



Les cafés de la statistique

"La statistique éclaire-t-elle les questions de société" ?

Soirée du 9 juin 2015

Le réchauffement climatique

Synthèse des débats ^[*]

Le climat est un déterminant important des implantations et des activités humaines, ainsi que de la biodiversité. Ses variations sont donc lourdes de conséquences. Or, un réchauffement climatique sans précédent historique semble être à l'œuvre.

Qu'en est-il de la réalité de ce réchauffement depuis bientôt un siècle et de son ampleur ? Que nous apprend l'histoire de la planète ? La période récente (1990-2010) correspond-elle à un palier ? Ou seulement à une pause dans une progression continue ?

Que peut-on dire des causes de ce réchauffement ? Les activités humaines sont-elles indiscutablement à son origine ?

Quelles conséquences attendre du réchauffement climatique ? Avec quel degré de certitude ?

Sur toutes ces questions, quelles sont les méthodes de travail du GIEC ?

Que doivent faire, que peuvent faire les pouvoirs publics ? Que peut-on espérer de la prochaine Conférence de Paris ?

Invitée :

Valérie Masson-Delmotte,

Directrice de recherche au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives –
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement

^[*] Tant l'exposé liminaire que le contenu des échanges sont structurés en quelques thèmes, sans suivre l'ordre chronologique. Par ailleurs, l'identité des intervenants n'était pas toujours connue et l'on a choisi de ne pas attribuer nominativement les propos. Au reste, ceux-ci ont été reconstitués à partir des notes du secrétariat sans reprendre leur formulation détaillée. Pour retracer le débat, les thèmes sont souvent introduits sous forme d'une question : ce qui vient ensuite n'est pas la seule réponse de l'invité, mais l'ensemble des contributions des participants.

Exposé introductif :

D'entrée de jeu, l'invitée précise comment la communauté scientifique travaille sur la question du réchauffement climatique. Elle le fait au moyen d'observations de l'atmosphère, des océans, de la terre, des glaces et de l'activité du vivant ; elle lance des campagnes scientifiques pour comprendre les phénomènes à l'œuvre, réunit de grandes bases de données, analyse les données collectées pour caractériser les processus, et applique des lois physiques bien établies au système complexe que représente la machine climatique pour en effectuer des modélisations théoriques ou numériques. Cette machine climatique a pour moteur l'énergie solaire et présente différents compartiments dont les interactions nourrissent la variabilité du climat au cours du temps.

La communauté scientifique étudiant le réchauffement climatique réunit quelque mille chercheurs et enseignants chercheurs en France, et 25 000 environ dans le monde.

Ce sont des compilations des données disponibles qui, dès les années 1970, ont permis de comprendre que le climat était en train de changer et qu'une modification de l'atmosphère se produisait, avec un accroissement du taux de gaz carbonique (CO₂) dans l'air, principalement du fait de la combustion d'énergies fossiles. Cela a conduit à effectuer des simulations sur différentes échelles de temps au moyen de modèles climatiques intégrant de nombreux paramètres, puis d'organiser une interface entre la science et la société sous la forme du GIEC¹. Ce groupe fonctionne en faisant appel à des volontaires pour dresser tous les six ou sept ans le panorama des connaissances, sur la base des publications scientifiques. Trois groupes de travail produisent respectivement ces synthèses : le groupe I sur les principes physiques du changement climatique, le groupe II sur les impacts du changement climatique, les vulnérabilités et les stratégies d'adaptation et le groupe III sur les moyens d'une atténuation possible du changement climatique.

Tous ces travaux donnent lieu à des milliers de pages de rapports, avec une analyse des incertitudes et de la robustesse des conclusions. Quelques conclusions clés sont les suivantes : le climat est en train de changer et la planète accumule de l'énergie, avec depuis un siècle un accroissement moyen de température (à la surface de la Terre) de 0,85°C qui n'est homogène ni dans le temps ni dans l'espace, en particulier quand on compare la surface des mers et celle des continents. Il faut, bien entendu, tenir compte des accidents annuels qui se produisent tels que le phénomène El Niño² qui entraîne – comme en 1998 - des records de température moyenne à la surface de la planète. Les prévisions climatiques permettent d'ailleurs d'estimer, avec une probabilité de .90, qu'un phénomène de même nature se produira l'été 2015 (et se prolongera avec une probabilité de .80 jusqu'à la fin de l'année 2015) : ce type d'événement conduit à un transfert vers l'atmosphère de l'énergie emmagasinée en subsurface de l'océan Pacifique.

Si l'on prend les années 1998 à 2013, le phénomène du réchauffement climatique semble ralentir. Mais si on considère la période 2000-2014, on retrouve un accroissement de 0,1° par tranche de dix ans, semblable au rythme moyen du réchauffement depuis les années 1960.

Cette température moyenne à la surface de la Terre est un indicateur imparfait, mais utile, de l'évolution du climat. Les mesures effectuées depuis soixante ans montrent que l'énergie supplémentaire accumulée dans le système climatique est stockée à raison de 1 % par l'air, 3 % par les sols, que 3 % de cette énergie supplémentaire est convertie en fonte de neige et de glaces et que 93 % sont stockés en profondeur dans les océans, plus chauds. On sait aussi qu'une élévation de la température moyenne de 1°C s'accompagne d'une augmentation de 7 % de la capacité de

¹ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, créé en 1988 à la demande du G7 dans le cadre des Nations unies par le Programme des Nations unies pour l'environnement et l'Organisation météorologique mondiale.

² Ce terme désignait à l'origine un courant chaud apparaissant peu après Noël le long des côtes de l'Equateur et du Pérou. Il qualifie maintenant toute élévation anormale de la température des eaux de l'Est du Pacifique Sud.

l'atmosphère à contenir de la vapeur d'eau, laquelle est le premier des gaz à effet de serre³ et donc un amplificateur du réchauffement climatique.

Les accidents climatiques annuels sont nombreux, qui se traduisent par des vagues de chaleur et des épisodes de grand froid, avec des répartitions locales très inégales. Il existe donc une forte variabilité spontanée du climat. Néanmoins, le signal significatif sur ce bruit de fond est celui d'une élévation de la température moyenne. On observe en conséquence de plus en plus de phénomènes météorologiques autrefois exceptionnels : des précipitations intenses se multiplient, dans le sud de la France comme dans d'autres régions tempérées, tropicales ou polaires ; l'étendue de la couverture neigeuse en hiver sous nos latitudes ne cesse de diminuer ; les glaciers continentaux reculent ; les glaciers du Groenland également ; l'accroissement de chaleur entraîne une dilatation des océans qui se cumule avec l'eau provenant de la fonte des glaciers au Groenland ou en Antarctique. Alors qu'on a observé une élévation du niveau des mers de 20 cm en un siècle, elle est maintenant de 3 mm par an.

Quelles sont les causes de ce changement ? Il s'agit d'attribuer ces causes à de multiples facteurs possibles. Un bon instrument de travail pour ce faire est le bilan net des échanges de rayonnement qui entrent et sortent de la planète, au sommet de l'atmosphère⁴. Les facteurs agissants sur ce bilan sont l'activité solaire et ses variations, les éruptions volcaniques (via l'effet « parasol » des particules volcaniques) et, depuis la fin du XIXe siècle, les activités humaines (effet de serre et effet « parasol » des particules de pollution, ainsi que les modifications des surfaces continentales qui agissent sur leurs propriétés optiques). La teneur de l'atmosphère en CO₂ atteint actuellement 400 parties par million, soit 40 % de plus que le niveau pré-industriel. Le méthane a doublé sa teneur dans l'atmosphère par rapport à la moyenne des 800 000 dernières années. L'effet de serre correspond à un piégeage de l'énergie. A contrario les particules de pollution, notamment près de des grandes villes, exercent un effet parasol, directement, et indirectement en ce qu'elles contribuent à la formation de nuages. Actuellement, l'influence humaine est responsable d'une perturbation radiative de 2,3 W par mètre carré, contre un demi watt par mètre carré en 1950 ; ce dernier taux a doublé de 1950 à 1980, puis encore doublé de 1980 à maintenant.

L'activité solaire n'a pas montré de tendance depuis une cinquantaine d'années, avec des cycles d'environ onze ans correspondant à une perturbation radiative de l'ordre de 0,2 W par mètre carré, et un minimum prononcé. L'activité volcanique a été importante ces cinquante dernières années, surtout dans les années 80-90 : éruption des volcans Agung en Indonésie en 1963, El Chichón au Mexique en 1982 et Pinatubo en 1991 aux Philippines.

L'évolution du climat planétaire est la traduction de ces perturbations radiatives, mais aussi de variabilités spontanées et amples, par exemple avec l'occurrence des événements El Niño et La Niña. Comment alors attribuer avec certitude le réchauffement à une cause précise ? Deux approches sont possibles : d'une part, une approche statistique, a posteriori, utilisant les observations, qui analyse les relations entre l'évolution de la température, la variabilité océan-atmosphère (El Niño) et chacun des forçages radiatifs⁵ ; cette approche montre que le réchauffement depuis 1970 est essentiellement dû à l'augmentation de l'effet de serre, en partie

³ Les gaz à effet de serre sont des composants gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre. Les principaux gaz à effet de serre qui existent naturellement dans l'atmosphère sont : la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et l'ozone (O₃).

⁴ C'est un modèle qu'on applique également à l'étude des planètes dotées d'une atmosphère, telles que Mars et Vénus.

⁵ Wikipédia : À température constante, la Terre émet autant d'énergie qu'elle en reçoit ; et un peu plus ou un peu moins lorsque la température change. Or de très nombreux facteurs interviennent dans les échanges d'énergie entre la Terre et l'espace. Pour simplifier l'analyse des impacts de chacun de ces facteurs, le concept de forçage radiatif est utilisé par les scientifiques pour mesurer la propension d'un de ces facteurs à garder sur Terre l'énergie provenant du soleil ou à la renvoyer dans l'espace. Par exemple, un chiffre positif pour un gaz à effet de serre signifie que celui-ci contribue à réchauffer l'atmosphère en renvoyant des infrarouges vers la Terre, et un chiffre négatif pour les aérosols signifie que ces particules, en empêchant le rayonnement solaire d'atteindre la Terre, contribuent à la refroidir. Le forçage radiatif, appliqué au réchauffement climatique, mesure donc la propension d'un facteur à perturber l'équilibre énergétique de la Terre.

compensée par l'effet refroidissant des particules de pollution et de l'activité volcanique, et modulée par la variabilité interne. D'autre part, cette question est aussi abordée en utilisant des modèles de climat, basés sur la représentation numérique de la circulation générale des fluides de l'atmosphère et des océans⁶ et intégrant les calculs des transferts de rayonnement, du cycle de l'eau dans l'atmosphère, la banquise, et les interactions avec la surface des continents. Il existe différents modèles de climat, développés dans des centres de recherche. Les sources d'incertitude dans ces modèles tiennent à la représentation des processus de petite échelle, comme les nuages ; cela motive la confrontation des résultats de ces différents modèles. Des tests de simulation appliqués au climat passé, soit sur la très longue durée (périodes géologiques chaudes, climat glaciaire, etc.), soit sur le dernier millénaire, permettent de confirmer la capacité de ces modèles à représenter correctement des climats différents de celui de la période actuelle, par la confrontation des simulations aux informations issues d'archives naturelles témoignant de l'histoire climatique de la Terre. Une quarantaine de modèles climatiques existent, dont deux en France (Météo France et l'Institut Pierre Simon Laplace). Des simulations dites « historiques » sont effectuées de façon systématique pour la période allant de 1850 à 2000, soit en prenant en compte uniquement les facteurs naturels externes (soleil, volcans), soit en prenant aussi en compte l'influence humaine (gaz à effet de serre, usage des sols, particules de pollution). Ces simulations produisent pour chacune d'entre elles des phénomènes de type « El Niño » et une variabilité des échanges océan-atmosphère, et les résultats ne peuvent donc être confrontés aux observations qu'en prenant en compte cette variabilité spontanée, par exemple en analysant des évolutions sur une trentaine d'années. Cette approche montre aussi que le réchauffement en cours et ses conséquences ne peuvent être simulés correctement qu'en réponse à l'influence humaine. Le rôle des activités humaines productives de gaz à effet de serre dans le réchauffement climatique, le recul de la banquise arctique, la montée du niveau des mers, l'intensification des vagues de chaleur ou des fortes précipitations est devenu évident. Ce n'est pas le cas pour tous les aspects des changements observés : dans certaines régions, les tendances des dernières décennies (par exemple, pour les précipitations) peuvent encore être dominées par la variabilité « interne » du climat.

Comment construire des scénarios pour l'avenir ? Cela revient à s'interroger sur les rejets futurs de gaz à effet de serre. Si le développement se poursuit par la consommation croissante d'énergies fossiles, les rejets annuels de CO₂ pourraient être multipliés par trois. La perturbation radiative atteindrait 8,5 W par mètre carré à l'horizon 2100 (schéma RCT 8,5 du GIEC) et la valeur médiane de la hausse moyenne de température indiquée par les modèles serait de 4° en 2100, de 6° en 2200 et de 8° en 2300. En 2100, l'élévation du niveau des mers pourrait atteindre 1 mètre en l'état des connaissances. Cela dit, à l'intérieur de ces scénarios, les valeurs maximales sont difficiles à estimer localement. On a défini aussi un scénario intermédiaire, et aussi un scénario correspondant à une action publique forte sur les émissions de gaz à effet de serre. Dans le cadre de ce dernier scénario, la température s'élèverait jusqu'à 2050 puis se stabiliserait (avec un réchauffement de moins de 2°C par rapport au XIXe siècle), avec un pic des émissions de gaz à effet de serre en 2030 et une baisse ensuite.

La réponse des modèles numériques de climat à une perturbation radiative est le résultat de nombreuses rétro-actions, qui impliquent le profil de température et de vapeur d'eau dans l'atmosphère, les effets des nuages, le recul des surfaces enneigées et englacées, etc. Cette réponse est décrite par le concept de sensibilité du climat : quel changement de température à la surface de la Terre correspond, sur le long terme, à un doublement de la teneur en CO₂ de l'atmosphère par rapport au climat pré-industriel ? Il existe une large incertitude sur cette sensibilité climatique (entre 1,5 et 4,5°C), cette plage produite par les modèles de climat étant cohérente avec des estimations indirectes issues de l'étude de climats passés.

Bien entendu, des incertitudes subsistent :

⁶ Ces modèles sont construits à partir des observations permises par un maillage de l'atmosphère en cellules de 100 km de côté. Les données ainsi recueillies sont ensuite paramétrées en un certain nombre de grandeurs caractéristiques du fonctionnement de la machine climatique et reliées entre elles par des fonctions. En faisant varier les paramètres, on peut simuler à volonté des situations climatiques. On peut aussi faire des simulations par rapport à un état antérieur supposé, par exemple la température de l'océan profond vers 1850.

- incertitudes sur les rétroactions entre le climat et le cycle du carbone dans le scénario de forte perturbation : les « puits de carbone » (océans, sols et végétation absorbent aujourd'hui environ la moitié des émissions de CO₂ anthropiques ; leur capacité d'absorption pourrait diminuer dans un climat plus chaud) ;
- incertitudes sur les modèles, qui présentent des biais communs dus à une connaissance encore insuffisante du comportement des océans en matière de stockage d'énergie ou de la dynamique des glaces ;
- incertitudes sur ce qui peut se passer localement et à court terme (les prochains vingt ans) en raison de la variabilité intrinsèque du climat.

Pour mieux appréhender les effets de la variabilité du climat, une approche rétrospective est utile. D'ores et déjà, avec une augmentation de 0,85° de la température moyenne en un siècle, des effets sont mesurables sur l'acidification des océans ou sur le déplacement des espèces végétales et animales. Si le réchauffement s'accroît, il y aura des impacts à grande échelle : la sécurité alimentaire sera compromise par le freinage des rendements ; la montée des eaux affectera les littoraux (où se concentrent en général de nombreuses populations humaines) ; des problèmes de santé apparaîtront, comme le montre la récente canicule – au demeurant pas inhabituelle – observée en Inde ; des problèmes liés à l'eau se produiront dans les régions de mousson et les zones tempérées ou froides ; une atmosphère plus humide s'accompagnera d'une raréfaction des pluies en Méditerranée, en Californie, en Australie et dans différents autres lieux. Tout cela freinera le développement et la sortie de la pauvreté.

La Conférence de Paris qui doit se tenir fin 2015⁷ comporte deux enjeux : d'une part, un enjeu de maîtrise de l'émission des gaz à effet de serre, et sur ce point les propositions des pays sont modestes à l'horizon 2030 mais les mêmes pays arborent des objectifs ambitieux pour 2050 ! D'autre part, un enjeu d'adaptation qui se traduira par la négociation de la mise en place d'un fonds vert destiné à aider les pays les plus vulnérables.

Débat :

1 – Comment le GIEC travaille-t-il ?

Ouvert à tous les pays membres de l'ONU, le GIEC a pour mission d'évaluer avec objectivité l'ensemble des informations relatives au réchauffement climatique, à ses conséquences et aux stratégies possibles pour les atténuer ou s'y adapter. Pour ce faire, il s'appuie sur les publications scientifiques et techniques dont le sérieux est avéré. Les chercheurs qui veulent contribuer à ses travaux candidatent et font l'objet d'une sélection qui, outre leurs mérites propres, vise une répartition par pays et par sexe⁸. Être sélectionné est perçu comme un honneur mais c'est aussi une charge, et un danger car on s'expose à voir sa réputation scientifique mise en doute. On se rappelle les erreurs commises par le groupe II sur le recul des glaciers dans le rapport 2007. Les relectures des papiers soumis sont devenues très exigeantes ; on construit collectivement à travers une critique collective. L'invitée a le sentiment d'avoir vécu personnellement au GIEC une expérience intellectuelle et professionnelle très riche grâce à ces procédures.

Le GIEC n'est pas prescripteur mais fournit des éléments d'aide à la décision. Il ne fait pas non plus d'études coûts-avantages, ni ne calcule le coût d'éventuelles mesures d'atténuation du réchauffement climatique ou le coût de l'abstention d'émettre des gaz à effet de serre. Ses formulations en matière de diagnostic sont prudentes et, de l'avis d'un participant, ne donnent ni dans l'alarmisme, ni dans le catastrophisme. Ce même participant a été frappé par le soin apporté à définir précisément des termes comme « quasiment certain », « très probable » ou probable » ou des

⁷ 21^e conférence des parties à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCCC), ou COP21.

⁸ Il y a encore peu de femmes parmi les chercheurs sélectionnés. Une des explications possibles est le faible nombre de femmes dans la communauté scientifique des pays du Sud.

niveaux de confiance à partir du croisement de la robustesse des éléments disponibles et de leur degré de cohérence.

Ayant eu vent de calculs effectués en éliminant les points jugés aberrants parmi les observations utilisées, puis refaits – avec des résultats différents – en réintroduisant lesdits points aberrants, un autre participant émet le vœu que les méthodes de traitement statistique des données soient elles aussi une préoccupation constante des scientifiques du GIEC.

2 – A propos du « climato-scepticisme »

Le climato-scepticisme porte moins sur la réalité du réchauffement climatique que sur ses causes anthropiques. Il est particulièrement vigoureux aux États-Unis. Qu'en est-il en Europe et en France ? interroge un participant. Une autre personne, se présentant comme géographe, se déclare agacée par deux composantes du discours ambiant : d'une part, il y a toujours eu des changements climatiques, alors pourquoi en faire toute une histoire aujourd'hui ? D'autre part, on met toujours en avant les aspects négatifs du réchauffement climatique alors qu'il y a aussi du positif à en attendre. Ces interventions amènent un troisième participant à demander quels sont au juste les arguments des climato-sceptiques : critiquent-ils la collecte des données ? les modalités de traitement de ces données ? les modèles utilisés ? les interprétations des résultats des études ?

En qualité de scientifique et de chercheuse, l'invitée se déclare doublement sceptique dans sa démarche. Elle constate que, dans les pays anglo-saxons et en France ou ailleurs en Europe, le doute prend de multiples formes et porte, selon un véritable continuum critique, tantôt sur l'élévation des températures, tantôt sur les traitements statistiques, tantôt sur les capacités à analyser convenablement la machine climatique, ou encore sur les méthodes, ou sur les priorités à retenir, ou sur les facteurs explicatifs possibles, etc. Le doute est particulièrement élevé aux États-Unis, où il est assez fortement connoté sur le plan politique. La négation de l'influence de l'homme sur le réchauffement climatique y est pratiquement autant un marqueur de l'appartenance au camp républicain que les positions sur l'avortement ou sur la peine de mort. Le doute se rencontre aussi en Australie, au Canada et au Royaume-Uni. Il est également fort en Pologne et en Russie. En Pologne, il est lié à l'importance du charbon comme source énergétique et à la volonté du pays d'assurer son indépendance économique à l'égard de la Russie. En France, des scientifiques ont réagi par rapport à l'écologie politique vue comme anti-progrès ; d'autres, au sein même de l'Académie des sciences, continuent de nier le changement climatique ou son attribution aux émissions de gaz à effet de serre. Selon Philippe de Larminat (cf. "Changement climatique - Identification et Projections"), qui a mené un travail de modélisation à trois entrées (la concentration en CO₂, l'activité solaire et l'activité volcanique) et une sortie : le niveau des températures au cours du dernier millénaire, le réchauffement climatique serait dû à un surcroît d'activité solaire plutôt qu'à l'évolution de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère.

Naomi Oreskes et Erik Conway, historiens des sciences, ont écrit un ouvrage – « Les marchands de doute » - qui décortique la stratégie de mise en doute des travaux scientifiques par laquelle de puissants lobbies se battent contre toute législation qu'ils jugent contraire à leurs intérêts. Il est clair, selon l'invitée, que l'opinion peut être fortement manipulée par ces lobbies et qu'il existe malheureusement des scientifiques « mercenaires de la science » qui s'expriment sur des sujets comme l'ozone, le tabac ou le climat, dont pourtant ils ne sont pas spécialistes.

L'invitée précise que quatre estimations du réchauffement résultent de travaux effectués indépendamment par la Grande-Bretagne, les USA, la NASA et le Japon : elles sont convergentes. Elle ajoute que Richard Muller, de l'université de Berkeley, qui doutait de la réalité du réchauffement climatique, a fait travailler vingt étudiants pendant plusieurs années sur les données disponibles (programme BEST, pour Berkeley Earth Surface Temperature) et a conclu à la réalité du réchauffement et admis que les activités humaines en étaient la plus évidente explication.

3 – Questions de mesure

Un participant note, à propos de la température moyenne sur la planète, que tout calcul de moyenne passe par la pondération des observations et se fait confirmer que ces pondérations interviennent

bien dans les calculs, en fonction de la densité des mailles de la grille d'observation et de la fréquence des relevés effectués. Les techniques de relevés s'améliorent avec le temps : les mesures météorologiques brutes d'autrefois ont fait place à des relevés sous abri et les instruments ont changé ; en mer, les relevés de température en surface sont maintenant complétés grâce à des bouées qui permettent des mesures de température en profondeur. La couverture spatiale, améliorée depuis 1950, a pu connaître certains reculs, comme dans le nord de la Russie après l'effondrement de l'URSS mais, de 1960 à 1990, on a disposé d'une grande quantité de mesures et des corrections ont pu être effectuées sur les séries antérieures. Les incertitudes portant sur certaines séries sont prises en compte.

Soit, intervient un autre participant. Mais n'y a-t-il pas contradiction lorsqu'on attribue aux activités humaines l'élévation des températures à partir de modèles climatologiques appliqués à la période commençant en 1850, alors que les données sont de mauvaise qualité avant 1950 ? Les modèles numériques utilisés ont fait leurs preuves, répond l'invitée, en dépit des incertitudes qui subsistent, par exemple sur l'évolution du régime des précipitations ou sur la rapidité des échanges entre l'eau et l'atmosphère : les simulations opérées sur le passé avec les modèles de climats donnent des résultats cohérents avec ce qu'on sait des périodes lointaines. En considérant les 1 500 ans écoulés, les observations récentes tranchent fortement sur la variabilité de fond, et les travaux sur l'augmentation du rayonnement et de l'effet de serre effectués dans le cadre de l'étude du bilan radiatif de la Terre sont solides. Tout en restant vigilant quant aux risques de surinterprétation des changements d'origine anthropique, on peut avoir confiance, estime l'invitée, dans l'attribution aux activités de l'homme du réchauffement climatique.

Une autre personne se demande s'il n'y a pas une pirouette des scientifiques autour des variations de température observées ces dernières années. En effet, le GIEC lui-même avait admis l'existence d'un palier dans l'élévation des températures depuis une quinzaine d'années ; or, depuis quinze jours, on annonce un nouveau calcul en prenant cette fois comme référence les années 2000 à 2014. A quoi l'invitée répond que la période 1998-2012 était caractérisée par le fait que 1998 a été l'année la plus chaude du XXe siècle à cause du phénomène El Niño. Une élévation de 0,05° par tranche de dix ans, est-ce un plateau pour la courbe ? On parle plutôt de « hiatus » chez les climatologues car, si l'accumulation d'énergie n'apparaît pas à la surface de la Terre, elle se poursuit en profondeur en mer. La variabilité des échanges au sein de la machine climatique est une constante et introduit des discontinuités. Si on prend la période 2000-2014, on retrouve bel et bien le rythme d'élévation de 0,1° par tranche de dix ans, avec cette précision il est vrai que 2000 était une année un peu froide et 2014 une année un peu chaude.

Un participant s'étonne, par ailleurs, que les mesures concernant l'émission des gaz à effet de serre ne donnent pas lieu, apparemment, à des querelles entre les pays. Seraient-elles d'une précision indiscutable malgré la complexité qu'il leur suppose ? Une structure du Programme des Nations unies pour l'environnement s'efforce de définir des modes de calcul propres à chaque énergie fossile. On converge pour le gaz et le pétrole. C'est plus compliqué pour le charbon en raison de l'autoconsommation. L'usage des sols intervient aussi. Le méthane pose des problèmes spécifiques et un système européen d'observation se met en place. Des discussions entre scientifiques ont lieu pour faire converger les méthodes de calcul et d'agrégation.

Il y a des interactions entre les échanges d'énergie, les modifications climatiques et les politiques exercées. On émet de plus grandes quantités de gaz à effet de serre dans certaines régions du monde et tous les pays en subissent des conséquences. On ne saurait comparer la Chine et l'Inde en 1950 à ce qu'elles sont devenues aujourd'hui. La Chine émet beaucoup mais cela retombe sur l'ensemble du monde : quelle dynamique est à l'œuvre ? Qu'en est-il de la circulation des masses d'air ?

La circulation de l'air se fait en dix jours dans l'hémisphère Nord et en six mois en ce qui concerne les échanges entre le Nord et le Sud. Les gaz à effet de serre se mélangent rapidement à l'atmosphère. Les mesures de concentration se font au sol et par satellite. Le CO₂ émis se retrouve à raison de un quart dans les océans, un quart dans les sols et la végétation (avec un certain nombre de variations selon la température), et la moitié dans l'atmosphère (où il se répartit de manière homogène jusqu'à 10 km d'altitude et se maintient en l'état pendant plusieurs siècles ou millénaires). Si la température s'élève, la quantité piégée dans les sols et la végétation diminue. En 1990, les responsables du réchauffement étaient indiscutablement les pays riches. Aujourd'hui, ce sont

essentiellement la Chine, les États-Unis et l'Inde. Il faut bien sûr tenir compte des échanges de marchandises dans le commerce mondial, qui déplacent quelque peu les responsabilités. Si l'on s'intéresse aux émissions de gaz à effet de serre par habitant, les pays du Golfe, les États-Unis et l'Australie sont en tête. Cette notion d'émission par tête choque un participant qui, préoccupé par le nombre absolu d'humains, estime que les pays encore très féconds portent une responsabilité énorme quant à l'état de la planète et à son évolution.

Comment estime-t-on l'élévation du niveau des mers ? Deux approches étaient possibles : une approche statistique reposant sur l'observation du passé et son extrapolation, méthode qui a conduit à une estimation haute ; une approche fondée sur un calcul prenant en compte le maximum de facteurs possibles, calcul qui aboutissait à une estimation plus basse. L'arbitrage entre les résultats a été fait lors des relectures critiques au sein du GIEC et a reposé sur un argument de bon sens : il a été décidé de ne pas prendre en compte les résultats issus d'extrapolations car les glaciers d'aujourd'hui ne sont pas ceux du passé. On a grâce à ces discussions sur les méthodes une grande traçabilité des éléments scientifiques disponibles.

Le changement climatique ne pourrait-il être un accident à l'échelle des temps géologiques, comme le sont les vagues scélérates dans les océans⁹, demande un autre participant ? L'argument qui permet d'écarter l'idée d'un « réchauffement scélérate » est qu'il faudrait observer un relâchement brutal de l'énergie emmagasinée dans les océans. Or, depuis 1950, c'est le contraire qui se produit : l'énergie s'accumule dans les profondeurs océanes.

4 – Quand le passé éclaire l'avenir

A propos des évolutions climatiques sur longue durée, l'invitée signale les travaux menés depuis le XIXe siècle pour établir des liens entre les cycles astronomiques¹⁰ et les paléoclimats, travaux que le mathématicien serbe Milutin Milankovitch a poussés très loin entre 1920 et 1941, accréditant l'idée que les cycles astronomiques pouvaient avoir joué un rôle dans la succession des épisodes glaciaires, ceux-ci résultant notamment de suites d'étés frais au cours desquels les glaces pouvaient s'accumuler. La dernière glaciation a démarré il y a 115 000 ans et a mis plusieurs milliers d'années à s'installer et à modifier la circulation des eaux océaniques. Le scénario catastrophe du film « Le jour d'après » (2004) n'est pas fondé scientifiquement : il ne saurait y avoir de glaciation quasi instantanée même si la circulation des eaux océaniques se modifiait sensiblement.

La plupart des événements climatiques résultent de la conjonction de nombreux facteurs : extension ou recul des glaces, accumulation de CO₂ dans les océans, modifications de l'orbite terrestre, etc. On a pu cerner l'influence de ces facteurs sur le phénomène de mousson, plus accentué qu'aujourd'hui il y a 15 000 ans (époque où le Sahara était vert), par l'étude des sédiments des lacs ou des concrétions dans les grottes en Afrique.

Sous nos latitudes, on a connu un climat doux de 950 à 1200-1300 puis froid de 1350 à 1500 et froid à nouveau avec le petit âge de glace du XVIIIe siècle. Tout cela avec une variation de 1° environ de la température moyenne. On a recueilli de nombreux témoignages sur l'impact de ces changements sur les activités humaines. Une explication pour l'épisode de froid le plus récent tient au fait que les éruptions volcaniques ont été plus fréquentes et plus intenses à cette époque.

En s'appuyant sur l'étude des anneaux de croissance des arbres et sur les carottes de glace, on a pu remonter jusqu'à 800 000 ans en arrière. Qu'y a-t-il de nouveau ? Sur la planète ou sur les grandes régions, on observe indubitablement depuis 1980 un changement exceptionnel en amplitude et en rapidité, qui contraste fortement par rapport à la variabilité courante. Par exemple, le niveau des eaux était stable au cours des 3 000 dernières années et il ne l'est plus depuis un siècle.

⁹ Mal expliqué, mis en évidence par les moyens modernes d'observation, le phénomène des vagues scélérates correspond à la formation aléatoire dans les océans de vagues très hautes, aux parois abruptes. La vague scélérate se définit par une hauteur du creux à la tête supérieure ou égale à 2,1 fois la hauteur moyenne du tiers supérieur des vagues environnantes. Les vagues scélérates peuvent atteindre 30 mètres ou davantage.

¹⁰ Variations dans l'orbite de la Terre autour du soleil, dans la rotation de la Terre sur elle-même, précession des équinoxes, etc.

5 – A quoi peut-on s'attendre ?

Il y a 125 000 ans, la température était supérieure de quelques degrés à ce qu'elle est aujourd'hui ; elle augmentait à raison de 1° tous les mille ans et le niveau des mers était supérieur de cinq à dix mètres à ce qu'il est aujourd'hui. Dans le passé, entre les périodes glaciaires et les périodes chaudes, l'écart n'était que de 5° en moyenne (très inégalement réparti à la surface de la planète). Or, si on ne fait rien, la température s'élèvera de 4° en cent ans seulement ! C'est la vitesse du changement qui pose problème. Dès 2050, le climat de Paris sera celui de Madrid actuellement, alors que la ville n'est pas conçue pour cela. Déjà on observe des pertes de forêts. Les sociétés humaines devront fortement évoluer.

Si les océans emmagasinent 93 % de l'énergie supplémentaire, doit-on craindre des remaniements substantiels de la circulation des courants marins et notamment du Gulf Stream ? Les océans absorbent en effet plus de 90 % de l'énergie : ils sont plus chauds en surface donc la densité des eaux y est plus faible ; les précipitations augmentent, entraînant des apports d'eau douce supplémentaires. Ces apports d'eau seront-ils suffisants pour casser la boucle de circulation des eaux profondes ? Le Gulf Stream étant dû pour l'essentiel à la rotation de la Terre, on peut penser qu'il subsistera mais il n'est pas exclu qu'il y ait des changements dans la circulation profonde des eaux, avec un ralentissement pouvant atteindre 20 à 40 % dans ce grand déplacement qui se boucle en mille ans.

Que deviendront les régions déjà sèches, interroge un participant ? De même qu'en ce qui concerne les échanges entre les airs et les océans, il subsiste des incertitudes sur les régimes des précipitations et leurs changements, comme il existe des incertitudes sur la vitesse de réponse de la machine climatique. Néanmoins, on estime que la période à venir sera marquée par une augmentation des précipitations dans les zones humides et une diminution dans les zones déjà sèches, par effet de circulation verticale à grande échelle des masses d'air. Le dessèchement de la région Méditerranée est probable. Déjà 5 % de précipitations en moins sont observés dans des pays comme la Syrie. Bien sûr, on ne peut prédire avec précision les évolutions locales ; par exemple, on connaît encore mal les phénomènes liés à l'existence de chaînes montagneuses. Au Sahel, le phénomène de mousson de l'Afrique de l'Ouest est encore un sujet d'étude : on observe moins de pluie dans cette région depuis cinquante ans mais les causes en sont mal connues. Un programme européen d'étude de cette mousson est mis en place - avec formation de climatologues africains - et on analyse les raisons pour lesquelles les différents modèles donnent sur le sujet des résultats contrastés.

Un participant, prospectiviste, s'étonne que la croissance de la population n'ait pas été évoquée dans la discussion ; pourtant, cette croissance a des conséquences sur le climat. Nous étions 2,5 milliards en 1950 et nous serons peut-être 10 milliards en 2050, voire 12 à 15 milliards en 2100. Cette progression peut être qualifiée d'anormale dans la mesure où elle entraîne des modifications profondes dans la vie des sociétés. Quelles en sont les conséquences et les enjeux ? Même s'il n'y avait pas de réchauffement climatique, cette croissance entraînerait des changements considérables, à tel point qu'on peut se demander si le changement climatique est si grave que cela par comparaison ! En effet, l'émission des gaz à effet de serre s'accroît avec le nombre d'humains et leurs modes de vie qui ont longtemps reposé sur une l'énergie peu coûteuse. Avec dix milliards d'hommes sur la planète, dont beaucoup dans les zones à risques, les impacts humains seront importants. Comment, notamment, alimenter ces masses humaines tout en maintenant de la biodiversité ? On touche les limites de la planète et c'est à juste titre, estime l'invitée, qu'on peut parler d'anthropocène¹¹ car ni l'air ni l'eau ne sont des poubelles illimitées.

6 – Une communication anxieuse ?

On sent bien la nécessité de lier étroitement la question du réchauffement climatique au débat politique et social. Mais on sent aussi le risque de basculer dans le catastrophisme, fût-il éclairé. Comment, se demande un participant, les travaux des scientifiques peuvent-ils se répercuter dans l'opinion compte tenu de ce qu'on sait des modes d'information du public et surtout de

¹¹ Ce terme est employé pour caractériser l'époque de l'histoire de la planète qui a commencé quand les activités humaines ont eu un impact global significatif sur l'écosystème terrestre.

l'information continue... ? Que peuvent à cela les scientifiques ? En tout cas le prophétisme est à proscrire, estime une participante géographe, qui appelle de ses vœux une collaboration étroite entre toutes les disciplines, la climatologie n'étant à ses yeux qu'un aspect du problème. L'invitée se montre d'accord sur ce point et souligne en particulier que le rôle des géographes sur la connaissance des impacts territoriaux est important. Elle pense que, dans leur démarche de communication publique, les scientifiques devraient avoir le souci de ne pas utiliser la peur de l'avenir pour mobiliser l'opinion, ce qui serait contreproductif car l'antidote à la peur est le déni. Il vaut mieux selon elle se projeter dans un autre mode de vie, ce qui trouve de l'écho avec les jeunes générations soucieuses qu'on leur parle de solutions possibles. Il manque à son avis dans l'enseignement actuel une réflexion sur les racines de notre développement économique et de ses modalités. Or, certaines remises en cause seraient vraisemblablement salutaires car moins de pollution se traduirait par une amélioration de la santé des populations ; ainsi, en Inde en Chine, l'amélioration de la qualité de l'air présenterait d'énormes bénéfices en termes de santé publique ; dans les milieux urbains de tous les pays, on pourrait développer l'utilisation de la marche à pied ou de la bicyclette ; un mode d'alimentation faisant une moindre part à la nourriture carnée serait bénéfique à bien des égards. Une fiscalité adaptée reste aussi à étudier.

L'information diffusée doit rendre compte de tous les aspects du réchauffement climatique. On peut aussi attendre de ce dernier des bénéfices à côté des nuisances : on se chauffera sans doute moins en hiver mais on utilisera davantage la climatisation pendant les périodes chaudes ; on observera un allongement de la durée de la croissance des plantes (surtout au Nord) mais aussi des dépérissements de forêts sous nos latitudes car la chaleur affaiblit les arbres ; le rendement agricole du blé tendre ne s'élève plus et cela semble lié d'après les chercheurs à l'existence de moments très chauds ; des routes maritimes nouvelles s'ouvriront permettant l'exploitation de nouveaux gisements de gaz mais cela portera atteinte à de nombreuses espèces animales et aux sociétés humaines implantées localement. Des maladies à vecteurs sont à craindre ; ainsi, le moustique tigre s'installe maintenant en France. Prenons l'exemple concret de la Russie : elle pourrait tirer des bénéfices du réchauffement climatique mais, d'un autre côté, on voit proliférer des insectes xylophages dangereux pour les forêts russes ; moins de banquise facilitera la navigation mais les fleuves gelés sont des axes de circulation importants en Russie ; les inondations risquent d'y être plus fréquentes. La vague de chaleur de 2010 et les feux de forêt qui l'ont accompagnée ont sensibilisé la population russe. A noter que la communauté scientifique russe est solide et ancienne, mais assez en retard sur les problèmes relatifs à l'évolution du climat.

Au chapitre des informations anxiogènes, que penser, demande un participant, du risque de voir le pergélisol¹² relâcher d'énormes quantités de méthane ? L'invitée répond que, pour le moment, on n'a observé aucun signe d'emballement. Des modélisations sont en cours mais la question est compliquée du fait que les modalités du relâchement du méthane varient selon la configuration et l'usage des sols (sols déprimés ou pas, brûlis de la toundra ou autres formes d'exploitation, etc.). Si un fort réchauffement des températures se produit, il y aura 20 % d'émissions supplémentaires de CO₂ et de CH₄. En l'état actuel des connaissances, l'amplification se produit sur le long terme et de manière graduelle.

7 – La parole est aux gouvernants

Les Nations unies cherchent à identifier les risques les plus graves liés au réchauffement climatique et à repérer les populations les plus exposées, tout cela sur fond de négociations politiques. Il y a dans toutes les discussions une dimension de justice qui apparaît fortement : c'est un point important pour la Conférence de Paris de la fin de l'année 2015¹³. À Kyoto, le protocole signé en

¹² Dans les régions froides, on trouve des sols particuliers, les cryosols, composés d'une partie gelée en permanence en profondeur (le pergélisol) et d'une partie en surface qui dégèle pendant la saison chaude (le mollisol).

¹³ La Conférence de Paris sur les changements climatiques aura lieu du 30 novembre au 15 décembre 2015. Selon le comité organisateur, l'objectif de cette conférence est "d'aboutir, pour la première fois, à un accord universel et contraignant permettant de lutter efficacement contre le dérèglement climatique et d'impulser/d'accélérer la transition vers des sociétés et des économies résilientes et sobres en carbone". Elle est à la fois la 21^e conférence des parties (COP-21) à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques et la 11^e conférence des parties siégeant en tant que Réunion des parties au protocole de Kyoto (CRP-11).

décembre 1997¹⁴ avait pour objectif qu'entre 2008 et 2012 les émissions de six gaz à effet de serre diminuent de 5 % au moins par rapport au niveau de 1990. Certains pays ont fait mieux du fait de la crise économique. L'Union européenne prévoit maintenant une réduction d'au moins 40 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport à 1990. La conférence de Paris (COP21) vise un accord international contraignant, universel et ambitieux ayant pour objectif de contenir le réchauffement climatique en deçà de 2°C¹⁵.

D'où vient cette limite et comment l'interpréter ? Son origine remonte à 1990, époque où les gouvernants s'inquiétaient de l'irréversibilité possible des phénomènes climatiques sur lesquels les scientifiques les alertaient. La limitation à 2°C de l'élévation de la température est un choix purement politique du Conseil européen et peut être considérée comme une ligne de défense contre des risques plus graves. Ce qui ne signifie pas qu'on serait dans le domaine du supportable en-deçà et dans la catastrophe au-delà. Concrètement, on ne sait pas quels sont les seuils d'irréversibilité des phénomènes. Par exemple, est-on proche ou pas d'un enclenchement de la déglaciation de la calotte du Groenland, qui ferait monter de plusieurs mètres le niveau des mers ?

Comme on l'a vu, les rapports du GIEC n'édicte pas de prescriptions, renvoyant aux politiques la responsabilité des décisions. Celles-ci sont d'autant moins aisées à prendre par le monde politique qu'une action forte dès aujourd'hui ne produira des effets positifs que dans des dizaines d'années...



Annexes :

- Fiche Q14 sur le climat (Valérie Masson-Delmotte) ; reproduite ci-dessous ;
- lien vers le numéro spécial de la revue "la Météorologie" sur le changement climatique : <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/56350> ;
- lien vers la partie "physique du climat" du 5e rapport du GIEC : <http://www.climatechange2013.org/>

¹⁴ Accord international visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il s'est ajouté à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques dont les pays participants se rencontrent une fois par an depuis 1995.

¹⁵ À propos de cette conférence, le bruit a couru que la Russie et les États-Unis étaient sur les mêmes positions, mais aucune information de cette nature n'est apparue dans la presse russe.

Q14 : CLIMAT

Résumé

1) La recherche sur le climat: Recherche pluri-disciplinaire, menée par environ un millier d'enseignant-chercheurs universitaires et chercheurs d'organismes divers (CNRS, CEA, Météo France, ...). La recherche menée en France est représentée au sein du GIEC, qui produit un rapport de synthèse tous les 6 ans (prochain en 2013)

2) Le système climatique : Le climat met en scène 5 compartiments principaux : l'atmosphère, les océans, les continents (lithosphère), les glaces (cryosphère) et le vivant (biosphère). L'énergie solaire est le moteur du système climatique, mais le bilan d'énergie de la Terre dépend également de la composition de l'atmosphère (effet de serre). Différents compartiments stockent, échangent, transportent de l'énergie, de l'eau, des gaz à effet de serre. Les interactions entre ces compartiments produisent une variabilité à différentes échelles de temps, et des réponses complexes à des perturbations externes (naturelles, ou anthropiques).

3) Les perturbations : Le système climatique réagit à des perturbations externes naturelles liées à l'ensoleillement (variation de l'orbite terrestre sur des longues échelles de temps, petites variations de l'activité du Soleil à plus court terme) ou bien aux éruptions volcaniques (effet « parasol » des particules émises en haute atmosphère). Les activités humaines ont un impact, dit anthropique, sur le climat. Les changements d'usages des sols, la déforestation ont un effet local. Depuis la révolution industrielle, les rejets de particules de pollution (« aérosols » : sulfates, suies...) et surtout de gaz à effet de serre sont massifs. Il est certain que les activités humaines modifient le bilan radiatif de la Terre (une partie du rayonnement thermique est bloquée et réchauffe les basses couches de l'atmosphère, et l'océan).

4) Modélisation du climat : L'évaluation des risques futurs ne repose pas sur une extrapolation des observations mais sur la modélisation numérique du climat, à partir de scénarios d'émission. Il existe une vingtaine de modèles de climat (simulations numériques) dans le monde et deux en France (Météo France et Institut Pierre Simon Laplace), qui demandent des moyens de calculs très lourds. Depuis 30 ans, ces modèles ont subi une évolution constante, avec une meilleure prise en compte des compartiments principaux et de leurs interactions, et des grilles spatiales plus fines. Ils sont les seuls outils utilisés pour explorer l'évolution future suivant différents scénarios d'émissions de particules, gaz à effet de serre et usage des sols.

La comparaison de résultats de différents modèles est indispensable pour déterminer les aspects robustes de la réponse du climat à différentes perturbations. Un test important de validité de ces modèles est de simuler les changements climatiques passés et de vérifier la cohérence des résultats avec les données paléoclimatiques. Parallèlement, des modèles économiques permettent d'améliorer la cohérence des scénarios d'émission, en prenant en compte différents jeux d'hypothèses sur les politiques futures.

5) Les observations : Depuis le début du 20^{ème} siècle, on observe (de façon certaine) un réchauffement « global » qui a les caractéristiques suivantes : +0,8°C entre 1900-2011), dont 0,5°C au cours de la période 1979-2011. La dernière décennie a été la plus chaude depuis le début des mesures

météorologiques. Ce réchauffement est amplifié dans certaines régions : ainsi en Arctique, +2°C depuis 50 ans ; il est plus important à la surface des continents que des océans (en France : +1°C en 100 ans). On observe un recul très important de la banquise arctique (accélération au cours des derniers 10 ans), une diminution de l'extension de neige sur les continents en hiver, un recul de la plupart des glaciers. Le niveau moyen des mers a monté de 17 cm au 20^{ème} siècle et augmente actuellement au rythme moyen de 3.2 mm/an (depuis 1993) avec des contributions croissantes du Groenland et de l'Antarctique de l'ouest. On note également des changements du cycle de l'eau avec une augmentation des précipitations aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère nord. Le nombre de cyclones tropicaux les plus intenses a augmenté depuis les années 1970.

6) Attributions : Toutes les études dédiées à la compréhension de l'évolution du climat global au cours des derniers 50 ans ont conclu que le réchauffement est causé par les rejets de gaz à effet de serre d'origine humaine (en partie atténué par l'impact contraire des rejets de particules de pollution et par l'activité volcanique).

7) Les émissions de gaz à effet de serre : Les émissions sont principalement liées à la consommation d'énergies fossiles, la production de ciment mais aussi l'agriculture intensive et la déforestation. Ces émissions sont en augmentation, et sont distribuées de façon inégale entre les pays. Si les pays industrialisés ont occasionné l'essentiel des émissions par le passé, aujourd'hui les pays en développement représentent déjà plus de la moitié des émissions mondiales. A l'exception de la Chine, les rejets de gaz à effet de serre par habitant des pays en développement restent plus bas que ceux des pays développés. Environ 50% des rejets de CO₂ annuels s'accumulent dans l'atmosphère (26% absorbée par sols et végétation, 24% par océans). Cette fraction pourrait augmenter dans un climat plus chaud (diminution de l'efficacité des puits naturels de CO₂).

8) Changements climatiques : scénarios et impacts : une partie de l'évolution future du climat apparaît déjà comme inéluctable (horizon 2030), mais la trajectoire du climat à horizon 2050-2100 dépend de celle des rejets de gaz à effet de serre à venir. Deux situations « extrêmes » sont projetées : dans le cas d'une action résolue et efficace conduisant à une diminution des rejets mondiaux de gaz à effet de serre d'ici 2020, un réchauffement global de l'ordre de 2°C à horizon 2100 est prévu ; dans l'hypothèse d'une poursuite d'une consommation croissante d'énergies fossiles, un réchauffement global de l'ordre de 4°C ou plus est projeté dès l'horizon 2100.

En termes d'impacts, on attend en particulier : un réchauffement plus marqué sur les continents que les océans, accentué dans l'Arctique; une situation très contrastée, suivant les régions, pour les précipitations, avec une forte diminution dans les régions subtropicales (par ex. les pourtours méditerranéen) et une augmentation dans les régions polaires ; une modification des risques

« naturels » (vagues de chaleur, sécheresses, feux de forêts, très fortes précipitations et risques d'inondations, peut-être ouragans de forte intensité) ; une modification des débits et températures des rivières et lacs ; des impacts très contrastés pour la production agricole (négatifs dans les régions tropicales, positifs dans les hautes latitudes); une acidification des océans ; une augmentation du niveau des mers pouvant aller de 20 cm à 1 m à l'horizon 2100, avec des impacts sur les écosystèmes et les populations des régions côtières ; des déplacements d'espèces vivantes, des modifications importantes d'écosystèmes (ex forêts), des modifications des aires de répartition de maladies à vecteur (ex dengue) ; une dégradation de la qualité de l'air dans les zones urbaines en été. Pour la France, les impacts possibles du changement climatique ont commencé à être évalués dans le cadre

du Plan d'Adaptation national (voir texte complémentaire). Une partie de l'évolution future du climat apparaît déjà comme inéluctable (horizon 2030), mais la trajectoire du climat à horizon 2050-2100 dépend de celle des rejets de gaz à effet de serre à venir.

9) Les mesures à prendre : Malgré une médiatisation importante ces dernières années, il reste un gros déficit d'éducation et de formation sur les notions de base et les enjeux du changement climatique ; par ailleurs, les besoins d'adaptation seront indispensables, mais, il faut le rappeler, d'autant moins importants que l'action en matière d'atténuation (maîtrise des rejets de gaz à effet de serre) sera vigoureuse. Sur le plan international, le Protocole de Kyoto donnait des objectifs chiffrés pour les pays développés ayant ratifié le traité, mais pas d'engagements pour les pays en développement; Les engagements pris à Copenhague et Cancun impliquent des émissions globales qui commencent à diminuer avant 2020 ; la feuille de route de Durban est certes décevante vis-à-vis de l'urgence climatique. Mais elle marque un pas important car d'une part, elle prolonge le protocole de Kyoto, avec des accords à minima de quelques pays (mais on y a enregistré le retrait unilatéral du Canada du protocole de Kyoto). D'autre part elle constitue la première étape pour un engagement des pays en développement, avec la perspective d'un accord à établir en 2015 avec application à partir de 2020.

Les engagements français sont précis: Programme National de Lutte contre le Changement Climatique (2000) ; Plan Climat 2004-2012 révisé tous les deux ans ; paquet énergie climat européen, avec pour objectifs en 2020, une amélioration de 20% de l'efficacité énergétique (objectif cependant non contraignant), 20% de renouvelables, pour 20% à 30% de réduction d'émissions. A l'horizon 2050, objectif du « facteur 4 » énoncé par la Mission Interministérielle pour l'effet de serre dès 2003. Enfin, mise en place d'un plan national d'Adaptation (2011).

Sur le plan économique, il convient d'évaluer les coûts du changement climatique (adaptation) et des politiques de réduction des émissions (atténuation) et d'identifier des dispositifs instrumentaux adéquats (en particulier taxe ou quotas), sur lesquels des débats persistent. En 2009, la France a failli se doter d'un dispositif de complet de régulation économique du CO₂, avec le système européen des quotas européens pour l'industrie lourde et le secteur électrique et une forme de taxe carbone, destinée à réguler les sources d'émission diffuses dans les transports et le bâtiment. Malheureusement ce chantier n'a pas abouti et devra probablement être remis en route.

Texte complémentaire

- **1) Où se fait la recherche sur le climat**

-

Dans les laboratoires de recherche : en France, sont impliquées de nombreuses universités, le CNRS, Météo France, le CEA, l'IRD, IFREMER, le CNES, l'INRA... On estime qu'environ 1000 chercheurs et enseignant-chercheurs travaillent sur la thématique du changement climatique au sens large, c'est-à-dire couvrant l'étude des climats passés, présent et futur à partir d'observations ou de modélisation des échelles locales à globales). De grands programmes internationaux (organisés au sein du World Climate Research Programme et de l'International Biosphere Geosphere Programme) identifient des priorités de recherche.

Depuis 1990, les Nations Unies et l'Organisation Météorologique Mondiale ont mis sur pied une organisation, le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC en Français, IPCC en anglais). Le GIEC produit tous les 6 ans des rapports de synthèse sur l'état des connaissances scientifiques à partir de la littérature scientifique (dernier rapport : 2007, disponible sur : www.ipcc.ch; prochain rapport : 2013). Ces rapports portent sur (i) la physique du climat, (ii) les impacts et l'adaptation, (iii) les stratégies socio-économiques d'atténuation.

Le GIEC ne conduit pas les travaux de recherche (ils sont faits dans les laboratoires), et n'est pas prescriptif (l'objectif de limiter le réchauffement à 2°C est un choix politique).

Par ailleurs, les besoins d'informations utiles pour construire des stratégies d'adaptation précises (selon les acteurs économiques, les secteurs d'activités...) font émerger un besoin de services climatiques commerciaux qui sortent du cadre académique classique.

- **2) Météo et climat, système climatique**

-

Le climat est défini comme l'ensemble des conditions météorologiques (température, précipitations, vents ...), à la surface de la planète.

La variabilité de la météorologie (changements de temps d'un jour à l'autre, d'une saison à l'autre) fait partie des caractéristiques du climat. Lorsque le climat change, la météorologie change également : cycle saisonnier des températures, précipitations, fréquence d'événements extrêmes (vagues de froid, de chaleur, tempêtes...).

Le climat est le résultat des mouvements de l'atmosphère et l'océan, qui sont les deux fluides qui répartissent la chaleur à la surface de la planète, mais également de leurs interactions avec la biosphère (végétation), la cryosphère (neige, banquise, glaciers). Ces différents compartiments échangent de l'énergie, de l'eau, mais également des gaz à effet de serre.

L'état moyen du climat d'une planète dépend d'abord du bilan d'énergie de cette planète : quantité d'énergie solaire incidente, fraction de cette énergie solaire qui est absorbée ; fraction du rayonnement thermique qui traverse l'atmosphère et sort vers l'espace (d'où l'importance de l'effet de serre). La température moyenne à la surface d'une planète (Terre, Mars, Vénus...) dépend de cet équilibre radiatif.

Le système climatique met en œuvre des processus d'échelles d'espace et de temps très différents. Quelques ordres de grandeur : temps mis pour une masse d'air transportée par les vents d'ouest à faire le tour d'un hémisphère (10 jours) ; temps mis pour les gaz à effet de serre émis par les activités humaines à être homogénéisés dans l'ensemble de l'atmosphère (1 an) ; temps mis pour une masse d'eau à circuler dans les océans (1000 ans) ; âge moyen de la glace du Groenland (40 000 ans) et de l'Antarctique (100 000 ans).

En l'absence de toute perturbation de son équilibre radiatif, le système climatique produit une variabilité qui est liée à l'interaction de l'atmosphère, de l'océan, de la végétation et de la surface des continents (ex : stock d'eau dans les sols), des glaces. La variabilité de la météorologie d'un jour à l'autre dépend essentiellement de la circulation de l'atmosphère. La prévisibilité de la météorologie peut atteindre une dizaine de jours. Les prévisions réalisées à l'aide de modèle de circulation atmosphérique dépendent de la connaissance de l'état initial de l'atmosphère obtenu grâce aux réseaux de mesure (stations météorologiques, océanographiques, suivi satellite etc). D'une saison à l'autre, d'une année à l'autre, elle dépend des interactions entre l'atmosphère et l'océan. Il existe des modes de variabilité organisés à grande échelle et qui expliquent la structure de la variabilité à l'échelle d'une saison, comme l'Oscillation Nord Atlantique (qui module la trajectoire des vents d'ouest et affecte fortement le climat de l'Europe en hiver) ou les phénomènes El Niño / La Niña (qui modulent la température des océans tropicaux et la répartition des précipitations tropicales, d'une année à l'autre). La circulation de l'Océan Atlantique présente également une variabilité à l'échelle de quelques dizaines d'années (Oscillation Multi-décennale Atlantique) avec des conséquences pour le climat des régions voisines. Une meilleure surveillance de l'océan (océan de surface, eaux intermédiaires par des systèmes automatiques) et une assimilation de ces observations pourrait permettre d'avoir une prévisibilité du climat à l'échelle de la saison voire la décennie (travaux de recherche intensifs en cours à l'interface entre météorologie – climat).

- **3) Perturbations du système climatique : facteurs naturels et anthropiques**

Le système climatique réagit également à des perturbations externes. A très long terme (millions d'années), ces perturbations peuvent être liées à la tectonique des plaques (position des continents, formation de montagnes, volcanisme modifiant la composition de l'atmosphère). A long terme (plusieurs milliers d'années), le principal moteur de l'évolution du climat tient dans la variation régulière de l'orbite de la Terre autour du Soleil qui modifie la répartition de l'ensoleillement selon les saisons et les latitudes ; c'est le moteur des grands cycles glaciaires- interglaciaires.

A court terme (décennie-siècle), les petites variations de l'activité du Soleil (cycles de 11 ans, variabilité plus lente) et la fréquence des éruptions volcaniques explosives (injectant des poussières dans la très haute atmosphère qui jouent un rôle de « parasol » pendant 1-2 ans) ont un effet important sur la variabilité du climat.

Depuis plusieurs millénaires, les activités humaines ont modifié la surface des continents (déforestation, agriculture, urbanisation), modifiant localement les caractéristiques climatiques. Depuis la révolution industrielle, les activités humaines s'accompagnent de rejets massifs de particules de pollution (« aérosols » : sulfates, suies...) et de rejets massifs de gaz à effet de serre liés à la déforestation, la combustion d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), l'agriculture intensive,

certaines processus industriels. Les rejets d'aérosols ont des impacts complexes (effet « parasol » mais aussi modification de la formation des nuages), restent concentrés près des zones industrialisées (courte durée de vie). Les rejets de gaz à effet de serre sont mélangés globalement et ont une longue durée de vie : 10 ans pour le méthane, plusieurs siècles à plusieurs milliers d'années pour le dioxyde de carbone. La quantification des effets des différents agents contribuant à ces modifications est obtenue à l'aide de modèles du transfert radiatif. Il est certain que les activités humaines modifient le bilan radiatif de la Terre et renforcent l'effet de serre en bloquant une partie du rayonnement thermique ce qui réchauffe les basses couches de l'atmosphère et l'océan).

Ordre de grandeur : perturbation radiative liée aux activités humaines de l'ordre de 2 W/m^2 (avec effet des gaz à effet de serre de l'ordre de 3 W/m^2 (estimation très précise), compensée en partie par l'effet radiatif des aérosols de pollution, $- 1 \text{ W/m}^2$) (entre 1750 et 2010).

Le dioxyde de carbone est le gaz à effet de serre dont (i) les émissions augmentent le plus (+40% depuis 1990) ; (ii) l'impact radiatif est le plus fort ($+1,8 \text{ W/m}^2$ à lui seul), (iii) la durée de vie est très longue dans l'atmosphère ($\gg 100$ ans).

- **4) Notion de rétroactions, modélisation du climat**

Le système climatique est un système complexe qui présente un ensemble de boucles de rétroactions qui peuvent amplifier l'impact initial d'une perturbation (rétroactions positives) ou à l'inverse atténuer l'impact initial d'une perturbation (rétroactions négative).

Exemples de rétroactions négatives : une surface terrestre plus chaude émet davantage de rayonnement thermique ; certains nuages peuvent avoir un effet « parasol » ; l'océan en se réchauffant absorbe une partie du réchauffement de surface.

Exemples de rétroactions positives : une atmosphère plus chaude contient davantage de vapeur d'eau (qui est un gaz à effet de serre) ; un réchauffement de l'Arctique entraîne un recul des surfaces enneigées et englacées (qui ont un effet «miroir»), et une augmentation de l'absorption d'énergie solaire par les océans ou les sols (surfaces sombres).

La réponse du système climatique à différentes perturbations est évaluée (i) à partir d'études rétrospectives (analyse des mécanismes de changements climatiques passés, pour le 20^{ème} siècle mais également pour des périodes plus anciennes), et (ii) à partir de la modélisation physique du système climatique (calculs de l'évolution à 3 dimensions de l'océan, l'atmosphère, la surface des continents etc).

Les modèles de climat reposent sur une physique classique (mécanique des fluides, transferts radiatifs...) et la représentation des phénomènes de petite échelle (turbulence, interaction nuages-aérosols-rayonnement) modélisés à partir d'études de processus (qui reposent sur des observations et des lois physiques). Ces modèles de climat, mis au point pour le climat actuel, sont aussi utilisés pour simuler des climats passés et vérifier que les résultats sont cohérents avec les données paléoclimatiques. Ils sont les seuls outils utilisés pour explorer l'évolution future suivant différentes hypothèse d'augmentation des gaz à effet de serre, des aérosols et de l'utilisation des terres (il ne s'agit pas d'extrapolation de données mais de calculs à partir de lois physiques). Les principales

incertitudes portent sur la représentation des interactions aérosols-nuages-rayonnement, et sur la représentation des phénomènes de petite échelle spatiale (<100 km) (dont tempêtes, ouragans...). Une autre source d'incertitude tient à la représentation des interactions entre océan, atmosphère, haute atmosphère et des phénomènes oscillatoires (El Niño, Oscillation nord atlantique...) et donc de la variabilité « interne » de la machine climatique.

Il existe une vingtaine de modèles de climat dans le monde et deux en France (Météo France et Institut Pierre Simon Laplace), qui demandent des moyens de calculs très lourds. La comparaison de résultats de différents modèles est indispensable pour déterminer les aspects robustes de la réponse du climat à différentes perturbations. De nombreux modèles incluent actuellement le couplage entre climat et cycle du carbone, ou climat et chimie atmosphérique. Les développements en cours concernent le couplage entre le climat et les calottes de glace.

Une notion importante issue de l'observation et de la modélisation du climat est la notion de sensibilité du climat, c'est-à-dire la relation entre évolution de la température moyenne à la surface de la Terre et perturbation radiative. Elle est classiquement définie comme le réchauffement (exprimé en distribution de probabilité) qui serait atteint en cas de doublement de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère (par rapport au niveau pré-industriel). Cette sensibilité du climat est déterminée à partir de l'analyse de simulations ou bien à partir d'observations à différentes échelles de temps pour les climats passés. Elle est probablement comprise entre 2 et 4,5°C.

- **5) Observations du changement climatique**

Depuis le début du 20^{ème} siècle, on observe un réchauffement « global » qui a les caractéristiques suivantes :

Amplitude du réchauffement (1900-2011) : +0,8°C (température moyenne à la surface des continents et des océans) dont 0,5°C au cours de la période 1979-2011. Ce réchauffement est certain (malgré les incertitudes liées aux effets d'îlots de chaleur urbaine, ou de la densité des réseaux de mesure etc).

Réchauffement amplifié dans certaines régions (Péninsule antarctique ; Arctique). En Arctique, +2°C au cours des derniers 50 ans.

Dernière décennie la plus chaude depuis le début des mesures météorologiques. Mais le réchauffement n'est pas monotone (fortes variations du rythme du réchauffement d'une décennie à l'autre) (facteurs externes, volcanisme et cycles solaires + variabilité interne).

Réchauffement plus important à la surface des continents que des océans. En France : +1°C en 100 ans.

Le réchauffement des dernières décennies semble sortir de la variabilité « naturelle » du climat des siècles précédents. Il s'accompagne d'un recul très important de la banquise arctique, d'une diminution de l'extension de neige sur les continents en hiver, d'un recul de la plupart des glaciers, de changements de la phénologie des plantes (apparition de bourgeons, chute des feuilles, dates de vendanges...), de migrations d'animaux (poissons, insectes, oiseaux...).

Le niveau moyen des mers a monté de 17 cm au 20^{ème} siècle et augmente actuellement au rythme moyen de 3.2 mm/an (depuis 1993). Cette augmentation est liée à trois facteurs : réchauffement des eaux de mer en profondeur et dilatation thermique, fonte des glaciers de montagne, fonte des calottes polaires qui couvrent le Groenland et l'Antarctique de l'Ouest (à partir des années 1990). Depuis 2005, les calottes polaires contribuent autant que la dilatation des océans à la montée du niveau des mers (fait nouveau).

Ce réchauffement s'accompagne de modifications de la distribution des températures (fréquences de jours et nuits très froids en baisse, nuits et jours très chauds en hausse) avec une augmentation de fréquence des canicules en Europe depuis les années 1990 (ex 2003 en France, 2010 en Russie).

On observe également des changements du cycle de l'eau avec une augmentation des précipitations aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère nord. L'humidité de l'air a cependant diminué à la surface des continents. Dans certaines régions, le nombre d'évènements de très fortes précipitations a augmenté. Le nombre de cyclones tropicaux les plus intenses a augmenté depuis les années 1970.

- **6) Attribution du changement climatique à l'impact des activités humaines**

La modélisation de la réponse du climat à différentes perturbations est utilisée pour déterminer la part du réchauffement observé liée aux facteurs naturels (soleil, volcans) et aux facteurs anthropiques.

Les seuls facteurs naturels ne peuvent pas expliquer le réchauffement observé (pas de tendance à l'augmentation de l'activité solaire sur les derniers 50 ans ; activité volcanique relativement intense qui aurait dû provoquer un léger refroidissement).

Si l'on prend en compte les facteurs naturels et les facteurs anthropiques, les modèles de climat parviennent à représenter correctement les grands traits des changements observés (réchauffement de la basse atmosphère, refroidissement de la haute atmosphère, structure spatiale du réchauffement, changements du cycle de l'eau...). Inversement, la simulation est beaucoup moins satisfaisante lorsque les facteurs anthropiques sont exclus de la modélisation. Cela constitue sans doute la plus forte indication scientifique de l'origine anthropique du changement climatique.

Toutes les études dédiées à la compréhension de l'évolution du climat global au cours des derniers 50 ans ont conclu que le réchauffement est causé par les rejets de gaz à effet de serre d'origine humaine (en partie atténué par l'impact des rejets de particules de pollution et par l'activité volcanique).

Mais l'évolution du climat n'est pas seulement linéaire par rapport à cela, elle comporte des fluctuations fortes à l'échelle de la décennie (rôle des cycles solaires, de l'activité volcanique) et d'une année à l'autre (occurrence d'évènements El Niño – La Niña). A l'échelle régionale, les aspects de circulation océanique et atmosphérique ont un rôle déterminant. Le rôle de l'activité du Soleil sur le climat, à l'échelle régionale, est controversé (impacts possibles sur l'Oscillation Nord Atlantique, les moussons...). Des études en cours portent sur l'impact du rayonnement cosmique sur la formation de nuages ; les résultats les plus récents montrent l'existence de ce processus mais suggèrent qu'il n'aurait qu'un impact très limité.

- **7) Rejets mondiaux de gaz à effet de serre**

Note : différentes unités sont couramment utilisées : les tonnes de carbone et les tonnes de CO₂ (1 tonne de carbone = 3,67 tonnes de CO₂). Le potentiel de réchauffement global (PRG) de différents gaz à effet de serre (ex. méthane, oxyde nitreux...) est défini comme l'effet radiatif cumulé des rejets d'une unité de masse de ce gaz, par rapport à celui d'un gaz de référence (le CO₂), pour une échelle de temps donnée (typiquement 100 ans). Ainsi, le PRG du CO₂ est 1 (par définition), celui du méthane est de 23, celui de l'oxyde nitreux de 296... Cette méthode permet alors de combiner les effets radiatifs de différents gaz à effet de serre et de les exprimer en CO₂ équivalent.

- **Au niveau mondial**

Emissions liées à la consommation d'énergies fossiles et la production de ciment :

Taux de croissance 1% par an entre 1990 et 2000 (avec un impact important de la réduction des consommations d'énergie dans l'ex-Union soviétique dans la crise de transition politique), 3,4% par an entre 2000 et 2010, 5,0% en 2010 ;

Responsabilité des pays : depuis 2006, par ordre décroissant : Chine, USA, Union Européenne (n°3), Inde, Russie, Japon. Changement du poids des pays émergents par rapport aux pays développés, très forte augmentation des émissions de la Chine depuis 2001 ; depuis 2005 les émissions des pays en développement ont dépassé celles des pays industrialisés ;

Fortes hétérogénéités des rejets de CO₂ par habitant : niveaux très élevés (>12 tonnes de CO₂ par habitant et par an) pour Australie, Arabie Saoudite, Qatar, Canada, USA ; niveaux moyens (5 à 12 tonnes de CO₂ / par h / an) pour la plupart des pays européens, la Corée, l'Afrique du Sud, la Russie, la Chine ; niveaux faibles (<5) pour l'Inde, le Brésil, et les pays en développement.

La crise économique actuelle est celle qui a entraîné la plus faible diminution des rejets de gaz à effet de serre par rapport aux crises précédentes (depuis 1970), parce qu'elle ne frappe que les pays développés ;

Depuis 2002, une stabilisation de l'intensité « carbone » de l'économie mondiale : il n'y a plus de découplage entre croissance et rejets de gaz à effet de serre. Ceci est lié à un poids croissant du charbon comme source primaire (actuellement 41% des émissions de CO₂), source fossile dont les ressources sont par ailleurs les plus importantes ;

Les rejets de CO₂ de la Chine sont avant tout liés à la production d'électricité pour satisfaire la consommation intérieure, mais aussi pour une part à la production de produits manufacturés exportés aux USA et en UE ;

Environ 50% des rejets de CO₂ annuels s'accumulent dans l'atmosphère (26% absorbés par sols et végétation, 24% par océans). Cette fraction pourrait augmenter dans un climat plus chaud (diminution de l'efficacité des puits naturels de CO₂).

- **Au niveau français**

Le CITEPA produit chaque année un inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France selon la convention des Nations Unies sur le Changement Climatique. Le dernier rapport (2011) fait un état des lieux pour l'année 2009. Ces inventaires reposent sur des cadastres d'émissions. Pour la France, en % de pouvoir radiatif global, les proportions sont de 74% pour le CO₂, 12,2% pour N₂O, 10,8% pour le CH₄, 3% pour les HFC. Par secteur, la répartition est : 71% pour l'énergie (en hausse), 19% pour l'agriculture (en baisse), 7% pour les processus industriels (en baisse) et 2% pour les déchets (en hausse).

Les émissions totales (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆) (sans prendre en compte l'utilisation des sols ou la sylviculture) correspondent à 512 millions de tonnes équivalent CO₂ soit 9,4% de moins qu'en 1990 (année de référence des inventaires d'émissions). Cette tendance masque des évolutions contrastées selon les différents gaz : -4,6% pour le CO₂, -16,4% pour le CH₄, -32,6% pour le protoxyde d'azote mais une forte augmentation (+300% pour l'impact radiatif) pour les hydrofluorocarbures (HFC) [*les HFC sont des gaz fluorés produits après l'interdiction des CFC et HCFC, interdits à cause de leur action destructrice sur la couche d'ozone ; ils sont principalement utilisés dans l'industrie du froid*]. Les émissions liées au transport ont fortement augmenté sur l'ensemble de cette période (1990-2009) mais elles ont cependant baissé depuis 2005. Les émissions du secteur de la chimie et des sols agricoles ont baissé, de même que les fuites de méthane (arrêt de l'exploitation des mines de charbon). Les utilisations des sols et la sylviculture compensent environ 12,5% des émissions totales.

Ces émissions du territoire national correspondent (pour 2005) à 32% pour la consommation finale des ménages, 45% pour la production pour la demande intérieure et 23% pour la production pour les exportations (soit 6,7 tonnes de CO₂ émises par habitant/an). Si l'on prend en compte les émissions nettes associées à la demande intérieure (effet importations moins effet exportations), alors du fait du poids de nos importations (de pays du Sud, avec une faible efficacité carbone) les émissions par tête augmentent fortement (9 tonnes de CO₂ émises par habitant/an, 12 tonnes de CO₂-équivalent en considérant les autres gaz liés aux produits agricoles, méthane et protoxyde d'azote).

Parmi nos importations d'énergies fossiles, il faut souligner le poids du gaz importé de Russie, moindre que pour d'autres pays européens (Allemagne) mais néanmoins significatives.

- **8) Changement climatique futur : scénarios, projections, impacts à court, moyen, long terme**

Les risques d'évolution future du climat sont évalués à l'aide d'ensembles de simulations réalisées par les modèles climatiques.

Ces simulations sont faites à partir de scénarios dits « socio économiques » faisant différentes hypothèses sur l'évolution future des émissions de gaz à effet de serre (en relation avec l'évolution de la démographie, de la production et la consommation d'énergie, des modes de vie et de développement).

Les deux extrêmes sont :

L'hypothèse d'une maîtrise rapide (plafonnement des émissions avant 2020) puis d'une diminution des émissions globales de gaz à effet de serre. Dans ce cas, la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère pourrait se stabiliser progressivement à la fin du 21^{ème} siècle autour de 450-550 ppmv. Les modèles de climat simulent alors un réchauffement global de l'ordre de 2°C à horizon 2100.

L'hypothèse d'une poursuite d'une consommation croissante d'énergies fossiles (pétrole, gaz et surtout charbon) pouvant entraîner un triplement des émissions et entraîner une augmentation des teneurs en dioxyde de carbone jusqu'à 800 ppmv. Les modèles de climat simulent alors un réchauffement global de l'ordre de 4°C ou plus dès l'horizon 2100. Il faut noter que l'évolution des rejets de gaz à effet de serre mondiaux entre 2000 et 2010 s'est située sur ce scénario « haut ».

Ces simulations sont appelées « projections » car elles ne visent pas à prévoir l'évolution réelle, future du climat mais les seuls impacts des facteurs anthropiques. Des travaux sont en cours pour obtenir des simulations plus réalistes pour les prochains 10-30 ans en prenant en compte des hypothèses sur les facteurs naturels (soleil, éruptions volcaniques) et en assimilant l'état initial de l'océan actuel. Les différents scénarios produisent des résultats très similaires de réchauffement à l'horizon 2012-2030 (réponse décalée du climat par rapport à l'ampleur de la perturbation radiative) ; les politiques de maîtrise des rejets de gaz à effet de serre ne portent leur fruit qu'après « une génération » (25 ans), ce qui représente une difficulté évidente pour la prise de décision.

Les incertitudes sur l'évolution à 30-100 ans du climat dépendent (i) de l'incertitude liée aux scénarios d'émissions ; (ii) de l'incertitude sur la réponse des modèles de climat, estimée en comparant les résultats de différents modèles ; (iii) de l'incertitude sur le couplage entre climat et cycle du carbone et la manière dont l'océan, les sols, la surface des continents vont absorber une fraction de nos rejets.

Les impacts du changement climatique vont dépendre du scénario. Si des politiques vigoureuses ne sont pas mises en œuvre au plan international, alors il faudrait s'attendre à une intensification des tendances déjà observées, avec au moins un changement comparable à celui du 20^{ème} siècle d'ici à 2050.

Parmi les impacts principaux, à l'échelle globale, il faut lister :

- un réchauffement plus marqué sur les continents que les océans, avec une forte amplification du changement de température dans la région arctique ;
- des bouleversements majeurs dans les régions arctiques (retrait de la banquise en été, fonte des glaciers, dégel du pergélisol) ;
- une situation très contrastée pour les précipitations : diminution dans les régions de climat subtropical ou méditerranéen, augmentation dans les régions tempérées et polaires ;
- une modification des risques « naturels » : vagues de chaleur, sécheresses, feux de forêts, très fortes précipitations et risques d'inondations, peut-être ouragans de forte intensité ;

- une modification des débits et températures des rivières, lacs (impacts pour les ressources en eau et le refroidissement des infrastructures industrielles) ;
- des impacts très contrastés pour la production agricole, avec un risque de chute de rendements dans les régions tropicales et méditerranéennes (effet sécheresse), mais une saison de croissance plus longue dans les régions tempérées et polaires ;
- une acidification des océans avec des conséquences potentiellement majeures sur les écosystèmes marins (coraux, calcification...) et les ressources en pêche ;
- une augmentation du niveau des mers pouvant aller de 20 cm à 1 m à l'horizon 2100, le triple à l'horizon 2200 (réchauffement et dilatation des océans, fonte de la plupart des glaciers de montagne à des altitudes < 4000m, accentuation de la fonte et l'écoulement des calottes du Groenland et de l'Antarctique de l'Ouest) ; impacts sur les écosystèmes et les populations des régions côtières ;
- des déplacements d'espèces vivantes, des modifications importantes d'écosystèmes (ex forêts), des modifications des aires de répartition de maladies à vecteur (ex dengue) ; une dégradation de la qualité de l'air dans les zones urbaines en été (effet vague de chaleur comme en 2003) ;

Un réchauffement global de 3°C en 100 ans serait sans précédent à l'échelle du dernier million d'années, en termes de niveau moyen de température, et en termes de rapidité du phénomène. Notons que dans le dernier exercice de projection climatique réalisé au niveau international, le scénario prévoyant une modification du bilan radiatif de l'ordre de 8.5W/m² conduit à un réchauffement supérieur à 8°C en moyenne globale.

Mais les conséquences seraient hétérogènes selon les régions, les secteurs économiques, les catégories sociales.

Les rejets de dioxyde de carbone posent des problèmes de changements « irréversibles » à l'échelle de plusieurs siècles du fait de (i) la longue durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère, l'acidification des océans, (ii) l'inertie de l'océan qui va intégrer une partie du surplus d'énergie et la redistribuer pendant plusieurs siècles, (iii) la réponse cumulée océan – glaces polaires qui entraînera une dérive du niveau des mers sur le long terme. La fonte du pergélisol peut entraîner une rétroaction positive (rejets de méthane) mais qui reste très incertaine. Il existe un débat scientifique sur la possibilité d'instabilités abruptes pour différentes régions (moussons, grandes forêts, circulation océanique, stabilité de la calotte de l'Antarctique de l'Ouest). A l'échelle de plusieurs siècles, un réchauffement global de l'ordre de 3°C entraînerait très probablement une fonte importante de la calotte du Groenland (correspondant à une montée de plusieurs mètres du niveau des mers), avec un débit d'eau qui pourrait arrêter la plongée des eaux profondes de l'Atlantique du Nord et perturber les courants océaniques, comme la Dérive Nord Atlantique. Ce type de changement abrupt entraînerait, dans un climat globalement plus chaud, un réchauffement moindre autour de l'Atlantique nord mais accentué dans les régions tropicales (avec des impacts majeurs sur les moussons en Afrique ou Amérique du Sud).

Pour la France, les impacts possibles du changement climatique ont commencé à être évalués dans le cadre du Plan d'Adaptation national. Quelques exemples :

- Ressources en eau : étiages plus précoces et plus sévères, déficit potentiel de l'ordre de 2 Mds de m³ à horizon 2050. Zones les plus touchées déjà en situation délicate (ex sud ouest) ;
- Risques naturels et assurances : risques de submersion marine (côtes), retrait gonflement des argiles et mouvements de sols à cause d'une augmentation de l'intensité et la fréquence de sécheresses (coûts pourraient être multipliés par 3 à 6), incertitudes sur les inondations et tempêtes ;
- Risque de pertes économiques lié aux services rendus par les écosystèmes, risques pour la biodiversité ;
- Santé : risques liés aux maladies à vecteurs (animaux et humains) ; fréquence accrue de vagues de chaleur ; risques liés à la qualité de l'air. Impacts sur les allergies (pollens).
- Agriculture : impacts de vagues de chaleur sur la productivité (blé) ; pertes à horizon 2050 pour les prairies de zone péri méditerranéenne ; forts impacts sur la viticulture (risques de baisse de la qualité des vins avec augmentation du taux de sucres) ;
- Forêts : aggravation de l'aléa « feux de forêt », compensations possibles entre augmentation de productivité et aléas (sécheresses, dépérissements) d'ici à 2050 ; modifications profondes des forêts françaises au-delà de 2050 (changements des types d'essences) ;
- Energie : baisse attendue de la demande d'énergie en hiver mais augmentation de la demande de climatisation en été, estimations de demande de l'ordre de -3% mais pourrait diminuer de moitié avec le développement spontané de la climatisation ; baisse possible de la production hydroélectrique (15%) (précipitations, fonte des glaciers).
- Tourisme : impacts possibles sur la fiabilité de l'enneigement (viabilité des stations <1500 m) ; dégradation du confort climatique en été et baisse possible de l'attractivité touristique, chiffre d'affaire exposé très important ;
- Infrastructures de transport : impacts importants (routes, voies ferrées...) (mouvements sols, risques de submersion sur infrastructures de régions côtières) ;
- Questions sur les mouvements de population (migrations) ;

A retenir : une partie de l'évolution future du climat est inéluctable (réponse du système climatique à la perturbation déjà injectée dans l'atmosphère) ; mais à l'horizon 2030-2100, la trajectoire du climat dépend de celle des rejets de gaz à effet de serre à venir, donc des politiques poursuivies.

- **9) L'action face au changement climatique : maîtrise des émissions de gaz à effet de serre et adaptation**

A noter :

- un fort besoin d'éducation et de formation (programmes scolaires, universitaires, écoles des chambres de commerce et d'industrie pour les formations professionnelles, écoles d'ingénieur, formation des élus). Enorme déficit de formation sur les notions de base et les enjeux du changement climatique.
- une nécessité de construire des scénarios à l'échelle nationale et locale.

- ne pas opposer atténuation (maîtrise des rejets de gaz à effet de serre) et adaptation ;

Cependant il faut souligner qu'au cœur des politiques climatiques il y a l'arbitrage suivant : les besoins d'adaptation seront d'autant moins importants que l'action en matière d'atténuation sera vigoureuse. Il faut donc choisir entre un monde dominé par le laisser-faire en matière d'émissions avec de forts changements climatiques, des coûts d'adaptation et des risques importants, et un monde d'action forte pour la réduction des émissions, mais où les coûts d'adaptation et les risques d'emballement climatique seront limités. Le grand mérite du rapport Stern, au-delà de certains de ses aspects discutables, est d'avoir bien montré que le coût de l'inaction en matière d'atténuation serait probablement plus élevé que le coût de l'action.

Négociations internationales (Programme Cadre des Nations Unies sur le changement climatique) :

- Protocole de Kyoto, objectif pour la France : 0% à horizon 2008-2012 par rapport à 1990 ; objectifs chiffrés pour les pays développés ayant ratifié le traité ; pas d'engagements pour les pays en développement ;
- Engagements de Copenhague et Cancun : un réchauffement global qui ne dépasse pas 2°C par rapport au niveau pré-industriel (soit 1,2°C par rapport aux températures de la décennie 2000-2011) ; implique des émissions globales qui devraient commencer à diminuer entre 2015 et 2020 ;
- Feuille de route de Durban : prolongation du protocole de Kyoto à horizon 2020, accord a minima de quelques pays (Europe, Australie... : au total, moins de 15% des émissions) ; retrait unilatéral du Canada du protocole de Kyoto ; les engagements volontaires suggèrent des émissions environ 15% plus élevées en 2020 que ceux nécessaires pour tenir la trajectoire 2°C ;
- Mise en place à partir de 2015 d'un accord international qui implique tous les pays, dont le caractère contraignant n'est pas encore fixé ;
- Mise en place d'un « fond vert » pour l'adaptation mais modes de financement flous.

Les engagements nationaux et internationaux de la France : Programme National de Lutte contre le Changement Climatique (2000), Plan Climat 2004-2012 révisé tous les deux ans.

Europe : paquet énergie climat (directive sur énergies renouvelables, échanges de permis d'émission, partage des efforts en matière de réduction d'émissions de gaz à effet de serre, captage et stockage de CO₂, qualité des carburants, règlement sur la réduction des émissions de CO₂ des voitures). Objectifs 2020 : 20% d'efficacité énergétique en plus (objectif non contraignant), 20% de renouvelables, pour 20% à 30% de réduction d'émissions;

Débats sur l'affichage de l'objectif le plus ambitieux (-30%) avec la question de savoir s'il doit ou non être corrélé à l'engagement des autres pays ;

France : A horizon 2050, objectif « facteur 4 » énoncé par la Mission Interministérielle pour l'effet de serre dès 2003 et correspondant à un objectif d'émissions de gaz à effet de serre par habitant compatible avec un scénario global permettant de respecter l'objectif de 2°C ; Mise en place d'un plan national d'Adaptation (2011).

- **10) Coûts du changement climatique et des instruments des politiques d'atténuation**

Depuis l'émergence de la question du changement climatique comme un thème majeur sur l'agenda de la recherche, les sciences sociales ont été aussi mobilisées. L'économie a en particulier été sollicitée sur deux champs principaux : (i) l'évaluation des coûts du changement climatique (adaptation) et des politiques de réduction des émissions (atténuation) et (ii) l'identification des dispositifs instrumentaux (écotaxes, quotas d'émission ou normes techniques) susceptibles de modifier les comportements d'acteurs et donc les trajectoires d'émission.

Une part non négligeable de ces recherches mobilise des modèles économiques théoriques synthétiques ou des modèles appliqués de grande taille ; ce sont des modèles de simulation ou d'optimisation, décrivant l'ensemble de l'économie ou les secteurs les plus importants pour les émissions (énergie, agriculture...).

Une ligne de démarcation existe entre (i) les études procédant d'une analyse coût-avantage du problème, qui cherchent à identifier le niveau de réduction optimal selon des critères économiques et (ii) les études qui, reconnaissant les limites durables à l'évaluation des coûts économiques du changement climatique, préfèrent considérer l'objectif comme exogène et donné par un choix politique, tout en s'attachant à rechercher la solution coût-efficace pour atteindre cette solution.

Pour ce qui concerne le choix des instruments, en particulier taxe ou quotas, le débat se poursuit, en termes théoriques et en termes pratiques, différentes écoles vantant les avantages et pointant les limites de l'une ou l'autre solution. C'est en partie un faux débat car les deux options ne sont pas contradictoires. En 2009, la France a failli se doter d'un dispositif de régulation économique du CO₂ jugé par la plupart des économistes comme très approprié avec : (i) le système des quotas européens pour l'industrie lourde et le secteur électrique et (ii) une taxe carbone, ou plutôt une contribution climat-énergie, permettant de réguler les sources d'émission diffuses dans les transports et le bâtiment. On ne peut que regretter que le gouvernement d'alors ait décidé en 2010 d'abandonner ce projet et l'on ne peut que souhaiter, avec Michel Rocard, que ce chantier soit bientôt ré-ouvert.

L'économie n'épuise pas cependant les problématiques du changement climatique, telles que considérées du point de vue des sciences sociales. L'étude des relations internationales a beaucoup à apporter sur les questions des régimes internationaux pour l'environnement et de la négociation internationale, les sciences politiques à la définition et à l'acceptabilité des politiques d'adaptation et d'atténuation, la sociologie et la psychologie à la compréhension des dynamiques d'adoption de nouvelles technologies ou de nouveaux comportements.

- **Ressources :**

- 4^{ème} rapport du GIEC (www.ipcc.ch)
- Global Carbon Project (<http://www.globalcarbonproject.org/>)
- Météo France (www.meteofrance.com), rubriques « climat », « bilans climatiques »
- Le Climat à Découvert, Collectif, CNRS Editions, 2011
- Ministère du Développement Durable, énergie et climat :
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Energies-et-Climat-.html>
- ONERC, Observatoire des Effets du Réchauffement climatique : <http://onerc.org/>
- Institut Pierre Simon Laplace, <http://www.ipsl.fr/> (voir : Foire aux Questions climat)
- Données scientifiques sur le changement climatique : <http://www.universcience.fr/climobs/>
- Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique :
http://unfccc.int/portal_francophone/
- Groupement d'Intérêt Scientifique Climat Environnement Société :
<http://www.gisclimat.fr/>
- Réponses aux idées reçues sur le climat : <http://www.skepticalscience.com/>
- Rapport Stern sur l'économie du changement climatique, pour le gouvernement britannique :
www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm
- Bert Metz (un des principaux auteurs du GT3 du GIEC), Controlling Climate Change en pdf :
http://www.controllingclimatechange.info/ControllingClimateChange_by_BertMetz.pdf