

HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES

Modèles et Systèmes complexes, le changement climatique global

(Histoire, Épistémologie, Anthropologie, Politique)

Michel Armatte

Les modélisations du changement climatique ont été l'objet d'un atelier organisé par Amy Dahan et Michel Armatte dans la semaine du 14 au 20 septembre dernier à Lalonde les Maures, dans le cadre du projet « Modélisation, Simulation et Gestion des Systèmes Complexes » de l'ACI Terrains Techniques Théories. Ce projet, consultable sur le site du Centre Koyré (laboratoire d'histoire des sciences mixte CNRS – École des hautes études en sciences sociales (EHESS) – Muséum national d'histoire naturelle) vise à étudier les nouvelles formes de la modélisation mathématique et de la simulation de systèmes. Michel Armatte a bien voulu, à notre demande, faire un compte rendu des travaux de cet atelier pour la Gazette.

Le projet « Modélisation, Simulation et Gestion des Systèmes Complexes » de l'ACI Terrains Techniques Théories prend la suite de 4 années d'un séminaire EHESS/Koyré sur « Modèle et Modélisation dans les sciences physiques et les sciences sociales ». Il vise à étudier les nouvelles formes de la modélisation mathématique et de la simulation de systèmes dont l'étude scientifique tout autant que la gestion collective ne peuvent plus se faire dans le cadre classique d'une science unifiée¹. Le climat de notre Terre, qui est maintenant l'enjeu non seulement de spéculations théoriques mais aussi de négociations internationales intenses, en particulier depuis les accords de Kyoto en 1997, et dont les organisateurs avaient fait le thème unique de cet atelier, est l'exemple paradigmatique de tels systèmes dits complexes. Sa complexité résulte aussi bien des nombreux sous-systèmes interconnectés qui le constituent (soleil, atmosphère, océans, biosphère, activités humaines), que de la très grande hétérogénéité de leur nature (les uns « naturels » les autres « sociaux »), de leurs échelles spatiales et temporelles allant de la particule à l'atmosphère et de la minute (tornade) à la centaine de milliers d'année (cycles climatiques), du type de connaissance que l'on en possède (des lois théoriques bien connues pour les uns, des comportements empiriques partiellement identifiés pour les autres), et de leurs nombreuses interactions avec feedbacks qui aboutissent à des non linéarités et des comportements chaotiques.

¹ Michel Armatte et Amy Dahan-Dalmedico, « Modèles, Modélisation 1950-2000 : nouvelles pratiques, nouveaux enjeux », à paraître dans la *Revue d'Histoire des Sciences*.

L'atelier a rassemblé une vingtaine de personnes de différentes disciplines comme en témoigne la vocation des trois laboratoires de recherche associés dans le projet *ACI* – un laboratoire d'histoire des sciences (Centre Koyré), un laboratoire de recherche sur la physique de l'atmosphère (Laboratoire de Météorologie Dynamique) et le Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED) qui regroupe essentiellement des économistes – comme en témoignent aussi les spécialités des chercheurs associés à cette recherche à titre individuel : des chercheurs en hydrodynamique, en physico-chimie, en génie rural (ENGREF), en sciences de la communication, voire des personnes engagées plus directement dans la négociation politique au titre d'institutions internationales (Agence Internationale de l'Énergie). Car la première originalité de cet atelier était l'approche résolument interdisciplinaire de la question de la modélisation du changement climatique.

Les historiens ont eu la charge de reconstituer la genèse des modèles du changement global depuis la seconde guerre mondiale : une première filiation se trouve dans l'histoire de la météorologie numérique des années 1950 (Amy Dahan²) qui prend racine dans l'*Electronic Computer Project et le Meteorological Project*, conduits entre 1946 et 1953 au célèbre *Institute for Advanced Study* de Princeton sous la haute autorité de John Von Neumann et sous la direction scientifique de Jules Charney. L'objectif du second projet est « le développement d'une méthode numérique d'intégration des équations météorologiques en conjonction avec l'ordinateur en construction à l'Institut », ce qui révèle l'intégration des deux projets et le rôle central de l'ordinateur comme instrument de calcul capable de traiter des modèles physiques de complexité croissante, et comme « machine inductive » permettant de sélectionner des hypothèses alors même que les lois de l'atmosphère sont imparfaitement connues. Dès 1950 un modèle barotrope bidimensionnel permet après 12h de calcul sur l'ENIAC des prévisions à 24, voire 36 heures, bientôt généralisables à tout le territoire des États-Unis. Le MIT a hébergé d'autres expériences consistant à projeter par des équations de régression linéaires des cartes météo établies par intégration numérique d'équations différentielles non linéaires et qui ont permis au météorologue Edward Lorenz, d'étudier la stabilité de ces prévisions. Il devait en résulter un débat assez riche sur la possibilité d'un modèle déterministe de l'atmosphère, et sur l'impossibilité de poursuivre à la fois les deux objectifs de la prévision assez fine et de la compréhension profonde des phénomènes en jeu. Plusieurs expériences de Lorenz sur des modèles conceptuels très simplifiés qui devaient lui permettre de mettre en évidence dès 1963, les éléments d'un comportement chaotique, première brique peu connue avant 1970 d'une théorie du Chaos mais aussi d'une approche de la turbulence.

Von Neumann est certainement le personnage central de cette préhistoire de la modélisation des systèmes complexes puisqu'on lui doit non seulement les principes des premiers ordinateurs et leurs usages en météorologie, mais aussi une épistémologie des modèles affirmée par exemple dans la contribution de

² Amy Dahan, « History and epistemology of models : Meteorology (1946-1963) as a Case-Study », *Archive for History of Exact Sciences*, 55 (2001)

1955³ : « ...the sciences do not try to explain, they mainly make models. By model is meant a mathematical construct with the addition of certain verbal interpretations, describes observed phenomena ». On lui doit par ailleurs en économie une des premières formulations d'un modèle de l'équilibre général (1937) et une participation reconnue par Koopmans aux travaux de recherche opérationnelle sur l'analyse d'activité (cf. infra).

Les modèles de circulation générale (GCM) de l'atmosphère construits après 1980 et analysés à l'atelier de Lalonde les Maures, ont profité à la fois d'un affinage du maillage spatial et temporel lié à la puissance accrue des ordinateurs (une maille de GCM fait environ 200km de côté et 20km en altitude), des études physiques spécifiques menées dans les laboratoires de phénomènes comme la turbulence des écoulements, la convection nuageuse, les échanges verticaux, les interfaces océan-atmosphère et biosphère-atmosphère, et de l'amélioration de la dynamique toujours fondée sur les équations d'Euler. De tels modèles intègrent aujourd'hui circulation atmosphérique, bilan chimique, échange avec océan et glace de mer, échanges avec végétation, sol et hydrologie, et ils articulent plusieurs couches ou niveaux (à la façon des réseaux informatiques) – phénoménologie des apparences, théorie physique, chimique, biologique ou économique, modèle mathématique, modèle numérique et modèle informatique – un élément quelconque du système possédant une représentation différente à chaque niveau. L'Institut Pierre-Simon Laplace regroupe 5 laboratoires (dont le Laboratoire de Météorologie Dynamique) ayant chacun compétence à traiter deux ou trois des composantes d'un tel GCM. La journée de l'atelier consacrée aux travaux du LMD vus de l'intérieur (Hervé Le Treut, Jean-Yves Grandpeix) et vus de l'extérieur par une démarche de type anthropologie de laboratoire (Hélène Guillemot) ou par des approches alternatives aux modèles intégrés plus « théoriques » (Manneville, Schmitt), ont permis de mieux situer le cadre stratégique de ces travaux, leur organisation en réseau, la tension entre petits modèles fondamentaux et gros modèles de simulation qui anime ce cadre stratégique et qui recouvre en partie une tension entre désir de comprendre, et nécessité de produire des prévisions et des scénarios à plus long terme.

L'intégration d'un couplage de ces modèles physiques avec une modélisation économique des activités humaines semble relever de la prise de conscience assez récente de l'origine anthropique du changement climatique via le rejet de gaz à effet de serre. En fait une origine plus lointaine de cette approche se situe dans la réflexion sur la croissance de long terme des économies et sur ses limites. Michel Armatte et Pierre Matarasso ont retracé la longue histoire de cette réflexion et des modèles qu'elle a suscités de Malthus (début XIXème) au Club de Rome (1973). Le modèle World3 de Jay Forrester (MIT) qui a servi de base aux rédacteurs du rapport « Halte à la croissance » est un moment fort de cette histoire à la fois pour ses conclusions très radicales et prémonitoires sur les limites d'un développement fondé sur les énergies fossiles, pour le simplisme des raisonnements démographiques et économiques mis en jeu, mais aussi pour un style de modélisation dynamique et systémique dont la notion clé est celle de feedback héritée de l'ingénierie militaire et de la recherche opérationnelle.

³ J. Von Neumann, « Methods in the Physical Sciences », in *The Unity of Knowledge*, L. Leary ed., Doubleday, New York, 1955.

World3 décrit les interactions causales entre quelques dizaines de variables démographiques, économiques et écologiques (des stocks et des flux) par un jeu de boucles de rétroactions, positives ou négatives, chacune traduite par un schéma et par une équation, en général non linéaire puisque dans une telle boucle, le résultat d'une action passée agit avec ou sans délai via le système de contrôle sur le taux de variation de l'action future (ou encore le stock résultant d'un certain flux d'entrée modifie à chaque pas ce flux). Forrester a diffusé cette méthodologie des systèmes dynamiques tout au long de son propre trajet, de la science des ordinateurs au projet militaire SAGE puis à la dynamique urbaine et la dynamique industrielle, et pour finir à la modélisation de la croissance mondiale. L'atelier s'est concentré un long moment sur deux traditions de modélisation incorporées aux modèles économiques de long terme qui ont succédé à World3 : d'une part la tradition des modèles de croissance optimale top-down à la Ramsey (1928) dans lesquels on optimise de façon inter-temporelle les utilités des générations successives – à l'aide d'un arbitrage qui peut prendre la forme d'un calcul d'actualisation dont Cédric Philibert a montré toute la difficulté et les enjeux – et que l'on retrouve au centre des modèles de Nordhaus et de la Banque Mondiale ; d'autre part la tradition des modèles bottom-up de type « analyse d'activité » au sens de Koopmans qui permettent des prévisions et des simulations tenant compte assez finement des processus de production. Les travaux de Koopmans ont été motivés par un problème de programmation de transports dès 1947 et ont culminé dans la conférence de la Cowles Commission de 1949 dont les actes ont été publiés en 1950 sous le titre « Activity Analysis of Production and Allocation ». Mais lui-même reconnaît que cette théorie doit beaucoup aux travaux de Wassily Leontieff sur les modèles input-output d'échange inter-industriels dans les années 1930, à l'invention de la programmation linéaire par Dantzig qui commence au Pentagone entre 1941 et 1945 et se poursuit dans de nombreux échanges avec Von Neumann, Arrow, Kuhn et Tucker jusqu'à la publication de la méthode du simplexe, et enfin aux travaux sur l'économie du bien-être et l'équilibre général de Hicks, Hotelling, Lange et Von Neumann⁴.

L'atelier s'est également attaché à rechercher la trace de ces traditions et leur renouvellement dans des modèles dits d'évaluation intégrée d'utilisation plus récente comme DICE (Nordhaus), IMAGE (de Vries), et RAINS (IIASA)⁵.

Il est alors apparu qu'une notion importante jouait un rôle considérable dans la modélisation du climat aujourd'hui, celle de *scénario* comme intermédiaire entre modèle et récit, entre explication et décision, entre science et politique. La notion de scénario est depuis 5 ans le cadre politique imposé par l'IPCC dans lequel se font les études de prospectives du climat. Dans l'acception de l'IPCC tel que défini dans son rapport spécial de 1999 qui en définit 4 grandes classes A1, B1 A2, B2, un scénario est une configuration d'hypothèses sur les évolutions futures des principaux indicateurs exogènes du développement

⁴ Voir M. Armatte « Les sciences économiques reconfigurées par la pax americana », in Pestre & Dahan (eds), *les sciences dans et pour la guerre, 1940-1960*, Paris, Presses de l'EHESS, à paraître en 2004

⁵ Voir P. Matarasso, « Les origines des méthodes de modélisation dans le champ du changement climatique : de la Cowles Commission aux modèles MARKAL, MERGE et DICE », texte présenté à l'atelier

(démographie, consommation, technologie ...) qui sont à la fois de nature positive (elles résultent de lois d'évolution) et normatives (elles résultent aussi de choix éthiques et politiques sur la société que l'humanité se choisira), ces hypothèses s'intégrant à l'intérieur d'un récit qui leur donne une cohérence à la fois synchronique et diachronique. L'origine et le rôle de cette notion de scénario (associée parfois à celle de « story lines ») dans les études de prospective, dans les « wargames » et les jeux de simulation de gestion, son éclairage par les travaux de Paul Ricœur sur temps et récit, son rôle essentiel dans les « futures studies », dans les forums qui décident de notre avenir environnemental, dans la co-construction avec les acteurs les plus divers de politiques de gestion, dans les projections énergétiques, le point de passage obligé qu'elle constitue parfois à regret pour les scientifiques, ont constitué les nombreuses facettes du débat sur cette notion ambiguë, qui apparaît comme centrale dans l'épistémologie (et la sociologie) de la modélisation de systèmes complexes en avenir incertain, mais aussi dans la gestion de ces systèmes (L. Mermet, H. Kieken).

Par le biais de cette notion de scénario, les participants de cet atelier ont dérivé sur le dernier thème important de la rencontre à savoir le rôle des modèles dans la négociation et la décision internationales. Des interventions sur l'histoire de cette négociation (Venance Journé) en particulier dans le cadre de l'IPCC, mais aussi sur le statut et la fonction des images dans la médiatisation par les chercheurs eux-mêmes ou par les journalistes (Emmanuel Paris) ont complété une réflexion menée tout au long de l'atelier sur la confrontation des connaissances savantes dans la communauté scientifique des quelques centaines de chercheurs engagés sur ce terrain. La divergence des résultats des modélisations concurrentes pose un problème d'évaluation des modèles et de gestion d'une seconde incertitude (après celle du climat lui-même) qui est celle de nos outils de connaissance, et d'une construction collective de résultats et scénarios avérés, probables ou vraisemblables. La réflexion sur l'articulation de ces travaux et le relais politique qui leur est donné au sein des différents « sommets » et « conférences des parties » ou au sein des multiples ONG, syndicats, partis et groupes de pression qui vulgarisent cette connaissance, la transforment et la déforment, mais lui donnent aussi son efficacité, n'a été qu'ébauchée. Le modèle de la courroie de transmission implicite chez les scientifiques voudrait que la décision politique suive temporellement et logiquement les résultats de la connaissance scientifique. Mais ce schéma semble bien inadéquat si l'on considère l'importance des choix politiques déjà intégrés dans les hypothèses de travail des modélisateurs sous la forme de scénarios à considérer, d'objectifs de réduction à atteindre, d'échelles régionales à considérer, d'instruments de politique économique (taxes, droits à polluer) à intégrer. Leur réticence bien compréhensible à ce mélange des genres, à la pollution de leurs hypothèses par des choix politiques est cependant à questionner du point de vue de l'intérêt collectif car le but ultime de ces études, ou pour le moins leur urgence, est bien de maîtriser collectivement les causes anthropiques et les conséquences socio-économiques du changement climatique. Si le doublement du CO₂ rejeté dans l'atmosphère est déjà atteint, si en 2050 le climat de Paris devient celui de Rabat aujourd'hui, si une émission de gaz à effet de serre réduite à quelques % de son niveau actuel est le seul objectif raisonnable, selon les travaux de modélisation

menés depuis une douzaine d'années, une réflexion critique sur l'élaboration et le rôle des modèles pourrait être cruciale non seulement pour réformer nos vieux modèles épistémologiques mais aussi pour inventer des modes de décision dans lesquels l'expert et le citoyen ont des rôles complémentaires, dans lesquels l'agenda politique des décideurs et le programme de recherche des modélisateurs sont intimement liés.

L'atelier n'était qu'un moment d'une réflexion dont on pourra trouver trace dans un numéro spécial de la *Revue d'Histoire des Sciences* à paraître, et qui devrait se poursuivre dans le cadre de l'ACI et du séminaire « Modèles, Modélisation » (programme sur le site http://www.ehess.fr/centres/koyre/Centre_A_KOYRE.html).