

La climatologie aujourd'hui

MICHEL CRUCIFIX
michel.crucifix@uclouvain.be

La climatologie a un pedigree bien difficile. À l'origine sous discipline de disciplines traditionnelles telles que la physique, la géographie, la géologie ou encore l'écologie, elle se présente aujourd'hui comme la science du système climatique. Le système climatique est un des systèmes les plus complexes qu'il soit permis d'étudier et pour lequel les méthodes d'expérimentation classiques semblent inapplicables. Je suis physicien et j'étudie le système climatique depuis 1998. Ces douze années d'expérience m'amènent à porter un regard réflexif, à la fois sur les fondements de la climatologie physique actuelle et sur son positionnement par rapport à la société. L'article tente d'abord d'aider à comprendre les méthodes qui dominent la climatologie moderne en exposant trois paradigmes et en expliquant comment ils se sont articulés. La section suivante est consacrée aux tensions et difficultés causées par les implications réciproques entre la recherche scientifique et les enjeux de société. Référence est faite au concept de science *post-normale*. Ces considérations nous amènent à proposer un nouveau paradigme pour l'étude du système climatique, fondé sur la connaissance physique du système climatique associé à un modèle probabiliste. Je conclus en tentant de spécifier trois objectifs scientifiques et un enjeu plus général pour la climatologie physique du XXI^e siècle.

1. Trois paradigmes

1.1 Le climat est soumis à un équilibre radiatif

Jusqu'au XIX^e siècle les idées que l'on se faisait de l'histoire de la Terre et du Climat en Occident étaient dictées par la tradition biblique. En particulier, les fossiles d'organismes marins étaient généralement reliés au *déluge*, évé-

nement qui aurait eu lieu il y a environ six millénaires (Bard, 2004). On doit entre autres au naturaliste Henri Bénédicte de Saussure (1779) et aux ingénieurs Venetz, de Charpentier (1841), au montagnard Gilles Perraudin et au jeune scientifique Louis Agassiz (1840) d'avoir établi les bases géologiques et glaciologiques de la théorie de l'âge glaciaire¹, selon laquelle l'hémisphère Nord a été dans le passé couvert en partie de grands glaciers. On sait aujourd'hui que ces âges glaciaires constituent des cycles dont le dernier a culminé il y environ 20 000 ans. Cette découverte a naturellement suscité le questionnement chez les physiciens, mathématiciens et ingénieurs. Au risque d'être caricatural, on peut tenter de résumer les choses en disant que deux théories se sont opposées : la théorie astronomique d'une part, selon laquelle les âges glaciaires sont causés par les perturbations de l'orbite de la Terre par les autres planètes combinées aux variations de l'inclinaison de son axe de rotation sur l'écliptique causée par les moments de force exercés par la Lune et le Soleil (Adhémar, 1860, Croll, 1875, Murphy, 1876) ; la théorie concurrente selon laquelle les âges glaciaires sont causés par des variations de la concentration en dioxyde de carbone de nature à affecter ce que Joseph Fourier a appelé *l'effet de serre* (Arrhenius, 1896). L'important est de voir qu'au travers de ces deux théories le phénomène des âges glaciaires est venu motiver l'étude du système climatique en tant qu'entité physique. Ainsi, le mathématicien et ingénieur serbe Milankovitch est sans doute le premier à avoir établi un modèle mathématique complet de la distribution de la température à la surface de la Terre (Milankovitch, 1920). Son intérêt était de comprendre et de modéliser les cycles glaciaires sur base d'éléments physiques. Un premier passage de l'introduction de son ouvrage final publié en 1941 (Milankovitch, 1998) nous montre en quoi les paradigmes de l'époque étaient inappropriés (p. 52)

“At that time meteorologists, who deal with thermal phenomena occurring on the surface of the Earth (...) were not interested in the climates of other planets (...). Nothing induced them to deal with complicated mathematical theories.”

Il a donc dû se tourner vers d'autres disciplines :

1. Le mot *eiszeit* serait dû à Karl Schimper auquel l'historien Evans (1887) attribue la paternité de la théorie

“At the time my first work was published, the question of the habitability of the planets, particularly of Mars, was the focal point of all astronomical research.”

Le passage suivant nous permet de mesurer le caractère fondateur de son entreprise (p. 53) :

“Thus the problem (of ice ages) remained unsolved for a long time, and was not even recognized by the three fields of science : spherical astronomy, celestial mechanics, and mathematical physics. (...) If someone could really succeed in solving the problem to its full extent and in forming a mathematical theory by which it would be possible to follow the action of solar radiation in space and time, then one would be in a position to calculate the basic features of the Earth's climate. (...) The theory can go even further. Having once elaborated the basic features of the present Earth's climate, we would be in a position to explore and describe the climates of ancient times.”

La preuve d'épisodes glaciaires est donc à l'origine d'une première révolution scientifique dans l'histoire de la climatologie. Elle a permis de basculer d'une tradition biblique vers un premier paradigme scientifique selon lequel l'évolution du climat peut se modéliser selon les méthodes de la physique et des mathématiques. Le climat est donc abordé comme un système physique dont l'évolution est déterminée par des considérations sur son équilibre radiatif.

Ce premier paradigme a constitué un cadre de référence pour l'étude de l'évolution du climat durant une bonne part du vingtième siècle. Au sein de ce paradigme, les modèles ont évolué et pris la forme de *systèmes dynamiques* (p. ex. : Oerlemans, 1982 ; Le Treut et Ghil, 1983 ; Gallée *et al.* 1992) ce qui a permis d'assimiler la révolution scientifique qui s'est opérée dans l'étude et l'analyse des systèmes dynamiques. Les modèles développés dans le cadre de ce premier paradigme partent du principe que l'évolution du système est déterminée par des équations d'équilibre appliquées à chacune de ses composantes physiques (l'atmosphère, les calottes de glace et les océans). La perception semble être qu'il doit être possible d'aboutir à une identification précise et univoque des mécanismes qui déterminent l'évolution du climat. En témoigne par exemple ce passage de l'article de Tarasov et Peltier (1997) qui évoque la fonte rapide des grands glaciers qui intervient au terme d'un cycle glaciaire - interglaciaire :

“The simulations of Gallée et al. (...) are perhaps unique, in that they do predict ice-sheet collapse on the appropriate time-scale, though the main mechanism forcing the retreat in their model of this process is a reduction of albedo associated with «snow aging», an effect that is sufficiently subtle as to suggest that the search for alternative mechanisms may be warranted.”

1.2 Prise de conscience des changements climatiques : vers une climatologie technologique

L'idée selon laquelle les activités industrielles modifient durablement l'état du système climatique n'est pas neuve : ainsi Arrhenius (1896) avait compris que l'augmentation de la concentration en gaz carbonique liée à l'activité industrielle causerait un réchauffement et y voyait d'ailleurs une bonne nouvelle - il faut dire qu'il était Scandinave. Par ailleurs, l'ingénieur Guy Steward Callendar avait dès les années 1930 mesuré une augmentation de température et résumé les éléments essentiels de la théorie du réchauffement climatique (Fleming, 2009). Cependant le phénomène de 'révolution scientifique' au sens où les paradigmes et activités de recherche ont été profondément modifiés est probablement à situer fin des années 60. La preuve d'une augmentation graduelle de la concentration en CO₂ sous l'effet de l'activité industrielle a été apportée par les mesures obstinées de Charles Keeling (1960) au Mauna Laua. Les services météorologiques largement développés sous l'effort de guerre s'étaient alors équipés de la technologie et du savoir faire en matière de modèles numériques de l'atmosphère. C'est tout naturellement là qu'ont été réalisées les premières simulations numériques de l'effet d'un doublement de la concentration en dioxyde de carbone par rapport à un niveau de référence sur la température et la circulation de l'atmosphère (Manabe et Wetherald, 1975). Lorsque en 1990 le premier ministre britannique Margaret Thatcher constate *l'urgence de traiter la question des changements climatiques* (Hulme 2009) (p. 65), c'est au sein du Meteorological Office, propriété du ministère de la défense britannique et premier fournisseur de prévisions météorologiques en Grande Bretagne, qu'elle choisit de fonder le Hadley Centre for Climate Change. Ce centre fait depuis autorité pour l'étude physique des changements climatiques. Autre signe : le Groupe Intergouvernemental d'Étude des Changements Climatiques a été établi en 1988 conjointement par l'organisation météorologique mondiale et le programme des Nations Unies pour l'environnement. *Les météorologues, très souvent des mathématiciens ou des*

physiciens, se sont donc retrouvés investis de la mission d'étudier l'aspect physique des changements climatiques.

Il en a résulté le paradigme selon lequel l'étude du système climatique peut se concevoir comme un problème de dynamique, où la dynamique des fluides joue un rôle majeur, à l'image du problème de la prédiction du temps. En témoigne la citation suivante, issue d'un article visionnaire écrit par le météorologue Edward Lorenz et intitulé «Climate change as a mathematical problem» :

“In a mathematical treatment, we may define the climate as the collection of all long-term statistical properties of the state of the atmosphere. We may represent the instantaneous state of the atmosphere by the three-dimensional fields of temperature, pressure, density and wind velocity, and water in its gaseous liquid and solid phases. The variations of these fields as time progresses are governed by familiar physical laws ; we may express these as mathematical equations which specify the time derivative of each atmospheric variable as a function of the state of the atmosphere and its environment.”

Nous voyons donc que Lorenz rassemble sous un même cadre le problème de la prévision du temps (*weather*) et celui du climat. Dans une note sur la prédictabilité du climat publiée dans les annales de l'organisation météorologique mondiale, Lorenz (1975) distingue d'ailleurs les *prévisions du premier type (first kind)*, qui consistent à prévoir la chronologie exacte de l'évolution d'un système dynamique déterminé ; et les *prévisions du second type*, qui consistent à calculer les invariants statistiques de ce système sous l'effet d'une modification d'un paramètre. Selon ce vocabulaire, une prévision météorologique est une prévision du premier type ; elle est principalement déterminée par les équations du mouvement atmosphérique. Le calcul du réchauffement climatique induit par une augmentation stabilisée du dioxyde de carbone dans l'atmosphère est une prédiction du second type, puisqu'on s'intéresse aux statistiques du système atmosphère - océan à l'état stationnaire. La prévision de la prochaine entrée en glaciation redevient un calcul de trajectoire, et donc une prévision du premier type. D'après Lorenz, même la question des âges glaciaires doit pouvoir être abordée selon les mêmes méthodes de simulation numérique (Lorenz, 1970), le seul obstacle semblant être la puissance de calcul disponible :

“If (...) we look in the 21st century, and make an optimistic forecast concerning the type of computer which will be available, we find that yet (...) we may construct a super-model, including as variables every feature of the atmosphere and its environment which can conceivably have varied over the ages. Included will be such features as the detailed composition of the atmosphere and the oceans, the extent of continental glaciation, and the distribution of vegetation (...) When we integrate the equations, if they are correct, we shall necessarily obtain changes in climate, including the great ice ages.”

Le paradigme décrit par Lorenz suit donc une logique réductionniste dans lequel les méthodes de simulation numériques prennent une part essentielle:

“The development of mathematical models has accompanied the development of computers rather than following it, and has always been limited by the size and speed of the computers available.”

Ce paradigme domine aujourd’hui la pratique en climatologie physique. Les *modèles mathématiques* auxquels Lorenz faisait référence en 1970 sont aujourd’hui des constructions extrêmement compliquées se présentant sous la forme de codes informatiques comprenant des centaines de milliers de lignes, qui traduisent la mise en forme numérique de centaines d’équations pour l’ensemble des processus intervenant dans le système climatique. Ces processus sont aussi divers que les phénomènes de turbulence dans la couche mélangée océanique (les premiers mètres de profondeur brassés sous l’effet du vent et des marées) ; la nucléation de gouttelettes d’eau dans l’atmosphère, notamment sous l’effet des aérosols ; l’émission de composés organiques volatiles par la végétation continentale, les réactions chimiques impliquant ces composés dans l’atmosphère ; l’absorption et l’émission de rayonnement infrarouge dans la colonne d’air atmosphérique ; le compactage et le cisaillement de la banquise, etc. Au Hadley Centre, plusieurs dizaines de scientifiques sont directement impliqués dans le développement d’un tel modèle, et ces scientifiques collaborent et empruntent des ‘morceaux de code’ auprès d’autres centres. Au final des centaines de personnes sont impliquées dans la construction d’un modèle. Il existe dans le monde une quinzaine de modèles de cette sorte.

Ces modèles sont le plus souvent désignés sous le vocable de ‘modèles de circulation générale’ (General Circulation Models, ou GCM) par une habi-

tude remontant à l'époque où ils étaient pour l'essentiel une implémentation numérique des équations de la dynamique des fluides appliquées à l'atmosphère du globe et aux océans. Nous leur préférons ici le terme de *simulateur*. Ils sont d'ailleurs quelquefois présentés au grand public comme des *terres virtuelles* qui, contrairement à la Terre réelle, peuvent être manipulées et expérimentées à loisir².

Les investigations menées dans le cadre de ce second paradigme peuvent se résumer de la façon suivante : (a) observations détaillées du système climatique, de la distribution de la température, précipitations, couverture nuageuse, couvert végétal..., reposant notamment sur des programmes d'observations satellitaires ; (b) investigation de la réponse du système climatique et des mécanismes de réponse par le truchement d'expériences avec des simulateurs numériques ; (c) attribution des changements climatiques visant à mettre en relation les simulations et les observations.

Sur le plan scientifique, on ne peut nier le succès de ce programme. Les simulateurs modernes reproduisent de façon assez convaincante un certain nombre de phénomènes tels que le cycle saisonnier de température, de précipitations, la distribution et les propriétés radiatives de la couverture nuageuse, le phénomène El-Niño, les structures frontales atmosphériques.... Les phénomènes simulés sont minutieusement comparés avec les phénomènes réels et les erreurs des simulateurs sont de mieux en mieux documentées. Ce qu'on nomme *validation* désigne le plus souvent la procédure de documentation des erreurs plutôt qu'un test qui conduirait à rejeter définitivement un simulateur donné.

Les avancées scientifiques rendues possibles par les simulateurs semblent d'autant plus tangibles que le problème considéré est dominé par les équations de la dynamique des fluides, par exemple le phénomène El-Niño (Guilyardi *et al.*, 2004). Pour ces phénomènes, il est effectivement essentiel de résoudre le mouvement des fluides avec une grande précision spatio-temporelle de façon à résoudre les échanges énergétiques entre les différentes échelles. Dans le jargon des météorologues ou des océanographes il est dit que le simulateur doit avoir une grande (ou haute) *résolution*.

2. Conférence grand public donnée par le prof. Hervé Le Treut lors des 16e Rencontres de Blois, 24 mai 2004

De là est née la perception que le climat lui-même peut être prédit avec d'autant plus d'exactitude que le simulateur résout la dynamique des fluides géophysiques avec une grande résolution. Citons ici Tim Palmer (2005), président actuel de la Royal Meteorological Society à Londres et chercheur au Centre de Préviation du Temps à Moyen Terme à Reading et professeur à Oxford:

“My view is that to reduce significantly the uncertainty in forecast of climate change, global climate models should be able to resolve more of the atmospheric processes that directly determine the cloud cover and water vapour distribution in the atmosphere. In order to resolve deep convection requires grid length on the order of 1 km.”

Cela a un coût : doubler la résolution spatiale multiplie par 16 le nombre d'opérations arithmétiques à effectuer. Tim Palmer encourage dès lors la mise en place d'un programme international qui viserait à développer un superordinateur capable de mille milliards d'opérations à la seconde (10^{15}), soit deux bons ordres de grandeur au-dessus de l'état de l'art actuel. Il assure que les simulations climatiques à haute résolution menées au moyen de cet ordinateur apporteront aux gouvernements et aux industries la confiance qui leur manque actuellement dans la qualité des prévisions climatiques pour les induire à l'action. *Cette proposition suppose cependant que la dynamique du système climatique considéré dans son ensemble soit effectivement dominée par les équations de mécanique des fluides géophysiques.*

C'est précisément ce point que met en question le paradigme *systémique* que nous abordons maintenant.

1.3 Un paradigme systémique : le climat comme système thermodynamique complexe.

1.3.1 Prise de conscience de la complexité du système climatique

Dès les années 80 est intervenue progressivement la prise de conscience du rôle fondamental joué par la biosphère dans la machine climatique. Ainsi, les forêts tropicales pompent de vastes quantités d'eau dans les nappes aquifères qu'elles libèrent sous forme de vapeur d'eau ; elles créent ainsi les conditions favorables au phénomène de convection humide qui a pour double effet de causer des précipitations et de contribuer à entraîner la dynamique des

cellules de Hadley qui constituent un des éléments dynamiques majeurs de l'atmosphère³. Les forêts boréales ont quant à elles pour effet d'augmenter le pouvoir d'absorption de la surface et contribuent ainsi à augmenter la température qui constitue une des conditions nécessaires à leur propre développement (Otterman *et al.*, 1984). Signe de l'extrême complexité des phénomènes en jeu, un réchauffement climatique pourrait au Nord favoriser le développement d'insectes ravageurs menaçant l'actuel équilibre des écosystèmes Nordiques, ainsi que le suggèrent des observations récentes (voir Kurz *et al.* (2008) et références citées dans cet article). Qu'Arrhénius nous entende où qu'il soit ! Le scientifique indépendant James Lovelock (1988) a contribué à populariser l'idée selon laquelle le système climatique pris dans son ensemble peut être comparé à un être vivant aux multiples mécanismes de régulation. Il relève entre autres que les principaux gaz à effets de serre, y compris la vapeur d'eau, sont intimement impliqués dans l'activité biologique. En effet, le dioxyde de carbone, un gaz qui représente après tout moins de 0,04 % du volume atmosphérique, se montre efficace à la fois comme agent radiatif (l'effet de serre de Joseph Fourier), comme agent chimique (il modifie l'acidité des océans, qui en retour agit sur la cinétique des phénomènes de calcification et de sédimentation) et comme agent biologique. Plusieurs études montrent que les variations de dioxyde de carbone au cours des âges glaciaires influencent de façon majeure le développement des forêts tropicales par son seul effet biologique (Harrison et Prentice, 2003, Crucifix *et al.*, 2005). Les grands cycles glaciaires peuvent dès lors être vus comme les respirations d'un système phénoménalement complexe. Par analogie avec les systèmes vivants, les gaz à effet de serre biogéniques tels que le gaz carbonique et le méthane peuvent être vus comme les hormones qui mettent en connexion l'ensemble des composantes du système climatique. La notion d'un système climatique complexe et auto-régulé que nous apporte ce paradigme systémique devrait nous mettre en garde contre les solutions dite de *geoengineering* (ingénierie de la Terre) visant à compenser les émissions de gaz à effet de serre, par exemple, par des émissions de dioxyde de soufre. Ces solutions sont héritées d'une époque de positivisme naïf que le paradigme systémique dépasse.

3. Voir à ce sujet l'article de synthèse de Betts *et al.* (2008) et l'article moins conventionnel mais plus proche de ce troisième paradigme de Makarieva et Gorshkov (2006). Ce dernier article a été abondamment discuté, généralement de façon constructive, mais la controverse autour de cet article peut en partie être lue comme un conflit entre les deuxième et troisième paradigmes que nous décrivons ici.

Face à la complexité des phénomènes en jeu et la redondance des mécanismes, on peut se demander s'il n'est pas plus pertinent de s'interroger sur les contraintes qui déterminent le comportement du système climatique dans sa globalité plutôt que de chercher à intégrer tous les processus dans un simulateur. Ainsi, à la question «pourquoi le lapin court-il plus vite que le renard ?», on peut tenter de répondre en analysant la musculature et le squelette de ces deux animaux (cela a été fait ! voir Iriarte-Diaz, 2002) ou bien réfléchir aux contraintes imposées par la dynamique des populations et de la chaîne alimentaire que l'on peut résumer par l'aphorisme : «le lapin court pour sa vie, le renard pour son dîner». C'est de cette seconde approche qu'il est question ici. Elle vise à établir une théorie prenant en compte les *contraintes* agissant sur le système dans son ensemble en identifiant des *variables et paramètres pertinents*. Cette approche est nécessairement plus phénoménologique que les approches précédentes.

Nous pouvons citer au moins deux méthodes d'investigation compatibles avec ce troisième paradigme : une approche phénoménologique basée sur la théorie des systèmes dynamiques, et une approche plus proche de la mécanique statistique fondée sur l'identification des contraintes.

1.3.2 Une approche phénoménologique basée sur la théorie des systèmes dynamiques

Dès les années 80, Barry Saltzman, ancien étudiant de Lorenz et auteur des équations du fameux modèle de Lorenz qui a servi de base pour étayer la théorie du chaos dissipatif, s'intéresse à la question des âges glaciaires. Contrairement à Lorenz, il estime que les modèles de circulation générale n'auront jamais la précision nécessaire pour calculer les très faibles déséquilibres d'accumulation de neige et de glace qui mènent, à des échelles de plusieurs dizaines de milliers d'années, aux grands cycles glaciaires-interglaciaires. Il écrit (Saltzman, 2001, p. 317) :

“On a more fundamental level the proposed scheme constitutes an inversion of the usual approach to the problem, wherein it is often taken as an article of faith that the CSM (i.e. le simulateur) provides the ultimate physical basis for calculating the long-term, time-dependent evolution of climate as an initial value problem. Here, we have suggested that because of the impracticality (if not impossibility!) of calculating the fluxes of mass and energy involved in the long-term changes to the accuracy required by the geologic

evidence, a more central need is to formulate, phenomenologically, the structure of the slow-response system (...)"

Il pense en revanche qu'il doit être possible d'établir un modèle de ces cycles sous la forme d'un petit système d'équations différentielles ordinaires. Il justifie notamment sa démarche sur base des travaux contemporains d'Herman Haken qui développe la théorie naissante des systèmes complexes, et selon lequel la dynamique des systèmes complexes est dominée par les modes les plus instables (Haken, 2004, sect. 7.2)⁴ L'évolution de ces systèmes peut alors être prédite en résolvant un système d'équations différentielles aux dérivées ordinaires représentant les modes les plus instables, éventuellement complétées de paramétrisations stochastiques pour tenir compte des effets liés à la relaxation des modes les plus rapides.⁵

Saltzman trace un parallèle entre l'activité de modélisation en climatologie et le problème plus général de modélisation des systèmes complexes :

"The palaeoclimatological problem we have been discussing here is but one example of a class of problems that is as difficult and important as any considered more generally in physics. It is, in short, a problem in ultraslow, complex evolution in which the rates of change, and the fluxes of mass, momentum, and energy, that accompany and drive them, are too small to be calculable directly and in some cases even measurable (...). One further example of which we are all aware is the human «aging» process wherein a very slow, unmeasurable process of combined biological, chemical and physical change occurs on a relatively long time scale (unfortunately, monotonically)."

Ces dernières lignes sont émouvantes quand on sait qu'elles ont été écrites alors que Barry Saltzman était en phase terminale d'un cancer. L'approche préconisée par Saltzman dépasse donc le cadre des âges glaciaires et s'applique dès que le chercheur désire éclairer un aspect particulier du système climatique par référence à l'abondante théorie des systèmes dynamiques. Ce programme est celui préconisé par le mathématicien Michael Ghil dans un

4. L'édition originale de cet ouvrage date de 1981.

5. Les climatologues réfèrent généralement l'article du physicien Klaus Hasselmann (1976) comme une des premières fondations théoriques pour l'emploi d'équations dynamiques stochastiques pour représenter les effets dynamiques non résolus explicitement. Il s'agit d'un aspect important en climatologie théorique, auquel nous n'avons pas pleinement rendu justice dans cet article et auquel Palmer et Williams viennent de consacrer un volume entier (Palmer et Williams, 2010).

ambitieux article où il identifie 10 grands problèmes pour les géosciences du XX^e siècle (Ghil, 2001). Une fois un cadre spatio-temporel défini, on peut espérer développer des systèmes dynamiques pertinents pour étudier, comprendre et prédire l'évolution du système climatique ou une de ses composantes en combinant différentes approches : (a) en développant des modèles macroscopiques où l'état du système climatique est résumé sous la forme d'une variable d'état avec un petit nombre de composantes ; (b) par analyse des séries temporelles d'observations ; (c) par analyse des informations générées par les simulateurs climatiques. Cette recherche peut amener les climatologues à *identifier* ou, mieux, *prévoir* l'existence de bifurcations dans le système climatique (Timmermann, 2003), voire d'identifier les signes précurseurs à l'approche d'une bifurcation (Livina et Lenton, 2007), un problème particulièrement pertinent, car une bifurcation implique un changement dynamique majeur susceptible d'intervenir à mesure que les concentrations en gaz à effet de serre augmentent.

1.3.3 Une approche de type «mécanique statistique»

Une seconde approche compatible avec le paradigme systémique consiste à prendre en compte les contraintes qui s'appliquent au système climatique selon une approche variationnelle, comme en mécanique statistique. Ainsi, Paltridge (1975) a noté que le flux d'énergie entre l'équateur et les pôles satisfait une loi de *production d'entropie maximale* sujette à la condition de conservation d'énergie. Dewar (2005) a tenté de démontrer que rechercher le point de production maximale d'entropie sous contraintes revient à chercher l'état macroscopique du système le plus probable étant donné ces contraintes. La démonstration de Dewar s'inscrit dans la lignée des travaux de Jaynes (2003, chap. 11)₂, qui a cherché une équivalence entre l'entropie d'information et l'entropie des ensembles canoniques et grand-canoniques de Gibbs⁶. Le postulat de Paltridge se ramènerait donc à la conclusion étonnante qu'aucun processus autre que l'énergie reçue directement du Soleil au sommet de l'atmosphère ne contraint effectivement le transport d'énergie par la machine climatique. Ralph Lorenz (2001) a cherché à déterminer si ce principe se vérifie pour d'autres planètes, telles que Vénus, Mars et Titan. La réponse semble affirmative, mais Lorenz a, au moins pour Mars, dû recourir à des hypothèses ad hoc. Plus récemment, Jupp et Cox (2010) ont cherché à déterminer les

6. Les publications de Dewar ont suscité des objections, mais il poursuit ses travaux.

conditions à partir desquelles la nature du fluide géophysique et la vitesse de rotation de la planète créent une limite effective au transport d'énergie. On comprend que cette voie de recherche suscite résistance et scepticisme auprès des météorologues, puisqu'elle tend à indiquer que certaines propriétés importantes du système climatique pris dans son ensemble *ne sont pas dominées* par la dynamique des fluides géophysiques.

2. Les défis d'une science post-normale

Thomas Kuhn qualifie de science *normale* les investigations scientifiques menées dans le cadre d'un paradigme déterminé, et considère les *révolutions scientifiques* comme le mécanisme qui permet de faire progresser la science en basculant d'un paradigme à un autre (Kuhn, 1962, ch.9). Dans le cas qui nous occupe, la prise de conscience des changements climatiques a induit un autre type de basculement : l'implication d'une discipline académique dans des questions d'intérêt public pour lesquelles «*les faits sont incertains, les valeurs controversées, les enjeux importants et les décisions sont urgentes*» (Funtowicz et Ravetz, 1994). Cette situation constitue une nouvelle étape dans les interactions entre la science et la société, qui dépasse les cadres connus de la science appliquée et même de la mission d'expertise. Aujourd'hui, c'est l'autorité même du scientifique qui est mise en balance face aux multiples enjeux associés à la crise environnementale. C'est pourquoi Funtowicz et Ravetz ont proposé de qualifier l'activité scientifique associée aux grands enjeux environnementaux de science *post-normale*.

Sans vouloir prétendre ici nous substituer au sociologue, nous aborderons ici le point de vue du chercheur climatologue, en observant que le contexte post-normal lui pose un certain nombre de défis que nous allons développer : (a) la définition des valeurs et de sa propre autorité ; (b) la définition de l'activité scientifique ; et (c) la communication des incertitudes.

2.1 Définir ses valeurs et son autorité

D'après Robert Merton (Merton, 1973, chap.13 : *The normative structure of science*) le chercheur tend généralement à justifier son activité par référence à une éthique fondée sur le sens critique (scepticisme), l'universalisme, le communisme (dans un sens non politique) et le désintéressement (voir aussi

(Hulme, 2009, p. 75). Dans le cadre d'une science post-normale, le chercheur est soumis à la pression du débat public qui est régi par d'autres règles que celles de l'activité scientifique normale. Le chercheur est notamment appelé à intervenir comme expert (auprès des gouvernements, industries) et pédagogue (parfois au travers des médias de masse). L'importance des enjeux rend le débat public particulièrement dense et usant. L'affaire des e-mails volés qualifiée de «climategate»⁷ montre à quel point l'activité scientifique normale est perturbée par la surveillance des médias, de l'industrie, et par l'agenda politique.

Le chercheur se retrouve donc à rendre des comptes (a) à ses pairs selon les normes de leurs disciplines scientifiques, ce qui en soit n'est pas sans défi vu le caractère multidisciplinaire de la climatologie ; (b) aux gouvernements, parfois au travers d'un marché ambigu où le bailleur de fonds achète de l'aide à la décision selon un modèle technocratique alors qu'il lui est vendu de la recherche scientifique ; (c) au public, qui est en attente de solutions face aux grands enjeux environnementaux et aux choix de société sur des thèmes aussi divers que l'énergie, l'hydrologie ou la gestion des déchets, sans pouvoir se mettre au niveau de la sous-discipline précise dans laquelle le chercheur a choisi d'orienter sa carrière ; (d) enfin face à lui-même, ses propres questionnements et sa part citoyenne, parfois militante, inquiète elle aussi des enjeux environnementaux.

L'interimplication entre *décideurs* et scientifiques s'est ici cristallisée sous la forme du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Ce groupe est fondé en 1988 sous l'autorité des Nations Unies par l'intermédiaire de l'organisation météorologique mondiale et du programme des Nations Unies pour l'environnement. Le GIEC a entre autres pour mission d'établir des rapports d'évaluation sur les aspects physiques du changement climatique (amplitude, origine, etc.), leurs impacts sur l'environnement et les sociétés humaines et sur les moyens de prévenir ou de s'adapter aux changements climatiques. Les rapports sont soumis à la critique d'experts selon un mode de relecture similaire aux publications scientifiques avant d'être relus et approuvés par les représentants des gouvernements au terme d'une phase de négociation. Ces rapports sont alors destinés à constituer une base scientifique propre à guider des décisions politiques ou leur implémenta-

7. Un «Climategate» fait des vagues à la veille du sommet de Copenhague, La Libre Belgique, 04 décembre 2009.

tion. En pratique, les experts dont il est question ici sont dans leur majorité des chercheurs issus des universités ou des centres gouvernementaux. Ces derniers considèrent souvent leur implication dans le GIEC comme un élément de valorisation professionnelle et les directeurs de recherche sont généralement amenés à adapter l'agenda de recherche de leurs équipes de façon à gagner en visibilité dans les rapports du GIEC. Ainsi, lorsque le GIEC s'est vu récompenser du prix Nobel de la Paix en 2007 conjointement avec l'ancien Vice-Président États-Unien Al Gore, on a vu fleurir sur nombre de pages web personnelles de chercheurs la mention : 'prix Nobel de la Paix' sous la rubrique «distinctions et récompenses». Il faut savoir que le comité Nobel n'a jamais nommé la liste des experts attachés au GIEC (Hulme, 2009, p. 98). Le chercheur qui affiche 'prix Nobel de la Paix' sur sa page web fait donc le choix de se revendiquer solidaire d'une communauté définie dans la conscience collective (nous la nommerons : les 'climatologues'). Son activité devient alors politique au sens large du terme, et un problème surgit du fait que les valeurs qui fondent l'activité scientifique - le doute, le scepticisme - diffèrent de celles qui fondent l'activité politique : la représentativité, la négociation et le consensus. De même, les critères qui permettent d'asseoir une autorité dépendent du contexte : l'humilité et l'expression du doute qui sont essentiels dans une publication scientifique font moins recette que l'aplomb personnel et les démonstrations de force (notamment technologiques) dans une négociation.

Face à cette dualité, le chercheur se doit de conserver une certaine hygiène. Il a certainement intérêt à bien réfléchir à la façon dont il désire asseoir son autorité et s'y tenir. Si on admet que le chercheur est maître de ses propos, ce qu'il en advient une fois prononcés publiquement relève de la dynamique des opinions sur laquelle il n'a que peu ou pas de prise. Il ne peut être tenu ni se sentir responsable de cette dynamique⁸. Notamment, l'existence de dénégateurs du changement climatique plus ou moins de bonne foi est un fait social pratiquement inévitable vu l'importance des enjeux. Avant de s'épuiser à leur répondre, il peut être utile au chercheur de se demander si ces dénégateurs menacent l'autorité sur laquelle il a choisi de fonder sa personnalité. Une fois ce cadre posé, il assurera sans doute ses responsabilités d'expert avec plus de sérénité.

Considérons l'exemple suivant : les échantillons de glace prélevés dans les profondeurs de l'inlandsis Antarctique révèlent sans la moindre ambiguïté

8. Hulmes (2009, p. 106) résume en écrivant : «knowledge is a public commodity».

que la dynamique des âges glaciaires est associée à des variations importantes des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote (Luethi *et al.*, 2008, Loulergue *et al.*, 2008). Ces mesures établissent la preuve que les concentrations actuelles des gaz à effet de serre sont absolument anormales et ne s'expliquent que par l'activité industrielle ; de plus elles démontrent une relation entre le climat et les variations en gaz à effet de serre. Il fut cependant facile à des personnes plus ou moins bien intentionnées de faire observer au public que les variations de température *en Antarctique* mesurées à partir des mêmes échantillons *précèdent* les variations de concentration en CO₂ lors des sorties de glaciation. Elles ne sauraient donc en être la cause, laissant ainsi entendre que la vérité a été maquillée. Le comble est que l'article montrant le décalage temporel entre les variations de température et de concentrations de CO₂ a été publié par les mêmes scientifiques que ceux qui ont établi le forage et mesuré les concentrations en CO₂ (Caillon *et al.*, 2003), et il est facile d'argumenter qu'en soi ce résultat ne remet aucunement en cause les théories actuelles sur l'effet du CO₂ sur le climat *global* de la Terre. On pourrait peut-être considérer que dans cette affaire les 'climatologues' vus comme 'groupe d'influence politique' ont perdu quelques plumes. En revanche, les chercheurs cités ici n'ont pas compromis leur autorité vis-à-vis de leurs pairs.

2.2 Redéfinir l'activité scientifique

L'activité scientifique conventionnelle consiste à rechercher des régularités naturelles et à établir des lois générales. Au fur et à mesure que la science est 'appliquée' l'activité du chercheur devient de plus en plus orientée vers des cas particuliers, selon les besoins de l'industrie ou de la société. En soi, cette situation favorise les programmes de recherche basés sur des simulateurs climatiques conçus pour étudier spécifiquement le climat de la planète Terre. Par ailleurs, le développement de simulateurs sophistiqués s'accorde bien avec le fonctionnement des structures d'encadrement et de financement de la recherche scientifique qui favorisent les programmes coopératifs, structurés et à haute visibilité (Lindzen, 2008). Citons à ce propos le discours prononcé par le premier ministre britannique Margaret Thatcher lors de la cérémonie d'inauguration du Hadley Centre⁹ :

9. Discours disponible à l'adresse : <http://www.margaretthatcher.org/document/108102>.

“Previously, we could get some idea of future climates by observing and analysing the patterns of the past, but the changes we can expect in the future will be so much greater than anything we have hitherto experienced, that these methods will not be adequate and we shall need to rely much more on computer models which take in the full complexity of the climate system. It will be on the basis of this work that we shall be able to establish a realistic international programme of action and an equally realistic time-table.”

Le contexte technologique entourant les simulateurs climatiques contribue à assoir le statut de la climatologie physique auprès des décideurs et du grand public¹⁰. Les simulateurs sont d'ailleurs un élément de fierté nationale. Il y a quelques années le Japon a inauguré avec grand bruit son 'Earth Simulator', le terme faisant référence à l'ordinateur plutôt qu'au simulateur proprement dit, et la Chine a déployé d'importants efforts pour développer un simulateur qui puisse être cité aux côtés de ceux développés par les Etats-Unis, France, Grande-Bretagne, Allemagne, Canada, Australie etc. dans le dernier rapport du GIEC (Meehl *et al.*, 2007). On peut certainement s'attendre à un modèle coréen dans les années à venir. Cette course n'est pas sans rappeler les programmes spatiaux des années 60.

Autre conséquence du climat 'post-normal' : les scientifiques apprennent à se protéger contre les interprétations perverses qui peuvent être faites de leurs recherches. Nous avons cité plus haut la mésaventure des scientifiques impliqués dans l'analyse des échantillons de glace prélevés en Antarctique. Les modélisateurs se méfient également. Ainsi, un responsable du Hadley Centre émettait récemment des craintes à propos de ce qu'une personne mal intentionnée pourrait extraire telle ou telle partie du code pour décrédibiliser l'activité scientifique des climatologues¹¹, à l'image du prétendu scandale du Climategate qui a injustement frappé plusieurs climatologues réputés. Dans la plupart des cas le code des simulateurs est soumis à un processus de révision interne scrupuleux au sein du centre de recherche qui encadre son développement, mais il est rarement publié dans son intégralité sur internet, précisément pour ces raisons. Les conditions ne sont donc pas strictement réunies

10. Leçon inaugurale par Mike Hulme, 'How models gain and exercise authority?', conférence CRASSH «Challenging Models in the Face of Uncertainty», Cambridge, 28 Septembre 2010.

11. Propos exprimés à la conférence CRASSH «Challenging Models in the Face of Uncertainty», Cambridge, 28 Septembre 2010.

pour que les résultats publiés puissent être reproduits par l'ensemble de la communauté scientifique. Il faut néanmoins reconnaître à ce sujet une évolution positive : la revue scientifique *Geoscientific Model Development (GMD)* fondée en 2008 a spécifiquement pour objet de documenter les modèles complexes, et en particulier les simulateurs climatiques.

Le poids pris par le développement et l'utilisation de simulateurs climatiques complexes nous amène à réfléchir au sens de l'activité scientifique en climatologie. Beaucoup de chercheurs utilisent des simulateurs qu'ils ne comprennent que très incomplètement et consacrent une grande partie de leur temps à des questions techniques. Le choix de tel ou tel simulateur est souvent autant guidé par des considérations pratiques ou de stratégie d'institut que par des considérations scientifiques. On peut s'inquiéter, par ailleurs, que de nombreux jeunes chercheurs, bien que très adroits avec l'ordinateur, n'ont pas suffisamment acquis certains éléments fondamentaux en matière de systèmes dynamiques et de statistique qui pourtant semblent essentiels pour interpréter les résultats des simulations numériques dans un contexte plus général. Bref : qu'est-il advenu de la démarche hypothético-déductive qui, en principe, caractérise la recherche fondamentale ?

Le chercheur se doit de se poser la question. Il peut y répondre de plusieurs façons. Une façon consiste à exercer son activité hypothético-déductive vis-à-vis du simulateur climatique, abordé comme un dispositif expérimental. C'est d'ailleurs l'approche préconisée par Lorenz (1970) :

“We therefore ought not to look upon a mathematical model as a means of by-passing the physical imagination needed to formulate hypotheses. We should, however, regard a model as a valuable tool for *testing* hypotheses.”

C'est ce que les climatologues appellent 'explorer les mécanismes' au moyen d'un modèle, et cette démarche est très valorisée dans le cadre normal du second paradigme.

Le chercheur peut également choisir de se réfugier dans des aspects plus idéalisés ou théoriques, moins directement en rapport avec les changements climatiques. Par exemple, on peut étudier le développement de la turbulence dans la couche mélangée océanique. Cette recherche reste souvent justifiée auprès des institutions de financement par le fait qu'elle peut aboutir à des paramétrisations qui peuvent être intégrées dans les simulateurs climatiques

(voir section suivante). Peut-être plus radicalement, le chercheur peut choisir d'adopter le 'paradigme systémique' en considérant le système climatique dans toute sa complexité, par exemple en essayant de comprendre sa structure de bifurcation ou, de façon encore plus large, en abordant les questions d'habitabilité des planètes en général. Le climat terrestre est alors vu comme un cas particulier parmi un *ensemble* de climats possibles.

Enfin, le chercheur peut choisir de réfléchir aux connexions qui existent entre les modèles (y compris les simulateurs) et le climat réel. Ceci nous mène à la question des incertitudes que nous abordons dans la suite de cet article.

2.3 Communiquer ses incertitudes

Dans le cadre d'une science post-normale, où l'autorité du chercheur est à ce point mise en question, la communication des incertitudes joue un rôle capital. Dans la Revue Louvain (nr 184, juin 2010, p. 19), le philosophe Marc Hunyadi s'exprime à l'occasion d'un débat avec le climatologue et mathématicien André Berger :

“Si les scientifiques reconnaissaient sobrement et rationnellement les incertitudes de leur propre savoir, les marges d'erreur de leurs données, pour ne rien dire du caractère hypothétique de leurs prévisions, le public ne serait pas si prompt à s'emparer de la moindre information de leurs belles incertitudes.”

Voilà de quoi décontenancer les experts, car un des objectifs du GIEC est précisément d'user de nuance et de faire le tri, par voie de consensus, entre ce qui semble certain et ce qui est plus spéculatif. Ceci dit la remarque du Prof. Hunyadi n'est pas dénuée de fondement : les simulateurs numériques sont parfois présentés au public comme un moyen d'aboutir à des prédictions précises sur base de lois physiques, donc nécessairement objectives. En particulier, (Hulme, 2009). p. 90 a noté que les climatologues ont tendance à renoncer en public à leur marge d'interprétation (une démarche 'subjective') par rapport au simulateur numérique qui, lui, fournit des valeurs numériques 'objectives'. La posture se comprend car elle vise à convaincre un public encore très positiviste (la certitude est la norme ; seules les sciences 'exactes' sont fiables), mais elle est risquée quand on sait que les simulations comportent inévitablement des erreurs.

Il faut en effet savoir que le développement d'un simulateur nécessite un grand nombre de décisions subjectives présidant à la sélection des processus qui sont effectivement représentés (par exemple : jusqu'où va-t-on dans le détail de la représentation de la biosphère ?), et à la façon dont ces processus sont représentés. Ainsi, les phénomènes de formation des nuages ou de dissipation d'énergie par les marées sont pris en compte par des modèles semi-empiriques adaptés à la résolution du simulateur. Ces modèles sont appelés dans le jargon des *paramétrisations*. L'adjectif *semi-empirique* fait ici référence au fait que la paramétrisation peut dans certains cas être déduite d'hypothèses physiques raisonnables, mais qu'au moins certains de ces paramètres doivent être inférés à partir des observations. Une des difficultés réside d'ailleurs dans les complications techniques d'effectuer des observations à une échelle spatio-temporelle compatible avec la résolution du simulateur, nécessaires pour tester et calibrer les paramétrisations. Une autre, plus fondamentale, est que les hypothèses théoriques à partir desquelles une paramétrisation est déduite ne sont pas toujours satisfaites en pratique. Par exemple, on trouvera rarement une région de la taille d'un élément de résolution d'un GCM (environ 10 000 km²) caractérisée d'un ensemble homogène de nuages convectifs en équilibre avec le flux d'air vertical à grande échelle. Pourtant, cette hypothèse est à la base de la plupart des paramétrisations de la convection atmosphérique (Palmer, 2005). Pour ces raisons, la communauté scientifique n'est pas toujours en position de trancher quelle paramétrisation est la plus adéquate pour un processus donné. Les simulateurs se distinguent dès lors les uns des autres par le choix des paramétrisations. Enfin, les paramètres laissés libres sont recalibrés une fois le simulateur assemblé, de façon à ce que celui-ci reproduise au mieux le climat à grande échelle, dans les limites jugées raisonnables pour chaque paramètre. Cette procédure porte le nom de 'tuning' (réglage).

Toute cette industrie (paramétrisations, 'tuning', 'debugging') laisse sceptique une frange de la population scientifique, en particulier les ingénieurs, habitués à des modèles asymptotiquement exacts. Si le modèle n'est pas exact, à quoi peut-il servir ?

L'enjeu est donc double. Nous sommes d'abord face à une mission pédagogique. Il s'agit de faire comprendre à l'ensemble de la communauté concernée par les changements climatiques que l'activité scientifique ne consiste ici plus à *bannir* l'incertitude mais bien de la gérer, de la quantifier et de l'intégrer dans la prise de décision, chose à laquelle les assureurs, par exemple, sont

tout à fait habitués. Le modèle ultra-haute résolution proposé par Tim Palmer ne bannira pas les incertitudes et il y a même débat quant au fait qu'il puisse les réduire. Le second enjeu est de se donner les outils et concepts pour *quantifier* ces incertitudes : un problème fondamentalement difficile quand, comme le notent Funtowicz et Ravetz (1994), l'incertitude confine parfois à l'ignorance en matière d'enjeux environnementaux.

Ce sont ces considérations qui nous indiquent l'urgence d'un nouveau paradigme, probabiliste, pour l'étude du système climatique et que nous abordons maintenant.

3. Naissance d'un paradigme probabiliste ?

Nous avons mis en exergue deux paradigmes pour l'étude du système climatique (si on laisse de côté le tout premier paradigme qui en est la racine historique) : un paradigme réductionniste fondé sur l'utilisation du simulateurs, et un paradigme plus systémique fondé davantage sur la notion de contrainte. Comme le prévoyait Kuhn (1962, chap. 9), il existe un certain niveau d'incommensurabilité entre les deux paradigmes : ils apportent des réponses différentes à un même problème et il est difficile de juger quelle est la meilleure réponse sans invoquer des arguments externes à ces deux paradigmes.

Nous pouvons aujourd'hui être certains que les simulateurs climatiques sont *informatifs* sur le climat réel. Notamment, suffisamment de temps s'est maintenant écoulé depuis les premières prédictions climatiques pour pouvoir affirmer que ces prédictions avaient une valeur prédictive supérieure à la persistance (Hargreaves, 2010). Cependant, il est tout aussi clair qu'il existe une distance entre le simulateur et le monde réel qu'il est impossible de déterminer *a priori* avec exactitude.

Les modèles systémiques sont de prime abord plus élégants, mais ils impliquent un niveau d'abstraction qui crée également une distance importante avec la réalité. Par ailleurs, il semble opportun de les calibrer de telle sorte qu'ils incorporent les connaissances inférées des programmes de recherche basés sur les simulateurs.

Un paradigme probabiliste Bayésien peut ici constituer le cadre unificateur. L'espoir est qu'il nous permette de mettre en relation des informations de différentes natures à propos du système climatique, et de nous aider à mettre en rapport la quantité d'événements expliqués par un modèle avec la quantité d'informations *ad hoc* introduites dans ce modèle¹².

Un premier pas vers ce paradigme probabiliste a été d'échantillonner de façon systématique les incertitudes liées aux paramètres intervenant dans les paramétrisations des simulateurs climatiques (Murphy *et al.*, 2004). Le projet le plus ambitieux à ce jour a sollicité des milliers de participants volontaires à travers le monde auxquels ont été distribués une version du simulateur du Hadley Centre configurée avec des paramètres spécifiques pour chaque utilisateur. Le projet, géré par le Prof. Myles Allen de l'Université d'Oxford, a été popularisé au travers d'un site web : www.climateprediction.net ainsi qu'au travers d'émissions diffusées par la BBC (<http://bbc.cpdn.org/>)

Le modèle statistique proposé par Rougier (2007) va plus loin : il nous amène à distinguer clairement l'état réel du système, l'état du simulateur, et les observations parfois indirectes du système climatique. Les différentes informations connues à propos du système réel peuvent être mises en relation au moyen d'un modèle probabiliste. Ceci pose l'acte fondateur de ce quatrième paradigme.

L'état du simulateur dépend d'une série de paramètres intervenant dans les paramétrisations, ainsi que d'autres facteurs qui ne sont pas nécessairement connus avec une précision parfaite, tels que, par exemple, les propriétés et concentrations de certains aérosols atmosphériques. Le formalisme Bayésien nous amène alors à (1) définir des variables d'état pour le système ; (2) spécifier des distributions de probabilité *a priori* pour l'ensemble des variables incertaines ; l'adjectif *a priori* signifie ici que ces distributions sont spécifiées *sans tenir compte* de l'état des autres variables incertaines ; (3) spécifier des relations entre les différentes quantités (par exemple : l'état réel = l'état simulé + une erreur aléatoire) ; et (4) mettre l'ensemble des connaissances en relation de façon à obtenir des distributions *a posteriori*. On les nomme également distributions jointes.

12. Ce rapport est en pratique l'élément qui forge la crédibilité du modèle (Hitchcock et Sober, 2004).

Les points (1) à (3) forment ensemble le *modèle probabiliste*, qu'il faut distinguer du simulateur climatique (GCM). C'est dans ce modèle que le scientifique injecte son jugement d'expert sur la distance qu'il convient d'établir entre le simulateur climatique et la réalité.

Les éléments subjectifs introduits par le jugement du scientifique restent présents, mais ils sont valorisés au rang d'hypothèses explicites d'un modèle probabiliste. La procédure d'inférence devient ainsi beaucoup plus transparente et elle peut dès lors être mieux suivie et critiquée par d'autres scientifiques. Par ailleurs, la description de connaissances incertaines en termes de distributions de probabilité implique que les prédictions et inférences se communiquent sous la forme de distributions ou de valeurs plausibles, plutôt que sous la forme de valeurs numériques précises.

L'opération (4) nous amène à déterminer si l'ensemble est cohérent, et en particulier si les observations sont plausibles compte tenu des hypothèses du modèle probabiliste. Cette étape soulève des difficultés algorithmiques substantielles, vu la complexité et le coût numérique des simulateurs climatiques, mais des solutions sont proposées et en voie d'implémentation.

Par exemple, supposons que l'on désire déterminer le réchauffement climatique consécutif à une perturbation donnée de la concentration des gaz à effet de serre. Supposons également que nous ayons un simulateur climatique à disposition. Un plan d'expériences va nous permettre d'échantillonner l'espace des paramètres du simulateur en fonction d'une distribution *a priori* des valeurs raisonnables de paramètres, éventuellement déterminée en sollicitant l'avis d'experts (ce que l'on nomme *elicitation* en Anglais). L'étape suivante consiste à développer un interpolateur permettant de prédire la réponse du simulateur pour toute combinaison de paramètres vraisemblables. Cet interpolateur est formulé comme un modèle statistique, qui dépend des paramètres du simulateur. Il est souvent désigné sous le vocable *d'émulateur*. L'émulateur va constituer un élément d'information vers la construction d'un modèle probabiliste du système climatique. Ce modèle est constitué de l'émulateur auquel on adjoint un modèle statistique qui paramétrise l'erreur du simulateur. Le modèle probabiliste peut ensuite être calibré sur les observations disponibles. L'effet de la calibration est de *mettre à jour* les distributions *a priori* des paramètres sur base des informations nouvelles (ici, les observations) dans le but de réaliser des prédictions.

La méthodologie permet en principe d'accommoder les informations fournies par différents simulateurs climatiques. Le formalisme Bayésien ne cherche pas à rejeter ou accepter définitivement un modèle, mais il nous aide à déterminer si un ensemble d'hypothèses et d'observations est cohérent ; il nous guide également dans le choix d'un modèle par rapport à un autre, compte tenu, entre autres, du nombre de paramètres libres. Enfin, il constitue le cadre qui nous permet de quantifier nos incertitudes de façon réaliste.

À l'UCL, plusieurs projets sont désormais engagés sur cette voie. Ainsi, le projet 'Integration of Theory and Observations over the Pleistocene' établit un cadre Bayésien pour mettre en relation des modèles systémiques pour la dynamique du climat à long terme (tel que préconisé par Barry Saltzman), les contraintes inférées sur base de *plans d'expériences* avec des simulateurs numériques du climat, et les observations paléoclimatiques. Ce projet devrait nous permettre d'augmenter notre connaissance sur la structure de bifurcation du système climatique pris dans son ensemble.

Le programme probabiliste pose cependant un certain nombre de difficultés non résolues. Certaines sont en rapport avec les choix de modélisation. Par exemple, les erreurs de différents simulateurs doivent-elles être considérées comme indépendantes, alors qu'ils sont tous conçus selon le même paradigme ? Sont-elles toutes de même amplitude ? Les simulateurs des différents grands centres internationaux sont-ils aussi fiables les uns que les autres ? Se prononcer revient hélas parfois à s'engager sur un terrain diplomatique duquel les chercheurs doivent pouvoir se détacher. D'autres difficultés sont de nature plus algorithmique. Calibrer des systèmes dynamiques et concevoir des émulateurs permettant d'accommoder des dizaines de paramètres demeurent des problèmes difficiles. Ces problèmes suscitent des collaborations avec des scientifiques jusqu'ici peu impliqués dans les questions des changements climatiques et qui apportent un regard neuf et rafraîchissant sur ces questions.

4. Les enjeux de la climatologie physique moderne

La climatologie physique s'est beaucoup focalisée sur la notion de *sensibilité climatique*. Il s'agit de l'augmentation de la moyenne globale de la température de l'air près de la surface, consécutive à un doublement de la concentration en dioxyde de carbone par rapport au niveau de référence pré-

industriel. De nombreux éléments permettent d'estimer que la sensibilité climatique est dans une fourchette de 2 à 5 degrés (Knutti et Hegerl, 2008). Une analyse des publications scientifiques des vingt dernières années laisse supposer qu'il est très difficile de réduire cette fourchette d'incertitude, ce qui amène parfois certains commentateurs à *remercier* les climatologues pour leur intervention dans le débat public sur le changement climatique, sous-entendant que s'il n'est pas possible de réduire davantage cette incertitude, ils n'ont plus grand chose à apporter¹³.

Un tel commentaire indique implicitement que l'étude du climat se résume à quantifier la sensibilité climatique. Ce n'est évidemment pas le cas. Nous savons que les niveaux actuels et à venir des concentrations en gaz à effets de serre sont de nature à altérer irréversiblement le fonctionnement de la machine climatique considérée dans son ensemble, en ce compris sa composante biologique. Ceci nous amène à énoncer trois questions ou familles de questions majeures pour la climatologie physique : (a) quels sont les points de non-retour dans le système climatique, quelle est la probabilité de les franchir et quelles en seront les conséquences pour la société et les populations (Lenton *et al.*, 2008) ; (b) comment caractériser les queues de distributions associées aux prédictions quantifiées ? Si par exemple on estime à 60 % la probabilité que la sensibilité climatique soit comprise entre 2 et 5 °C, quelle est la probabilité qu'elle soit supérieure à 8 °C ? ; (c) enfin, le comportement futur du système climatique est-il dominé par la dynamique des fluides ou par sa composante biologique ? Comment ces deux composantes vont-elles interagir ?

Au delà de ces questions importantes pour la société se pose un enjeu pour la climatologie physique en tant que discipline scientifique. Cette discipline ne peut se résumer à développer des simulateurs de plus en plus complexes. En effet, modéliser la chute d'une pomme au moyen d'un modèle quantique relativiste implémenté sur un ordinateur apporterait un éclairage très relatif. Il semble plus fertile de considérer les positions et vitesse de la pomme et de s'en tenir au formalisme Newtonien. De même, le climatologue a intérêt à identifier les informations pertinentes pour chaque problème qu'il se pose. Que doit-on savoir pour établir une prédiction fiable dans un contexte donné ?

13. Commentaire entendu à la conférence CRASSH «Challenging Models in the Face of Uncertainty», Cambridge, 28 Septembre 2010.

Le paradigme probabiliste constitue selon nous le cadre qui nous permet de poser les questions les plus pertinentes : quelles sont les propriétés des champs générés par le simulateur que nous estimons réalistes, c'est-à-dire utiles pour structurer nos jugements par rapport au monde réel ? Comment mettre en relation la quantité formidable d'informations générées par un simulateur numérique avec, par exemple, les rares informations paléoclimatiques ?

Ces considérations nous montrent, s'il le fallait, qu'il n'y a pas lieu d'établir une cloison entre des problèmes de nature académique et les applications de la climatologie aux changements climatiques ; pas plus qu'il ne serait correct d'affirmer que les mathématiciens ne peuvent contribuer qu'à des questions abstraites.

Appendice : point de vue personnel en matière de changements climatiques

Je n'ai pas voulu ici entrer dans le débat sur la réalité des changements climatiques et de leur cause humaine. En effet ce débat n'a plus lieu parmi ceux qui savent de quoi ils parlent et je préfère laisser aux philosophes, sociologues et, en dehors de la communauté académique, aux journalistes, le soin de comprendre et d'arbitrer le débat qui a encore lieu sur la place publique (bien plus, hélas, aux États-Unis qu'en Europe). La crise environnementale à laquelle nous sommes confrontés aujourd'hui est le signe que la civilisation occidentale a atteint les frontières physiques de son domaine. Ce n'est pas la première fois (la conquête des Amériques s'explique en partie par les pénuries en Europe), mais cette fois nos limites ultimes ont été atteintes. Les augmentations de gaz à effet de serre menacent un équilibre qui implique toutes les composantes de la biosphère. N'oublions pas que le CO₂ n'est pas seulement un gaz à effet de serre ; c'est aussi un acidifiant et un fertilisant. La crise environnementale est un problème global qui concerne le climat, la biodiversité, les équilibres hydrologiques et, bien entendu, toutes les populations et économies mondiales. Serons-nous comme les moutons de Panurge ?

Le lecteur trouvera dans les notes d'un cours donné au collège Belgique ma réflexion critique relative à la réalité du changement climatique et ses enjeux. Le document est disponible à l'adresse suivante :

<http://www2.academieroyale.be/academie/documents/CB2010docpost-limCRUCIFIX6439.pdf>.

Références

- J. ADHÉMAR, *Révolutions de la mer : déluges périodiques*, Lacroix-Comon, Hachette et Cie, Dalmont et Dunod, Paris, 2e édition (1860).
- L. AGASSIZ, *Etude sur les glaciers*, Jent et Gassman (1840).
- S. ARRHENIUS, "On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground", *Philos. Mag.* 41 (1896), 237-276.
- E. BARD, "Greenhouse effect and ice ages : historical perspective", *Comptes Rendus Geoscience* 336 (2004), 603-638.
- R. BETTS, M. SANDERSON, S. WOODWARD, "Effects of large-scale Amazon forest degradation on climate and air quality through fluxes of carbon dioxide, water, energy, mineral dust and isoprene", *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 363 (2008), 1873-1880.
- N. CAILLON, *et al.*, "Timing of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature changes across termination III", *Science* 299 (2003), 1728-1731.
- J. CROLL, *Climate and time in their geological relations : a theory of secular changes of the Earth's climate*, Appleton, New York (1875).
- M. CRUCIFIX, R. A. BETTS, C. D. HEWITT, "Pre-industrial-potential and Last Glacial Maximum global vegetation simulated with a coupled climate-biosphere model : Diagnosis of bioclimatic relationships", *Global and Planetary Change* 45 (2005), 295-312, 10.1016/j.gloplach.20.
- J. DE CHARPENTIER, *Essai sur les glaciers et sur le terrain erratique du bassin du Rhône*, Document numérisé par la Bibliothèque Interuniversitaire Scientifique Jussieu - UPMC, Imprimerie et Librairie de Marc Ducoux (1841).
- H.-B. DE SAUSSURE, *Voyages dans les Alpes, précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève. Tome premier.*, Samuel Fauche (1779).
- R. DEWAR, "Maximum entropy production and the fluctuation theorem", *Journal of Physics A-Mathematical and General* 38 (2005), L371-L381.
- E. V. EVANS, "The authorship of the glacial theory", *The North American review.* 145 (1887), 94-97.

- J. R. FLEMING, *The Callendar Effect : The life and work of Guy Stewart Callendar (1898-1964), the scientist who established the carbon dioxide theory of climate change*, American Meteorological Society (2009).
- S. O. FUNTOWICZ, J. R. RAVETZ, "Uncertainty, complexity and post-normal science", *Environmental Toxicology and Chemistry* 13 (1994), 1881-1885.
- H. GALLÉ, *et al.*, "Simulation of the last glacial cycle by a coupled, sectorially averaged climate-ice sheet model. Part II : Response to insolation and CO₂ variation", *J. Geophys. Res.* 97 (1992), 15713-15740.
- M. GHIL, "Hilbert problems for the geosciences in the 21st century", *Non-linear Processes in Geophys.* 8 (2001), 211-222.
- E. GUILYARDI, *et al.*, "Representing El Niño in coupled ocean-atmosphere GCMs : The dominant role of the atmospheric component", *Journal of Climate* 17 (2004), 4623-4629.
- H. HAKEN, *Synergetics : An introduction*, Springer (2004), originally published in 2 volumes in the series "Springer Series in Synergetics".
- J. C. HARGREAVES, "Skill and uncertainty in climate models", *WIREs* (2010), *in press*.
- S. P. HARRISON, I. C. PRENTICE, "Climate and CO₂ controls on global vegetation distribution at the last glacial maximum : analysis based on palaeovegetation data, biome modelling and palaeoclimate simulations", *Glob. Change Biol.* 9 (2003), 983-1004.
- K. HASSELMANN, "Stochastic climate models. Part I : Theory.", *Tellus* 28 (1976), 473-485.
- C. HITCHCOCK, E. SOBER, "Prediction versus accommodation and the risk of overfitting", *Br J Philos Sci* 55 (2004), 1-34.
- M. HULME, *Why we disagree about climate change : Understanding controversy, inaction and opportunity*, Cambridge University Press (2009).
- J. IRIARTE-DIAZ, "Differential scaling of locomotor performance in small and large terrestrial mammals", *J Exp Biol* 205 (2002), 2897-2908.
- E. T. JAYNES, *Probability Theory : The Logic of Science*, Cambridge University Press (2003).
- T. E. JUPP, P. M. COX, "MEP and planetary climates : Insights from a two-box climate model containing atmospheric dynamics", *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 365 (2010), 1355-1365.

- C. D. KEELING, "The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere.", *Tellus* 12 (1960), 200-203.
- R. KNUTTI, C. HEGERL, "The equilibrium sensitivity of Earth's temperature to radiation changes", *Nature Geosciences* 1 (2008), 735-743.
- T. KUHN, *The structure of scientific revolutions*, The University of Chicago Press (1962).
- W. A. KURZ, *et al.*, "Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change", *Nature* 452 (2008), 987-990.
- H. LE TREUT, M. GHIL, "Orbital forcing, climatic interactions and glaciation cycles", *J. Geophys. Res.* 88 (1983), 5167-5190.
- T. M. LENTON, *et al.*, "Tipping elements in the Earth's climate system", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (2008), 1786-1793.
- R. S. LINDZEN, "Climate Science : Is it currently designed to answer questions?", *ArXiv e-prints* .
- V. N. LIVINA, T. M. LENTON, "A modified method for detecting incipient bifurcations in a dynamical system", *Geophys. Res. Lett.* 34.
- E. N. LORENZ, "Climate change as a mathematical problem", *J. Appl. Meteor.* 9 (1970), 325-329.
- E. N. LORENZ, "Climate Predictability", dans "The physical basis of climate and climate modelling", Numéro 16 dans WMO GARP Publ. Series, Appendix 2.1, p. 132-136, World Meteorological Organisation (1975).
- R. D. LORENZ, *et al.*, "Titan, Mars and Earth : Entropy production by latitudinal heat transport", *Geophys. Res. Lett.* 28 (2001), 415-418.
- L. LOULERGUE, *et al.*, "Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years", *Nature* 453 (2008), 383-386.
- J. E. LOVELOCK, *The Ages of Gaia*, W.W.Norton & Co (1988).
- D. LUETHI, *et al.*, "High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present", *Nature* 453 (2008), 379-382.
- A. M. MAKARIEVA, V. G. GORSHKOV, "Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land", *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 3 (2006), 2621-2673.
- S. MANABE, R. WETHERALD, "The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model", *J. Atmos. Sci.* 32 (1975), 3-15.
- G. A. MEEHL, T. F. STOCKER, 77 CONTRIBUTING AUTHORS, "Global climate projections", dans "Climate Change 2007 - The Physical

- Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC”, Camb. Univ. Press (2007).
- R. MERTON, *The sociology of science*, The University of Chicago Press (1973).
- M. MILANKOVITCH, *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire*, Gauthier-Villars, Paris (1920), 339pp.
- M. MILANKOVITCH, *Canon of insolation and the ice-age problem*, Narodna biblioteka Srbije, Beograd (1998), English translation of the original 1941 publication.
- J. J. MURPHY, “The glacial climate and the polar ice-cap”, *Q. J. Geol. Soc. London* 32 (1876), 400-406.
- J. M. MURPHY, *et al.*, “Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations”, *Nature* 430 (2004), 768-772.
- J. OERLEMANS, “Glacial cycles and ice sheet modelling”, *Climatic Change* 4 (1982), 353-374.
- J. OTTERMAN, M. D. CHOU, A. ARKING, “Effects of nontropical forest cover on climate”, *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23 (1984), 762-767.
- T. PALMER, “Global warming in a nonlinear climate - Can we be sure?”, *Europhysics News* 36 (2005), 42-46.
- T. PALMER, P. WILLIAMS, *Stochastic Physics and Climate Modeling*, Cambridge Univ. Press (2010).
- G. W. PALTRIDGE, “Global dynamics and climate - a system of minimum entropy exchange”, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 101 (1975), 475-484.
- J. ROUGIER, “Probabilistic inference for future climate using an ensemble of climate model evaluations”, *Climatic Change* 81 (2007), 247-264.
- B. SALTZMAN, *Dynamical paleoclimatology : Generalized Theory of Global Climate Change* (International Geophysics), tome 80 de International Geophysics Series, Academic Press (2001).
- L. TARASOV, W. R. PELTIER, “Terminating the 100 kyr ice age cycle”, *J. Geophys. Res.* 102 (1997), 21665-21693.
- A. TIMMERMANN, “Decadal ENSO amplitude modulations : a nonlinear paradigm”, *Global and Planetary Change* 37 (2003), 135-156.