réunions suivront, en 1987, où sont formulées les premières recommandations de réductions des émissions de dioxyde de carbone.

3.1. Une institution singulière : le GIEC

En 1988, la question du réchauffement climatique global fait irruption sur la scène tant scientifique que géopolitique et médiatique. A la faveur d'une sécheresse exceptionnelle aux Etats-Unis, quelques climatologues activistes alertent l'opinion américaine et internationale sur le danger climatique, notamment lors de la conférence de Toronto sur l'atmosphère, en juin. La même année, la WMO et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP) décident la création d'une instance mondiale d'expertise, le Groupe Intergouvernemental d'Etude du Climat (GIEC), en anglais *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Le GIEC, constitué de plusieurs centaines de scientifiques, est chargé non seulement d'informer les gouvernements de l'état des connaissances sur le sujet, mais aussi de passer en revue les politiques nationales ou internationales liées à la question des gaz à effet de serre.

Les Etats-Unis ont joué un rôle déterminant pour influencer fortement le Conseil exécutif de la WMO et imposer le compromis d'un tel mécanisme intergouvernemental. Agrawala (1998) a analysé précisément ce scénario paradoxal, qui a conduit une multiplicité d'acteurs politiques (agences américaines variées et concurrentes, UNEP, WMO) et de pays ayant des intérêts très divergents, à se défausser sur les scientifiques et leur abandonner le contrôle du processus d'évaluation. Ils font présider le GIEC par Bert Bolin, célèbre climatologue suédois, vétéran de la WMO et des réunions internationales d'évaluation sur le climat.

⁸ Sur d'autres théories sur les changements climatiques qui ont eu un certain impact public dans le passé, on peut voir Fleming (1998) ; sur les théories concurrentes du refroidissement et du réchauffement, en particulier, voir ch. 9 et 10.

Selon le cadrage suggéré en particulier par Mostafa Tolba, directeur exécutif de l'UNEP, le GIEC s'est très vite organisé en trois groupes de travail (WG) qui s'occupent respectivement : 1) de la science du climat et de la biosphère ; 2) des impacts du changement climatique sur la biosphère et sur les systèmes socio-économiques (groupe qui s'occupe maintenant aussi des questions d'adaptation et de vulnérabilité des écosystèmes) ; enfin, 3) des réponses stratégiques au changement climatique (en anglais « *mitigation* » ou atténuation du changement). Le choix des personnalités qui présidaient les trois sous-groupes fut pré-négocié et répondait à des critères tant politiques que scientifiques. Les spécialistes des sciences de la nature jouent le rôle prééminent dans le premier groupe, les économistes et spécialistes de sciences politiques jouent le rôle hégémonique dans le troisième groupe ; quant au second, il a réuni des spécialistes en tous genres : hydrologues, biologistes, écologues, climatologues... ou encore économistes.

Le premier rapport du GIEC de 1990 établissant la claire distinction entre « changement climatique » d'origine anthropique et « variabilité climatique » (attribuable à des causes naturelles) a sensibilisé les politiques et entraîné la convocation par l'Assemblée générale des Nations Unies de la conférence de Rio qui se réunit en juin 1992. La convention des Nations Unies sur le changement climatique (UNFCCC) entre en fonction le 21 mars 1994. Dès ce moment, les Conférences des Parties (COP) convoquées chaque fin d'année, pendant quinze jours, deviennent les forums de la négociation internationale sur le changement climatique auxquels participent des représentants et délégations de tous les pays, mais aussi des organisations non gouvernementales (Raustiala, 2001), des représentants d'institutions de recherche, d'industries, etc., soit plusieurs milliers de personnes. Des centaines de débats, mini-colloques et rencontres avec politiques, scientifiques ou négociateurs sont organisés en marge de la négociation officielle. Là sont les véritables forums hybrides du changement climatique dont le régime, entre science et gouvernance globale, se complique tant dans sa composition que dans son fonctionnement. L'ensemble des relations entre changement climatique et politique ne se réduit pas au GIEC. Deux autres groupes, le Comité Intergouvernemental de Négociation (INC) et le *Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice* (SBSTA), créé en 1995, servent de « tampon » entre les négociateurs politiques et le GIEC (Miller, 2001).

Néanmoins, pour l'angle que nous avons choisi de privilégier, des relations entre le politique et les communautés des sciences du climat, le GIEC reste bien l'instance déterminante qui cherche à instaurer des procédures très strictes chargées de garantir son caractère rigoureusement scientifique. Les rapports seront préparés par des équipes de rédacteurs, durement sélectionnés sur la base de leur compétence scientifique (réputation, publications). Le processus de *referees* est très long et très lourd : les rédactions des chapitres devront traverser deux stades d'examen et de réécriture, d'abord par des pairs scientifiques, ensuite par les pairs et les gouvernements. Les rapports finaux devront être acceptés en session plénière et seront accompagnés de résumés techniques et de « résumés pour décideurs » ; ceux-ci devront être approuvés ligne par ligne. De plus, les concepteurs du GIEC préconisent une participation universelle : tous les pays du monde devront y être autant que possible associés (en 2005, 192 représentants d'Etats y ont participé).

Dans les premières années de fonctionnement du GIEC, alors que la réalité du changement climatique est encore l'objet de vives controverses, les scientifiques du premier groupe sont incontestablement très en pointe. S'appuyant sur une longue tradition de recherches, leurs modèles de circulation générale — seuls outils qui permettent de se projeter *quantitativement* dans le futur — jouent un rôle crucial. Dès le premier rapport de 1990, à l'aide des modèles dans lesquels ils entrent les concentrations de gaz à effet de serre, croissantes selon l'hypo-

thèse du *business as usual*, les climatologues prédisent un accroissement de la température moyenne du globe de 0,3°C par décennie au cours du 21^e siècle. Ils insistent toutefois sur les incertitudes (concernant les sources et les puits de gaz à effet de serre, le rôle des nuages...) En 1995, le deuxième rapport fait état d'avancées considérables dans la compréhension de divers aspects physiques du problème, et dans le développement de modèles couplant l'atmosphère avec les océans et les glaces. Le consensus scientifique reflété dans le résumé du rapport identifie cette fois clairement une « influence humaine discernable au-delà de la variabilité naturelle »⁹ (une petite phrase qui a exigé de très longues discussions) et un changement climatique déjà intervenu au cours du 20^e siècle, tout en soulignant toujours un certain nombre d'incertitudes.

L'instauration du processus politique conduit insensiblement à une modification des rapports d'influence des trois groupes de travail. Le premier groupe continue à jouer un rôle déterminant, avec à sa tête des figures charismatiques comme Bert Bolin, Robert Watson, ou John Houghton. En 1990 comme en 1995, ou encore en 2001, les résumés des climatologues représentent les éléments majeurs des rapports d'évaluation, repris et commentés dans l'opinion publique car ils donnent les chiffres des prédictions physiques du changement climatique.

Toutefois, au sein du GIEC, les économistes gagnent de l'influence. Ils sont chargés de traiter tous les aspects socio-économiques du changement climatique et de ses impacts. L'évaluation économique des dommages (WG II) se heurtant à de très grandes difficultés, le travail des économistes se concentre surtout dans le WG III. Les économistes s'efforcent d'élaborer des mesures de mécanismes de marché concernant la réduction des émissions, dans un contexte assez confus de vives controverses. En particulier, une mise en scène autour de l'expression *droits à polluer* oppose une rhétorique de l'efficacité et de la puissance du marché (incarnée par les USA et d'autres pays de l'OCDE) à une rhétorique de l'environnement et de l'équité (Europe, écologistes), mais cette bataille sémantique masque en grande partie les enjeux économiques réels du dossier climat (Hourcade, 2000). Les économistes sont donc en première ligne dans la phase de préparation du protocole de Kyoto et dans l'interface avec le politique. Le résumé de leur travail dans le second rapport (1995) du GIEC est à la base du mandat de Berlin qui a lui-même précédé et préparé le protocole de Kyoto en 1997. Après Kyoto, la demande faite aux économistes sera plus encadrée, les objectifs étant désormais fixés par une décision politique collective (Armatte, 2003) : les modèles économiques n'ont plus à explorer que des trajectoires arrivant toutes à un même point, celui fixé par le résultat des négociations. Ce moment marque les débuts de la montée en puissance du WG II, celui s'occupant des impacts, de la vulnérabilité et de l'adaptation au changement climatique. Nous y revenons dans la section 4.

Le rôle du GIEC ne s'est pas réduit à la seule préparation des grands rapports d'évaluation. Dès 1992, sa direction a lancé la préparation de six rapports dits spéciaux ou techniques – sur l'évaluation nationale des émissions des gaz à effet de serre, sur des questions énergétiques et industrielles, sur des questions agricoles et forestières, ou encore sur des scénarios d'émissions. La publication de ces rapports a correspondu à la volonté de répondre de façon plus réactive aux demandes des politiques et d'alimenter directement le processus de décision. Ainsi, bien que le credo officiel, constamment réaffirmé par les présidents successifs, stipule que l'organisation a seulement les moyens et la mission d'évaluer les recherches déjà existantes, le GIEC a contribué incontestablement à reconfigurer la recherche sur le changement climatique en met-

⁹ Le Résumé du Rapport dit : "The balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate."

tant en avant des questions peu considérées jusque-là : rôle des sols et des forêts, prédictions régionales, vulnérabilité à la montée des eaux (par exemple, le rapport “ Land Use, Land-Use Change and Forestry ” (2000), demandé par le SBSTA, a souligné l’importance de la séquestration du carbone et orienté des recherches vers les cycles du carbone).

Sans prétendre que ces questions ne seraient pas apparues dans la seule dynamique des recherches scientifiques, leur mise sur agenda par le GIEC a accentué leur importance stratégique et leur visibilité. De plus, plusieurs rapports spéciaux ont eu des répercussions politiques directes : l’*IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme* (NGGIP), mis au point entre 1991 et 2003, établit un ensemble de méthodologies et de règles pour que chaque pays puisse inventorier annuellement ses émissions en gaz à effet de serre. Aujourd’hui, tous les pays occidentaux signataires de Kyoto rendent public cet inventaire annuel, et des pays comme l’Inde, le Brésil ou la Chine ont commencé également à le faire¹⁰.

3.2. *Le cadrage du processus d’expertise GIEC*

Que le GIEC soit un organisme d’expertise qui tente de maintenir un équilibre fragile entre deux exigences également contraignantes —garder la crédibilité scientifique, avoir une audience auprès des politiques – mérite notre attention¹¹. Comment fonctionne la fabrication des consensus pour le politique, quel est l’impact de cette fabrique sur la vie scientifique ? Dans cette énorme machine, tous les scientifiques ne sont pas au même niveau d’expertise. La très grande majorité des auteurs fonctionnent comme des « scientifiques experts » qui reviewent des résultats ou en font la synthèse. En revanche, ceux qui en sont à écrire le résumé pour décideurs, à le négocier mot par mot, relèvent d’une deuxième acception de l’expertise, selon Philippe Roqueplo (1993, 1997) : l’Expert appelé pour produire, au nom de ses connaissances scientifiques, un avis fondé en vue d’une décision politique. Or, intervenant en tant qu’ « Expert », un scientifique fonctionne toujours, consciemment ou pas, comme l’avocat d’une certaine cause et cela d’autant plus qu’il considère comme importants les enjeux de la décision à prendre. Comme le notent aussi Jasanoff et Wynne (1998), la connaissance des experts comporte inévitablement des jugements de valeurs tacites sur la nature et la société.

Au GIEC, le processus d’approbation ligne à ligne des résumés pour décideurs est bien un processus intensément politique où s’exprime toute une gamme d’intérêts nationaux divergents : les pays de l’AOSIS¹² plaident pour l’introduction d’une rhétorique du risque, les pays producteurs de pétrole plaident pour la mention répétée des incertitudes scientifiques et celle de gaz autres que le CO₂ ; les pays en développement veulent mentionner le poids des émissions passées, les pays du Nord insistent sur les émissions futures... Si, aux yeux des scientifiques, les rapports complets du GIEC (plusieurs milliers de pages) constituent un état des lieux de la connaissance scientifique relativement fidèle et satisfaisant, faisant même apparaître les divergences et les incertitudes dans les résultats, les résumés pour les décideurs ont un statut bien différent : ils effectuent inévitablement une sélection et une synthèse pour trouver un consensus entre les politiques. Cette recherche d’un accord sur la manière de formuler

¹⁰ Ces pays ne font pas partie de ce qu’on appelle l’Annexe 1, et ne sont pas engagés par le protocole de Kyoto à des réductions d’émission.

¹¹ Cette exigence a été constamment réaffirmée par ses présidents successifs (Bert Bolin, Robert Watson qui l’a remplacé en 1997 et, depuis 2003, Rajendra K. Pachauri).

¹² Il s’agit d’une association regroupant des pays insulaires du Pacifique qui craignent d’être submergés et engloutis par la montée des eaux.

les désaccords et les alternatives a conduit parfois à un style lénifiant sans arêtes ni dramatisation.

Le modèle du GIEC paraît à première vue s'inscrire dans le mode traditionnel des relations entre science et société, selon lequel le consensus scientifique précède l'action politique, mode qu'on a appelé *modèle linéaire* (Pielke, 1997). L'expression fut utilisée par Vannevar Bush, en 1945, dans son célèbre rapport *Science, the Endless Frontier*, dans lequel il préconisait que le gouvernement et les agences militaires américaines continuent de subventionner la science dans son ensemble et en particulier la recherche fondamentale car celle-ci conduit naturellement à la recherche appliquée puis aux applications. Ce cadrage a pour corollaire la séparation radicale entre science et politique : à la science, les faits, les connaissances ; à la politique, les décisions, les valeurs, les croyances. Le modèle linéaire est souvent accepté sinon revendiqué par les scientifiques, car il les protège d'un pilotage trop étroit par les pouvoirs, les lobbies ou le marché ; il semble préserver leur sphère d'autonomie.

Les historiens et sociologues des sciences ont déjà établi¹³ que le modèle linéaire ne fonctionne jamais comme tel, et se révèle inadéquat à rendre compte des interactions multiples et des allers-retours complexes entre sciences et applications. Dans le cas du changement climatique, Shackley et al. (1998) se sont attachés à montrer que le choix des GCM comme outil de prévision du changement climatique est grandement déterminé par leur utilisation pour la décision politique – les chercheurs et les politiques renforçant mutuellement leur légitimité par le recours aux GCM. L'un des exemples les plus intéressants de cette co-construction étudie l'utilisation, dans différents GCM, des « ajustements de flux » – un procédé empirique parfois utilisé dans les modèles pour corriger les dérives dues aux défauts des couplages entre océan et atmosphère, qui constituait il y a encore 10 ans la meilleure façon de produire des prévisions « réalistes » à long terme. L'enquête auprès de différents centres de recherche atteste que tous les modélisateurs étaient d'accord sur le caractère peu rigoureux de cette technique, mais certains considéraient qu'on pouvait l'utiliser tandis que d'autres l'évitaient ; or, ce choix dépendait de facteurs institutionnels et sociaux (liens avec l'IPCC ou recherche d'abord académique), bien plus que scientifiques (Shackley et al., 1999).

En réalité, nous sommes loin du modèle linéaire d'une expertise où les scientifiques auraient la tentation de mettre en boîte noire leurs faits et de les présenter au politique comme une réalité dure. Le témoignage d'une chercheuse du Laboratoire de Météorologie Dynamique (CNRS) donne un aperçu du traitement d'une controverse scientifique porteuse d'enjeux politiques au sein même du GIEC. Un climatologue américain du MIT, Richard Lindzen, avait avancé plusieurs théories contestant la rétroaction positive de la vapeur d'eau et des nuages sur l'effet de serre. Ses thèses, en mettant en cause tant l'importance du réchauffement global que la capacité des modèles à le simuler, ont vite débordé la sphère scientifique et fourni des arguments de poids aux « sceptiques » du changement climatique. Or, ces désaccords, débattus en profondeur par le groupe de travail du GIEC chargé de rédiger l'expertise sur ce point, ont été en grande partie résolus¹⁴.

¹³ Exemples de la constitution aux Etats-Unis du champ de la science des matériaux, de la microélectronique, de la biomédecine (Gaudillière, 2002) ou bien développement des mathématiques appliquées (Dahan Dalmedico, 2005b), ou encore essor de l'aéronautique et du spatial.

¹⁴ « A coup d'argumentations physiques rigoureuses et sans concessions, cette démarche a permis de réduire la part de subjectivité des jugements personnels et d'aboutir à une évaluation argumentée et relativement consensuelle des modèles. [...] » (Bony, 2004, p 38).

Pour la chercheuse, cet épisode montre que la controverse peut faire progresser l'expertise, et illustre une victoire de l'argumentation scientifique sur les « opinions extrêmes » de certains chercheurs, ainsi que la supériorité du débat acharné par rapport à un consensus factice. Mais il montre aussi, réciproquement, que la polémique politique a fait avancer la controverse scientifique : la nécessité d'obtenir une réponse inattaquable, la capacité du GIEC à réunir les meilleurs spécialistes du domaine, la rigueur des procédures de débat qu'il a instituées sont certainement pour beaucoup dans la construction d'un accord satisfaisant¹⁵. La fabrication d'un consensus, y compris sur des questions controversées et porteuses d'enjeux politiques, paraît ici encourager la réflexivité scientifique au cours même du processus d'expertise.

Depuis 1988, les scientifiques et les politiques ont avancé conjointement sur la question du changement climatique. Chacun des grands rapports du GIEC a préparé les grands moments de décision politique. Réciproquement, chaque COP et chaque étape nouvelle de la négociation ont été l'occasion d'une demande d'expertise supplémentaire ou d'une impulsion par le GIEC de nouvelles recherches. Sans avoir officiellement les moyens d'orienter précisément les programmes, le GIEC contribue à susciter de nouveaux intérêts, à engager certains travaux et, plus généralement, à faire évoluer l'image du climat et des interactions entre l'homme et l'environnement chez les scientifiques et les politiques.

Dans le dispositif institutionnel du régime du changement climatique, le ressort du GIEC est d'être, pour parler en termes latouriens, une *fabrique de purification* de la science (Latour, 1999), même si l'entreprise est sans cesse remise en chantier par la nature même de ce régime. En revanche, le SBSTA, organisme qui fait le lien entre les gouvernements et le GIEC, assume l'expression proprement politique des clivages et controverses apparus au sein des COP et des forums qui les accompagnent.

3.3. La méthodologie du GIEC entre science et politique, les scénarios

Revenons à la structuration du GIEC suivant les trois groupes de travail déjà mentionnés. La compréhension de l'interdépendance de leurs résultats constitue un trait fondamental de la reconfiguration du champ de la recherche, comme de l'ensemble du régime du changement climatique.

Le troisième rapport du GIEC (2001) présente de manière assez détaillée les résultats des projections climatiques jusqu'à la fin du 21^e siècle. Elles concluent à une augmentation de la température moyenne à la surface du globe allant de 2,5°C à 6°C. En fait, cette fourchette de réponses climatiques, pratiquement constante depuis quinze ans, agrège deux types d'incertitudes, celles venant de la pluralité des modèles et des insuffisances de la connaissance des mécanismes climatiques, et celles venant des différents *scénarios* ou trajectoires des concentrations de CO₂ qui interviennent en inputs des modèles – et qui reflètent nos comportements futurs.

Précisons cette question des *scénarios* d'émission de CO₂. Introduits dès 1992, les scénarios ont fait l'objet d'un rapport propre en 2000 (SRES)¹⁶ et apparaissent comme une composante significative de la méthodologie du GIEC. Au départ, les socio-économistes élaborent une série d'images de l'avenir agrégeant démographie, modes de développement économique,

¹⁵ Pour autant, cette pratique du GIEC ne saurait être assimilée aux « conférences de consensus », préconisées par Callon et al. (2001) pour faire avancer la résolution des controverses sociotechniques en situation d'incertitudes. Les conférences de consensus visent avant tout à contester l'autorité exclusive du savoir académique et à reconfigurer ainsi la relation du pouvoir au savoir. Au GIEC, il n'est pas question de savoirs profanes ou de démocratie dialogique ; les scientifiques s'opposent au nom de leurs convictions de spécialistes.

¹⁶ *Special Report on Emissions Scenarios* (2000).

choix sociaux et technologiques¹⁷. Ces *images du futur* sont traduites en *scénarios économiques*, qui produiront (souvent à l'aide de modèles intégrés) des *scénarios d'émissions de CO₂*. Ces émissions seront alors transformées (à l'aide de modèles du cycle du carbone) en *scénarios de concentrations atmosphériques* de CO₂. Ce sont enfin ces scénarios de concentration qui serviront de « forçage » d'entrée aux modèles de climat, lesquels produiront, après des mois de calcul sur ordinateur, des simulations climatiques. Concrètement, le GIEC a défini quatre classes de scénarios économiques (avec près de quarante variantes) qui se distinguent à la fois par leur « soutenabilité » (productivisme versus développement durable) et par leur « ouverture » (marché global versus développement national ou régional protectionniste).

L'origine de la notion de scénario se situe dans les travaux issus de la dynamique des systèmes de Forrester et du Club de Rome des années 1970 et dans une réflexion récurrente et controversée sur les limites de la croissance. Elle a été reprise dans les années 1980 et 1990 dans des modèles dits *d'évaluation intégrée*, qui couplaient des modèles physiques très simplifiés avec des modèles économiques pour constituer des instruments de simulation au service de décideurs et de négociateurs. Il est assez remarquable que l'instance scientifico-politique du GIEC ait renoué, dans un périmètre ambigu, avec les termes d'un choix fondamental, relatif aux modes de développement (durable ?, de croissance ?), et aux conceptions des rapports d'échange entre les diverses parties du globe, tout particulièrement entre le Nord et le Sud.

Toutefois, cette présentation simplifiée et linéaire de la méthodologie est, pour des raisons inhérentes à la question même des projections de très long terme, en partie fallacieuse. Etant donnée l'importance des questions d'interactions et de rétroactions, le premier groupe du GIEC, qui utilise les scénarios produits par le troisième groupe, devrait tenir compte également des éléments issus du travail du deuxième groupe qui étudie les impacts. Comment l'hydrologie va-t-elle être affectée ? Comment la couverture végétale va-t-elle être modifiée au cours des premières décennies qui subiront un réchauffement climatique éventuel ? Les réponses à ces questions sont cruciales dans l'écriture des modèles du premier groupe et varient elles-mêmes selon les stratégies économiques mobilisées à telle ou telle étape du processus. De plus, elles pèsent en retour dans la deuxième phase de la méthodologie : le passage des émissions aux concentrations qui mobilise les cycles biochimiques.

En résumé, les modèles et les résultats utilisés par chacun des trois groupes du GIEC devraient, au moins en droit, tenir compte des résultats des deux autres. Ceci est d'autant plus important que l'on cherche à fournir des prédictions à plus long terme. Cette caractéristique fondamentale et spécifique du champ de recherche, très difficile encore à mettre en oeuvre, interdit en principe les cloisonnements étanches entre les trois WG, en particulier l'isolement des experts des sciences du climat. Le GIEC, par son organisation et la structuration du processus d'expertise qu'il a mis en oeuvre, a précédé de ce point de vue les communautés scientifiques nationales.

4. La modélisation du climat en France et ses reconfigurations au cours des années 1990

Une institution d'expertise internationale comme le GIEC fonctionne en interaction étroite avec les communautés scientifiques nationales : elle se nourrit (ou non) de leurs recherches, cherche à attirer (ou non) certains de leurs brillants chercheurs ; elle détermine en retour des

¹⁷ Ces scénarios ont été élaborés sans postuler l'intervention de politiques climatiques et ne prennent pas en compte les objectifs d'émissions fixés par le protocole de Kyoto – même s'ils postulent à des degrés divers des préoccupations environnementales.

orientations et des cadres généraux. Il nous a paru intéressant d'étudier comment la montée en puissance du changement climatique et celle du GIEC se sont traduites, en France, dans la communauté des sciences du climat. Une des questions posée est donc : comment une communauté de recherche infléchit-elle ses pratiques au niveau national, lorsqu'elle est soumise à une intégration internationale soulevant des questions directement politiques ? De plus, la France est caractérisée par l'existence de deux pôles de modélisation du climat : la Météorologie Nationale, organisme public de la prévision météorologique et le Laboratoire de Météorologie dynamique (LMD), affilié au CNRS. Cette situation permet de mesurer l'importance des facteurs institutionnels, sociologiques et anthropologiques dans l'organisation et les réactions des communautés de recherche et dans leur confrontation aux enjeux politiques.

4.1. Les deux pôles français de modélisation du climat, pratiques et évolutions

En France, les premiers modèles du climat ont commencé à être développés au début des années 1970, à la Météorologie Nationale et au Laboratoire de Météorologie dynamique (LMD) dépendant du CNRS. Fondé en 1968, le LMD combine les différents outils de recherche sur le climat : théorie, modélisation, observation spatiale. Quelques mathématiciens et physiciens y développent un modèle de circulation générale « fait maison », avec lesquels ils effectuent, durant la décennie 1980, plusieurs simulations climatiques (dernier maximum glaciaire, sensibilité du climat à la désertification, etc.) A la Météorologie Nationale, en revanche, la modélisation du climat est d'abord une retombée de la prévision numérique du temps ; depuis 1980, chaque nouveau modèle pour la prévision développé par l'organisme possédait sa « version climat » dotée d'une physique adaptée aux échelles climatiques.

L'étude de la modélisation du climat dans ces deux organismes fait apparaître des pratiques de recherche assez dissemblables, qu'il est intéressant de mentionner pour mieux saisir les façons différentes dont ces institutions vont prendre en charge le problème du changement climatique. En grossissant le trait, au LMD, une culture individualiste, très attachée à la recherche fondamentale, prévaut. La recherche est très peu hiérarchisée ; chaque chercheur fait alterner librement la recherche sur un phénomène précis, l'amélioration des modèles, les simulations climatiques... Côté Météo-France, en revanche, le travail est très dirigé et efficace sur le plan opérationnel ; il relève parfois davantage de l'*engineering* ou du management que de la recherche. Les chercheurs du LMD et de Météo-France ont des formations différentes, bien que les distinctions tendent à s'atténuer : ceux du LMD ont un cursus universitaire et une formation par la recherche, les chercheurs de Météo-France sont généralement des ingénieurs de l'Ecole Polytechnique qui intègrent le Corps de la Météorologie. L'origine des différences de pratiques réside principalement dans l'organisation et la culture spécifique à chaque institution, et dans les rôles différents qu'elles assignent aux modèles de climat.

A la fin des années 1980, l'existence de deux pôles de modélisation sans réelle coordination et la dispersion des équipes apparaissent, aux yeux de plusieurs responsables de laboratoires, à l'origine d'une certaine inefficacité et d'un manque de visibilité internationale. La modélisation du climat connaît alors des reconfigurations importantes. Quelques personnalités jouent un rôle déterminant, en particulier Gérard Mégie, spécialiste de l'ozone très sensibilisé à l'importance des problèmes environnementaux (et futur président du CNRS), et le paléoclimatologue Jean Jouzel (actuel directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace) tôt engagé au niveau du GIEC, dont les découvertes sur les instabilités du climat passé ont beaucoup contribué, en France, à alerter la communauté.

La première tentative de recomposition de la communauté française se solde pourtant par un *statu quo*. En 1990, l'équipe de modélisation du LMD, qui devait changer de modèle pour s'adapter à l'évolution des ordinateurs, est face à un choix crucial : construire son propre modèle ou adopter celui de Météo-France comme unique modèle de climat français. Réunis en séminaire interne, les chercheurs du LMD ont pris la décision stratégique de poursuivre le développement de leur propre modèle. Ils refusaient de s'intégrer au style de travail plus organisé et hiérarchisé de Météo-France, craignant de devenir davantage utilisateurs qu'acteurs dans le développement du nouveau modèle¹⁸.

La modélisation du climat connaissait alors un retard dans un domaine essentiel, le couplage entre l'océan et l'atmosphère – retard imputable à l'absence de programme ou de structure favorisant ces couplages et à l'absence de liens entre la communauté des climatologues et celle des océanologues. La création d'un nouvel organisme à Toulouse, le Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (CERFACS)¹⁹, va jouer enfin le rôle de catalyseur : c'est là qu'est développé un outil « universel », qui a permis de coupler le modèle d'océan du Laboratoire d'océanographie dynamique et de climatologie (LODYC) de l'Université de Jussieu, avec les deux modèles atmosphériques du LMD et de Météo-France.

Une autre réorganisation de la recherche sur le climat aboutit à un succès : l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) voit le jour en 1994. Il regroupe six laboratoires du CNRS (ou affiliés) de la région parisienne, consacré chacun à une composante du climat : l'atmosphère (pour le LMD), l'océan (pour le LODYC), la paléoclimatologie et la biosphère, la haute atmosphère, etc. Les initiateurs de cette fédération ne sont pas les directions institutionnelles, mais des chercheurs, désireux de mettre en commun les activités de modélisation, les moyens expérimentaux et spatiaux, et créer des liens entre des communautés cloisonnées, pour « aborder de front le caractère interdisciplinaire du problème climatique ». Ces initiatives de recomposition, tout en conservant la bipolarité du champ liée à deux styles de travail bien spécifiques, vont permettre d'adapter la recherche en France aux évolutions internationales des sciences du climat.

L'évolution majeure de la modélisation dans les années 1990 réside en effet dans l'intégration d'un nombre croissant de milieux, d'interactions et de rétroactions dans les modèles. Après les modèles couplés océan-atmosphère, on assiste à une généralisation des couplages entre différents modèles – chimie, hydrologie, végétation... La dynamique propre de la modélisation du climat (prendre en compte de nouveaux facteurs) et la croissance exponentielle de la puissance des ordinateurs²⁰ poussent à cette complexification des modèles ; et la question du changement climatique, en exigeant des projections à long terme, amplifie encore la tendance.

Cette évolution transforme profondément les pratiques des modélisateurs. Alors que chaque laboratoire de l'IPSL était centré sur des thématiques scientifiques liées à un seul milieu

¹⁸ Hervé Le Treut, directeur du LMD, donne son analyse : « Le modèle est ce qui fédère la communauté : la communauté crée le modèle mais elle est aussi créée par le modèle. Mais si la communauté est très artificielle, si elle n'a pas été structurée (...), il n'est pas très facile de bâtir un modèle commun. » Entretien, 16 juillet 2003.

¹⁹ Le CERFACS a été créé en 1987 à Toulouse afin d'utiliser les plus puissants calculateurs pour résoudre des problèmes de physique dans la recherche ou l'industrie. Le mathématicien Jacques-Louis Lions, engagé dans des recherches théoriques sur les modèles climatiques, a joué un rôle déterminant dans sa création et dans les choix méthodologiques du couplage. Voir Dahan Dalmedico 2005b, p 245-249.

²⁰ Sur le rôle de l'ordinateur comme « zone d'échange » entre disciplines différentes, voir Galison (1998), et aussi Armatte et Dahan Dalmedico (2004).

(océan, atmosphère), le travail sur les couplages de modèles relève d'une autre logique, transversale, qui demande aux scientifiques d'élargir leur champ disciplinaire et de s'engager dans un projet collectif²¹. Si les collaborations pluridisciplinaires apportent un réel renouvellement des perspectives sur le climat, elles vont rarement sans tensions et désaccords. En outre, tous les chercheurs ne trouvent pas un intérêt aux couplages pour leur propre recherche. Le couplage des modèles est en effet une tâche lourde, consistant en simulations de contrôles, réglages et corrections de *bugs*, et ne produisant pas immédiatement de résultats scientifiques. Peu de chercheurs souhaitent y consacrer du temps. A l'IPSL, leur prise en charge ne repose pas sur un management rigoureux mais sur l'enthousiasme et la bonne volonté de quelques individus qui doivent savoir mobiliser les autres, harmoniser les contributions des laboratoires et définir les priorités du groupe²².

Un autre facteur d'évolution des pratiques est la part croissante prise dans la recherche par les grands projets nationaux, internationaux et européens qui attribuent des fonds et des postes de doctorants ou post-doctorants. Ces programmes sont souvent accusés de pousser à une prise en compte de phénomènes toujours plus nombreux au détriment de réflexions fondamentales sur les processus, et d'encourager une « dérive technocratique » qui conduirait à assimiler systématiquement le meilleur modèle au plus « réaliste » et au plus complexe. C'est pour s'opposer à cette tendance que les chercheurs prônent le recours à une hiérarchie de modèles de complexités variables et restent attachés à la pluralité des modèles²³.

Ainsi, la culture des chercheurs, leur façon de travailler, leurs critères de ce qui constitue une recherche intéressante, ainsi que la logique institutionnelle du CNRS (nécessité impérieuse de produire des articles originaux) sont parfois entrés en conflit avec le besoin de modèles de plus en plus couplés et intégrés, nécessaires dans l'étude du changement climatique à long terme.

4.2. *Participer aux simulations pour le GIEC*

Ces difficultés et résistances, comme le retard mentionné dans le couplage océan-atmosphère, expliquent en partie l'absence des modèles français dans les deux premiers rapports du GIEC. Aucune simulation de l'IPSL ou de Météo-France ne figure dans les rapports de 1990 et 1995 (même si les travaux français y sont cités). Dans le 3^e rapport (2001), ces modèles sont encore peu présents²⁴. Ce n'est que récemment que les deux institutions ont décidé de placer les simulations pour l'IPCC en tête de leurs priorités.

D'autres raisons expliquent cette mobilisation tardive. Au LMD, la réalisation de simulations était jugée scientifiquement peu intéressante, difficile à valoriser, tout en exigeant un travail informatique important ; or, le laboratoire ne disposait pas de moyens nécessaires, en particulier en ingénieurs, pour effectuer toutes ces simulations. De plus, les scientifiques se

²¹ Interview de H. Le Treut, 17 juillet 2001.

²² « Les règles de la recherche actuelle se prêtent mieux à 10 petits sujets disciplinaires où chacun est son chef, qu'à un grand projet transdisciplinaire où il faut un seul chef. » Interview de Pascale Braconnot, responsable du pôle de modélisation de l'IPSL, juillet 2003.

²³ La pluralité est jugée également nécessaire au sein même des GCM, une multiplicité de modèles permettant de mieux couvrir le domaine des climats possibles. Le projet d'un modèle unique commun à toute l'Europe a d'ailleurs été repoussé par les climatologues européens.

²⁴ Pour le 3^e rapport de l'IPCC, 4 simulations ont été réalisées avec le GCM de l'IPSL, et une avec celui de Météo-France (sur environ 150 simulations présentes dans le rapport).

sentaient généralement peu concernés par la participation aux travaux du GIEC : ils ne percevaient pas le changement climatique comme un enjeu majeur et ne voyaient pas l'intérêt de « refaire en France des choses qui se faisaient ailleurs »²⁵. C'est souvent la participation active aux travaux du GIEC qui a suscité une prise de conscience de l'importance du problème et a sensibilisé à l'intérêt scientifique du processus d'expertise.

Enfin, les ministères de tutelle ou les directions des institutions ne sont pas ou peu intervenus pour inciter à la réalisation de simulations ou pousser les recherches sur le changement climatique, contrairement à ce qui s'est produit dans d'autres pays, comme l'Allemagne ou le Royaume Uni²⁶. Il a fallu que le problème soit posé à l'échelle internationale et que les sphères politiques s'en préoccupent, suscitant en retour la demande d'études plus importantes, pour que les modélisateurs s'investissent dans ces recherches.

Depuis quelques années, l'IPSL et Météo-France, qui disposent désormais chacun d'un modèle couplé, ont revu à la hausse leur participation aux simulations climatiques pour le rapport du GIEC de 2007. Météo-France a décidé d'y consacrer le tiers des moyens de la recherche en personnel et en heures de calculs, et ses chercheurs y voient un « passage obligé » pour se comparer aux autres équipes de modélisation dans le monde. A l'IPSL, où la participation au GIEC constitue aujourd'hui une priorité affichée, les chercheurs s'efforcent d'apporter une « valeur ajoutée » en articulant des recherches plus innovantes aux scénarios de base proposés par le GIEC²⁷. Ainsi, l'IPSL a réalisé en 2001 une simulation du climat prenant en compte pour la première fois la rétroaction du cycle du CO₂, qui a livré des enseignements de première importance²⁸. L'*a priori* souvent négatif des chercheurs a fait place à une conscience accrue de l'intérêt scientifique du processus d'expertise. Toutefois, toujours soucieux de garder le contrôle de l'utilisation de leurs modèles, les chercheurs mettent en garde contre leur utilisation comme des boîtes noires, des « machines à produire des images en couleur de climats » fournissant des prévisions pour la décision politique²⁹.

On peut conclure de cette partie consacrée à la communauté des sciences du climat en France que les aspects sociologiques qui la caractérisent — division et organisation du travail dans les différentes institutions, rapport des chercheurs à leurs modèles, conceptions de ce qu'est la *bonne* recherche, figures idéales dans lesquelles se projettent les chercheurs, engagement environnemental — se sont avérés tout à fait déterminants dans sa confrontation aux enjeux géopolitiques. Ces facteurs ont pesé bien davantage que les politiques de recherche scientifique (ou absence de politiques) promues en France par les divers pouvoirs.

²⁵ Interview de Hervé Le Treut, 17 Juillet 2001.

²⁶ Au Royaume Uni, le Hadley Centre a été créé dès 1989 par Margaret Thatcher avec la mission de prendre en charge la recherche sur le changement climatique. Un climatologue français raconte qu'ayant participé au 3^e rapport du GIEC et à d'autres rapports internationaux, il n'a jamais été sollicité par les organismes français. Mais travaillant au Hadley Centre depuis trois mois seulement, il a reçu une demande du Ministère britannique de l'environnement pour faire une présentation au Parlement européen sur le changement climatique. Interview d'Olivier Boucher, Hadley Centre, juin 2005.

²⁷ Interview de P. Braconnot, juillet 2003.

²⁸ Dans cette simulation, pour la première fois, les concentrations atmosphériques de CO₂ n'étaient pas données en input, mais *calculées par le modèle* à partir de scénarios d'émissions, ce qui permet de prendre en compte la rétroaction de l'évolution du climat sur le cycle du carbone. Ce travail a montré que dans un climat plus chaud, l'océan et la végétation absorberont une moindre proportion du CO₂, ce qui accroîtra d'autant sa concentration atmosphérique – et donc l'effet de serre (feed-back positif).

²⁹ Interview de H. Le Treut, juillet 2001.

5. Enjeux géopolitiques. Un rôle nouveau pour les modèles ?

Revenons au niveau géopolitique pour évoquer l'ascension du thème de *l'adaptation* dans les conférences annuelles (COP) de négociations climatiques et expliciter les enjeux de ce thème pour les pays en développement. Cette question porte en germe une contestation politique du paradigme fondamental des sciences du climat et invite à s'interroger sur l'évolution possible du rôle des modèles et des objectifs de la modélisation.

5.1. *Le GIEC, les pays en développement et les enjeux de l'adaptation*

Historiquement, depuis la création du GIEC, le changement climatique a été vu comme un phénomène graduel dont les impacts se feraient sentir à long terme, dans les 50 ou 100 ans à venir. La priorité fut mise sur la réduction à court et moyen terme des émissions de CO₂, dans les dix ou vingt prochaines années. L'objectif ultime de la convention des Nations Unies est explicite : « stabiliser » les émissions pour ne pas dépasser un certain seuil de « dangerosité » (article 2). L'adaptation au changement climatique est mentionnée de façon secondaire et peu précise, bien que le niveau de dangerosité dépende beaucoup de la capacité d'adaptation des écosystèmes et anthroposystèmes au changement. Le processus de négociations politiques qui a culminé dans le protocole de Kyoto s'est également surtout concentré sur les réductions d'émissions avec une discussion des outils de flexibilité économique.

C'est à Delhi, en 2002, – première COP après l'élection de G. W. Bush où les Etats-Unis ont annoncé qu'ils ne signeraient pas le protocole de Kyoto – que les Américains ont commencé à avancer la « réduction de la vulnérabilité des pays du Sud à la variabilité climatique » comme un thème central du processus de négociations, nettement alternatif à la réduction des émissions. Une convergence de fait s'est alors cristallisée entre les Etats-Unis qui voulaient retarder le temps de l'action et les pays du Sud qui voyaient dans cette thématique une source de financements supplémentaires sans contraindre leur développement et sans évoquer ce qui se passerait au-delà de 2012. Le thème de l'adaptation n'a cessé ensuite de monter en puissance jusqu'à la COP 10 de Buenos Aires en 2004, où l'adaptation a été reconnue comme une nouvelle priorité, au moins à égalité avec la réduction des émissions. L'Europe s'y est ralliée, affirmant, contrairement aux Etats-Unis, qu'elle ne séparait pas adaptation et réduction.

Pour les pays du Sud, l'enjeu principal est leur développement. La question climatique lui est nettement subordonnée, elle est postérieure dans la hiérarchie des urgences à résoudre. Si certains pays se sentent très concernés par le changement climatique (en raison du risque de montée annoncée des eaux ou d'une fréquence accrue d'événements extrêmes), il leur paraît plus urgent de parler d'adaptation (traiter les questions d'usage des sols, d'eau potable, de distribution de l'électricité...) plutôt que du taux de CO₂ dans l'atmosphère. Quant aux pays en émergence, comme la Chine, l'Inde, ou le Brésil, dont l'importance politique ne cesse de croître au sein du forum climatique, ils apprécient aussi l'adaptation qu'ils envisagent comme un moyen de transferts financiers, sans engagements de leur part.

Depuis 1992, il est manifeste que la question climatique a contribué au retour sur la scène internationale des pays en développement³⁰. En moins de dix ans, le changement climatique est passé d'un sujet scientifique complexe à celui d'un thème politique aux enjeux nationaux, économiques, sociaux et diplomatiques, mettant en compétition des intérêts économiques, des

³⁰ Evidemment, le climat n'est pas le seul facteur de la reprise du dialogue Nord-Sud. Il n'est pas dans l'objectif de cet article de développer des analyses sur ces questions.

conceptions du droit et de l'équité, des visions du futur, et faisant diverger les choix politiques. La mise en avant du thème de l'adaptation dans le processus des COP et également au sein du GIEC illustre ce déplacement et soulève de nouveaux enjeux.

La direction du GIEC a constamment cherché à avoir une représentativité géographique très large, conformément à l'idée selon laquelle les pays n'accepteraient jamais des analyses ou des mesures préconisées au cours d'un processus dont ils seraient exclus. La participation des gouvernements au processus est passée de 48 pays en 1990, à 96 en 1995, et atteint aujourd'hui 192 pays, un succès incontestable. Dès 1993, il fut stipulé que chaque chapitre d'un rapport serait sous la responsabilité conjointe d'au moins un auteur du Sud et un auteur du Nord ; peu après, la présidence des trois groupes devint également conjointe. Cette décision a revêtu une importance considérable : avoir œuvré pour que les pays soient représentés le plus largement possible au sein du GIEC, sans mettre en avant le fait que les scientifiques des pays en développement pourraient y être de moindre niveau, a contribué à la bonne image du GIEC dans les pays du Sud sans entamer sa crédibilité scientifique au Nord. De nombreux scientifiques du Sud, dont certains vivaient en Occident, ont pris des responsabilités croissantes dans le GIEC, sont retournés dans leurs pays, y dirigent des centres de recherche. Certains sont devenus des experts, voire des négociateurs auprès de leurs gouvernements, ils participent éventuellement au SBSTA. Les fonctions et les « casquettes » ont évolué ou se sont superposées.

5.2. La modélisation numérique globale est-elle un « langage du Nord » ?

Initialement, l'adaptation devait être traitée dans le WG II, mais le travail du groupe s'est surtout concentré sur l'évaluation des impacts et l'adaptation fut longtemps négligée. Aujourd'hui, les dirigeants du GIEC affirment fortement la nouvelle priorité de l'adaptation. Les responsables des groupes II et III pour le 4^e rapport (prévu en 2007) annoncent que celui-ci va mieux intégrer l'analyse des vulnérabilités et de l'adaptation, multiplier les études de cas concrets et même intégrer la littérature grise, car les savoirs locaux relatifs à l'adaptation ne sont pas académiques et restent peu publiés dans des revues internationales.

Des représentants du Sud nous ont déclaré³¹ : « au début, l'enjeu des COP était le climat, puis ce fut les impacts, aujourd'hui c'est le développement. »³² Ou encore : « Dans le 1^{er} Rapport du GIEC, on parlait de molécules, dans le 2^e Rapport, de molécules et de dollars, dans le 3^e, on a introduit enfin les humains, et désormais cela va aller croissant. »³³ Or, mettre l'adaptation en avant, c'est bouleverser un peu plus la hiérarchie d'influence entre les trois groupes du GIEC, souligner le rôle du deuxième groupe, et surtout permettre que les pays moins développés et industrialisés s'intègrent mieux au processus d'évaluation.

Le thème de l'adaptation s'accompagne en filigrane d'une contestation importante de la méthodologie qui a constitué le cadre du régime du changement climatique depuis quinze ans. « Le langage de la modélisation est un '*langage du Nord*' qui a eu ses mérites mais ne peut plus suffire aujourd'hui », avons-nous entendu à plusieurs reprises. Nous avons recueilli des échos similaires dans d'autres études sur le régime climatique (Lahsen, 2004, 2005 ; Miller, 2004).

³¹ Au cours de la COP 10 de Buenos Aires (décembre 2004), un certain nombre de personnalités (scientifiques, experts, conseillers) des pays du Sud ont accordé à Amy Dahan et Venance Journé de longs entretiens. Cet article s'appuie sur ce matériau qui fera par ailleurs l'objet d'une analyse approfondie.

³² Ogunlade Davidson (Sierra Leone), économiste de l'énergie, président du groupe III, vice-président du GIEC.

³³ Atiq Rahman, responsable du chapitre 19 du WG II, chimiste au Bangladesh.

Pour les scientifiques du Sud que nous avons interviewés, presque tous impliqués dans le GIEC, avec de grandes responsabilités, il ne s'agit certes pas d'affirmations de type relativiste ou lyssenkiste³⁴. Ce que ces personnalités dénoncent, c'est le cadrage *politique* du régime du changement climatique dans lequel la modélisation numérique a occupé une place trop longtemps exclusive. La méthode des modèles consiste principalement en la résolution numérique d'un problème mathématique d'évolution dont on fixe l'état initial. Or, ce qu'expriment ces critiques, c'est que, utilisée dans le cadre politique, la méthode efface le passé, naturalise le présent et globalise le futur.

Nos interlocuteurs critiquent en effet une vision « physicienne » et globalisante qui admet l'état actuel comme neutre, alors que l'instant initial — l'année 1990, référence du protocole de Kyoto — n'est pas un donné naturel, mais englobe forcément un ensemble de conditions politiques, économiques et sociales héritées de l'histoire. Ils critiquent une vision qui n'envisage le CO₂ et les autres gaz à effet de serre que comme des molécules comptabilisées selon leur pouvoir de réchauffement global, annulant les disparités locales (le méthane de survivance des rizières d'Asie étant ainsi confondu, notent-ils, avec le CO₂ des voitures du Nord !). Ces interlocuteurs revendiquent la possibilité d'une autre perception du changement climatique, à laquelle le thème de l'adaptation leur semble laisser plus de place.

6. Remarques conclusives

Bruno Latour (2001) a proposé l'image d'une rosace à cinq boucles pour figurer ce qu'il nomme le *système circulatoire de production des faits scientifiques* (dans un domaine donné), dont l'historien, le sociologue ou l'anthropologue des sciences devrait suivre les entrelacs pour pouvoir rendre compte de cette production (Latour, 2001, p. 103). Les boucles sont associées : 1) à la mobilisation du monde, 2) aux communautés épistémiques, 3) aux alliances qu'il faut établir hors de la recherche pour que celle-ci gagne de l'influence et se développe, enfin 4) à la représentation publique. La boucle centrale dit Latour — celle des « nœuds et des liens » — tient l'ensemble et lui assure une solide cohésion. Elle renvoie au cœur scientifique du problème posé, auquel on revient sans cesse, et qui détermine toutes les interactions ; sans qu'on puisse toutefois réduire ce cœur au *contenu cognitif* du problème dont le reste ne serait alors que le *contexte*. Bien que notre aperçu n'ait pas permis de parcourir ici l'ensemble des lacets et des boucles, notre analyse du régime du changement climatique s'inscrit adéquatement dans cette vision latourienne, avec deux spécificités fortes qu'il convient de souligner.

La première est le lien exceptionnellement privilégié avec le politique qui a abouti, en près de quinze ans, à déplacer et redéfinir le caractère même du problème posé. Or, la communauté des sciences du climat disposait de problématiques et de méthodologies longuement éprouvées. Un lien si direct avec le politique ne va pas de soi ; il a suscité, en France, en particulier dans cette communauté fortement attachée à la tradition de recherches fondamentales et à une certaine image de la Science, des résistances. Celles-ci semblent aujourd'hui dépassées. La COP 10 de Buenos Aires a été officieusement nommée « COP de l'Adaptation » (Ott et al., 2005, entre autres), bien qu'il soit trop tôt pour mesurer quelles vont être les répercussions de ces nouveaux enjeux sur les pratiques scientifiques, sur le processus de négociations politiques ou sur l'ensemble du régime du changement climatique. On note dans le milieu de la modélisation globale du climat des déplacements d'intérêts vers les modèles régionaux, l'étude des

³⁴ On se rappelle les controverses de sinistre mémoire entre science bourgeoise et science prolétarienne à propos des théories de Lyssenko.

événements extrêmes ou des « surprises climatiques », le rôle de l'usage des sols, et enfin, vers la part des différents gaz dans le réchauffement. La réduction des incertitudes restant au cœur de tous les programmes.

La deuxième spécificité du champ est le rôle singulier joué par le GIEC dans la boucle centrale qui assure la cohésion de cet ensemble hétérogène et les dynamiques de son développement. Dans les exemples traités par Latour, ce sont, implicitement, les figures mythiques de Joliot ou de Pasteur qui confèrent à la boucle centrale sa topologie. Dans notre cas, c'est le collectif du GIEC, bien qu'il ne soit qu'un des éléments du régime et que d'autres institutions (comme le SBSTA brièvement mentionné ici) jouent un rôle politique important. La place originelle assignée au GIEC, la structuration qu'il a adoptée, l'*expertise réflexive* qu'il a réussie à promouvoir (partiellement due aux pressions politiques pour une déconstruction des assertions scientifiques), l'attention qu'il a accepté de porter aux préoccupations des pays du Sud, autant de facteurs qui ont fini par lui assurer le respect tant des scientifiques que des politiques. Les va-et-vient qui s'effectuent, sous ses auspices, entre les divers WG, entre les divers intérêts, plus généralement entre science et politique, en font le véritable fer de lance de ce régime.

Contrairement à l'épistémologie traditionnelle du modèle d'expertise que pourtant il revendique, le GIEC a joué un rôle essentiel à l'articulation des deux ordres du scientifique et du politique qui ont avancé conjointement, en interaction l'un avec l'autre, y compris en l'absence de consensus général au sein de chacun d'eux³⁵.

Références

- Agrawala, S., 1998. Context and early origins of the intergovernmental panel on climate change. *Climate Change* 39, 605–620.
- Armatte, M., 2003. Modèles économiques du changement climatique : coûts et avantages de l'intégration. In: Freguglia, P. (Ed.), *The Science of Complexity, chimera or reality? Proceeding of Arcidosso International Workshop*. Esculapio Editions, Italie.
- Armatte, M., Dahan Dalmedico, A., 2004. Modèles et Modélisations (1950-2000) : Nouvelles pratiques, nouveaux enjeux. *Revue d'Histoire des Sciences* 57 (2), 243–303.
- Aspray, W., 1990. *John von Neumann and the origins of modern computing*. MIT Press, Cambridge.
- Bodansky, D., 2001. The History of the Global Climate Change Regime. In: Luterbacher, U., Sprinz, D.F. (Eds.), *International Relations and Global Climate Change*. MIT Press, Cambridge, pp. 23–40.
- Bony, S., 2004. Comment le débat scientifique a fait progresser l'expertise sur les rétroactions atmosphériques. In: Le Treut, H., et al. (Eds.), *Science du Changement Climatique, Acquis et Controverses*. IDDRI.
- Callon, M., Lascoumes, P., Barthe, Y., 2001. *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*. Seuil, Paris.
- Dahan Dalmedico, A., 2001. History and epistemology of models : meteorology (1946-1963) as a case study. *Archive History Exact Sciences* 55, 395–422.
- Dahan Dalmedico, A., à paraître. Models and Simulations in Climate Change. Historical, epistemological, anthropological and political aspects. In : Creager, A., Lunsbeck, E., Wise, N. (Eds.), *Science without Laws : Model Systems, Cases and Exemplary Narratives*. Duke University Press, Durham.
- Dahan Dalmedico, A., 2005a. Models, anti-reductionnism and complexity in Climate Change. In: Freguglia, P. (Ed.), *The Science of Complexity, chimera or reality? Proceeding of Arcidosso International Workshop September 2003*. Esculapio Editions, pp. 115–131.
- Dahan Dalmedico, A., 2005b. Jacques-Louis Lions, un mathématicien d'exception entre Recherche, Industrie et Politique. *La Découverte*, Paris.
- Dahan Dalmedico, A., Guillemot, H., à paraître. *Modeling Climate in France (1970–2000)*.

³⁵ Il est en passe de devenir l'idéal-type pour d'autres projets internationaux d'*assessment* : biodiversité (Millenium Ecosystem Assessment), eau (World Water vision), agriculture (International Assessment of Agricultural Science and Technology of Development).

- Edwards, P.N., Schneider, S.H., 2001. Self-governance and peer review in science-for-policy : the case of the IPCC Second Assessment Report. In: Miller, C., Edwards, P. (Eds.), *Changing atmosphere. Expert knowledge and environmental governance*. MIT Press, Cambridge, pp. 219–246.
- Fleming, J., 1998. *Historical perspectives on climate change*. Oxford University Press, New York.
- Galison, P., 1998. Computer simulations and the trading zone. In: Galison, P., Stump, D. (Eds.), *The Disunity of science : boundaries, context and power*. Stanford University Press, Stanford, pp. 118–157.
- Gaudillière, J.-P., 2002. *Inventer la biomédecine*. La Découverte, Paris.
- Gibbons, M., Limoges, C., Nowotny, H., Schwartzman, S., Scott, P., Trow, M., 1994. *The new Production of Knowledge : The Dynamics of Science and Reserach in Contemporary Societies*. SAGE Publications, Londres.
- Hourcade, J.-C., 2000. *Le Climat est-il une marchandise?* Etudes, 3933.
- Jasanoff, S., Wynne, B., 1998. Science and Decision-Making. In: Rayner, S., Malone, E. (Eds.), *Human Choice and Climate Change*, vol 1. *The Societal Framework*. Battelle Press, Columbus, OH, pp. 1–87.
- Kandel, R., 2002. Les modèles météorologiques et climatiques. In: Nouvel, P. (Ed.), *Enquête sur le concept de modèle*. PUF, Paris.
- Kwa, C., 2001. The rise and fall of weather modification : changes in American attitudes toward technology, nature and society. In: Miller, C., Edwards, P. (Eds.), *Changing atmosphere. Expert knowledge and environmental governance*. MIT Press, Cambridge.
- Lahsen, M., 2004. *Transnational Locals : Brazilian Experiences of the Climate Regime*. In: Jasanoff, S., Martello, M. L. (Eds.), *Earthly Politics*. MIT Press, Cambridge.
- Lahsen, M., 2005. Technocracy, Democracy, and U.S. Climate Politics : the Need of Demarcations. *Science, Technology and Human Values* 30 (1), 137–169.
- Latour, B., 1999. *Politiques de la Nature. Comment faire entrer les sciences en démocratie*. La Découverte, Paris.
- Latour, B., 2001. *L'espoir de Pandore*. La Découverte, Paris.
- Luterbacher, U., Sprinz, D.F., 2001. *International relations and Global Climate Change*. MIT Press, Cambridge.
- Manabe, S., 1997. Early development in the study of greenhouse warming : the emergence of climate models. *Ambio* 26 (1).
- Miller, C., 2001a. Scientific Internationalism in American Foreign Policy : The Case of Meteorology, 1947-1958. In: Miller, C., Edwards, N. (Eds.), *Changing the Atmosphere*. MIT Press, Cambridge, pp. 167–217.
- Miller, C., 2001b. Challenges in the Application of Science to Global Affairs : Contingency, Trust and Moral Order. In: Miller, C., Edwards, N. (Eds.), *Changing the Atmosphere*. MIT Press, Cambridge, pp. 247–285.
- Miller, C., 2004. Resisting Empire : Globalism, Relocalization, and the Politics of Knowledge. In: Jasanoff, S., Martello, M.L. (Eds.), *Earthly Politics*. MIT Press, Cambridge, pp. 81–102.
- Nebeker, J., 1995. *Calculating the weather: meteorology in the 20th century*. International Geophysics Series 60. Academic Press.
- Nowotny, H., Scott, P., Gibbons, M., 2001. *Re-thinking Science, Knowledge and Public in an Age of Uncertainty*. Polity Press, Cambridge.
- Ott, H.E., Brouns, B., Sterk, W., Wittneben, B., 2005. It Takes Two to Tango – Climate Policy at COP 10 in Buenos Aires and Beyond. *Journal European Environmental & Planning Law (JRRPL)* 2.
- Paterson, M., 1996. *Global Warming and Global Politics*. Routledge, Londres.
- Pestre, D., 2003. *Science, argent et politique*. INRA, Paris.
- Pielke Jr., R., 1997. Asking the Right Questions: Atmospheric Sciences Research and Societal Needs. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 (2), 255–264.
- Pielke Jr., R., 2001. Policy, Politics and perspective : The scientific community must distinguish analysis from advocacy. *Nature* 416, 368 (March 28).
- Raustiala, K., 2001. Nonstates Actors in the Global Climate Regime. In: Luterbacher, U., Sprinz, D.F. (Eds.). pp. 95–117.
- Roqueplo, P., 1993. *Climats sous surveillance*. Economica, Paris.
- Roqueplo, P., 1997. *Entre savoir et décision, l'expertise scientifique*. Editions de l'INRA, Paris.
- Sarewitz, D., 2004. How science makes environmental controversies worse. *Environmental Science & Policy* 7, 385–403.
- Shackley, S., Young, P., Parkinson, S., Wynne, B., 1998. Uncertainty, complexity and concepts of good science in climate change modelling: are GMCs the best tools? *Climatic Change* 38, 159–205.
- Shackley, S., Risbey, J., Stone, P., Wynne, B., 1999. Adjusting to policy expectations in climate change modeling : an interdisciplinary study of flux adjustments in coupled atmosphere-ocean general circulation models. MIT joint program on the science and policy of climate change, report n°48.