



TEXTES DE L'EXPOSITION 

CLIMAT

l'expo à 360°

Actualités • Enjeux • Visions d'artistes

Jusqu'au 20 mars 2016



Avec le soutien de :



En partenariat avec :



SOMMAIRE

Édito

Le diagnostic du réchauffement et les premiers impacts p.5

Le climat, ce n'est pas la météo !	6	8	Parole d'expert : Jean-Louis Etienne
Une surveillance mondiale	6	8	Un réchauffement inédit ?
Toujours plus profond dans les océans	7	9	Les archives du millénaire
L'océan Arctique, bientôt libre de glace ?	7	9	Le recul des glaciers
« Coup de chaud » sur la planète !	7		

Les causes du réchauffement et la responsabilité humaine p.11

La part du Soleil	12	14	Parole d'expert : Valérie Masson-Delmotte
Le climat sous influence	12	15	L'air piégé des glaces
Des particules refroidissantes	12	15	Premier gaz incriminé : le CO ₂
Les experts du climat	12	15	Des forêts qui s'amenuisent...
L'empreinte chauffante d'El Niño	13	16	Charbon ultra polluant
L'Homme, acteur du réchauffement	13	16	Sommes-nous entrés dans l'ère de l'Anthropocène ?

Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'évolution du climat p.17

Les projections des climatologues	18	20	Des cyclones de plus en plus violents
Une planète virtuelle	18	20	Parole d'expert : Christian de Perthuis
Des supercalculateurs de plus en plus puissants	18	21	Petits effets, grandes conséquences
Les modèles sont-ils fiables ?	19	22	La sécurité alimentaire en question
Le double jeu des nuages	19	22	L'Europe n'est pas épargnée
Le dégel du pergélisol	19	22	Corail en péril en Australie
Dérèglement climatique en vue	20	22	L'acidification des océans testée en mer

Face au défi climatique, la planète en quête de solutions p.23

Objectif mondial : +2°C	24	27	Électricité « 100 % renouvelable » ?
Mobilisation citoyenne	24	28	Quelle place pour le nucléaire ?
Chine - États-Unis : les premiers pas	24	28	L'exception française... jusqu'à quand ?
Le droit au développement pour tous	25	28	Vivre avec le risque climatique
Parole d'expert : Laurence Tubiana	25	29	S'adapter à la mer qui monte...
Donner un prix au carbone	26	29	Enfouir le dioxyde de carbone
Une nouvelle ressource fossile	26	29	Vers un monde plus sobre ?
Vers un habitat moins énergivore	27	30	Méga solaire en Inde
Transition énergétique made in France	27		

À l'occasion de la Conférence mondiale sur le climat à Paris du 30 novembre au 11 décembre 2015, « Climat, l'expo à 360° » fait le point sur toutes les questions posées par le changement climatique induit par l'augmentation des gaz à effet de serre liés aux activités humaines. Elle permet en outre une meilleure compréhension du système climatique à travers les dernières observations, simulations et analyses des chercheurs.

Édito

Pour ne pas faire l'autruche

Ya-t-il encore place pour le doute ? Non. Depuis plus d'un siècle, la Terre se réchauffe. Autre certitude : dans le même temps, les taux de gaz à effet de serre (GES) ont augmenté dans l'atmosphère. Troisième certitude : cette augmentation a coïncidé avec le développement d'activités humaines génératrices de GES (énergie, transports, industrie...). Partant de ce constat, quel avenir nous attend ? En l'absence de boule de cristal, les projections des climatologues sont les seuls outils pour appréhender l'évolution future du climat. Et un résultat s'impose : si l'on ne change rien à nos modes de production et de consommation, l'emballement est prévisible. Avec, en perspective, le dérèglement du climat et son lot de scénarios catastrophes. Alors, que faire ? « Adaptation » et « atténuation » sont les maîtres mots des politiques climatiques négociées âprement lors des grands sommets internationaux. Mais nous, au Nord comme au Sud, sommes-nous prêts à entrer dans un monde « décarboné » ? À l'heure où la 21^e Conférence mondiale sur le climat (COP21) à Paris est annoncée comme décisive par rapport à notre avenir sur la planète, cette exposition entend mettre sur la table toutes les pièces du dossier. Une vue panoramique à 360° pour ne pas faire l'autruche.

1

Le diagnostic du réchauffement et les premiers impacts

Stations météorologiques, marégraphes, flotteurs dérivant dans les océans et satellites sont mobilisés pour suivre l'évolution du climat terrestre... et constater que la Terre se réchauffe, avec des impacts déjà visibles, comme la fonte de la banquise arctique ou le recul de la plupart des glaciers continentaux. Est-ce nouveau dans l'histoire de notre planète ? Pour répondre à cette question, les climatologues explorent tout ce qui dans l'environnement garde en mémoire des indices climatiques : carottes de glace, carottes de sédiments marins ou lacustres, cernes de bois, récifs coralliens, grains de pollen... Résultat : le climat de la Terre s'est déjà réchauffé dans le passé en réponse à différents facteurs naturels. Ainsi, la Terre a été très chaude du fait d'un effet de serre important durant l'Eocène, il y a 60 millions d'années, et durant le Pliocène, il y a environ 3 millions d'années. Mais le réchauffement des trente dernières années est inédit au regard des 1 500 ans écoulés, notamment par son caractère global et ses premiers impacts.

Le climat, ce n'est pas la météo !

Par son échelle de temps longue et la multitude de mécanismes en jeu, la climatologie se distingue fortement de la météorologie.

La météorologie décrit l'état de l'atmosphère à un instant donné et à un endroit précis de la Terre, son évolution pouvant être prévue sur quelques jours. En revanche, le climat d'une région, c'est l'ensemble des conditions météorologiques durant une longue période, au moins trente ans. Le climatologue travaille donc sur le long terme – contrairement au météorologue qui fait des prévisions sur le court terme – et il s'intéresse aux valeurs moyennes des paramètres atmosphériques : température de l'air, précipitations, pression atmosphérique, force et direction des vents... Plus globalement, à l'échelle planétaire, le climat se définit avant tout comme une question d'énergie. La Terre est alimentée par l'énergie du Soleil et le climat, ou plutôt ce qu'on appelle « la machine climatique », redistribue ces flux de rayonnement solaire à la surface du globe. L'état du climat terrestre dépend alors de l'équilibre entre l'énergie reçue du Soleil et celle qui repart vers l'espace. Toute perturbation de cet équilibre provoque un changement du climat terrestre. Les facteurs qui perturbent cet équilibre, appelés « forçages », peuvent être naturels, comme l'activité du Soleil ou des volcans, ou bien anthropiques, c'est-à-dire dus aux activités humaines. Le réchauffement global en cours reflète une accumulation d'énergie dans le système climatique, dont 93 % est absorbée par les océans, 3 % dans les sols, 3 % dans les glaces et 1 % dans l'atmosphère.

Une surveillance mondiale

Stations météorologiques, marégraphes, flotteurs dérivant dans les océans et satellites sont mobilisés pour suivre l'évolution du climat de la Terre.

Pour observer le climat de la Terre, de grands réseaux mondiaux de mesures météorologiques et océanographiques ont été mis en place depuis plus d'un siècle. Ils enregistrent, à l'aide d'appareils de mesure standardisés, des grandeurs physiques comme la température, la pression, l'humidité de l'air ou la salinité des océans. Ces réseaux de mesure sont complétés, depuis une quarantaine d'années, par une surveillance du climat par satellites. Ils permettent d'accéder à la température de l'atmosphère ou à celle des océans, à la hauteur du niveau des mers, à la distribution des précipitations et des nuages, au niveau d'extension de la banquise, à une estimation de la masse des calottes de glace... Des dizaines de satellites sont ainsi mis à contribution, ainsi que 11 000 stations météorologiques et près de 6 000 marégraphes et flotteurs dans les océans. Cet effort coordonné et mondial a été mis graduellement en place d'abord pour la prévision du temps, puis pour la surveillance du climat. L'un des indicateurs de l'évolution du climat est le suivi, année après année, de l'évolution de la température moyenne à la surface de la planète, qui avoisine +15°C. Son estimation repose sur l'agrégation de données qui n'ont pas une couverture homogène ni dans le temps, ni dans l'espace,

avec un déficit de stations de mesures dans certaines régions, et des modifications des instruments au cours du temps. Pour homogénéiser toutes ces données, les climatologues ont recours à des procédures statistiques complexes.

Toujours plus profond dans les océans

Depuis les années 1990, les mesures automatisées des flotteurs qui dérivent dans les océans (bouées Argo) complètent les observations effectuées à partir des navires océanographiques. Afin d'améliorer le suivi des courants marins, qui ont une influence sur le climat, de nouveaux flotteurs – actuellement en phase de test en France, aux États-Unis et au Japon – pourront permettre d'étudier les océans jusqu'à 4 000 mètres, voire 6 000 mètres de profondeur.

L'océan Arctique, bientôt libre de glace ?

Depuis le début de son suivi par satellite en 1979, la surface de la banquise arctique en septembre diminue de 10 % par décennie en moyenne. Les données historiques montrent, quant à elles, que le réchauffement observé depuis un siècle est trois fois plus important en Arctique que dans le reste du globe. Selon certains scénarios, la glace pourrait avoir totalement disparu en été dans l'océan Arctique dès 2050. La situation est plus contrastée en Antarctique, au pôle Sud, où la fonte des glaces touche la péninsule et l'ouest du continent (depuis le milieu du XX^e siècle), alors que la banquise a plutôt tendance à s'étendre.

« Coup de chaud » sur la planète !

La Terre se réchauffe avec des impacts déjà visibles comme la fonte de la banquise arctique, le recul des glaciers et l'élévation du niveau des mers.

+0,85°C : c'est l'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre (continents et océans) entre 1880 et 2014. Le climat se réchauffe à l'échelle planétaire mais de façon non uniforme : l'hémisphère nord est plus touché, le réchauffement est maximal aux hautes latitudes (Arctique) et il est plus prononcé sur les continents que dans les océans. Ce réchauffement a déjà des impacts sur l'environnement. Le plus frappant est la fonte de la banquise arctique en été, avec une diminution de sa surface et de son épaisseur. Mais on observe également un recul généralisé des glaciers des régions tropicales, tempérées et polaires. De plus, les mesures effectuées par les marégraphes et les satellites montrent une augmentation du niveau des océans de 3 millimètres par an depuis vingt ans. En effet, en se réchauffant, les océans se dilatent ce qui, avec la fonte des glaces continentales (glaciers de montagne et glaces du Groenland et de l'Antarctique), conduit à une élévation du niveau des mers. Autres témoins du réchauffement : la migration de certaines espèces, comme la chenille processionnaire du pin qui remonte vers le nord en France ou les oies cendrées qui hibernent de plus en plus dans notre pays, sans aller jusqu'en Espagne ou en Afrique ; on note également un avancement de la date de floraison de certains arbres fruitiers.

Enfin, dans de nombreuses régions du monde, le nombre moyen de jours de gel par an a décliné et le nombre de journées chaudes (température supérieure à 25°C) a augmenté depuis 1950 (de plus de 50% pour Paris).

Parole d'expert

Jean-Louis Etienne

Médecin et explorateur, spécialiste de l'Arctique et de l'Antarctique

« L'Arctique, le Grand Nord, se réchauffe en moyenne beaucoup plus vite que l'ensemble des régions de la planète. La raison en est simple : l'Arctique change de couleur. C'est une zone qui était blanche pratiquement toute l'année : l'océan Arctique était recouvert de glace et toute la couronne de terre – la Sibérie, le Groenland, le nord du Canada – était recouverte de neige. Et le blanc, comme tout le monde le sait, est un réflecteur du rayonnement solaire. Aujourd'hui, la neige apparaît plus tard et disparaît plus tôt sur les zones de terre. Cette zone-là, qu'on appelle le permafrost, un sol gelé en permanence – pergélisol en français – et qui était blanche une majorité de l'année, devient de plus en plus sombre et capte donc le rayonnement solaire. Le permafrost fond de plus en plus profondément, c'est une zone marécageuse qui émet du méthane qui s'ajoute au gaz carbonique. On assiste donc à un phénomène d'emballlement dans le nord, l'extrême nord, c'est-à-dire le pôle : avec cet océan gelé, il y a de plus en plus de zones qu'on appelle « d'eau libre », parce que la banquise se casse, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas recouvertes par la glace. Ce sont donc des zones sombres qui captent le rayonnement solaire et qui, par proximité, font fondre la glace etc. Cette histoire d'emballlement a été longtemps sous-estimée dans les modèles climatiques. Il y a des endroits où la température moyenne en Arctique a augmenté de presque 5 degrés en 80 ans ! Cette disparition progressive, ou cette atténuation plutôt, du froid au nord va être préjudiciable pour compenser l'excès de chaleur tropicale. Bien sûr, quand on regarde fondre la banquise, cela nous inquiète. On pense tout de suite à l'ours, mais cela va avoir des conséquences sur nous, ici, parce que, si vous voulez, on a ouvert la porte du frigo. On perd des frigories qui vont manquer à l'excès de chaleur tropicale. En ce sens, les régions polaires, et surtout l'Arctique, sont devenus des témoins, mais aussi des acteurs importants du changement climatique. »

Un réchauffement inédit ?

Le climat de la Terre s'est déjà réchauffé dans le passé mais si l'on observe les derniers 1 500 ans, le réchauffement actuel est exceptionnel.

Pour savoir si le réchauffement actuel est sans précédent, il faut disposer d'enregistrements climatiques sur de longues échelles de temps. Les paléoclimatologues, qui étudient les climats passés, font appel à un ensemble d'archives naturelles du climat. L'analyse des sédiments marins permet de reconstituer les variations du niveau des mers et de la température des océans

depuis plus de 60 millions d'années. Les carottages dans les glaces de l'Antarctique donnent accès aux variations du climat polaire et de la composition atmosphérique (via les bulles d'air piégées dans la glace) sur 800 000 ans. Les sédiments des lacs ou les concrétions des grottes permettent de caractériser l'évolution du climat au cours de milliers à centaines de milliers d'années. Pour les derniers millénaires, les informations préservées saison après saison dans les anneaux de croissance des arbres ou les coraux jouent un rôle précieux. Résultat : le climat terrestre a maintes fois changé dans le passé, en réponse à différents facteurs naturels. Ainsi, la dérive des continents a eu une influence sur le climat à l'échelle de millions d'années, et les variations de l'orbite terrestre, à l'échelle de milliers d'années. De même, l'activité solaire et les éruptions volcaniques jouent un rôle sur la variabilité naturelle du climat. Néanmoins, le réchauffement des trente dernières années est inédit au regard des 1 500 ans écoulés, notamment par son caractère global et ses premiers impacts.

Les archives du millénaire

Sédiments marins ou lacustres, glaces, cernes des arbres, récifs coralliens ont gardé une trace (dans leur structure et leur composition physico-chimique) des conditions climatiques (température, pluviosité, salinité...) qui régnaient au moment de leur formation. Après analyse et datation des échantillons de ces archives naturelles, les paléoclimatologues peuvent ainsi « reconstruire » l'évolution du climat passé, site par site, puis région par région. Résultat : dans l'hémisphère nord, les variations de température ont été modestes (moins de 2°C) au cours des deux derniers millénaires.

Le recul des glaciers

À l'exception de certains glaciers (Karakorum) de l'Himalaya, la plupart des glaciers continentaux voient leur volume baisser. En France, la Mer de Glace a reculé de 1,8 kilomètre entre 1823 et 1995, et de 700 mètres depuis 1993.

2

Les causes du réchauffement et la responsabilité humaine

La planète se réchauffe, c'est un fait, mais pour quelles raisons ? De nombreux facteurs ont une influence sur le climat. Tout d'abord le Soleil, qui est le moteur de la machine climatique, mais aussi l'activité volcanique ou l'effet de serre. Présents naturellement dans l'atmosphère, certains gaz dits à effet de serre sont capables de piéger la chaleur à la surface de la Terre. Ils maintiennent ainsi la température moyenne de la Terre à +15°C, alors qu'elle serait de -18°C sans eux. Depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines (industrie, énergie, bâtiment, transports, agriculture, déforestation...), associées à une démographie très importante, produisent elles aussi des gaz à effet de serre qui viennent s'ajouter à ceux déjà présents dans l'atmosphère. Malgré un débat alimenté par ceux qui se définissent comme « climato-sceptiques », pour les climatologues il ne fait pratiquement plus aucun doute que l'Homme – à travers cet effet de serre additionnel – est responsable de la majeure partie du réchauffement planétaire observé depuis 1950.

La part du Soleil

Tous les onze ans, en moyenne, notre étoile connaît un regain d'activité qui se manifeste par une augmentation du nombre de « taches solaires » et de la quantité d'énergie solaire arrivant sur Terre. Cela se traduit par une fluctuation de 0,1°C (au plus) de la température moyenne à la surface de la Terre. L'activité du Soleil ne peut donc pas expliquer à elle seule le réchauffement planétaire observé au cours des dernières décennies.

Le climat sous influence

Soleil, activité volcanique, effet de serre naturel et, depuis peu, activités humaines... De nombreux facteurs interviennent sur le climat de la Terre.

Plusieurs facteurs naturels agissent sur le climat de la Terre. En premier lieu, le Soleil qui est le moteur de la machine climatique. La quantité d'énergie solaire reçue par la Terre est variable. Elle dépend de l'inclinaison de son axe de rotation et des caractéristiques de son orbite autour du Soleil. Ces paramètres astronomiques sont à l'origine des périodes glaciaires et interglaciaires qui ont marqué les variations du climat terrestre au cours des derniers millions d'années. L'activité volcanique conditionne également le climat de la Terre, de même que l'effet de serre. Présents dans l'atmosphère, certains gaz comme la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO₂) ou le méthane (CH₄) retiennent une partie de la chaleur reçue du Soleil. Sans ces gaz à effet de serre (GES), la température moyenne de la Terre avoisinerait -18°C au lieu de +15°C. Ils sont donc essentiels au développement de la vie sur Terre. À l'échelle géologique (millions d'années), l'effet de serre naturel a varié en fonction notamment du volcanisme et de la capacité particulière des océans à stocker du dioxyde de carbone lors des glaciations. Depuis le début de l'ère industrielle (200 ans), les activités humaines produisent elles aussi des GES, qui s'ajoutent à ceux naturellement présents dans l'atmosphère. Cet effet de serre additionnel augmente le réchauffement de l'atmosphère et permet d'expliquer, selon le Giec (5^e rapport), le réchauffement planétaire observé depuis 1950.

Des particules refroidissantes

En éjectant des quantités importantes de cendres et d'aérosols sulfatés, les éruptions volcaniques de type explosif contribuent à un refroidissement de courte durée (de un à trois ans) de l'atmosphère. Certaines particules de pollution – qui proviennent des fumées industrielles, des gaz d'échappement ou des feux de forêt – ont également un effet refroidissant sur le climat, lequel atténue l'effet réchauffant des gaz à effet de serre.

Les experts du climat

20 000 scientifiques collaborent à l'étude du climat et de son évolution passée et future. Le Giec est chargé de livrer une synthèse des connaissances.

La climatologie est une science pluridisciplinaire et internationale. Physiciens, chimistes, glaciologues, statisticiens, océanographes, météorologues, géologues,

astronomes, biologistes, historiens, géographes... 20 000 scientifiques dans le monde, dont un millier en France, étudient le climat ainsi que son évolution au cours des temps anciens et de ceux à venir. Ils bénéficient de l'aide d'informaticiens et de mathématiciens dans la mise au point de puissants modèles informatiques capables de simuler la machine climatique et de prédire ses variations futures. Techniciens et ingénieurs innovent, quant à eux, pour mettre au point des instruments de mesure toujours plus performants (sondes, satellites...). Cinq organismes suivent l'évolution de la température moyenne à la surface de la planète : l'Agence américaine de l'océan et de l'atmosphère (Noaa), l'Agence spatiale américaine (Nasa), le Centre Hadley du Met Office britannique, l'université de Berkeley et l'Agence météorologique japonaise. Chaque année, la climatologie produit des milliers de publications scientifiques. D'où la nécessité de faire régulièrement une synthèse de l'état des connaissances. C'est le rôle du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec*), créé en 1988 par les Nations unies et l'Organisation météorologique mondiale, dont les rapports (le 5^e a été publié en 2013 et 2014) sont rédigés par des centaines d'auteurs, sur la base des publications scientifiques, et relus par plus de 1 000 chercheurs. Ce socle scientifique, construit collectivement et approuvé par l'ensemble des gouvernements, sert de base aux négociations internationales sur le climat.

* En anglais, IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

L'empreinte chauffante d'El Niño

Les océans, qui couvrent 71 % de la surface du globe et absorbent 93 % de l'énergie stockée par la Terre, jouent un rôle déterminant dans le système climatique. À court terme, le principal mode de variabilité naturelle du climat à l'échelle globale est El Niño, un phénomène de réchauffement des eaux de surface de l'océan Pacifique équatorial qui se produit tous les deux à sept ans. Il en résulte une succession d'événements météorologiques extrêmes (inondations ou sécheresses) dans les régions tropicales, et un réchauffement de la température moyenne globale*. Fort en 2015, ce phénomène avait été encore plus intense en 1998.

* Il arrive aussi que le phénomène s'inverse : c'est La Niña, qui conduit à un refroidissement de la température du globe.

L'Homme, acteur du réchauffement

Selon les dernières données scientifiques, il ne fait quasiment plus aucun doute que les activités humaines sont la cause principale du réchauffement observé depuis 1950.

Pour le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec), il est « extrêmement probable » que les activités humaines (exploitation de combustibles fossiles, intensification des activités agricoles, déforestation...) sont la cause principale du réchauffement observé depuis 1950 par les gaz à effet de serre

qu'elles libèrent dans l'atmosphère. Pour connaître l'évolution de la composition atmosphérique au cours du temps, les scientifiques combinent des mesures directes et l'analyse de l'air ancien piégé dans les glaces de l'Antarctique. Résultat : ils observent une élévation de la teneur en CO₂ qui coïncide avec le début de la révolution industrielle et qui s'accompagne d'une diminution de l'oxygène, ce qui démontre que le dioxyde de carbone supplémentaire est produit par des processus de combustion, donc par les activités humaines. Autre argument en faveur de l'action humaine sur le climat : les simulations climatiques basées sur les seuls facteurs d'origine naturelle (variations solaires et éruptions volcaniques) ne parviennent pas à expliquer le réchauffement observé depuis les années 1950. Le rôle des gaz à effet de serre est donc dominant dans l'élévation du thermomètre mondial bien qu'il soit partiellement compensé par l'effet refroidissant de certaines particules de pollution produites elles aussi par les activités humaines.

Parole d'expert

Valérie Masson-Delmotte

Directrice de recherche (CEA) au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
« *Quand on regarde la composition de l'atmosphère aujourd'hui, on constate une augmentation très forte de la teneur des principaux gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone ou le méthane. On peut le comparer à ce qu'on mesure dans les glaces polaires sur environ 800 000 ans, et on voit effectivement qu'on est sur une rupture. On est complètement sorti de la gamme des variations « glaciaire/interglaciaire » pour ces gaz. La teneur en dioxyde de carbone est aujourd'hui autour de 400 ppm dans l'atmosphère, soit 40 % de plus que le niveau normal d'une période interglaciaire. C'est un niveau qu'on a connu à l'échelle géologique, par exemple pendant les phases chaudes du Pliocène, il y a environ 3 millions d'années, et qui correspondait à un climat plus chaud qu'aujourd'hui de l'ordre de 2 à 4 degrés, avec un niveau des mers beaucoup plus élevé. Le cycle du carbone global est complètement perturbé par l'action de l'homme. Par rapport à nos rejets de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, l'océan en absorbe à peu près un quart, la végétation et les sols à peu près un quart, et chaque année la moitié de nos rejets s'accumule dans l'atmosphère. On voit donc que ce cycle est dominé par notre action, notamment la consommation d'énergies fossiles, la déforestation et enfin la production de ciment, qui sont les trois grandes activités humaines sources de dioxyde de carbone. En ce qui concerne la concentration en méthane dans l'atmosphère – en importance, le deuxième gaz à effet de serre ajouté par les activités humaines – on en est à plus de deux fois et demi le niveau naturel. Il n'y a donc aucun doute que cette évolution de la composition atmosphérique est pilotée par nos activités industrielles et agricoles, pour faire simple. Pour l'instant, ce changement n'en est qu'à son début, puisque le climat n'a pas encore fini de réagir à l'effet de serre supplémentaire qu'on a ajouté dans l'atmosphère. Quand on regarde les évolutions futures possibles,*

on envisage un réchauffement de l'ordre de 2 degrés à 4 ou 5 degrés à l'horizon 2100. Ce réchauffement – plus de 2 degrés en 2100 – serait vraiment exceptionnel par rapport à l'évolution passée du climat. »

L'air piégé des glaces

800 000 ans d'analyse du CO₂ et de la température dans la glace de l'Antarctique montrent que, parallèlement au réchauffement global de la planète, la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmenté de 40% depuis 1750 du fait des activités humaines. Les glaciologues sont en effet capables de repérer dans l'air piégé des glaces la signature d'une combustion de matières fossiles. Le consortium européen d'études des carottes de glace vise à étendre cet enregistrement sur plus d'un million d'années. Pour cela, le projet français Subglacior développe un nouveau type de carottier-sonde, avec une technologie laser.

Premier gaz incriminé : le CO₂

Le dioxyde de carbone représente plus de la moitié des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) induites par les activités humaines.

Les activités humaines rejettent différents gaz à effet de serre dans l'atmosphère : dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), oxyde nitreux (N₂O), ozone (O₃), HCFC (substitués des CFC interdits par le protocole de Montréal depuis 1987)... Le CO₂ est produit par la combustion des matières fossiles ou par les feux de forêts. Le CH₄ est issu des rizières, de la digestion des ruminants ou des pertes lors de l'extraction, du transport ou de l'utilisation du gaz naturel. Le N₂O est rejeté par certains processus industriels et par la transformation des engrais azotés par les sols, et l'O₃ est issu de polluants produits par le transport, le chauffage ou certaines industries. Les CFC, quant à eux, qui restent encore présents dans l'atmosphère, ont longtemps été utilisés comme gaz réfrigérants ou propulseurs. Le CO₂ représente plus de la moitié des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) induites par les activités humaines, loin devant le CH₄ (15%), l'O₃ (12%), les CFC (11%) et l'oxyde nitreux (5%). C'est pourquoi on mesure l'effet des autres GES en équivalent CO₂. De plus, le CO₂ qui s'accumule dans l'atmosphère a une longue durée de vie (jusqu'à plusieurs milliers d'années) : 20% au moins des rejets actuels auront encore un effet dans l'atmosphère dans 1 000 ans. Ce qui n'est pas le cas du méthane : il a un pouvoir de réchauffement 23 fois plus important que le dioxyde de carbone mais sa durée de vie est beaucoup plus courte (10 à 20 ans). Le CO₂ est donc le principal responsable de l'effet de serre induit par les activités humaines (« forçage radiatif » de 1,7 watt/m² sur un total de 2,3 watts/m²).

Des forêts qui s'amenuisent...

Dans le monde, les feux de forêts et la déforestation (en particulier, la destruction massive des forêts tropicales) comptent pour 11% des rejets de gaz à effet de serre

dans l'atmosphère. C'est la deuxième source d'émission de dioxyde de carbone, après la combustion des matières fossiles. D'une part, du CO₂ est dégagé lors des incendies ; d'autre part, les végétaux détruits ne jouent plus leur rôle majeur d'absorption du CO₂ par photosynthèse.

Charbon ultra polluant

Le charbon est la plus polluante des matières fossiles : sa combustion génère 43% des émissions mondiales de CO₂, suivi par le pétrole (33%) et le gaz naturel (18%). La Chine représente à elle seule près de la moitié de la consommation mondiale de charbon. En Europe, c'est l'Allemagne qui consomme le plus de charbon pour son électricité, devant la Pologne et la Grande-Bretagne.

Sommes-nous entrés dans l'ère de l'Anthropocène ?

Pour certains scientifiques, dont le Prix Nobel de chimie néerlandais Paul Crutzen, nous aurions quitté l'ère géologique de l'Holocène (commencée il y a environ 11 700 ans) pour entrer dans celle de l'Anthropocène, où l'Homme, par son mode de vie, serait devenu le principal facteur de modification de l'environnement. Chargé de statuer sur la question, un comité de scientifiques rendra son verdict en 2016.

3

Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'évolution du climat

Pour comprendre le fonctionnement de la machine climatique et prédire l'évolution du climat à venir, les centres de recherche sur le climat développent des modèles numériques, basés sur des programmes informatiques, qui permettent de simuler dans le temps et dans l'espace la circulation en 3D de l'atmosphère, de l'océan et l'ensemble de leurs caractéristiques (température de l'air ou de l'océan, vents, précipitations, humidité...). Ces modèles – il en existe une quarantaine dans le monde dont deux en France – doivent encore être améliorés, mais ils permettent déjà de prévoir les grandes tendances. Résultat : si les activités humaines se poursuivent au rythme actuel, on s'attend à un réchauffement jusque quatre fois plus rapide ce siècle que le précédent, une montée du niveau des mers pouvant aller jusqu'à un mètre d'ici à 2100, certaines régions du monde risquant d'être submergées... Sans compter les effets destructeurs d'évènements météorologiques extrêmes plus intenses et les pertes d'écosystèmes marins et terrestres. Seule une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre permettrait de contenir le réchauffement à un niveau tolérable pour la planète en terme d'impacts.

Les projections des climatologues

Il existe une quarantaine de modèles dans le monde, dont deux en France. Ce sont les seuls outils permettant de prédire l'évolution du climat futur.

Pour comprendre le fonctionnement de la machine climatique et prédire l'évolution du climat à venir, les scientifiques réalisent des modèles numériques, basés sur des programmes informatiques, qui permettent de simuler dans le temps et dans l'espace divers paramètres (température de l'air, de l'océan, vent, humidité, précipitations...). La modélisation du climat passe par une mise en équation des phénomènes climatiques à partir de lois physiques. La mécanique des fluides, par exemple, permet de décrire mathématiquement les vents et les courants marins. Initialement élaborés pour la prévision du temps, les modèles de circulation générale de l'atmosphère ont été progressivement enrichis. Aujourd'hui, les modèles dits du système Terre prennent également en compte la composition de l'atmosphère (gaz à effet de serre, aérosols...), les océans, les sols et la dynamique de la végétation, ainsi que le cycle du carbone. Il existe une quarantaine de modèles dans le monde, dont deux en France*. Pour développer de tels outils de prévision, les climatologues doivent faire face à de nombreuses difficultés : par exemple, la diversité d'échelles des phénomènes rencontrés ou la complexité des interactions entre les divers composants de l'environnement. D'où parfois des résultats qui diffèrent selon les modèles. Les climatologues préfèrent donc parler de projections climatiques plutôt que de prévisions lorsqu'ils annoncent les résultats de leurs modèles. Pour l'heure, il s'agit des seuls outils permettant d'évaluer les risques climatiques futurs.

* Les modèles du Centre national de recherches météorologiques et de l'Institut Pierre Simon Laplace.

Une planète virtuelle

Comme toute modélisation numérique, celle des climats terrestres repose sur un découpage ou « maillage » de la zone étudiée en sous-parties de 100 x 100 km. Ces mailles sont encore trop larges pour simuler des micro-processus, comme la formation des nuages ou le transport des aérosols, qui ne peuvent donc être représentés de façon explicite. Néanmoins, pour prendre en compte leur influence à grande échelle sur le climat, les chercheurs passent par une méthode empirique, dite de « paramétrisation ». Celle-ci constitue la plus grande source d'incertitude des modèles.

Des supercalculateurs de plus en plus puissants

La prévision du climat nécessite des calculs beaucoup plus lourds que celle de la météo, qui suit uniquement l'évolution de l'atmosphère. La capacité des ordinateurs actuels permet de descendre à une précision de 8 kilomètres pour les modèles météorologiques et de 100 kilomètres pour les modèles climatiques. Il faut pratiquement une année de calculs pour modéliser le climat sur 2 000 ans. L'accroissement futur des puissances de calcul devrait permettre d'affiner le maillage et d'effectuer des simulations plus rapidement.

Les modèles sont-ils fiables ?

Les modèles sont soumis à des séries de tests pouvant aller jusqu'à vérifier leur capacité à reproduire le climat d'autres planètes.

Il y a plusieurs façons de s'assurer de la fiabilité d'un modèle climatique : on le confronte aux observations disponibles (stations météorologiques, bouées Argo, mesures satellitaires...) ; on évalue sa capacité à reproduire les caractéristiques saisonnières du climat dans chaque région (moussons tropicales, englacement de l'Arctique en hiver...) ou les tendances récentes du climat observé (réchauffement global). On le teste aussi dans un contexte très différent du climat actuel, soit en vérifiant qu'il est capable de reproduire des climats passés, comme les périodes glaciaires ; soit en le testant sur d'autres planètes du Système solaire, comme Mars ou Vénus. Les résultats des modèles sont ensuite déposés dans des bases de données accessibles à tous les chercheurs et font l'objet de vérifications au-delà de la communauté des modélisateurs. Certains résultats sont retrouvés dans toutes les simulations et les scientifiques leur accordent un haut degré de confiance (par exemple, le réchauffement en Arctique) ; d'autres sont très différents d'un modèle à l'autre, et donc plus incertains. Ainsi, la façon de prendre en compte les nuages conduit, pour un même scénario d'émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines, à une estimation du réchauffement global qui peut varier d'un facteur 2. Les modèles doivent donc encore être améliorés. Mais ils permettent déjà de prévoir les grandes tendances du changement climatique sans que l'on sache précisément où, quand et avec quelle amplitude les impacts se feront sentir.

Le double jeu des nuages

Les nuages représentent une source d'incertitude importante dans la prévision du changement climatique : outre le fait qu'il est difficile de les modéliser, ils peuvent, selon leur altitude, leur épaisseur ou leur forme, avoir un effet de serre réchauffant mais parfois aussi un effet parasol qui refroidit l'atmosphère. Il est donc important de mieux comprendre leurs mécanismes de formation. C'est tout l'enjeu des mesures effectuées par certains satellites : au sein de la constellation de satellites Aqua Train, le laser de Calipso et le radar de Cloudsat permettent désormais d'observer les nuages en trois dimensions.

Le dégel du pergélisol

Ce sol gelé en permanence qui couvre un cinquième de la surface terrestre (90 % du Groenland, 80 % de l'Alaska, 50 % du Canada et de l'ex-Union soviétique) commence à se réchauffer. Or, en dégelant, il pourrait libérer dans l'atmosphère du méthane et du dioxyde de carbone, ce qui pourrait amplifier le réchauffement climatique. Des chercheurs de huit laboratoires français et canadiens* suivent donc de près l'évolution du pergélisol.

*Projet ATP (Acceleration of Permafrost Thaw by Snow-Vegetation Interactions)

Dérèglement climatique en vue

Si l'exploitation des énergies fossiles se poursuit au rythme actuel, les projections des climatologues annoncent un réchauffement de 4°C supplémentaires d'ici à 2100. Depuis 2010, les climatologues travaillent sur quatre scénarios de concentrations de gaz à effet de serre (dits RCP : Representative Concentration Pathways) pour les décennies à venir. Résultat : les modèles du climat montrent que l'ampleur du réchauffement global futur sera proportionnelle au cumul des rejets de gaz à effet de serre dus aux activités humaines. Si dans tous les scénarios le réchauffement global est relativement comparable durant les trente prochaines années (réponse inéluctable à l'impact déjà produit par les activités humaines sur le climat), de grandes différences apparaissent par la suite. Dans le cas du scénario RCP 2.6, qui correspond à une réduction très forte des émissions de gaz à effet de serre, la température va encore augmenter de 1°C d'ici à 2050, puis se stabiliser. Le niveau des mers augmentera de 40 centimètres d'ici à 2100 et la banquise arctique n'aura pas disparu en été. À l'inverse, dans le cas du scénario le plus élevé, RCP 8.5, qui correspond à la poursuite de l'exploitation croissante des énergies fossiles comme c'est le cas aujourd'hui, les modèles des climatologues annoncent un réchauffement jusque quatre fois plus rapide ce siècle que le précédent (4°C supplémentaires d'ici à 2100, voire 6°C en 2200 et 8°C en 2300), une montée du niveau des mers pouvant aller jusqu'à 1 mètre d'ici 2100, et un océan Arctique libre de glace en été.

Des cyclones de plus en plus violents

En seize mois, deux archipels du Pacifique ont été victimes de cyclones d'une puissance exceptionnelle : les Philippines en novembre 2013 (bilan : 7 000 morts et une partie du territoire philippin rasée) et le Vanuatu en mars 2015, avec des rafales de plus de 300 km/h. Selon les projections des climatologues, la proportion de ce type de cyclones, très intenses, devrait augmenter avec le réchauffement climatique. Aujourd'hui, les pertes économiques dues aux catastrophes naturelles sont estimées, selon l'Onu, entre 240 et 290 milliards d'euros par an.

Parole d'expert

Christian de Perthuis

Professeur d'économie (Université Paris Dauphine), directeur scientifique de la chaire Économie du climat

« On sait que, si on poursuit les trajectoires actuelles d'émissions, à la fin de ce siècle nous risquons de nous retrouver avec une hausse moyenne du niveau de la mer comprise entre 60 centimètres et un mètre. Un mètre d'augmentation du niveau de la mer, qu'est-ce que ça veut dire pour l'économie ? Aujourd'hui, dans le monde, vous avez à peu près la moitié de la population qui vit sur des zones littorales. En Asie, vous avez 350 millions de personnes qui vivent sur des deltas. Nous essayons donc de mesurer le coût que représenterait, pour la société, cette hausse du niveau de la mer.

Les coûts sont de différentes natures. Vous avez d'abord des coûts qui sont des pertes de production. Le premier effet de l'augmentation du niveau de la mer, c'est en effet la salinisation des sols – d'où des pertes énormes en termes de production agricole. Il faut mesurer ces coûts. Deuxième point : si l'on veut se protéger contre l'augmentation du niveau de la mer, si l'on veut s'adapter à cet impact du climat, il faut construire des digues, organiser différemment la société. Ça coûte de l'argent. Ça peut même coûter très cher ! Imaginez : Manhattan est dans sa plus grande partie à moins d'un mètre du niveau de la mer. Vous imaginez ce que cela coûterait, de protéger Manhattan contre une hausse d'un mètre du niveau de la mer ? Et puis, si on est réaliste, on voit bien que cette augmentation du niveau de la mer va générer des migrations. Ces migrations auront un coût, car ce ne seront pas du tout des migrations choisies, mais des migrations obligées. Le premier travail des économistes, c'est de mesurer le coût futur des dommages climatiques. Et c'est évidemment plein d'incertitudes ! Nous faisons donc des hypothèses en supposant que des actions d'adaptation seront menées, et qu'il n'y aura pas de conflits nouveaux générés par le changement climatique. Mais les choses pourraient aller de façon beaucoup plus dramatique que ce que nous incluons dans les modèles. À mesure que la science progresse – aussi bien la science du climat que les analyses économiques que l'on peut faire à partir du climat – on découvre que ces effets sont extrêmement complexes et incertains. Mais l'incertitude ne doit pas être un justificatif de l'inaction. »

Petits effets, grandes conséquences

Le réchauffement de la planète provoque des réactions en chaîne qui vont encore l'amplifier, avec des effets destructeurs pour l'environnement et les humains.

Dans le 5^e rapport du Giec, la liste est longue des risques associés à la poursuite du réchauffement global de la planète : disparition de la banquise arctique durant l'été, acidification* des océans, migration ou extinction d'espèces, baisse des rendements agricoles, insécurité alimentaire, augmentation des épidémies, apparition de maladies (comme le paludisme) dans de nouvelles zones, diminution des ressources en eau, événements météorologiques encore plus extrêmes, élévation du niveau des océans, augmentation des catastrophes naturelles, flux migratoires nouveaux... Une diversité de conséquences impressionnante au regard d'une élévation du thermomètre mondial pouvant sembler modeste (4°C d'ici à 2100, si l'on continue sur la trajectoire actuelle). Mais le réchauffement de l'atmosphère provoque des réactions en chaîne qui vont encore l'amplifier. En intensifiant les phénomènes d'évaporation, il va augmenter la concentration de vapeur d'eau (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère, ce qui ne fera que renforcer le réchauffement initial. De même, la fonte des glaces polaires et des glaciers va s'accélérer : les régions découvertes ne réfléchissant plus autant la lumière du Soleil (une surface enneigée réfléchit 80 % du rayonnement solaire contre 10 %, par exemple, pour une forêt), elles se réchaufferont à leur tour, participant un peu plus au déséquilibre climatique mondial.

* Terme adopté par les scientifiques qui correspond à une baisse du pH moyen de la surface des océans de 0,1 unité depuis l'ère industrielle. Ce pH est aujourd'hui de 8,1.

La sécurité alimentaire en question

Aujourd'hui, 805 millions de personnes souffrent de la faim dans le monde. Avec le dérèglement climatique, on pourrait en compter 600 millions de plus d'ici à 2080, selon le Programme des Nations unies pour le développement (Pnud). On s'attend en effet à une baisse de productivité des grandes cultures (blé, riz, maïs...) et à une augmentation des pertes de cultures causées par des événements météorologiques extrêmes (cf 5^e rapport du Giec). Avec un risque de hausse des prix alimentaires, qui rendra encore plus difficile l'accès des populations les plus pauvres à la nourriture.

L'Europe n'est pas épargnée

Les pays du nord sont eux aussi touchés par des événements météorologiques extrêmes. Depuis 2000, l'Europe a enregistré une dizaine de records de canicules (celle de 2003 a provoqué la mort de 35 000 personnes en Europe dont 15 000 en France), sécheresses ou inondations. Par exemple, l'inondation dévastatrice qui a frappé le sud de la Grande-Bretagne durant l'hiver 2013-2014, la plus importante depuis le début des mesures météorologiques. Même s'il n'est pas certain que ces événements extrêmes soient directement imputables au changement climatique, il ne fait plus guère de doute que celui-ci aura pour effet de les rendre encore plus intenses.

Corail en péril en Australie

Symbolisant, année après année, l'état de sécheresse sévère que pourraient connaître certaines régions du monde si le réchauffement se poursuit au rythme actuel, l'Australie est emblématique d'un autre de ses effets : le blanchissement des coraux suite à l'élévation de la température de la mer. La Grande Barrière de corail a perdu la moitié de ses coraux en trente ans. Le réchauffement n'est pas seul en cause : les activités agricoles intensives le long de la côte et l'expansion des ports industriels pour l'exportation du charbon ont également un impact sur la qualité des eaux, et donc sur la Grande Barrière de corail.

L'acidification des océans testée en mer

Afin d'étudier l'impact de l'acidification des océans – due à une absorption croissante de CO₂ – sur la faune et la flore marines, une expérience inédite a été réalisée entre mai et novembre 2014 en mer Méditerranée (projet eFOCE) : des chercheurs ont « piégé » au fond de la mer, dans des boîtes reproduisant différentes conditions de pH, des organismes marins et ont suivi leur développement. Les premiers résultats montrent que les posidonies (plantes aquatiques) sont tolérantes au niveau de pH prévu pour la fin du siècle (-0,3 unité pH). L'effet sur les autres organismes (épiphytes, benthos, bactéries...) est en cours d'analyse.

4

Face au défi climatique, la planète en quête de solutions

Que peut-on faire pour lutter contre le changement climatique, en atténuer ses effets ou s'y adapter ? Au plan international, en Europe et en France, se donne-t-on réellement les moyens de réduire les rejets de gaz à effet de serre ? Quelles solutions technologiques et industrielles sont-elles envisagées ? Y a-t-il des mécanismes de régulation financière à mettre en place, comme la très débattue « taxe carbone » ? Quelles formes doivent prendre les transitions énergétique et agricole évoquées partout dans le monde ? Comment ne pas pénaliser les pays du Sud en plein développement ? La liste est longue des questions à prendre en compte pour tenir l'objectif que se sont fixé en 2009 les gouvernements des pays participant, sous l'égide de l'ONU, au Sommet mondial sur le climat à Copenhague : limiter le réchauffement climatique lié aux activités humaines à 2°C d'ici à 2100 (par rapport au niveau préindustriel). Pour cela, ils doivent conclure fin 2015 un accord universel de réduction des émissions de gaz à effet de serre destiné à prendre la suite du protocole de Kyoto, après 2020.

Objectif mondial : +2°C

Pour tenir leur objectif de limiter le réchauffement à 2°C d'ici à 2100, les États doivent s'engager dans des politiques climatiques fortes.

Contenir le réchauffement climatique sous les 2°C d'ici la fin du siècle (par rapport au niveau pré-industriel) : tel est l'objectif que se sont fixé les gouvernements participant au Sommet mondial sur le climat à Copenhague en 2009. Pour tenir cet objectif, les projections des climatologues montrent qu'il ne faudrait pas ajouter plus de 1 000 gigatonnes* de dioxyde de carbone aux 2 000 Gt déjà émises dans l'atmosphère par les activités humaines depuis 1750 (dont la moitié depuis 1970). Or, au rythme actuel, ce seuil critique de CO₂ sera atteint d'ici trente ans. L'objectif affiché par les États peut donc s'avérer rapidement hors de portée si rien n'est fait pour diminuer drastiquement (de 40 à 70% d'ici à 2050) les émissions de gaz à effet de serre. Les solutions, qui existent dans tous les secteurs, doivent être soutenues par des politiques climatiques fortes. Le seul accord international existant à ce jour est le protocole de Kyoto, qui n'implique d'objectifs contraignants que pour les pays développés et qui s'achève en 2020. L'enjeu de la COP21 (21^e Conférence des Parties de la Convention climat de l'ONU) qui se tient à Paris du 30 novembre au 11 décembre 2015 est de conclure un accord universel et ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, destiné à prendre la suite du protocole de Kyoto. Tous les pays participant à la COP21 ont l'obligation de présenter leurs engagements en amont de la Conférence. L'Union européenne (28 pays, émettrice de 9% des GES mondiaux) a annoncé une diminution de ses émissions de GES de 40% d'ici à 2030 par rapport à 1990 avec, dans son mix énergétique, 27% d'énergies renouvelables et 27% d'économies d'énergie.

*1 gigatonne de CO₂ = 1 milliard de tonnes de CO₂ = 10⁹ tonnes

Mobilisation citoyenne

Le 21 septembre 2014, la Marche mondiale pour le climat a rassemblé près de 600 000 personnes dans 158 pays, dont la moitié dans les rues de Manhattan à New York où, quelques jours plus tard, se tenait le sommet des chefs d'État et de gouvernement sur le climat, organisé par Ban Ki-moon, le secrétaire général des Nations unies. Parallèlement, une pétition en ligne (sur le site de l'ONG Avaaz) pour une planète avec 100% d'énergies renouvelables d'ici à 2050 a été signée par 2 millions de citoyens dans le monde. À l'approche de la COP21 différentes initiatives voient le jour qui entendent influencer sur les décisions prises à Paris...

Chine - États-Unis : les premiers pas

En novembre 2014, la Chine et les États-Unis – qui représentent à eux seuls plus de 40% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) – ont fait une déclaration commune sur le climat. La Chine, où l'ampleur de la pollution atmosphérique devient un problème majeur de santé publique, s'est engagée à ce que ses rejets de gaz à effet de serre atteignent un maximum autour de 2030, puis diminuent.

Les États-Unis prévoient de réduire de 26-28% leurs émissions d'ici à 2025 (par rapport à 2005). Un premier pas vers l'accord de Paris et son objectif des 2°C ?

Le droit au développement pour tous

La population mondiale a plus que doublé depuis 1960, passant de 3 à 7,3 milliards d'habitants aujourd'hui. Elle devrait atteindre 9 milliards en 2050. Cette explosion démographique s'accompagne d'une urbanisation croissante et d'une hausse des besoins énergétiques et alimentaires. Selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), il faudra augmenter la production alimentaire de 70% au cours des 35 prochaines années. De nouveaux modèles agricoles vont devoir être envisagés si l'on veut satisfaire ces besoins tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture.

Parole d'expert

Laurence Tubiana

Ambassadrice chargée des négociations sur le changement climatique, représentante de la France pour la COP21

« Si je regarde ce qui se passe du côté des pays développés, nous sommes quand même entrés dans une décarbonation des économies. Elle est certes lente, mais elle est en train d'arriver ! Je vois que la Chine, depuis 2007, reconnaît que le changement climatique est un vrai problème et met progressivement en place des politiques de plus en plus sévères pour diminuer la consommation de charbon. Donc oui, ça agit. Ça n'agit peut-être pas de la façon prévue, on n'a peut-être pas l'impression que ces grandes négociations servent à quelque chose... Mais pour les avoir pratiquées, je sais ce qui se passe lors de ces négociations. Les pays apprennent. Ils apprennent deux choses : d'une part, ils apprennent que c'est possible, puisque d'autres pays le font. Ils conçoivent que leurs intérêts nationaux étroits sont en fait menacés par ce phénomène collectif et global et qu'il faut lutter contre lui. En même temps, ils ne peuvent pas lutter seuls. C'est un apprentissage incroyablement fort ! Si nous ne faisons pas cet exercice de remettre sur la table, sans arrêt et depuis de nombreuses années, cette convention sur le climat, nous n'aurions aucun résultat, parce que tout le monde serait assez démuni, voire désintéressé par le sujet. C'est toujours l'idée de l'objectif qui concentre l'attention. Je prends un autre exemple : ces experts, qui disent que les réunions internationales ne servent à rien, pourraient comparer où on en était en 1948 sur les échanges internationaux et où on en est aujourd'hui. Ça n'a été ni facile, ni rapide, mais toujours positif de libéraliser les échanges entre 1948 et, disons, la fin de cette grande phase de libéralisation des échanges qu'a été la fin des années 1990. Aujourd'hui, beaucoup d'économies ont ouvert leurs frontières. Les échanges commerciaux ont explosé. On a mis plus de 40 ans à progressivement arriver à ces accords qui reconnaissent les droits, mais aussi les obligations des pays les uns envers les autres. Le climat, c'est la même chose.

Je ne vois pas pourquoi ça a marché pour l'économie mondiale et ça ne marcherait pas pour le climat. On a moins de 20 ans d'expérience, d'une certaine manière, pour ceux qui s'occupent sérieusement du climat, et on a beaucoup plus de 40 ans d'expérience pour la libéralisation des marchés financiers ou la libéralisation des échanges. On est dans des problèmes difficiles et complexes, et je ne peux pas dire que ces sommets internationaux ne servent à rien. »

Donner un prix au carbone

Afin de rendre les énergies renouvelables davantage compétitives, une solution, d'un point de vue économique, serait de fixer un prix dissuasif au carbone.

Pour un grand nombre d'économistes, le moyen le plus efficace pour réduire d'une manière drastique les émissions de gaz à effet de serre (GES) est de fixer un prix au carbone. L'objectif est de faire payer à chaque émetteur de CO₂ le coût des dommages associés à ses rejets. Actuellement, les prix du charbon, du pétrole et du gaz reflètent, outre l'état du marché, les raretés relatives de leurs réserves sous terre et les contraintes de leur stockage, transport et distribution. Mais ils n'intègrent pas leur impact sur l'atmosphère qui joue, via l'effet de serre, un rôle essentiel dans l'équilibre du climat. L'usage de l'atmosphère est considéré comme gratuit comme s'il s'agissait d'un réservoir infini pouvant accueillir tout le CO₂ émis, ce qui n'est pas le cas. Pour limiter le réchauffement à 2°C d'ici à 2100, il faudrait laisser sous terre 80 % des réserves de charbon, la moitié de celles de gaz et un tiers des réserves de pétrole*... Si l'on donne un prix au carbone à l'échelle planétaire, les énergies renouvelables deviendront davantage compétitives**. Les expériences menées jusqu'à présent (marché d'échanges des quotas d'émissions de GES, taxe carbone) n'ont pas été totalement concluantes, en particulier parce qu'elles étaient soumises au volontariat des États et qu'elles ne concernaient que les émissions de gaz à effet de serre de l'industrie lourde (soit 40 % des GES). D'où la recommandation des économistes : pour que ce prix du carbone soit réellement un levier pour la transition énergétique, il doit être universel et dissuasif.

* Étude de l'University College de Londres publiée le 8 janvier 2015 dans la revue *Nature*

** Dans son plan d'action pour une transition énergétique mondiale (septembre 2014), l'ancien vice-président de la Banque mondiale, Nicholas Stern, propose notamment d'arrêter les subventions annuelles accordées aux énergies fossiles, qui sont cinq fois plus subventionnées que les renouvelables.

Une nouvelle ressource fossile

Avec une exploitation croissante du gaz de schiste, les États-Unis délaissent peu à peu le charbon. Celui-ci est en partie exporté en Asie et en Europe depuis les mines américaines. L'exploitation du gaz et du pétrole de schiste – qui nécessite des investissements massifs et qui, par ailleurs, pose d'autres problèmes environnementaux – représente une nouvelle source fossile. Elle a permis aux États-Unis de devenir, depuis 2014, le premier producteur mondial de pétrole, juste devant l'Arabie Saoudite.

Vers un habitat moins énergivore

Pour réduire la consommation d'énergie du secteur du bâtiment, qui représente en France 42 % de l'énergie consommée, deux approches peuvent être développées : la rénovation thermique des bâtiments existants (la France s'est fixé comme objectif de rénover énergétiquement 500 000 logements par an à compter de 2017), et la construction de nouveaux habitats dits à énergie positive. Ceux-ci produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment pour leur fonctionnement, grâce notamment à des panneaux solaires photovoltaïques en toiture, une isolation thermique renforcée, une consommation d'énergie limitée pour les appareils ménagers.

Transition énergétique made in France

La loi entérine une réduction de 75 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050, qui passe notamment par un développement des énergies renouvelables.

Le projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte a été définitivement adopté le 22 juillet 2015. Avec des objectifs ambitieux en terme de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), de baisse de la consommation d'énergie ou de développement des énergies renouvelables. La loi vise en effet une diminution des rejets de GES de 40 % en 2030 et de 75 % en 2050, par rapport au niveau de 1990 ; une réduction de moitié de la consommation énergétique finale d'ici à 2050 (en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030) et une baisse de la consommation primaire* d'énergie fossile de 30 % pour 2030. Une hausse de la taxe carbone a été également entérinée, avec un objectif de 100 euros la tonne en 2030, contre 14,5 euros aujourd'hui. La part du nucléaire dans la production d'électricité doit être réduite de 75 % à 50 % à l'horizon 2025 et celle des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie portée à 32 % en 2030, en développant notamment l'éolien, le photovoltaïque et la biomasse. Autres objectifs : disposer d'un parc immobilier dont l'ensemble des bâtiments seront rénovés en fonction des normes « bâtiment basse consommation », ou assimilé, à l'horizon 2050 ; et parvenir à l'autonomie énergétique dans les départements d'outre-mer en 2030. Des investissements annoncés comme créateurs d'emplois et de croissance économique.

* Consommation primaire d'énergie = consommation finale + pertes d'énergie subies lors de la production de l'énergie et de son acheminement

Électricité « 100 % renouvelable » ?

Selon une étude de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), dont les premiers résultats ont été rendus publics en avril 2015, la France aurait un potentiel d'énergie renouvelable trois fois supérieur à la demande électrique. Il faudrait pour cela développer fortement l'éolien terrestre, notamment avec des éoliennes adaptées à des régimes de vents plus faibles, et adapter le réseau électrique.

Quelle place pour le nucléaire ?

Développer le nucléaire pourrait être une option pour réduire les émissions de gaz à effet de serre mais de nombreux obstacles et risques freinent son déploiement.

Le secteur de l'énergie – de l'extraction de la ressource à la distribution finale de l'énergie en passant par le stockage et le transport – est celui qui, au niveau mondial, émet le plus de gaz à effet de serre (GES). Ses émissions se sont accrues de 3,1 % par an sur la période 2000-2010, contre 1,7 % par an sur la période 1990-2000. La grande majorité provient de la production d'électricité. Pour les réduire, une option pourrait être de développer l'électricité d'origine nucléaire, qui émet très peu de GES. Elle représentait 11% de la production mondiale d'électricité en 2012, contre 17% en 1993, en baisse donc ces dernières années. Plusieurs obstacles et risques freinent le déploiement de cette technologie : risques d'accidents dans les centrales nucléaires et problèmes de sécurité associés (cf Fukushima, 11 mars 2011), gestion des déchets, coût financier (notamment de la sûreté), risque de prolifération de l'arme nucléaire, sécurité d'approvisionnement des mines d'uranium, acceptabilité sociale... D'autres options existent pour réduire les émissions de GES du secteur de l'énergie : amélioration de l'efficacité énergétique des centrales à combustibles fossiles, remplacement du charbon par du gaz, développement des énergies renouvelables, captage et stockage du CO₂, réduction des consommations finales d'énergie par la sobriété et l'efficacité énergétiques.... Si les scientifiques délimitent le champ des possibles, les choix en matière énergétique, par leur retentissement sur les finances des États et leurs conséquences sur le mode de développement, sont éminemment stratégiques et donc du ressort du politique.

L'exception française... jusqu'à quand ?

Le parc nucléaire français, le deuxième plus important au monde après celui des États-Unis, arrive à un tournant : près de la moitié des 58 réacteurs nucléaires que comptent les 19 centrales auront atteint la limite d'âge (40 ans) entre 2019 et 2025. Ils devront être démantelés ou, si l'Autorité de sûreté nucléaire autorise leur prolongation, remplacés par des réacteurs de nouvelle génération (type EPR, le réacteur pressurisé européen de Flamanville). Dans tous les cas, la facture est importante, qu'il s'agisse de la mise aux normes de sécurité exigées pour les nouveaux réacteurs, de la gestion des déchets radioactifs ou du démantèlement des centrales.

Vivre avec le risque climatique

La lutte contre le changement climatique passe par des stratégies d'adaptation, en particulier dans les pays les plus pauvres.

Les impacts du réchauffement se font déjà sentir dans certaines régions du monde et, quelles que soient les politiques climatiques adoptées, il y aura inéluctablement une poursuite de la hausse du thermomètre mondial durant les prochaines décennies. Il est donc urgent, selon le Giec*, de s'adapter au changement climatique. Cela passe, par

exemple, par la construction d'ouvrages de protection (digues, abris anticycloniques...) ou l'évacuation des zones à risque, une gestion améliorée des ressources en eau pour la prévention du risque de sécheresse, une diversification des espèces cultivées, des assurances agricoles contre les aléas climatiques... Ces stratégies d'adaptation ont un coût que ne peuvent assumer les pays les plus pauvres, qui sont aussi les plus vulnérables au changement climatique. En 2009, les négociations internationales ont décidé de la mise en place d'un Fonds vert pour le climat qui serait abondé par les pays riches pour aider les pays en développement à lutter contre le réchauffement climatique, que ce soit par l'adaptation ou l'atténuation (réduction des émissions de gaz à effet de serre). Ce Fonds doit recevoir 10 milliards de dollars entre 2015 et 2018 (la France contribuant à hauteur de 1 milliard de dollars), une somme bien en deçà de l'objectif initial de 100 milliards de dollars annuels d'ici à 2020. Pour les experts du Giec, l'adaptation est indispensable mais elle doit s'ajouter à l'atténuation qui, elle seule, permettra de contenir le réchauffement de la planète. Au XXI^e siècle, les risques liés au dérèglement climatique dépendront donc des efforts d'adaptation et d'atténuation consentis par nos sociétés.

* 5^e rapport du Giec, 2^e volume publié le 31 mars 2014

S'adapter à la mer qui monte...

Des villes ou des îles flottantes pouvant accueillir des dizaines de milliers de personnes sont actuellement imaginées par des cabinets d'architectes. Objectif : s'adapter à la hausse du niveau des mers. Des constructions sur l'eau sont déjà testées aux Pays-Bas (pavillon flottant dans le port de Rotterdam). Des projets de villages amarrés et d'îlots de plaisance flottants sont à l'étude pour des régions très vulnérables comme les Maldives.

Enfouir le dioxyde de carbone

L'une des solutions pour réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère est de le récupérer à la source, dans les fumées des usines polluantes, et de le stocker dans le sous-sol. Cette technologie – dont les principaux obstacles sont le coût et la faisabilité de la séquestration souterraine du CO₂ – commence à se développer : le Canada et les États-Unis concentrent neuf des treize installations opérationnelles dans le monde. Par ailleurs, certains experts appellent à de nouvelles pratiques agricoles afin d'utiliser la capacité naturelle des sols à séquestrer le CO₂.

Vers un monde plus sobre ?

Par l'efficacité et la sobriété énergétiques, on pourrait réduire considérablement la consommation mondiale d'énergie et les rejets de gaz à effet de serre.

Toujours plus nombreux, les Terriens vont devoir relever simultanément deux défis majeurs : apprendre à maîtriser leur consommation, en particulier d'énergie, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), tout en permettant aux pays

pauvres et aux pays émergents d'accéder à un développement correspondant aux besoins de leur population. Pour rendre conciliables tous ces paramètres, une grande marge de manœuvre se trouve dans les politiques de sobriété et d'efficacité énergétiques associées au développement des énergies renouvelables. Dans tous les secteurs, des solutions moins énergivores existent : meilleure isolation des bâtiments (rénovation thermique), constructions bioclimatiques, développement des transports en commun, valorisation des déchets organiques (biogaz) pour se chauffer ou produire de l'électricité, cogénération (production conjointe de chaleur et d'électricité), moteurs électriques plus performants, circuits courts (privilégier les produits régionaux)... Il serait ainsi possible de réduire considérablement la consommation d'énergie dans les pays industrialisés et de remplacer progressivement les combustibles fossiles par des sources renouvelables. Dans ce nouveau contexte, si l'État conserve un rôle majeur, les usagers, architectes, urbanistes, constructeurs, entreprises, agriculteurs, collectivités locales et territoriales auront aussi un rôle déterminant. Reste à changer bon nombre d'habitudes et à se donner les moyens de permettre l'éclosion de cette nouvelle civilisation énergétique.

Méga solaire en Inde

L'Inde multiplie les parcs solaires. La plus grande centrale solaire du monde doit entrer en service en août 2016 à Rewa dans l'État du Madhya Pradesh. Elle sera dotée d'une capacité de 750 mégawatts et occupera une superficie de 1 500 hectares. Un record qui devrait être battu d'ici sept ans par une centrale solaire dont la capacité sera de 4 000 mégawatts et qui sera une nouvelle fois installée en Inde, dans l'État du Rajasthan*. L'Inde, dont un quart de la population n'a pas encore accès à l'électricité, bientôt leader mondial de l'énergie solaire ?

* *Scientific American*, 6 février 2014

Universcience, qui regroupe le Palais de la découverte et la Cité des sciences et de l'industrie, a pour ambition de faire connaître et aimer les sciences d'aujourd'hui ainsi que de promouvoir la culture scientifique et technique. Établissement public national, Universcience est subventionné par l'État (ministère de la culture et de la communication, ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche).

universcience.fr

Président : Bruno Maquart

Directrice générale déléguée : Mélanie Joder

Directrice adjointe des expositions : Dominique Botbol

Directeur des éditions et du transmédia : Claude Farge

Climat, l'expo à 360°

Textes : Isabelle Bousquet

Rédaction en chef : Alain Labouze

Conseillère scientifique : Valérie Masson-Delmotte

Cité des sciences et de l'industrie - Science actualités

Contact :

science-actualites@universcience.fr

© EPPDCSI - Octobre 2015.

© Photos de couverture (de haut en bas et de gauche à droite) : Narinder Nanu/AFP, Kadir van Lohuizen/NOOR, File/Stringer/Reuters, Moodboard/Corbis, AirPano.com