



DOSSIER

Durable ?

Qu'est-ce qu'un changement

Quelle est la mesure du changement climatique global qui risque de survenir ?

Quelle est la part du facteur humain dans cette nouvelle ère géologique ?

Comment s'y adapter, maintenant et à l'avenir ? Une problématique complexe, pluridimensionnelle, tout autant scientifique que politique.

Valérie MASSON-DELMOTTE, directrice de recherche au Laboratoire des sciences, du climat et de l'environnement *

Le climat de notre planète a permis l'émergence puis conditionné l'évolution du monde vivant. Notre espèce humaine, *homo sapiens*, a su s'adapter à des variations climatiques considérables au cours de la dernière période glaciaire, pour connaître un formidable essor démographique au cours des derniers millénaires et des derniers siècles. Mais du chasseur-cueilleur nomade au sédentaire, de quelques millions à quelques milliards d'individus, nous touchons désormais du doigt les limites de notre planète.

La longue histoire du climat a été façonnée par l'ensoleillement reçu par notre planète, par la géographie des continents et des océans, par l'évolution de la composition de notre atmosphère. Celle-ci est bien connue au cours des dernières huit cent mille années, grâce aux bulles d'air emprisonnées dans les glaces de l'Antarctique. Aucun doute n'est permis : depuis l'ère industrielle, ce sont les activités humaines qui pilotent la composition de l'atmosphère de notre planète, à travers les rejets massifs de gaz à effet de serre liés à l'utilisation des énergies fossiles, l'agriculture intensive et la déforestation. Avec actuellement plus de 30 milliards de tonnes de dioxyde de carbone déversées chaque année dans l'atmosphère, nous sommes devenus une force géologique, marquant une rupture profonde vis-à-vis des mécanismes « naturels »

de l'évolution du climat : nous entrons dans « l'anthropocène ». Contenant 35 % de plus de dioxyde de carbone et deux fois et demi plus de méthane qu'au cours des siècles précédents, l'atmosphère « anthropique » est plus efficace pour piéger le rayonnement thermique émis depuis la surface de notre planète vers l'espace. Dans quelle mesure cet incontestable surplus d'effet de serre affecte-t-il l'évolution du climat ? Les réseaux météorologiques permettent d'estimer les variations de la température moyenne de la surface de notre planète depuis environ cent cinquante ans ; il faut savoir qu'il existait près de 4 000 stations météorologiques en fonctionnement en 1900, pour 8 000 stations de mesure actuellement. La température moyenne de notre planète s'est nettement réchauffée depuis cent ans (avec un rythme de 0,074°C par décennie) ; ce réchauffement s'est nettement accentué au cours des dernières cinquante années puisqu'il y atteint une intensité de 0,128°C par décennie. La fonte des glaciers, la montée du niveau marin, l'augmentation de la saison de croissance des végétaux témoignent déjà des impacts de ce réchauffement sur nos paysages.

Les « rétroactions » du système climatique

Il n'existe pas de « preuve » directe, simple, que les activités humaines sont responsables du réchauffement actuel. Comment

* Paléoclimatologue, co-auteur du quatrième rapport du Giec. Liste de publications et ouvrages de vulgarisation disponible sur <http://www.lsce.ipsl.fr/Pisp/24/valerie.masson-del-motte.html>.

Nous sommes devenus une force géologique, marquant une rupture profonde vis-à-vis des mécanismes « naturels » de l'évolution du climat : nous entrons dans « l'anthropocène ».

fonctionne la machine climatique ? Notre planète dans son ensemble échange du rayonnement avec l'espace : elle intercepte une partie du rayonnement solaire, et émet du rayonnement infrarouge. L'équilibre entre ces deux termes contrôle la température moyenne de la surface des planètes. Physiquement, il est évident qu'une augmentation des concentrations en gaz à effet de serre va modifier les échanges de rayonnement en limitant les pertes infrarouge vers l'espace et conduire à un ajustement de la température moyenne de notre planète. Tout l'enjeu de la physique du climat consiste à quantifier la réaction de la machine climatique à cette perturbation des échanges de rayonnement : comment vont changer la circulation de l'océan et de l'atmosphère, ces deux fluides qui redistribuent la chaleur à la surface de notre planète ? Comment le cycle de l'eau va-t-il modifier le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère, et quels types de nuages seront formés, avec quels effets radiatifs ? Comment les propriétés réfléchissantes de notre planète vont-elles varier, selon les types de nuages, mais aussi selon l'état de sa surface (neige, glace, végétation, océan...) ? L'ensemble des rétroactions mises en jeu dans cette machine climatique peut fortement amplifier la réaction du climat à la perturbation initiale liée au surplus de gaz à effet de serre.



climatique « acceptable » ?

YOU CONTROL
CLIMATE CHANGE.



TURN DOWN. SWITCH OFF. RECYCLE. WALK. CHANGE

© COMMISSION EUROPÉENNE

Les sciences du climat disposent de trois approches complémentaires pour comprendre la sensibilité du climat et les rétroactions en jeu : déterminer et comprendre la manière dont le climat de notre planète a varié dans le passé en réponse à différentes perturbations « naturelles » (composition de l'atmosphère, orbite terrestre, volcanisme, activité solaire...) ; observer les processus en jeu dans l'évolution actuelle du climat en réponse à un ensemble de facteurs naturels (volcanisme, activité solaire) et anthropiques (rejets de gaz à effet de serre et de particules dans l'atmosphère ; changements d'usages des sols...) ; et enfin mettre en équation le fonctionnement physique de la machine climatique afin de quantifier le rôle des différents processus dans la réponse du climat : la modélisation. Ces trois approches complémentaires permettent depuis peu de déterminer la part des activités humaines dans l'évolution du climat. Premièrement, le réchauffement observé depuis

une trentaine d'années est clairement sans précédent par rapport aux variations de température reconstruites à partir des archives climatiques pour les deux derniers millénaires. Deuxièmement, l'effet radiatif des activités humaines (environ 1.6 W/m^2 en plus) devient dominant par rapport à l'effet radiatif des facteurs naturels connus pour cette même période (volcanisme, activité solaire), et ces facteurs naturels ont joué dans le sens d'un refroidissement du climat au cours des dernières cinquante années. Troisièmement, le réchauffement observé depuis 1985 se situe sur la trajectoire « haute » du réchauffement qui avait été calculé dès 1985 à l'aide des premiers modèles de climat (ce qui constitue une vérification « a posteriori » de la validité des projections climatiques). Quatrièmement, les modèles de climat sont capables de simuler correctement le réchauffement du XX^e siècle en prenant en compte les facteurs naturels et anthropiques. Par contre, ils ne

simulent pas de réchauffement au cours des dernières décennies s'ils ne prennent pas en compte les facteurs anthropiques. Ces éléments de caractérisation de l'évolution récente du climat, de la perturbation radiative liée aux facteurs naturels et anthropiques, et de modélisation du climat ont permis au Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec) d'affirmer dans son dernier rapport de synthèse, rendu public en 2007, que la majeure partie du réchauffement des dernières décennies est due aux activités humaines, dont l'effet devient dominant par rapport aux facteurs naturels.

Risque climatique : les scénarios

Si les grands changements climatiques passés nous montrent sans ambiguïté que les périodes caractérisées par un effet de serre plus intense étaient des périodes plus chaudes, ces climats passés ne peuvent être utilisés pour prévoir le risque climatique à venir. Dans l'état des connaissances



DOSSIER

Durable ?

actuelles, il n'existe pas d'analogie « naturel » à une perturbation aussi rapide et brutale de la composition de l'atmosphère que celle que nous imprimons à notre planète depuis l'ère industrielle. L'étude des changements climatiques passés permet de comprendre les rétroactions du système climatique, de mettre en évidence l'occurrence de changements abrupts lorsque des effets de seuil sont franchis, et de tester la capacité des modèles de climat à simuler correctement des climats radicalement différents du climat actuel (climats glaciaires, par exemple). Mais seuls ces modèles numériques de climat peuvent être utilisés pour prévoir la réaction du climat en réponse au surplus de gaz à effet de serre d'origine anthropique. S'ils sont construits à partir de lois physiques (échanges de rayonnement, physique des fluides...), ces codes de calcul font également appel à des relations empiriques pour prendre en compte les processus de petite échelle (turbulence, rôle des gouttelettes d'eau ou des cristaux de glace des nuages sur les échanges de rayonnement, par exemple). Ainsi, différents modèles de climat vont-ils représenter différemment les rétroactions du système climatique et avoir des sensibilités climatiques différentes. C'est la comparaison systématique de la vingtaine de modèles de climat disponibles dans le monde qui permet d'estimer une barre d'erreur sur les projections climatiques.

Augmentation des émissions polluantes

Comment prévoir l'évolution future du climat ? Il faut d'abord construire des scénarios de rejets de gaz à effet de serre, selon l'évolution démographique, technologique, économique. Plusieurs scénarios ont été construits à la fin des années 1990 et sont encore utilisés pour les projections du Giec rendues publiques en 2007. Le scénario « business as

usual » repose sur la poursuite du développement actuel, avec une intensification de l'utilisation des énergies fossiles et une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre de l'ordre de 1 % par an pour atteindre trois fois le niveau « pré-industriel » à la fin du XXI^e siècle. Notons que les rejets de gaz à effet de serre sont actuellement 30 % plus élevés qu'en 1990 (année de référence pour la Convention climat des Nations unies), et que les concentrations de gaz à effet de serre augmentent depuis 2002 de l'ordre de 3 % par an. Autrement dit, la réalité dépasse déjà le scénario le plus « pessimiste » en terme de rejets de gaz à effet de serre, à cause d'une augmentation des émissions dans les pays les plus « pollueurs » en terme de rejets de gaz à effet de serre par habitant et par an (Etats-Unis, Australie, Canada), d'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans les pays émergents (Chine, Inde, Brésil...) associée à une diminution de l'efficacité énergétique, et enfin à une saturation des puits naturels de carbone (végétation, océan) qui jusqu'à présent absorbaient la moitié des émissions anthropiques de dioxyde de carbone. Ensuite, les autres scénarios sont construits en faisant l'hypothèse d'une mise en œuvre coordonnée d'un maximum de méthodes connues (efficacité énergétique, énergies renouvelables) ou en développement (nouveaux moteurs, séquestration géologique du dioxyde de carbone, optimisation de l'aménagement du territoire) d'abord dans les pays développés, puis par les pays en développement. Dans ce cas, on estime possible de faire plafonner le total des rejets de gaz à effet de serre d'ici au milieu du XXI^e siècle puis à les faire diminuer progressivement, permettant ainsi de stabiliser les concentrations en dioxyde de carbone à 1.6 à 2 fois les niveaux naturels. De nombreuses études

Alors qu'au Sud le risque de feux de forêt augmentera, c'est la fonte des glaces qui sera particulièrement remarquable dans l'Arctique.



économiques suggèrent, comme le rapport Stern, que le coût de la maîtrise des rejets de gaz à effet de serre est significatif, mais largement inférieur aux effets négatifs du climat : le coût de l'action concertée est inférieur au coût de l'inaction.

L'ampleur du réchauffement à venir est dans tous les cas considérable. Quelque que soit le scénario, il faut s'attendre à un réchauffement climatique de l'ordre de 0.5°C au cours des prochaines vingt-cinq années, c'est-à-dire autant au cours des prochaines vingt-cinq années que pour les dernières cinquante années. L'évolution du climat au cours des prochaines décennies, hors facteurs naturels (éruption volcanique majeure, par exemple) est déjà inscrite dans la composition de l'atmosphère actuelle - le temps de résidence du dioxyde de carbone est de plusieurs siècles dans l'atmosphère... Premier constat : le changement climatique est amené à s'intensifier et



que accru d'inondations), et, au contraire, à des étés plus chauds et plus secs, avec des phases de sécheresse prolongée et simultanément un risque d'augmentation des très fortes précipitations. La dilation des eaux marines et la fonte de l'immense majorité des glaciers ne peuvent qu'entraîner une augmentation du niveau des océans, mettant sous pression les écosystèmes des zones côtières, et les infrastructures de bord de mer.

Certaines zones, telles que l'Arctique ou le pourtour méditerranéen, apparaissent comme particulièrement exposées aux effets du réchauffement climatique et devraient subir des bouleversements considérables. Alors qu'au Sud le risque de feux de forêt augmentera, c'est la fonte des glaces qui sera particulièrement remarquable dans l'Arctique. Les modèles de climat simulent tous une disparition saisonnière (pendant la fin de l'été) de la couverture de banquise autour du pôle Nord :

© DENIS MERCIER

c'est le visage même de notre planète qui sera modifié, sans refuge possible pour la faune locale. Les signaux d'alarme s'accumulent dans le Grand Nord, où l'été 2007 a été marqué par un retrait exceptionnel de la zone couverte de banquise (1,5 millions de km² de moins que le précédent record de 2005) et une extension de la fonte à la surface de l'inlandsis du Groenland jusqu'à plus de 2 000 mètres d'altitude. Le rythme des changements observés ces dernières années dans l'Arctique est bien plus rapide que ne le suggèrent les modèles de climat : est-ce la marque d'aléas météorologiques ponctuels, liés à la dynamique des vents et des courants, ou bien le premier signe d'un changement climatique encore plus abrupt que nous ne pouvons le prévoir ? Les missions de terrain prévues dans le cadre de l'Année polaire internationale, de 2007 à 2009, devraient apporter des éléments de réponse à ces interrogations. Les changements

il faudra nécessairement nous adapter à un climat en mouvement. Second constat : l'évolution des rejets de gaz à effet de serre au cours des prochaines vingt années sera déterminante vis-à-vis du risque climatique. Si nous poursuivons les rejets de gaz à effet de serre au rythme actuel, il faut s'attendre à un réchauffement global de plus de 3,5°C d'ici à 2100. Si, par contre, nous parvenons à faire plafonner puis décroître les rejets de gaz à effet de serre d'ici vingt ans, alors il serait possible de contenir la dérive du climat en dessous de 2°C.

L'anormale rapidité du changement climatique

En quoi un changement climatique de 2°C en cent ans est-il plus acceptable qu'un changement de 4°C en cent ans ? D'abord, revenons au rythme naturel du climat. Les changements climatiques globaux les plus rapides se sont produits lors des grandes transitions entre périodes glaciaires

Le péril ne vient pas tant de l'ampleur du réchauffement que de sa vitesse.

Plus le changement climatique sera rapide, plus il sera difficile, aussi bien pour les sociétés humaines que pour les écosystèmes, de s'y préparer.

et périodes chaudes, atteignant environ 5°C en dix mille ans. Pour ce siècle, le péril ne vient pas tant de l'ampleur du réchauffement que de sa vitesse. Plus le changement climatique sera rapide, plus il sera difficile aussi bien pour les sociétés humaines que pour les écosystèmes de s'y préparer et d'y faire face « en douceur ». Pour visualiser l'ampleur du changement à venir, il faut mentionner qu'un réchauffement global de 3,5°C correspondrait à un réchauffement moyen de l'ordre de 4 à 5°C en Europe : Paris aurait alors la température actuelle de Marseille, et les « isothermes », qui conditionnent les zones de répartition de nombreuses espèces vivantes se déplaceraient vers le nord avec un rythme de l'ordre de 80 km par décennie, ce qui est très rapide par rapport aux facultés de migration de certaines espèces. Il faut, en Europe de l'Ouest, s'attendre à des hivers plus doux et plus humides au nord de la France (avec un ris-



DOSSIER

Durable ?

climatiques qui se déroulent dans l'Arctique ont en effet de nombreuses conséquences à grande échelle : les changements de température et de salinité des eaux de mer de l'Arctique jouent un rôle essentiel dans la formation des courants marins profonds ; l'infiltration d'eau de fonte depuis la surface de la calotte du Groenland jusqu'à son lit rocheux peut accélérer l'écoulement des glaciers et accroître la vitesse d'augmentation du niveau des océans. Ces processus sont observés depuis peu mais ne sont pas encore inclus dans les projections d'augmentation de niveau des mers, car ils sont très difficiles à modéliser. Il apparaît cependant clair qu'un réchauffement de plus de 2°C en moyenne globale entraînera inéluctablement une fonte partielle des glaces du Groenland, au cours des siècles à venir.

Un défi scientifique, politique, philosophique

Le problème du réchauffement climatique est extrêmement complexe, d'une part parce qu'il n'existe pas de remède miracle (il n'existe pas actuellement de technique démontrée permettant de récupérer le dioxyde de carbone de l'atmosphère, ou pour refroidir le climat) et d'autre part parce qu'il pose des problèmes d'ordre moral. Il ne fait aucun doute, au regard de l'historique des rejets de gaz à effet de serre, que les pays riches portent une lourde responsabilité. Les populations qui risquent d'être les plus fortement affectées par les impacts du changement climatique se trouvent dans leur immense majorité dans les pays du Sud. Pourtant, prévoir correctement les conséquences des rejets de gaz à effet de serre sur l'évolution du climat tropical reste difficile : il reste d'immenses incertitudes sur les changements de moussons, sur la variabilité interannuelle des précipitations (El Niño), sur les phénomènes extrêmes comme les tempêtes ou les ouragans. Quel poids fai-

Les populations qui risquent d'être les plus fortement affectées par les impacts du changement climatique se trouvent dans leur immense majorité dans les pays du Sud.

sons-nous porter à nos enfants, qui vivront dans un monde de neuf milliards d'humains, où les énergies fossiles seront plus chères, et où ils devront faire face aux conséquences de ce bouleversement climatique dont nous ne voyons que les prémisses !

Vivre cette période de changement climatique annoncé est une expérience formidable pour la climatologue que je suis. C'est un formidable défi pour la communauté scientifique de pouvoir à la fois mieux comprendre l'évolution passée du climat, et mieux prévoir le risque climatique à venir. C'est surtout un formidable défi politique de pouvoir s'adapter à ce climat qui change, et, en parallèle, de chercher à contenir cette dérive climatique dans des limites acceptables.

Il reste difficile à déterminer ce qu'est un changement climatique acceptable. La pression d'un climat en changement s'ajoutera aux autres pressions anthropiques qui rendent l'adaptation des écosystèmes plus difficile. N'oublions pas que la seule augmentation des rejets de gaz à effet de serre a déjà entraîné une acidification des océans, qui ne peut que s'amplifier : il reste très difficile d'en anticiper les conséquences sur les écosystèmes marins. Faut-il être pessimiste ? Je ne le crois pas. Philosophiquement, c'est un bouleversement incroyable qui se produit. L'homme, victime des aléas naturels, a construit un modèle de pensée où l'objectif final est la maîtrise de la Nature. Nos sociétés modernes ont fait émerger l'illusion d'une indépendance de l'homme par rapport aux rythmes naturels : chauffage en hiver, climatisation en été, moyens de transport protégeant l'individu des aléas météorologiques. Le réchauffement climatique ne menace pas cette planète, qui a subi de nombreux bouleversements au cours du temps, avec plusieurs grandes extinctions d'espèces et de nouvelles émergences. Ce réchauffe-

ment climatique menace la stabilité de nos sociétés, posant des problèmes d'équité entre acteurs des rejets de gaz à effet de serre et victimes des impacts du changement climatique.

Les quelques millions d'*homo sapiens* chasseurs-cueilleurs ont développé une stratégie très efficace d'adaptation à la rigueur des climats glaciaires : la migration. Aujourd'hui, nous sommes 6,5 milliards de sédentaires. Où déplacer les futurs réfugiés climatiques ? Ce n'est pas par hasard que le prix Nobel de la paix a été attribué en 2007 à Al Gore et au Giec. La paix dépend de la pression que nous exerçons sur l'environnement, et que l'environnement exerce sur nous. La solution aux défis posés par le réchauffement climatique ne se trouve pas du côté des scientifiques.

Les modèles climatiques constituent une révolution dans le rapport homme/climat : nous ne sommes plus passifs, attendant le prochain aléa naturel. Nous pouvons anticiper, dans une certaine mesure, le risque climatique. La solution aux défis posés par le réchauffement climatique doit maintenant être imaginée par des hommes politiques visionnaires, qui doivent créer de nouveaux projets de société. La Commission européenne s'est fixé unilatéralement l'objectif de réduire de 20 % les rejets de gaz à effet de serre européens d'ici à 2020 ; le Grenelle de l'environnement a listé une stratégie pragmatique pour parvenir à cet engagement, mais une liste de moyens ne constitue pas encore un projet de société plus juste. Nous ne sommes plus des chasseurs-cueilleurs nomades, prédateurs de l'environnement. Nous devons devenir des gestionnaires (des jardiniers ?) de cet environnement global, de cet anthropocène dont nous ne sommes pour l'instant que les apprentis-sorciers. C'est à ce prix que nous pourrons devenir véritablement « *sapiens sapiens* ». ●