

Regard historique sur la recherche climatique, entre observations et modèles

Climate sciences, observation and modelling: an historical perspective

Entretien avec le Professeur Pierre MOREL, par Hervé LE TREUT et Lionel CHARLES

Résumé

À l'heure où la problématique climatique connaît une inflexion après les bruyantes controverses et remises en question qui ont marqué ces dernières années, il nous a semblé intéressant d'ouvrir ce numéro par un entretien avec Pierre Morel. Initiateur de la recherche physique sur le climat en France, il a créé en 1968 le Laboratoire de Météorologie Dynamique qui est aujourd'hui, au sein de l'IPSL, le pivot de la recherche française dans ce domaine, et dont il a assuré la direction jusqu'en 1975. La carrière de Pierre Morel s'est pour une large part déroulée dans un cadre international. Normalien, physicien, premier directeur des programmes scientifiques et technologiques du CNES en 1962, où il reste deux ans, puis professeur à l'université de Paris, il se spécialise dans le champ de la dynamique des fluides géophysiques. Il est nommé en 1967 membre du Joint Organizing Committee du Global Atmosphere Research Program (GARP), aux travaux duquel il participe jusqu'en 1982. Il imagine et fait adopter plusieurs projets spatiaux, notamment le système ARGOS embarqué sur les satellites polaires de la NOAA et le satellite météorologique européen METEOSAT. En 1982 est créé, dans le sillage du GARP, le World Climate Research Program (WCRP) dont il devient le premier directeur, fonction qu'il remplit jusqu'en 1994. Il rejoint ensuite le quartier général de la NASA comme Senior Visiting Scientist au bureau de la Mission to Planet Earth. Cette carrière, à bien des égards exceptionnelle, a donné à Pierre Morel un regard qui a peu d'équivalent, par son ampleur, sur toutes les facettes de la recherche climatique. Hervé le Treut, avec qui nous avons préparé et conduit cet entretien, est l'actuel directeur de l'IPSL. Membre de l'Académie des sciences, il enseigne à l'École Polytechnique et à l'université Pierre et Marie Curie. Nous les remercions vivement tous deux d'avoir accepté de se livrer à cet exercice délicat de communication scientifique⁽¹⁾.

Mots-clés

Histoire des recherches sur le climat, climatologie physique, modèles climatiques globaux, observation de la Terre, agences spatiales.

Abstract

At a time when the public perception of climate change is recovering from the controversies and vocal dissent aired during the recent years, we thought it would be interesting to begin this special issue with an interview of Pierre Morel. As the originator of physical climate studies in France, he established and led (until 1975) the Dynamic Meteorology Laboratory of CNRS, a component of the Pierre-Simon Laplace Institute (IPSL), which has become the focus of climate research in France. However his professional activities were pursued largely in an international context. Alumnus of école Normale Supérieure in Paris, physicist, first director of scientific research and advanced technology programs in the French space agency CNES from 1962 to 1964 and then Professor at the University of Paris, he specialized in the field of geophysical fluid dynamics. In 1967, he became a member of the international Joint Organizing Committee for the Global Atmospheric Research Programme (GARP) and eventually vice-chairman of the Committee until 1982. He conceived and promoted a number of satellite projects, in particular the operational ARGOS navigation and data collection system on NOAA polar-orbiting meteorological satellites and the European geostationary meteorological satellite Meteosat. In 1982, he became the first director of the international World Climate Research Programme that followed upon GARP and continued in this function until 1994. He then joined NASA Headquarters in the capacity as Senior Visiting Scientist in the Office of Mission to Planet Earth. This unorthodox professional career gave Pierre Morel an exceptionally broad, possibly unmatched, view of all facets of climate science and global observations. Hervé Le Treut, with whom this interview was prepared and conducted, is the current director of IPSL, a member of the French Academy of Sciences, and professor at École Polytechnique and University Pierre and Marie Curie of Paris. We are grateful to both for their participation in this demanding scientific information endeavour.

Keywords

History of climate research, Physical climatology, Global climate models, Earth observation, Space agencies.

(1) Ce texte est issu d'un entretien de près de 4 heures qui a eu lieu à l'ENS en janvier 2013. Par souci de précision, de clarté et de lisibilité, le contenu initial a été largement repris et les interventions réécrites.

Hervé Le Treut. Les sciences du climat vivent un moment paradoxal : on n'en a jamais autant parlé, au point qu'elles éclipsent les autres dimensions des enjeux environnementaux, mais les risques de malentendus sont nombreux. L'ampleur du relais médiatique sur les changements climatiques a suscité une attente du public que la science n'est probablement pas en mesure de satisfaire. Par exemple, la demande de « services d'information climatique », initiée par l'OMM pour distribuer des prévisions climatiques, peut créer des confusions ou des mauvais usages du fait des incertitudes persistantes... Pour poser un regard plus juste sur la période actuelle, il est sans doute nécessaire de revenir à la période où ont été créés tous les grands programmes de recherche sur le « système terrestre »... Qu'attendait-on vraiment ? Il me semble qu'il serait utile de reprendre ce sujet sous un angle strictement scientifique. Si la science d'aujourd'hui n'a pas atteint les objectifs souhaités, quels étaient réellement les objectifs de ces programmes il y a 30 ou 40 ans ? Où en sommes-nous maintenant ? Y a-t-il eu des moments où l'on espérait faire mieux que ce que l'on sait faire maintenant ? Et puis un autre problème a été la création du GIEC et son rôle vis-à-vis de la conduite des recherches scientifiques. Comment cet organisme est-il né et qu'en attendait-on ? Nous travaillons aujourd'hui sur la base des idées scientifiques et des choix d'organisation de cette époque fondatrice mais, pour la plupart d'entre nous, nous n'avons pas une conscience claire du contexte dans lequel ces choix ont été faits.

Lionel Charles. Il faudrait d'ailleurs évoquer non seulement l'histoire des concepts mais aussi celle des outils d'observation et de prévision dont le développement a joué un rôle également important pour donner une consistance aux idées, idées qui étaient loin d'être évidentes.

Pierre Morel. Tout d'abord, il faut se rappeler que nos connaissances de la planète au début des années 1960 étaient très fragmentaires. Celle-ci paraissait immense, et nos moyens d'observation de portée fort limitée (restreints en pratique aux territoires habités par les nations industrielles). Le reste, les vastes étendues océaniques et la presque totalité de l'hémisphère Sud étaient quasiment *terra incognita*, à l'exception de rares observations par des navires météorologiques et océanographiques, ou quelques dizaines de stations dispersées sur des îles ou de vastes territoires continentaux. Les perspectives météorologiques étaient limitées à une vision régionale et à une analyse subjective – avec crayons et cartes en papier – de mesures isolées disponibles aux alentours. Les prévisions météorologiques étaient valables pour 24 ou 36 heures au mieux et l'on s'en contentait. On a peut-être un souvenir de lecture des angouisses du commandant en chef des Forces Alliées, le général Eisenhower, confronté à une prévision météorologique incertaine deux jours avant le débarquement sur les côtes de France.

Conception du *Global Atmospheric Research Programme*

Quoi qu'il en soit, en ce début des années 1960, il existait des raisons d'escompter un progrès majeur des prévisions météorologiques. Pour la première fois, des engins artificiels avaient été mis en orbite autour de la Terre et offraient la possibilité de collecter, en douze ou vingt-quatre heures, des informations photographiques ou autres sur toute l'étendue de la planète. Ainsi l'avaient bien compris les conseillers scientifiques du président des États-Unis qui avaient reconnu les applications potentielles des satellites artificiels à la météorologie en même temps qu'aux missions de reconnaissance stratégique, aux télécommunications et au progrès des sciences en général, notamment l'astronomie. Cette percée technologique tombait à pic au moment même où les théoriciens de la circulation atmosphérique venaient de découvrir, au moyen de simulations numériques primitives, que la limite ultime de prévision déterministe des phénomènes météorologiques pouvait atteindre une dizaine de jours, à condition de prendre en compte la totalité de l'atmosphère planétaire considérée comme un système fluide unique.

Avances spectaculaires des techniques et des sciences, perspectives d'applications pratiques utiles à toute l'humanité, espoir d'une franche coopération internationale dans un domaine neutre susceptible de mitiger les affrontements systématiques de la guerre froide, tout cela constituait un cocktail grisant auquel n'ont pas manqué d'être sensibles les autorités politiques des États-Unis comme de l'URSS au plus haut niveau. Dans ces conditions, il allait presque de soi d'imaginer en 1967 un ambitieux programme de coopération scientifique mondial dans l'esprit de la première Année Géophysique Internationale, le *Global Atmospheric Research Programme* (GARP) visant à exploiter ces nouvelles possibilités. Le premier objectif de l'entreprise était, tout simplement, de concevoir et mettre en œuvre au cours d'un test réel les méthodes scientifiques et les moyens techniques de prévoir le temps à échéance de plusieurs semaines. S'y ajoutait un second objectif, visionnaire au regard des connaissances de l'époque : étudier les bases physiques du climat. De vastes ressources pouvaient être engagées pour un tel programme, à la mesure des préoccupations politiques des grandes puissances. Cette ambitieuse entreprise devait culminer en 1981-82 avec le déploiement effectif d'un système international d'observation et de prévision météorologique à l'échelle planétaire, qui constitue encore aujourd'hui la base de la météorologie opérationnelle.

Pour des raisons compréhensibles de neutralité vis-à-vis des non-engagés, on prit soin de confier l'organisation de ce programme à des experts scientifiques plutôt qu'à des fonctionnaires de services officiels forcément liés par les contraintes de leurs systèmes politiques respectifs. Un comité d'organisation international, le *Joint Organizing Committee*, fut

constitué sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et du Conseil International des Unions Scientifiques (ICSU). Le comité était composé de douze savants dont deux Américains, deux Russes, quatre Européens (un Allemand, un Anglais, un Français et un Suédois), un Canadien, un Australien, un Japonais et un Indien. Il recevait une dotation annuelle suffisante pour financer toutes consultations utiles entre scientifiques et techniciens concernés mais ne pouvait entreprendre des projets de recherche indépendants ; il était entendu que le GARP se limiterait à fédérer les efforts des partenaires nationaux. Une des tâches dévolues à chacun des douze membres était précisément de représenter les idées, propositions et résultats acquis par leurs communautés nationales respectives – sauf peut-être le représentant français (Pierre Morel), encore novice en la matière. Cette initiative fut accueillie avec enthousiasme par la communauté scientifique concernée et une demi-ignorance bénigne de la part des services météorologiques officiels (notamment la Direction de la Météorologie Nationale française).

Premières initiatives techniques lancées dès le début des années 1960

En fait, les pionniers de ce nouveau champ d'innovation scientifique et technique n'avaient pas attendu la création d'un comité international pour entreprendre les premiers développements pratiques. Dès 1960, les États-Unis lançaient le premier d'une série de satellites d'observation météorologique, connus sous le nom de *Television and Infra-Red Observation Satellites* (TIROS). Comme leur nom l'indique, ces engins fournissaient simplement des images de la couverture nuageuse – utilisables par exemple pour détecter la présence de perturbations tropicales naissantes – mais rien qui soit directement applicable à la prévision « dynamique » de l'époque.

En fait, deux concepts pour la réalisation d'un système d'observation météorologique global s'affrontaient aux États-Unis à cette époque : l'observation à distance des rayonnements émergeant de la planète au moyen d'instruments portés par des engins spatiaux ou la collecte de mesures effectuées sur place au moyen de capteurs atmosphériques automatiques et ultérieurement rassemblées au moyen d'un satellite de télécommunication et localisation *ad hoc*. Les autorités de la NASA et du *Weather Bureau* à Washington se fixèrent sur la télédétection et rejetè-

rent le concept fondé sur des mesures *in situ* effectuées par des engins atmosphériques tels que des ballons en vol horizontal de longue durée. On peut dire que ce fut un bon choix pour la météorologie mondiale, à moyenne échéance en tout cas⁽²⁾.

Le Professeur Blamont⁽³⁾, qui se trouvait alors aux États-Unis, eut vent (c'est le cas de le dire) de l'abandon du projet d'observation global au moyen de capteurs météorologiques portés par des ballons flottant dans l'air. Lui-même s'était déjà illustré par la réalisation de vols stratosphériques au moyen de ballons fabriqués en France suivant des techniques américaines. Il apporta ce projet au CNES sous le nom d'EOLE, en le présentant comme l'une des deux voies royales pour entrer de plain-pied dans un domaine d'application d'envergure mondiale, la prévision opérationnelle du temps à moyen terme, rôle qu'il ambitionnait pour l'agence spatiale française. Le président du CNES me proposait alors la responsabilité de conduire ce projet à bon port scientifique et pratique, alors que je venais juste de quitter l'agence spatiale pour prendre un poste de professeur à l'université de Paris.

Avec le bénéfice de l'expérience, on sait que le choix d'EOLE s'est révélé malheureux en ce qui concerne l'application directe à la prévision opérationnelle du temps (parce que les ballons en question étaient trop fragiles pour être déployés dans les régions actives de l'atmosphère). À plus long terme, cependant, les travaux du CNES dans ce domaine se révélèrent riches d'applications tout aussi significatives. Les techniques de télécommunication spatiale mises au point dans le cadre du programme expérimental EOLE sont la base du système actuel de recherche et localisation des accidents en mer ou dans les régions désertes (*Search and Rescue Satellite System*, SARSAT), ainsi que du système spatial ARGOS pour la collecte des données d'observation provenant de diverses « balises » automatiques, mobiles ou non. Ce n'est pas tout à fait par hasard si le réseau de plusieurs milliers de flotteurs océaniques qui effectuent de nos jours des sondages systématiques des paramètres physiques de la circulation océanique porte le nom de système ARGO.

Pour revenir aux systèmes d'observation globaux, il faut aussi citer la brillante initiative du professeur Verner Suomi de l'université du Wisconsin consistant à placer un petit télescope mobile sur un gros satellite expérimental de télécommunication de la NASA en orbite géostationnaire (*Advanced Telecommunication Satellite*, ATS-1), lancé en 1966. La rotation du satellite autour d'un axe perpendiculaire au plan de l'é-

(2) Les premiers résultats des « sondeurs atmosphériques » en orbite se révélèrent en fait assez décevants, au point que jusqu'à la fin des années 1970, les spécialistes de la prévision opérationnelle du US Weather Bureau évitèrent de les utiliser de peur de contaminer leurs calculs. Il fallut attendre 1980 et les travaux du Centre Européen de Prévision à Moyen Terme pour que les observations spatiales soient universellement exploitées en vue d'applications quantitatives (prévision numérique) aussi bien que qualitatives.

(3) Jacques-Émile Blamont a été directeur scientifique et technique du CNES de 1962 à 1972.

quateur permettait de balayer à chaque révolution une fauchée étroite sur le disque de la Terre vu d'une altitude de 36 000 km. Un mécanisme incrémental permettait, à chaque tour, de passer d'une ligne à la suivante et ainsi de construire toutes les 30 minutes une image remarquablement détaillée du disque terrestre. Pour la première fois, nous avons une vision cinématographique de la couverture nuageuse de la planète. Il était même possible d'estimer la vitesse du vent d'après la dérive apparente des bancs de nuages. Cette information est particulièrement précieuse dans la zone tropicale où il n'est pas possible de déduire la circulation atmosphérique du champ de pression-température.

Tous ces pionniers de la météorologie spatiale se retrouvaient volontiers aux réunions du Comité des Sciences Spatiales de l'ICSU (COSPAR). Un groupe de travail présidé par le Dr. Morris Tepper⁽⁴⁾ de la NASA avait même ébauché, dès 1966, le plan d'un système d'observation météorologique global réalisable avec les outils disponibles ou en cours de développement. Dès la constitution du GARP en 1967, il était en mesure de présenter ce plan au *Joint Organizing Committee* et de le faire accepter comme point de départ d'un système capable de fournir les observations essentielles pour initier une prévision de l'évolution dynamique de la circulation atmosphérique globale. Ce système comprenait, outre l'ensemble du réseau opérationnel de mesure géré par les services météorologiques nationaux, deux satellites en orbite quasi polaire héliosynchrone⁽⁵⁾ équipés de « sondes atmosphériques » infrarouges et micro-ondes, quatre satellites géostationnaires imageurs, et une flottille de ballons porteurs de capteurs aérologiques en vol horizontal de longue durée.

La NASA et la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) des États-Unis développaient déjà le prototype (TIROS-N) d'une nouvelle génération de satellites polaires satisfaisant ces exigences. Par ailleurs, la NOAA prévoyait de mettre en œuvre deux *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES) porteurs de caméras semblables à celle expérimentée par le professeur Suomi afin de couvrir le territoire des États-Unis et les abords océaniques Atlantique (GOES Est) et Pacifique (GOES Ouest). On espérait naturellement que le projet EOLE apporterait les moyens techniques de réaliser des ballons porteurs de capteurs météorologiques en vol horizontal de longue durée, au moins pour la période relativement brève (un an) d'une démonstration en vraie grandeur (*First GARP Global Experiment*, FGGE) prévue pour les années 1980. Il restait à se

procurer les deux satellites géostationnaires manquants, ce qui fut fait à l'initiative du *Joint Organizing Committee*. Le membre français put convaincre le CNES puis l'Agence Spatiale Européenne d'entreprendre la réalisation du satellite géostationnaire METEOSAT placé dans le plan méridien de référence. Parallèlement, le membre japonais assisté du professeur Suomi put convaincre les autorités nipponnes (*Japan Meteorological Agency* et NASDA⁽⁶⁾) de suivre la même voie avec un programme de satellites semblables (*Himawari*). Tous ces engins spatiaux, réalisés par une demi-douzaine d'agences nationales ou multinationales, furent mis en place et fonctionnèrent parfaitement pendant toute la période de démonstration du GARP entre 1981 et 1982.

S'il est vrai que les agences spatiales (particulièrement la NASA) ont joué un rôle essentiel dans la mise au point et le déploiement de ces moyens d'observation nouveaux requis par le GARP, il faut noter que ce sont les météorologistes et les théoriciens universitaires qui ont inventé le concept de ce programme mondial et qui ont guidé la réalisation de ce programme par le canal du *Joint Organizing Committee*. En particulier, le comité a su encourager et entretenir la motivation de la communauté scientifique internationale pendant une bonne douzaine d'années, jusqu'à la démonstration finale de prévisions du temps valides une semaine à l'avance.

L'œuvre du GARP

En une quinzaine d'années, le GARP a fondé la quasi-totalité des bases théoriques et des méthodes pratiques de la météorologie d'aujourd'hui, y compris les moyens spatiaux qui complètent et renforcent l'observation conventionnelle de l'atmosphère. De 1968 à 1982, le GARP a inspiré toutes les innovations techniques et les progrès scientifiques réalisés dans ce domaine depuis l'invention de la météorologie dynamique par l'école scandinave au cours des années d'avant-guerre, souvent à l'encontre des idées reçues et des pratiques opérationnelles de l'époque. Il s'agissait d'abord de surmonter les difficultés purement mathématiques rencontrées dans l'intégration numérique des équations de la mécanique des fluides géophysiques à partir d'un état initial défini par les observations. Norman Phillips au *US Weather Bureau* et Chuck Leith au *Lawrence Livermore National Laboratory* ont maîtrisé ces problèmes algorithmiques et reconnu le rôle fondamental des invariants intégraux (masse totale de l'atmosphère, énergie

(4) Le Dr. Morris Tepper était le responsable des projets spatiaux d'observation de la Terre au siège de la NASA à Washington.

(5) L'orbite héliosynchrone est une orbite circulaire dont l'inclinaison (quasiment polaire) et l'altitude sont choisies pour que la dérive progressive de cette orbite vers l'Est compense exactement le mouvement apparent du Soleil dans le zodiaque. Dans ces conditions, l'heure (solaire) de passage du satellite au zénith d'un point particulier de la Terre est toujours la même.

(6) National Space Development Agency du Japon.

cinétique et thermique, vorticité et enstrophie⁽⁷⁾) dans ce type d'intégration par une succession de pas incrémentaux de quelques minutes seulement. Edward Lorenz, du *Massachusetts Institute of Technology*, reconnu les limites fondamentales de la prévisibilité résultant du caractère chaotique de ce système mécanique. C'est la même génération de savants qui publièrent en 1979, sous la direction de Jule Charney, la première estimation sérieuse du réchauffement climatique global (1,5 à 4,5  C) que l'on peut attendre d'un doublement de la concentration de gaz carbonique dans l'air⁽⁸⁾.

On se heurtait en outre à un problème nouveau, celui d'exploiter des mesures distribuées dans le temps et dans l'espace provenant de plates-formes mobiles (telles que satellites ou ballons en vol horizontal) en les intégrant aux observations météorologiques classiques (mesures barométriques en station ou sur ballons-sondes) qui sont toutes synchronisées aux heures synoptiques définies par l'OMM. Le problème mathématique de définir l'approximation optimale de l'«  tat initial » d'un système à un instant t_i d'après une suite d'observations ponctuelles réalisée au cours de la période précédente $t_0 \rightarrow t_i$ est loin d'être trivial. De nombreux mathématiciens (dont Olivier Talagrand du Laboratoire de Météorologie Dynamique) ont contribué au progrès de ces méthodes qui se poursuit encore de nos jours. Le Centre Européen de Prévision Météorologique   Moyen Terme (CEPMMT), sous la direction du professeur Wiin-Nielsen, est la première institution qui a appliqué ces nouvelles méthodes à l'exploitation assidue des observations spatiales encore relativement nouvelles et s'est ainsi élevé, en quelques années, au premier rang mondial pour la prévision du temps au-delà de deux ou trois jours.

Le GARP a naturellement reconnu l'importance et la complexité des processus atmosphériques spécifiques à la zone tropicale, notamment en ce qui concerne la genèse des ouragans. Un programme ambitieux – GARP *Atlantic Tropical Experiment* (GATE) – fut organisé pendant l'été 1974 pour collecter des informations sur un vaste domaine océanique à basse latitude. Cette entreprise internationale exceptionnelle mobilisa une flotte de quarante navires météorologiques ou océanographiques, douze avions

de recherche et un vaste réseau de bouées mis en œuvre par une vingtaine de nations dont naturellement les  tats-Unis et l'URSS. Les données rassemblées au cours de ce projet sont encore exploitées de nos jours après avoir donné lieu à plus d'un millier de publications scientifiques.

On a déjà parlé plus haut du développement des moyens spatiaux d'observation météorologique. Le GARP fut l'entreprise phare (le prétexte si l'on veut) qui a permis de développer et mettre en place ce réseau multinational de satellites d'observation – ainsi que les systèmes de traitement de données correspondants – dont ont hérité les services météorologiques du monde entier. Tous les éléments qui constituent actuellement le système opérationnel de surveillance de l'atmosphère planétaire ont leur origine dans le GARP.

Le *Joint Organizing Committee* ne s'est pas limité à la prévision météorologique mais s'est également souci  d'aborder l'étude des phénomènes climatiques (le second objectif du programme), du moins en ce qui concerne les processus physico-chimiques individuels qui gouvernent l'équilibre et l'évolution du climat. La conférence de Stockholm⁽⁹⁾ sur les « bases physiques du climat et les modèles climatiques » est le premier exemple d'un effort encyclopédique pour recenser les connaissances acquises et dessiner les grandes lignes d'un programme de recherche scientifique préfigurant le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (*World Climate Research Programme*, WCRP). On peut considérer cette conférence comme l'origine d'une certaine approche « scientifique » du problème, fondée sur l'étude quantitative des phénomènes observables actuellement, de préférence aux travaux de nature qualitative des climatologues, géographes ou naturalistes qui étudiaient depuis longtemps les indicateurs des changements climatiques passés. Ce fut aussi pour beaucoup de physiciens (dont Pierre Morel) l'occasion d'élargir leur horizon au-delà de la mécanique de la circulation atmosphérique et d'étendre leurs relations à une communauté beaucoup plus vaste de géochimistes, géologues, paléo-climatologues... et aussi à l'écologiste Stephen Schneider⁽¹⁰⁾, un *alumnus* du fameux *Goddard Institute for Space Studies* (GISS) de la NASA   New-York et l'un des fondateurs

(7) Intégrale du carré de la vorticité (rotationnel de la vitesse) sur une surface donnée.

(8) Charney J.-G. et al. Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment. Washington DC, National Academy of Sciences, 1979 (<http://www.atmos.ucla.edu/~brianpm/charneyreport.html>). Les premières mesures systématiques de la concentration atmosphérique du gaz carbonique ont été entreprises par C. Keeling (1928-2005) dans le cadre de l'Année Géophysique Internationale (1958), à la suggestion de R. Revelle (1909-1991), directeur de la Scripps Institution of Oceanography. Les mesures mettent en évidence une hausse constante de cette concentration, entraînant une augmentation de l'effet de serre et un réchauffement de l'atmosphère globale.

(9) The Physical Basis of Climate and Climate Modelling, 1975. GARP Publication Series n  16, Organisation Météorologique Mondiale, Genève.

(10) S.-H. Schneider (1945-2010)  tait professeur de biologie environnementale et de changement global à l'université de Stanford, en même temps qu'il dirigeait le Center for Environment Science and Policy du Freeman Spogli Institute for International Studies, au Woods Institute for the Environment de Stanford.

de l'écologie globale avec son ouvrage *The Genesis Strategy : Climate and Global Survival* (1976). Comme on le voit, Schneider n'hésitait pas à forcer le trait pour capter l'attention du public et des politiciens – et sans doute également attirer les financements d'agences gouvernementales sensibles à la notoriété. Cette stratégie s'est révélée payante : c'est effectivement à cette époque qu'apparaît l'école des *doom-sayers* qui utilisent facilement l'argument de prévisions apocalyptiques pour justifier leurs travaux et recommandations politico-économiques.

Le Programme Mondial de Recherche sur le Climat

Il est évident que le rôle prépondérant des universitaires et scientifiques dans l'organisation d'un programme aussi essentiel que le GARP pour le développement de la météorologie moderne ne pouvait manquer d'engendrer quelques regrets au sein des services officiels appartenant à l'OMM. Il faut aussi comprendre que l'étude du climat est une entreprise à long terme : les constantes de temps ne sont plus de l'ordre de la semaine, mais plutôt d'années, de décades, de siècles... Il n'est donc pas réaliste de fonder une entreprise aussi ambitieuse sur des percées scientifiques et innovations techniques *ad hoc* financées essentiellement par des programmes de recherche (comme ce fut le cas pour le GARP). En un mot, la nature de ces études exige le soutien durable des services opérationnels. Ceci ne pouvait qu'inciter l'OMM à reprendre la main en ajoutant à ses activités traditionnelles un nouveau « Programme Mondial sur le Climat », formellement entériné par son assemblée générale de 1983. Ceci impliquait la conclusion définitive du GARP et son remplacement par un « Programme Mondial de Recherche sur le Climat » (*World Climate Research Programme*, WCRP) patronné par l'OMM et l'ICSU, et confié à la direction scientifique interdisciplinaire d'un *Joint Scientific Committee* (JSC). C'était là le premier accroc à la philosophie du GARP : un comité scientifique émet des recommandations mais n'organise pas. Cependant le secrétaire général de l'OMM jusqu'en 1983 était le professeur Wiin-Nielsen, précédemment fondateur du CEPMMT et universitaire dans l'âme. Il n'approuvait pas cette réorientation et esquiva le coup en appelant un ancien du *Joint Organizing Committee* (Pierre Morel) à la direction du WCRP au sein de l'organisation. Cette démarche avait d'ailleurs le soutien de nombreux directeurs de Services Météorologiques occidentaux, ce qui nous permit de fonctionner assez librement sous l'autorité d'un nouveau secrétaire général, le Dr. Obasi.

Une seconde difficulté se présentait dès l'origine en raison de l'esprit d'indépendance (pour ne pas dire

l'hostilité) de la communauté océanographique internationale, frustrée par une attente trop longue – une décennie ou plus – pendant laquelle la priorité avait été mondialement accordée à l'essor des sciences de l'atmosphère. De même, les océanographes s'étaient vus privés d'accès aux moyens d'observation lourds (notamment satellites et programmes annexes financés par les agences spatiales) largement réservés au GARP. Les océanographes décrétèrent que si la prévision du temps était l'affaire des sciences atmosphériques, le climat était gouverné par les océans et appartenait donc au domaine des océanographes. En outre, la communauté océanographique avait pour l'essentiel le contrôle de ses moyens logistiques, c'est-à-dire les navires océanographiques rattachés à des instituts de recherche et financés par des agences à vocation scientifique dans la grande tradition du Prince de Monaco. Deux grandes initiatives d'ailleurs concurrentes, TOGA et WOCE⁽¹¹⁾, furent lancées simultanément afin de couper court aux approches pluridisciplinaires patronnées par l'OMM et l'ICSU. Le second défi fut donc celui de réinsérer ces deux initiatives incontestablement intéressantes dans le programme WCRP naissant, par une combinaison de promesses (financement des activités de planification de TOGA et dans une moindre mesure WOCE par le WCRP) et de chantage (menace de boycott par les agences spatiales). Il faut noter que le WCRP n'avait, comme le GARP, aucun moyen de financement direct des projets de recherche proprement dits (soumis au bon vouloir d'agences nationales), ni aucun mandat à réorienter les choix d'une communauté fort indépendante œuvrant sous le haut patronage d'un service *ad hoc* de l'UNESCO, la Commission Océanographique Intergouvernementale.

Ces deux obstacles franchis, il fallait mettre en place un programme cohérent en vue d'un objectif encore lointain et surtout virtuel. La planification du WCRP s'apparentait, à ce stade, à la construction d'une pyramide d'Égypte : on part d'un terrain vide et on entreprend d'assembler quatre murs de pierres convenablement inclinés qui doivent, en fin de compte, converger en un point de l'espace qui n'existe initialement que dans l'imagination de l'architecte. De même pour le WCRP, il existait nombre d'activités individuelles potentiellement intéressantes mais totalement déconnectées les unes des autres. Il fallait en organiser le développement pour constituer un programme cohérent, c'est-à-dire convergeant effectivement vers une compréhension globale du système climatique. Les programmes océanographiques offraient un point de départ ; il fallait organiser le reste à partir des initiatives les plus prometteuses, notamment pour rassembler les observations disponibles et constituer des banques de données homogènes. On peut citer ici quelques projets encouragés ou même directement engendrés par le WCRP : *International Satellite Cloud Climatology*

(11) TOGA : Tropical Oceans and Global Atmosphere. WOCE : World Ocean Circulation Experiment.

Program (ISCCP), *Global Precipitation Climatology Program* (GPCP), *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN), projet de *Surface Radiation Climatology* (SRB), *Global Run-off Data Center* (GRDC). Il faut souligner que (sauf le BSRN) ces efforts visaient – et poursuivent de nos jours – la collecte et la mise en forme de données d'observations systématiques réalisées en vue d'autres applications, en général à court terme. La contribution du WCRP est donc un authentique service scientifique garantissant la calibration ou, en tout cas, la cohérence à long terme de l'ensemble des archives ainsi constituées. En particulier, le programme prend en compte les mises à jour éventuelles des algorithmes utilisés pour la production de ces données. En cas de changement de procédure, le WCRP fait recommencer le traitement de l'ensemble de l'archive concernée depuis son début avec le nouvel algorithme. Incidemment, il faut savoir qu'aucun système d'observation à partir de satellites (télédétection) ne fournit une mesure directe des quantités que l'on veut connaître. Dans tous les cas, la véritable information doit être extraite des observations au moyen d'algorithmes plus ou moins efficaces et, en tout cas, sujets à des améliorations successives. La cohérence à long terme des données de télédétection exige un effort permanent de remise à jour ou « *reprocessing* » des archives déjà accumulées.

Le WCRP a également coordonné les projets de recherche et d'une manière générale l'ensemble du programme GEWEX (*Study of Global Energy and Water Exchanges*), en s'appuyant notamment sur un important programme financé par le Department of Energy des États-Unis afin d'homogénéiser les mesures radiatives dans l'atmosphère (*Atmospheric Radiation Measurement Program*). Il a également patronné nombre d'études régionales des bilans énergétiques et hydriques dans le but de rassembler la communauté des sciences hydrologiques autour d'objectifs climatiques.

Il était également évident que la compréhension scientifique des variations du climat dépend dans une large mesure de modèles numériques fiables, fondés sur des bases objectives ancrées dans l'observation des processus physiques mis en jeu. De nombreux groupes dont celui de Syukuro Manabe au *Geophysical Dynamics Laboratory* de Princeton, Jim Hansen au GISS, le *National Center for Atmospheric Research* au Colorado, le *Hadley Centre* au sein du Service Météorologique Britannique et bien d'autres furent contactés dans le but de créer un programme d'intercomparaison de simulations effectuées avec les mêmes conditions aux limites imposées (*Atmospheric Model Intercomparison Project*, AMIP). Le but était de faciliter le progrès des simulations climatiques par une prise de conscience des différences et faiblesses possibles des modèles existants. La proposition rencontra dès l'abord une réponse fort tiède

de la part de ces groupes de théoriciens assez insulaires par nature : le Dr. Manabe lui-même affirma que ma proposition n'était qu'une perte de temps (sous-entendu : dans la course aux publications) puisqu'il était certain que son modèle était le bon ! La participation active du professeur Larry Gates (membre du *Joint Scientific Committee*) et son influence au US Department of Energy – qui mit à la disposition du projet les puissants ordinateurs du Lawrence Livermore National Laboratory – ont été les arguments essentiels pour faire démarrer AMIP.

Rôle des Agences Spatiales dans les Sciences du Climat

Malgré ces premières initiatives, il était impossible d'atteindre les objectifs impartis au WCRP avec les seuls outils d'observation légués par le GARP. S'il est vrai que la prévision météorologique est fondée pour l'essentiel sur la connaissance de l'état initial de la circulation atmosphérique, la prévision des variations climatiques dépend des seules conditions aux limites observées et des processus dynamiques, physiques, chimiques, etc., inclus dans les modèles. Ces processus sont multiples et font intervenir nombre de phénomènes de petite et moyenne échelle dont il faut déterminer (calculer) les effets quantitatifs sur les flux de masse, d'énergie, d'eau, etc. L'avancement des sciences du climat suppose donc la connaissance d'une multitude de processus inaccessibles aux moyens d'observations météorologiques ordinaires. Le WCRP exigeait donc un vaste investissement dans l'observation globale des échanges radiatifs à travers l'atmosphère, les propriétés optiques et la distribution des nuages, la distribution de la vapeur d'eau et autres composants absorbants de l'atmosphère, la répartition des pluies, la décharge des rivières et le stockage de l'eau dans les sols, la circulation océanique, la distribution des aérosols, la nature et propriétés de la végétation, le budget de masse des banquises marines et des glaciers, etc.

Cet immense agenda (qui n'a pas encore été rempli de nos jours) supposait une coopération intense avec les agences spatiales dépositaires des ressources indispensables, en premier lieu la NASA mais aussi l'ESA, le CNES, le DFVLR, la JAXA⁽¹²⁾, etc. Aux États-Unis, Dr. Shelby Tilford lança le concept multidisciplinaire de *Earth System Science* fondé sur le développement d'un *Earth Observing System* visant à mesurer, pendant plusieurs décennies, une multitude de paramètres du système climatique et de l'écologie planétaire. Malgré son ampleur, ce programme américain et les projets semblables entrepris par l'ESA en Europe (ENVISAT) et la JAXA au Japon (ADEOS-1 et 2) présentaient cependant de nombreuses lacunes. Nous devons donc beaucoup aux nombreux projets

(12) DFVLR : Deutsche Forschungs und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt. JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency.

spécialisés qui ont pu être réalisés à la même époque : première détermination du bilan radiatif planétaire (*Earth Radiation Budget Experiment* aux USA, projet ScaRaB en France), observation de la distribution des pluies tropicales (*Tropical Rain Measuring Mission* en coopération entre les USA et le Japon), surveillance altimétrique de la circulation globale des océans (TOPEX/Poséidon en coopération entre les USA et la France), analyse des vagues à la surface des océans (satellites ERS-1 et 2 de l'ESA), mesure de la masse des calottes de glace polaires et des nappes d'eau stockées dans les sols par le *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) de la NASA.

On peut citer encore les deux satellites jumeaux CLOUDSAT et CALIPSO, équipés respectivement d'un radar et d'un profileur laser pour observer la distribution verticale et les propriétés optiques des nuages et des aérosols. On sait que ces deux satellites ont été placés sur la même orbite que la plate-forme multicapteurs AQUA qui est une composante du *Earth Observing System*⁽¹³⁾. L'un de ces satellites (CLOUDSAT) est réellement un projet imaginé et étudié par le WCRP dans les années 1990 au cours d'une longue campagne de promotion dans la communauté scientifique internationale puis au sein de la NASA, pour arriver enfin au lancement (début 2006) d'une mission spatiale parfaitement réussie.

HLT. Cet exposé donne l'impression que les programmes entrepris par les agences spatiales ont constitué au cours de toutes ces années fondatrices la source d'inspiration et la base d'observations empiriques principale de toutes les sciences de la Terre à l'échelle planétaire. Est-ce une situation durable ? N'est-ce pas un risque que de s'appuyer sur des agences à vocation technologique pour définir la stratégie d'observation de la planète, en lieu et place des instances scientifiques compétentes représentées par le WCRP ? Peut-on effectivement compter à long terme sur l'esprit d'initiative de ces agences et leur compréhension des nouveaux enjeux scientifiques ?

PM. On ne peut compter à long terme que sur les scientifiques personnellement engagés dans ce genre d'études et déterminés à les faire aboutir. Comme je l'ai dit plus haut, il est essentiel que la communauté scientifique concernée se sente responsable de la mise à niveau des infrastructures qui lui sont indispensables. Permettez-moi de remarquer que les astronomes ont complètement embrassé ce point de vue.

En ce qui concerne la prévision météorologique et d'une manière générale toute activité de service utile à la société telle que la synchronisation précise des horloges⁽¹⁴⁾, il existe des agences responsables qui sont en mesure de justifier objectivement la relation entre un service opérationnel particulier et les infrastructures techniques employées à cet effet. La preuve en est leur souci de remplacer d'urgence un satellite opérationnel en fin de vie, par exemple. C'est d'ailleurs un problème actuel en météorologie, résultant de la faillite du programme de satellites NPOESS⁽¹⁵⁾ imaginé par le vice-président Gore. Notons en passant que le sauvetage du système d'observation météorologique mondial résulte d'une initiative précoce de la NASA : la conception d'un « *NPOESS Preparatory Project (NPP)* » pour combler un éventuel hiatus dans le système de satellites météorologiques polaires. Ce projet, désormais rebaptisé « *National Polar-orbiting Partnership (NPP)*⁽¹⁶⁾ », a conduit en 2011 à la mise sur orbite du satellite « *Suomi* » qui préfigure en principe les futurs satellites opérationnels de la NOAA.

Une expérience personnelle de quarante années consacrées à ce genre d'entreprises me conduit à penser qu'en dehors des télécommunications, les agences utilisatrices potentielles (météorologiques, géographiques, hydrographiques, hydrologiques et même, dans une certaine mesure, militaires) n'ont ni l'imagination, ni les compétences techniques, ni surtout les ressources budgétaires disponibles pour entreprendre le développement de programmes spatiaux. Les agences spatiales ont été créées spécifiquement pour pallier ce déficit. Elle disposent généralement à la fois des compétences techniques et/ou scientifiques appropriées et de budgets spécifiquement consacrés à l'innovation. Le problème est de savoir si ces agences spatiales ont la capacité intellectuelle de formuler les stratégies de développement pertinentes pour le compte d'entreprises scientifiques ou opérationnelles dans des domaines tout à fait différents. Ce sont en tout cas les agences spatiales, principalement la NASA, qui ont imaginé et défendu la notion pluridisciplinaire de « sciences du système Terre ».

La NASA évidemment et, dans une certaine mesure, le CNES, les agences spatiales européenne ou japonaises ont possédé cette capacité intellectuelle et formulé des stratégies de développement technique porteuses d'avenir, vraisemblablement grâce à une politique de recrutement très ouverte (fai-

(13) Deux éléments (AQUA et AURA) du Earth Observing System, rejoints ultérieurement sur la même orbite par les deux satellites Cloudsat et CALIPSO, constituent le « A-train ». La mise en place de différents satellites de taille moyenne sur des orbites synchronisées est la solution d'avenir pour acquérir un ensemble cohérent de mesures pratiquement simultanées.

(14) Synchronisation fondée sur l'exploitation des signaux émis par les satellites GPS et éventuellement Galileo.

(15) Le programme NPOESS (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System) était conçu pour remplacer deux programmes de satellites météorologiques opérationnels : Polar Operational Environmental Satellites (POES) de la NOAA et le Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) géré par le US Department of Defense. Entrepris en 1995, ce projet exagérément ambitieux devait être définitivement abandonné en 2010.

(16) L'imagination des bureaucrates pour les acronymes est admirable !

sable lorsque l'on bénéficie d'un soutien gouvernemental solide motivé par des considérations de prestige national ou autre). Cependant un tel état de grâce n'a qu'un temps dans la vie de telles institutions. Que serait-il arrivé, se demandait André Lebeau dans un de ses ouvrages, si l'on avait décidé au XIX^e siècle de créer des agences nationales pour le développement de la machine à vapeur ? Les agences spatiales ont vieilli et se sont laissées alourdir par de nouvelles générations de fonctionnaires naturellement motivés par de tout autres ambitions.

On ne saurait non plus confier cette responsabilité stratégique à des organismes purement universitaires ou académiques. Ceux-ci se révèlent totalement incapables d'imaginer (*a fortiori* formuler) une synthèse entre de légitimes ambitions scientifiques et les contraintes techniques, programmatiques et financières. Une démonstration en a été récemment fournie par un comité *ad hoc* de la *US Academy of Science* qui a élaboré pour le compte de la NASA une liste des *National Imperatives for the Next Decade and Beyond* en matière de missions d'observation de la Terre. Cette liste se résume à une compilation des projets favoris des membres du comité. Par ailleurs, je ne pense pas qu'un programme interdisciplinaire aussi fragile que le WCRP soit désormais en mesure de promouvoir ou même influencer ces développements futurs. Quant aux initiatives à caractère politique, telles que le *Global Earth Observing System of Systems* (GEOSS) imaginé par une succession de « *Earth Observation Summits* » convoqués à grands frais par les Communautés européennes, elles ne valent pas la peine qu'on en discute.

Si l'avenir des sciences de l'environnement global n'était pas, à mon sens, une préoccupation de second plan en regard de la crise de société ambiante, je suggérerais volontiers le recours à une institution interministérielle sur le modèle de la DGRST, largement accessible aux scientifiques et techniciens. Avec un peu de chance, une telle institution pourrait être en mesure de formuler une vision prospective des initiatives nationales souhaitées dans le futur et d'en favoriser le financement⁽¹⁷⁾.

Rôle des modèles numériques dans les sciences du climat

HLT. Tu fais allusion au projet AMIP et au rôle de Larry Gates mais tu ne discutes pas vraiment le rôle, à mon avis essentiel, de la modélisation numérique comme facteur d'intégration et de progrès de la communauté des sciences du climat. Le programme

AMIP a été le point de départ d'un vaste éventail d'activités coordonnées dans le domaine de la modélisation, et de progrès significatifs de la pertinence des modèles climatiques. En ce qui concerne le Laboratoire de Météorologie Dynamique, AMIP a été un déclencheur parce qu'il nous a permis de participer à un jeu international auquel les programmes de modélisation non anglo-saxons n'avaient pas facilement accès.

PM. Il est tout à fait exact que AMIP a pu entraîner un certain nombre de programmes nationaux dont la notoriété n'était pas encore établie au plan mondial. Le programme AMIP leur fournissait le moyen de participer de manière relativement aisée, en particulier grâce à un accès indirect aux moyens de calcul extraordinairement puissants du *US Department of Energy*. AMIP donnait aussi une sorte de reconnaissance internationale, un « label de qualité » fondé sur les résultats objectifs de simulations exécutées dans des conditions identiques. De ce point de vue, AMIP a été un grand succès.

En revanche, AMIP a esquivé un problème de fond, à savoir la validation des formulations empiriques des processus dynamiques et/ou physiques au sein des modèles. AMIP s'est en effet satisfait de la comparaison de « produits finis » de simulations numériques (c'est-à-dire essentiellement des quantités météorologiques à grande échelle) avec les rares données d'observation disponibles ou le plus souvent les résultats d'analyses météorologiques opérationnelles. En d'autres termes, AMIP s'est contenté de promouvoir l'ajustement des paramètres empiriques inclus dans les algorithmes en traitant le modèle comme une « boîte noire ». Il n'y a pas lieu de mépriser les algorithmes purement empiriques : leur utilisation quotidienne pour des applications pratiques courantes, telles que la prévision des marées dans la baie de Brest ou bien la décharge d'un bassin versant après la pluie, donne toute satisfaction. Mais la portée de telles « validations » reste limitée. Actuellement, je pense que les prévisions climatiques présentes ou futures qui reposent sur cette approche empirique sont limitées par l'incertitude fondamentale attachée à la nature chaotique du système climatique. Cette incertitude irréductible est apparemment proche de l'intervalle de confiance défini par J. Charney et ses collègues en 1979 (voir plus haut).

Contrairement à leurs prédécesseurs tels Jule Charney, Tony Hollingsworth ou d'autres, il est courant que les modélisateurs actuels se désintéressent des observations sur le terrain ou dans l'espace, tout comme ils ignorent fréquemment le détail des processus physiques de petite et méso-échelle. On se

(17) Créée en avril 1961, la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique, dirigée à partir de 1973 par le professeur H. Curien, était un organisme gouvernemental chargé de promouvoir des domaines scientifiques et/ou techniques innovants jugés porteurs d'avenir, grâce à des financements « incitatifs » accordés en supplément des subsides courants. La DGRST s'est tout de même illustrée par une résistance farouche au projet de lanceur spatial Ariane et probablement à d'autres projets également prometteurs.

demandait tout à l'heure qui pourrait remplacer le rôle stratégique du WCRP. Ce rôle essentiel de programmation stratégique pourrait – devrait – être assumé par les théoriciens compétents, c'est-à-dire les modélisateurs du climat, tout comme les modélisateurs des années 1960-70 ont su assimiler et encourager les innovations offertes par les nouveaux systèmes d'observation de l'époque.

En un mot comme en cent, les modèles numériques du climat jouent un rôle trop essentiel pour être laissés entièrement aux mains des modélisateurs ! Les qualités ou défauts de ces modèles déterminent le succès ou la faillite de notre discipline toute entière. Les observations brutes elles-mêmes sont, la plupart du temps, inutilisables directement et ne prennent tout leur sens que dans le cadre d'un processus d'analyse ou d'assimilation effectué au moyen d'un modèle. Notre discipline n'est pas une science d'observation pure, comme peuvent l'être la biologie ou la géologie. La dynamique du système climatique est trop complexe, trop chaotique pour que l'on puisse identifier intuitivement les connexions entre différents phénomènes. Malheureusement, les modélisateurs, qui ont une connaissance détaillée des codes numériques et formules physiques, n'ont plus une compréhension approfondie du fonctionnement de l'environnement réel dans tous ses aspects physiques. Je dois dire qu'il est facile de perdre de vue la multiplicité des processus dynamiques, physiques, chimiques, géologiques qui influencent le climat. Je vais donner un exemple tiré d'une époque où les problèmes étaient considérablement plus simples.

Au début du programme EOLE⁽¹⁸⁾, il était clair que l'exploitation météorologique de traceurs de l'écoulement atmosphérique (tels que des ballons flottant à un plafond constant) n'était concevable que dans le cadre d'un processus d'assimilation utilisant une description dynamique de cet écoulement. Le problème est qu'il n'existait alors aucun modèle de ce genre en France. Je me rendis donc en Californie pour emprunter le modèle de circulation générale mis au point par les professeurs Yale Mintz et Akio Arakawa de l'UCLA. En échange, je proposai d'associer ces deux chercheurs au projet EOLE. À ce titre, le professeur Mintz fut chargé par la NASA d'effectuer un calcul de simulation des trajectoires des ballons EOLE en utilisant le champ de vent variable engendré par son modèle.

Cette simulation justifiable donna cependant un résultat inquiétant puisque, dans le modèle de Mintz-Arakawa, tous les ballons lancés de différents points

du globe se rassemblaient rapidement dans une étroite bande aux latitudes subtropicales. Ce résultat était attendu si l'on connaît un peu de climatologie de la circulation planétaire, mais ce n'était pas le cas des ingénieurs du CNES, ni du professeur Blamont, conseiller scientifique de cet organisme. On s'inquiéta donc, bien inutilement, d'une éventuelle catastrophe du programme de déploiement des ballons EOLE dans l'hémisphère Sud. Le professeur Mintz avait tout simplement oublié de dire que son modèle à mailles assez lâches (1 000 km) ne représentait nullement l'écoulement atmosphérique réel, dominé à petites et moyennes échelles par de puissants tourbillons aléatoires. Dans la réalité, les ballons EOLE ne manqueraient pas de se disperser au gré des fluctuations du champ de vitesse et de migrer vers toutes les latitudes de l'hémisphère Sud, des tropiques aux pôles. Dans ce cas d'école, le résultat d'une prévision « climatique » se révélait tout simplement opposé à la réalité des faits.

HLT. Cet exemple n'est peut-être pas représentatif de la réflexion actuelle sur le rôle de la modélisation : les modèles peuvent faire beaucoup mieux maintenant, même s'ils ne restent qu'une conceptualisation de la réalité. Surtout, l'approche qui guide leur développement s'est beaucoup rapprochée des données – dans beaucoup de cas il s'agit d'ailleurs d'un héritage clair des développements initiaux du WCRP, du programme ARM⁽¹⁹⁾ et de sa réplique française du SIRTAA⁽²⁰⁾, de l'A-Train, etc.

PM. Ces développements récents sont certes encourageants. Cependant les simulations climatiques demeurent sensibles à des problèmes du même type que ceux qui ont causé l'erreur du professeur Mintz, à savoir le fait que toute prévision numérique repose sur l'itération répétée – jusqu'à des millions de fois – d'un algorithme qui comporte nécessairement des approximations. Ces imperfections sont généralement sans importance pour une intégration de durée limitée mais peuvent, dans certains cas, s'accumuler jusqu'à conduire à des prédictions aberrantes au cours d'une intégration prolongée.

Un exemple est celui de la prétendue « accélération » du cycle hydrologique global associée au réchauffement climatique qui apparaît dans un certain nombre de publications fondées sur la simulation et dans les rapports du GIEC. Sans parler du barbarisme constitué par la notion d'accélération du cycle hydrologique (il faudrait parler d'une augmentation du flux global de l'eau circulant dans le système), cette notion erronée procède de simulations numériques

(18) Pour plus de détail, voir <http://nospremieressannees.fr/eolesite/eoletextemorel/texte1.html>

(19) Atmospheric Radiation Measurement (project). Ce programme du U.S. Department of Energy entretient une douzaine de sites équipés d'instruments de mesures des paramètres atmosphériques et des flux de rayonnement montants et descendants. ARM finance également les travaux de divers groupes universitaires qui participent à ces mesures. Le programme ARM est une composante importante du WCRP.

(20) Acronyme pour Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique.

qui ne respectent pas la fermeture exacte du budget d'énergie. Les précipitations totales sont évidemment égales au flux d'évaporation global, lui-même gouverné par l'énergie disponible pour vaporiser l'eau. En fait, cette énergie – flux de rayonnement net⁽²¹⁾ à la surface de la Terre – n'a pas ou très peu changé au cours des 25 dernières années et reste constante dans la limite de la précision de nos mesures. Il en résulte que l'évaporation globale et les autres composantes du cycle hydrologique planétaire n'ont pas varié non plus d'une manière significative.

Ceci dit, je rappelle que le recours à la modélisation est nécessaire pour approfondir la compréhension du système climatique. Ces modèles ne sont pas nécessairement complexes : les meilleurs théoriciens de la dynamique du climat, tels que Jule Charney autrefois ou aujourd'hui Isaac Held, se servent même de modèles conceptuels fort simples (les Américains les qualifient de *toy-models*) pour clarifier un mécanisme ou en estimer grossièrement l'impact. De même V. W. Ekman, Henry Stommel, Adrian Gill et d'autres dynamiciens des océans utilisèrent des formulations simplifiées, généralement linéaires, pour expliquer les grands traits de la circulation des bassins océaniques. Mais la simulation détaillée de phénomènes climatiques complexes exige des algorithmes numériques spéciaux et des formulations compliquées au niveau des processus de base. L'ensemble constitue une construction si complexe que l'interprétation des résultats pose elle-même un problème difficile. En raison de leur rôle central, on s'attend à ce que les simulations numériques et les modèles du climat se retrouvent en première ligne des controverses. Il appartient aux praticiens de s'y préparer, ce qui exige sans doute un vaste investissement dans l'étude de toutes sortes de phénomènes naturels qui ne sont pas nécessairement visibles dans les produits de simulations globales.

Rôle du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC)

HLT. Penses-tu que les difficultés rencontrées pour réduire l'incertitude des modèles, que tu décris comme un divorce entre modèles et données, a pu renforcer le besoin d'évaluation de la recherche et jouer un rôle dans la mise en place du GIEC ?

PM. Non, je ne le pense pas. La constitution du GIEC est un événement totalement distinct, influencé principalement par la personnalité des acteurs principaux, en particulier le professeur Bert Bolin, membre

de l'Académie des Sciences suédoise. Dans les pays nordiques, les élites politiques et académiques forment une communauté relativement étroite où tout le monde se connaît et se respecte. Le professeur Bolin ne rencontrait donc aucune difficulté à présenter son point de vue aux autorités politiques de son pays. Il n'a pas imaginé que le problème serait différent au plan international où sévissent des clans fondamentalement opposés et des *lobbies* puissants. En tout cas, il n'a pas mesuré l'impact économique profond des déclarations du GIEC pour de nombreux secteurs industriels, depuis l'extraction des carburants fossiles jusqu'à l'industrie des transports. Il a imaginé qu'il suffirait de constituer des comités quasiment académiques (science du climat, impacts régionaux des changements, conséquences et remèdes) pour imposer les vues des « autorités scientifiques » à tous les acteurs concernés. Bolin et son successeur Robert Watson ont donc adopté une démarche quasiment messianique, en tout cas idéaliste. Pressés de conclure, ces porte-parole ont privilégié les sources qui semblaient s'accorder le mieux à leurs idées *a priori*, comme les premiers résultats de reconstitutions paléo-climatiques et simulations numériques, sans s'attarder à l'examen de résultats problématiques de certains physiciens et observateurs.

En outre, Bolin avait une conception très internationaliste de l'action politique. Il voyait dans la diversité une source naturelle d'autorité au plan mondial et ignorait royalement le fait que la majorité des « experts » convoqués dans les différents comités du GIEC étaient souvent ignorants de la réalité scientifique, particulièrement dans les Groupe II (impacts régionaux) et Groupe III (remèdes économiques et par conséquent politiques). Il n'imaginait nullement devoir faire face à une contestation scientifique persistante sur son propre terrain et s'est cru autorisé à formuler des vues « consensuelles » fondées sur des résultats publiés sans doute, mais néanmoins fragiles. En un mot, il a été surpris en rase campagne.

Au plan politique, le résultat est très décevant, comme on pouvait l'imaginer dès le début. Les résistances à un gigantesque effort de réduction de la consommation des carburants fossiles étaient prévisibles en raison de l'importance stratégique de ces ressources dans l'économie mondiale. Les résultats des tentatives du dernier effort de concertation mondiale à ce sujet (Conférence de Copenhague des Nations Unies sur le Réchauffement Climatique, 2009) ne font que confirmer ce jugement.

Au plan scientifique, les contributions des Groupes II et III sont fort modestes, alors que les rapports du Groupe I reposent incontestablement sur de réelles compétences scientifiques. Mais le choix de

(21) Le rayonnement net est la différence entre les flux de rayonnement descendants (rayonnement d'origine solaire et rayonnement infrarouge d'origine atmosphérique) et les flux de rayonnement montants (rayonnement solaire rétrodiffusé et rayonnement infrarouge émis par la surface du sol). L'énergie du rayonnement net peut être stockée temporairement dans le sol ou l'océan mais à long terme doit retourner à l'atmosphère sous la forme de chaleur sensible (réchauffement) ou de chaleur latente (évaporation d'eau).

s'appuyer exclusivement et sans analyse critique sur les résultats publiés (notamment des travaux historiques ou paléo-climatologiques peu quantitatifs) a offert une cible trop facile à la contestation. En outre, cette démarche est équivalente à marcher vers l'avenir avec le regard résolument fixé sur le passé. En l'absence d'analyse critique de résultats pris pour argent comptant et en l'absence de toute stratégie de recherche pour pallier les défauts les plus évidents, j'estime que le GIEC a exercé une influence globalement négative sur le développement des sciences du climat.

Je rappelle que ni le GIEC ni le WCRP n'ont les moyens financiers d'initier quelque initiative scientifique que ce soit (*a fortiori* un projet d'observation global). Le seul rôle positif que peuvent jouer de telles institutions est de formuler une stratégie de recherche cohérente qui rencontre l'adhésion de la communauté scientifique, et de faire valoir la validité de cette stratégie auprès des responsables des agences de financement (telles que le CNRS et le CNES en France, la NSF, la NASA et le *Department of Energy* aux États-Unis). Or le WCRP a perdu sa voix, noyée dans la cacophonie engendrée par les controverses entre le GIEC et ses détracteurs. Le GIEC, de son côté, ne s'intéresse pas à formuler une stratégie pour les recherches futures. Même le Groupe I du GIEC a renoncé à tout rôle de *leadership* puisqu'il se contente de publier des résultats déjà publiés, c'est-à-dire anciens.

Enseignement et communication avec le public

HLT. Favoriser une perception équilibrée du problème du climat pose un problème d'enseignement et aussi d'information du public. Les sciences climatiques sont devenues un sujet de recherche très vaste et diversifié, dont les participants se spécialisent dès le niveau du master. Cinq années plus tard, au moment où ils deviennent apprentis chercheurs, ils n'ont pas toujours eu l'occasion de construire une vision agrégée du système climatique dans son ensemble. De ce point de vue, la spécialisation précoce des étudiants ne les aide pas toujours. Mais le problème se décline de manière plus difficile encore lorsque l'on touche au domaine voisin de la communication avec le public, qu'il s'agisse du grand public seulement accessible à quelques personnalités très médiatisées ou d'un public plus familier de la culture scientifique. Dans tous les cas, il y a une difficulté majeure à développer et propager le message de ceux qui s'attachent aux bases physiques fondamentales du changement climatique, à des études de processus complexes associant modèles et exploitation des observations pertinentes. Le public réagit plus fortement à des domaines plus visuels : observations d'événements extrêmes, témoignages des climats passés, campagnes dans des régions lointaines... Il y a un risque à terme de propager une impression

fautive de ce qu'est la science climatique, et des messages qu'elle porte. Comment y échapper ?

PM. Les paléo-climatologues comme les paléontologues ont l'avantage de parler de phénomènes concrets ou de créatures spectaculaires. En outre, ils ne redoutent pas la contradiction de témoins de première main, et pour cause ! D'un autre côté, il est certain que les découvertes paléo-climatiques sont la base de notre conception de l'ampleur des variations possibles au cours du temps, la source essentielle d'information sur la variabilité naturelle du système climatique. De ce point de vue, les reconstructions préhistoriques sont une inestimable source d'inspiration. Cependant, aucune reconstruction paléo-climatologique ne définit quantitativement l'ensemble des conditions aux limites et des paramètres internes qui entrent en jeu dans la dynamique du climat. En simplifiant un peu, la climatologie historique ou préhistorique pose des questions passionnantes mais ne répond à aucune. On ne peut pas compter directement sur les travaux paléo-climatologiques pour faire avancer notre capacité à prévoir ou du moins encadrer le domaine des changements climatiques futurs.

Pour cette raison, on ne peut pas faire l'économie de modèles mathématiques sophistiqués. Encore faudrait-il que les modélisateurs prennent soin de cultiver leur image en se rapprochant des préoccupations du public, cultivé ou pas, notamment l'explication de certains aspects prévisibles du changement climatique. On ne peut pas se contenter de publications dans des revues savantes mais confidentielles : il faut aussi atteindre une large audience, celle des citoyens contribuables en général. Les astrophysiciens le font très bien. Ceci dit, les partenaires du LMD au sein de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) pourraient en effet encourager leurs collègues physiciens de l'atmosphère dans cette tâche.

LC. Ce que vous disiez sur le rapport intime entre constructions mathématiques et observations est une notion qui semble s'être évanouie. La reconnaissance d'une correspondance entre observations et simulations numériques devrait aller de soi. Actuellement le contexte, fort différent, est l'hypothèse floue d'un réchauffement qu'on ne sait pas bien calculer, ni comprendre, associée à beaucoup d'incertitude et, en *arrière plan*, la perspective de contraintes sociales et de coûts économiques auxquels il faudra faire face. En revanche, l'idée qu'il existe des éléments d'information quantitative précise sur l'évolution passée du climat, les processus physiques qui y concourent actuellement, est complètement évacuée dans la conscience du public.

PM. Naturellement, puisque la communication publique est fondée sur des clips télévisuels de 30 secondes. Une compréhension réelle échappe pratiquement à tous, même à des personnes informées dont les connaissances demeurent néanmoins superficielles. La communication repose sur de belles images... Peu importe que ces images soient générées par un quelconque algorithme numérique, en d'autres termes ne représentent qu'une vérité vir-

tuelle. On fabrique toujours plus d'images ou « effets spéciaux » de plus en plus déconnectés de la réalité. C'est une des causes du discrédit auquel s'est exposée la communauté scientifique. Les vrais scientifiques, comme le professeur Bolin, ont exécuté eux-mêmes sur le terrain les mesures dont ils avaient besoin. Le professeur Bolin, plus que tout autre, aurait dû sentir le danger de substituer à la réalité des observations, des nombres débités à la demande par des ordinateurs. Il n'aurait jamais dû laisser le GIEC s'engager dans la voie d'une « réalité virtuelle » créée par les modèles, en anglais *model data*. L'intégrité scientifique exige que l'on maintienne une distinction formelle entre les conclusions d'observations objectives de la nature et les hypothèses illustrées par des simulations numériques.

LC. Pour envisager le problème par une autre face, n'est-il pas nécessaire de développer l'engagement des scientifiques vis-à-vis des problèmes socio-économiques liés aux changements de l'environnement ? Vous avez dit vous-même que le changement climatique engage les sociétés humaines sur une trajectoire sans précédent et à coup sûr problématique. Comment apporter au public des réponses pertinentes pour en juger ? Dans les circonstances actuelles, n'importe quelle information nouvelle suscite immédiatement un flot de réactions contradictoires. Comment la communauté scientifique peut-elle se positionner par rapport à ces débats ?

PM. Les scientifiques actifs sont assez largement impuissants vis-à-vis de ce problème. Dès lors que la hiérarchie académique n'a pas su ou pu maîtriser la polémique, elle a perdu sa crédibilité dans le débat. Auparavant, les scientifiques authentiques n'étaient peut-être pas très écoutés mais au moins savait-on que, lorsqu'on leur posait une question précise dans leur domaine de compétence, ils donnaient une réponse raisonnée et raisonnable. Dès l'instant où quelques-uns ont placé le débat sur un plan polémique, soit en raison de leurs intimes convictions, soit dans des buts moins nobles tels que la recherche de la notoriété, le débat objectif n'intéresse plus personne, chacun étant au premier chef occupé à la défense d'une thèse. Dans l'histoire des sciences, on connaît de nombreux exemples de l'une ou l'autre situation. Au début du *xx^e* siècle par exemple, le professeur/docteur Von Karman a été universellement reconnu comme un expert incontournable en matière de mécanique des fluides et mondialement consulté. Son talent d'arbitre lui a permis de développer une vue équilibrée des différents points de vue. Il pouvait donc donner un avis motivé, basé sur une vue objective de l'état des connaissances à un moment donné. En revanche, dans les années 1920, les quelques savants – ils étaient une douzaine – capables de comprendre les bases fondamentales de la mécanique quantique étaient engagés dans une controverse abstruse autant qu'implacable. Les attaques (naturellement géniales) lancées par Einstein contre les interprétations des phénomènes quantiques inventées par ses collègues sont célèbres dans l'histoire des sciences !

Il nous manque maintenant l'équivalent d'une « académie de climatologie » gardienne d'une certaine intégrité scientifique. On peut dire que le *Joint Organizing Committee* du GARP n'était pas loin de remplir cette fonction à une époque où, il est vrai, les problèmes étaient moins complexes. Le WCRP, trop occupé à rassembler une communauté scientifique éminemment multidisciplinaire, n'a jamais envisagé de remplir un tel rôle. Par ailleurs, il est certain que le GIEC a failli à atteindre ce statut d'arbitre objectif en dépit des intentions affichées. À partir du moment où ce débat est devenu une activité politico-médiatique, nourrie le plus souvent par les controverses, la notion d'intégrité scientifique perd son sens devant la force des convictions ou des agendas personnels.

Conclusion

LC. Cet échange nous a permis de dresser un large panorama de ce vaste champ de recherche, d'en évoquer les multiples composantes, les avancées considérables en une cinquantaine d'années, sans en masquer les difficultés ni les préoccupations qu'il a fait surgir pour l'ensemble des sociétés. Quelle vision avez-vous du futur, et du rôle particulier de la recherche dans ce contexte ?

PM. Nous avons tous vu, j'imagine, l'image de notre planète bleue isolée dans l'immensité de l'espace, telle que les astronautes de la NASA l'ont saisie de la capsule Apollo. Cette photographie fameuse faisait ressortir le caractère exceptionnel de cet astre façonné par une nature vivante et multiforme, mais aussi la relative étroitesse du domaine dont nous sommes les héritiers. Il serait catastrophique que, par ignorance ou simplement par indifférence, l'humanité en arrive à détruire un habitat naturel dont son avenir dépend. Les ressources de la planète sont finies et déjà durement éprouvées par nos exigences et notre industrie engagée dans une course aveugle à la croissance et son cortège de conséquences. Comme d'autres efforts de réflexion sur l'avenir de cette planète à l'aube d'une ère nouvelle dominée par les actions de l'humanité (anthropocène), l'étude et la compréhension des phénomènes climatiques sont une entreprise scientifique visant à conforter un comportement responsable d'une espèce qui se juge intelligente. Contrairement à la démarche adoptée par certains organismes ou institutions internationaux, l'effort des chercheurs doit viser d'abord à convaincre leurs pairs dans la communauté scientifique de la véracité de leurs conclusions, point de passage obligé pour retenir l'attention du grand public. Tout autre raccourci politique ou médiatique est promis à l'échec devant le scepticisme des citoyens, scepticisme justifié par l'ampleur et la complexité des phénomènes physiques mis en jeu tout autant que par la fragilité des institutions humaines chargées d'y porter remède.

Nous avons passé en revue les étapes du long cheminement scientifique qui nous a menés au

niveau actuel de connaissances. Nous sommes conscients de l'imperfection de nos méthodes et de nos résultats mais nous avons confiance en la faisabilité d'aboutir à une estimation réaliste des changements climatiques à venir et de leurs conséquences. Malgré les controverses et la légèreté de certains avis

d'« experts », nous sommes confiants en la justesse de notre approche et généralement satisfaits des progrès réalisés à ce jour. Il ne nous manque que d'être authentiquement appréciés par l'ensemble de la communauté scientifique et encouragés par la compréhension de nos concitoyens.

