

Jean Jouzel
Anne Debroise

LE DÉFI CLIMATIQUE

OBJECTIF : 2°C !

DUNOD

Photographie de couverture : NASA

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--



© Dunod, Paris, 2014
5 rue Laromiguière, 75005 Paris
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-070527-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PROLOGUE

Maintenant, ou jamais : notre civilisation désormais mondialisée se trouve à un tournant de son histoire. Elle peut laisser faire, ou bien s'engager volontairement dans un nouveau type de relations avec la planète qui la porte et assure sa subsistance.

L'explosion démographique au xx^e siècle, associée à notre modèle économique de consommation de masse, nous ont conduits non seulement à utiliser les ressources naturelles de notre planète à une vitesse bien supérieure à celle de leur renouvellement, mais aussi à modifier son fonctionnement en profondeur. Le changement climatique en constitue le témoignage le plus flagrant.

« Et alors ? » pourrait-on nous rétorquer. « Pourquoi craindre le changement, n'est-il pas inhérent à la vie ? ». Parce que ce changement est aujourd'hui trop rapide pour que l'espèce humaine puisse s'y adapter sans souffrances. Il est désormais temps de vivre autrement, d'imprimer à nos sociétés un nouveau type de développement.

Parce qu'il n'y a pas d'autres issues pour l'espèce humaine, nous sommes persuadés que cette révolution est en marche. Certes, le mouvement n'est pas assez rapide, et son ampleur aujourd'hui trop limitée. Mais nous avons choisi d'interpréter les frémissements, les initiatives qui fleurissent ici ou là comme les signes d'un phénomène plus vaste qui se mettrait en mouvement doucement.

En 2013 et 2014, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) a produit son cinquième rapport. En vingt-cinq ans d'existence, cette organisation internationale a réussi à faire taire les incertitudes. La grande majorité des scientifiques du monde entier travaillant sur des problématiques climatiques s'accorde

aujourd'hui sur plusieurs constats : le climat de la Terre change, et va vers un réchauffement global de grande ampleur ; ce changement est dû, en grande partie, aux activités humaines ; l'évolution du climat va s'avérer néfaste pour la population humaine. Mais il conclut également qu'il est encore temps de renverser la vapeur. Il dresse des pistes qui vont nous permettre, non pas de revenir en arrière, mais d'avancer vers un monde plus sain qui préservera l'espèce humaine des conséquences les plus graves du changement climatique.

Ces rapports ne sont pas restés lettre morte. En 1992, une convention internationale a été rédigée pour engager les nations sur la voie du développement durable. Elle est aujourd'hui signée par 189 pays. Chaque année, ces signataires se retrouvent lors de conférences, appelées Conférences des parties (COP), pour adopter des politiques dans ce sens. Parmi elles, de nombreuses mesures concernent le climat et s'appuient sur les rapports du GIEC. Ces conférences ont ainsi accouché, en 1997, du protocole de Kyoto, qui posait les premières conditions, peu contraignantes, pour une stabilisation des émissions des gaz à effet de serre. Le prochain accord devra être plus ambitieux. Les simulations sont en effet édifiantes : ce n'est qu'en diminuant drastiquement les émissions à partir de 2020, au plus tard, que l'on peut encore espérer stabiliser le climat à un niveau tel que les conséquences du changement climatique resteront limitées et peu douloureuses. Une fois stabilisée, la température moyenne ne devra pas dépasser de plus de 2 °C celle qui régnait à l'ère pré-industrielle.

Nous avons donc les cartes en main. Nous, ce sont certes les politiques, les hommes et les femmes d'influence, les décideurs économiques, mais aussi les simples citoyens. Les citoyens ont en effet été les premiers à tenter de lutter contre le changement climatique. Heureusement, car le monde politique, lui, se contenterait bien de beaux discours.

Mais, curieusement, ce sont peut-être les initiatives venues du monde économique qui, en surfant sur une demande de l'opinion publique, vont changer la donne. Les citoyens, eux, ont pris conscience des effets du changement climatique au travers de nombreuses catastrophes qui se sont accumulées ces dernières années. À toute chose malheur est bon, dit-on. Les énergies renouvelables deviennent de plus en plus rentables, les initiatives vertes rencontrent un franc succès. Un succès auquel nous voulons croire.

I

LE TEMPS DES CERTITUDES

1

LE RÉCHAUFFEMENT EST SANS ÉQUIVOQUE

« Changement climatique » : le terme est apparu dans les médias et les conversations au cours des années 1980. Il a aussitôt suscité de l'inquiétude, que traduit l'expression, devenue courante, de « dérèglement climatique ». Car les Hommes n'ont pas oublié les périodes de disette liées, dans le passé, aux variations du climat.

Pour évaluer la réalité de ce changement annoncé, une organisation mondiale, le GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat), a été mise en place en 1988 sous les auspices de deux institutions onusiennes, le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement) et l'OMM (Organisation météorologique mondiale). Nous décrivons plus loin dans cet ouvrage le fonctionnement de cette expertise collective, qui a fourni la grande majorité des données sur lesquelles s'appuie ce livre. Rappelons ici simplement sa mission : établir un diagnostic sur le rôle potentiel des activités humaines sur le climat. C'est aujourd'hui chose faite.

Contrairement à ce qui transparaît parfois dans l'opinion, la très grande majorité des scientifiques du monde entier admet aujourd'hui que le climat mondial connaît un réchauffement global. Ses conséquences sont désormais visibles sur toute la planète. Depuis les années 1950, l'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, les neiges et les glaces de la planète ont fondu, le niveau des mers a monté. Certes, au cours des 4,5 milliards d'années de son existence, notre planète a connu des variations climatiques importantes.

Mais celles que nous vivons actuellement sont inhabituelles à plus d'un titre: elles sont particulièrement rapides, amples, et, pour la première fois de l'histoire de la Terre, elles n'ont pas grand-chose de naturel.

De la météorologie au climat

Difficile de tenter de vous rappeler le climat de votre enfance pour le comparer avec celui que vous connaissez actuellement. Contrairement à la météorologie, le climat n'est pas une expérience individuelle. D'abord, parce que nos souvenirs personnels déforment la réalité. Ensuite, et surtout, parce qu'il y a un fossé entre la météorologie que nous expérimentons chaque jour et le climat.

La météorologie, c'est la science du temps qu'il fait à un instant précis, dans un lieu donné. Elle liste un certain nombre de paramètres décrivant ce temps: la température, la pression atmosphérique, l'humidité de l'air, les vents, les nuages, les tempêtes, etc. La climatologie, elle, s'appuie sur la moyenne de ces paramètres pour donner une description du temps sous forme de statistiques. Elle étudie le temps moyen et sa variabilité sur des périodes allant de plusieurs mois à plusieurs milliers d'années, et explique les différences climatiques d'un endroit à l'autre de la planète.

Le constat: ça chauffe !

Le GIEC a livré son dernier diagnostic du changement climatique le 27 septembre 2013. Ce diagnostic confirme, et précise, les chiffres publiés lors de ses quatre rapports précédents, en 1990, 1995, 2001 et 2007.

Depuis 1901, les températures mesurées à la surface de la Terre ont, en moyenne, globalement augmenté. Entre 1901 et 2012, cette augmentation affiche désormais 0,89 °C. Le réchauffement se répartit irrégulièrement au cours de la journée. Ce ne sont pas tant les températures de la mi-journée qui montent, mais plutôt les températures de la nuit qui ne baissent pas. Les minima de températures journalières ont par exemple augmenté deux fois plus vite que les maxima entre 1950 et 1979. Bref, l'écart de température entre la nuit et le jour a diminué à cette période puis s'est maintenu constant.

Dans la plupart des régions, les nuits très froides (les nuits de gel en France) se font rares, tandis que le nombre de nuits très chaudes augmente. Et les canicules estivales se font plus fréquentes et/ou plus longues dans de grandes zones d'Europe, d'Asie ou d'Australie. La France garde le souvenir de l'été caniculaire de 2003. Des événements tout aussi exceptionnels ont marqué les États-Unis en 2013.

C'est dans les régions boréales que l'élévation de température est la plus forte. L'Arctique se réchauffe deux fois plus vite que la moyenne du globe. En soixante ans, les hivers d'Alaska ont gagné environ 4 °C.

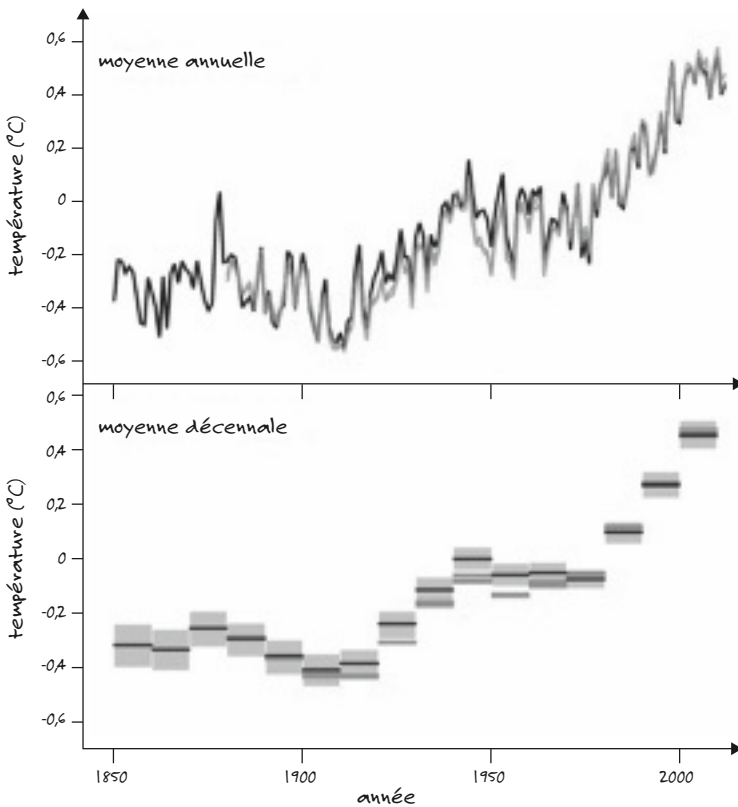


Figure 1.1 Différence des températures moyennes en surface par rapport à la période de référence 1961-1990

En haut : moyenne annuelle tirée de trois ensembles de données. En bas : moyenne décennale avec une estimation de l'incertitude. Adapté du 5^e rapport du GIEC (Groupe I).

Enfin, il n'y a pas que la terre qui s'échauffe. Le phénomène a peut-être échappé à tous les baigneurs de l'été, mais les chiffres l'attestent : les océans du monde entier se sont réchauffés depuis 1970. Ce réchauffement est assez peu perceptible, sauf si vous avez une peau de princesse : il se chiffre à 0,1 °C tous les dix ans depuis 1970 dans les premiers 75 m. Au-delà de 700 m, la variation de température est beaucoup plus difficile à estimer...

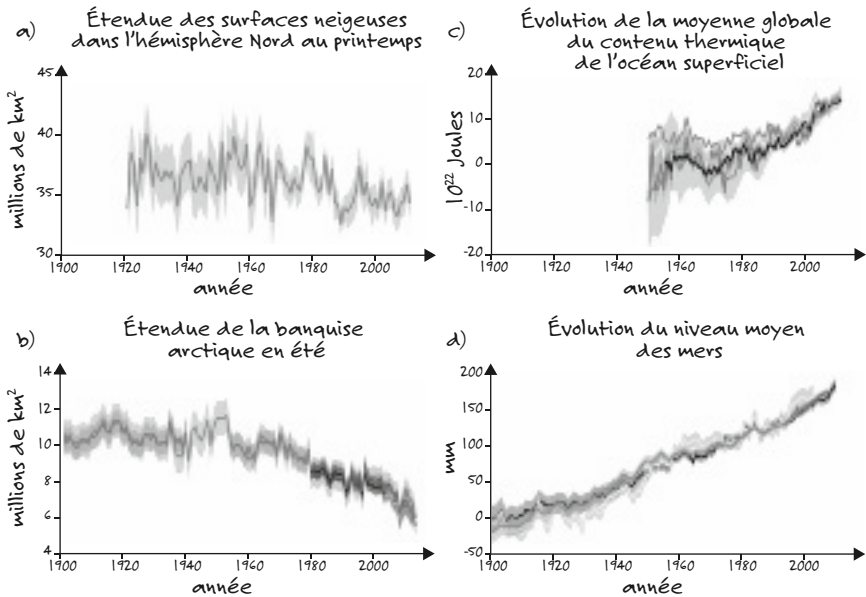


Figure 1.2 Le réchauffement climatique se manifeste dans différentes composantes du système climatique. Adapté du 5^e rapport du GIEC (Groupe I)

À l'origine de ces chiffres : les réseaux de mesure

Une approche scientifique et rigoureuse du climat ne peut se faire sans observations : température, précipitations, pression atmosphérique et vents... Des données désormais abondantes. Mais pour donner une vision statistique juste de l'évolution récente du climat, encore faut-il disposer de séries de mesures étalées sur de longues périodes de temps, et qu'elles soient comparables entre elles. La mise au point de tels dispositifs ne s'est pas faite en un jour.

En France, le premier réseau a été financé par la Société royale de médecine à la fin du XVIII^e siècle. Il a fallu qu'en 1854, la flotte française engagée dans la guerre de Crimée soit dévastée par une tempête pour que le service météorologique de l'Observatoire de Paris, tout nouvellement dirigé par Urbain Le Verrier, commence à télégraphier des données météorologiques. En 1863, grâce à un nouveau réseau d'observateurs dispersés sur la France, les premières prévisions météorologiques sont envoyées par le télégraphe. Des initiatives du même genre ont été prises de manière disparate en Angleterre, en Allemagne, en Russie, aux États-Unis. Puis, progressivement et essentiellement au début du XIX^e siècle, des services météorologiques nationaux se sont mis en place dans chacun de ces pays.

Les premiers amateurs de météorologie

«Un changement de notre climat se met en place très sensiblement... La chaleur et le froid deviennent tous deux très modérés...».¹ De quand date ce constat? De plus de deux siècles: il figure dans un écrit de Thomas Jefferson daté de 1785. À l'époque, le réchauffement climatique était gage de progrès. Pour de nombreux intellectuels américains, le climat du Nouveau Monde devenait plus clément au fur et à mesure de l'installation des colons, qui remplaçaient les forêts sauvages par des champs cultivés. Dans une lettre datée de 1763, Benjamin Franklin expliquait que «les terres éclaircies absorbent plus de chaleur et font fondre la neige plus rapidement».

Pour en apporter la preuve, de nombreux Américains patriotes inaugurent un nouveau passe-temps: les mesures météorologiques. Hélas, certains placent leur thermomètre au soleil, d'autres à l'ombre, d'autres près de leur habitation. Leurs instruments sont peu fiables et leurs données inutilisables.

À partir du XIX^e siècle, le développement des instruments de mesure climatique change la donne. Tout du moins partiellement. Certes, des réseaux nationaux de stations de mesures de la température, de la pression atmosphérique, et des précipitations se mettent en place. Mais les premières données ne sont guère homogènes. Les instruments diffèrent, les stations sont inopinément déménagées, et les mesures ne sont pas

1. Thomas Jefferson, *Notes on the State of Virginia* (Paris, 1785).

prises dans des conditions identiques. On sait, par exemple, que les températures des villes sont légèrement supérieures à celles enregistrées en campagne. Or, au cours des cinquante dernières années, les villes ont gagné du terrain. Certaines stations ont donc enregistré un réchauffement notable pour la seule raison qu'elles se sont vues peu à peu englouties par la ville ! Les données océaniques ne sont pas mieux loties. Elles proviennent en grande partie de mesures réalisées par des navires marchands le long des grandes routes maritimes, alors que les océans couvrent 71 % de la surface du globe. C'est dire si la couverture géographique est inégale. Sans compter que la mesure de température n'a pas toujours été obtenue de la même façon : le résultat n'est pas le même si l'on immerge le thermomètre directement dans la mer ou dans un seau dans lequel l'eau de mer se refroidit par évaporation.

Ces dernières années, les données météorologiques enregistrées depuis un siècle ont fait l'objet d'un examen scrupuleux. Station par station, et presque thermomètre par thermomètre, les chiffres ont été homogénéisés. Des corrections appropriées permettent aujourd'hui de disposer de données comparables d'un endroit à l'autre et d'une décennie à l'autre. Des incertitudes subsistent, en particulier pour les données du XIX^e siècle. Mais, que ce soit à l'échelle globale où à celle de notre pays, il n'y a aucun doute. La température de surface a connu une hausse générale au cours du XX^e siècle.

En 1873, à Vienne, se tient le premier congrès international des directeurs de services météorologiques nationaux. La coopération internationale va dès lors se renforcer jusqu'à la création, en 1950, de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) qui rassemble désormais 191 États et territoires membres.

Aujourd'hui, l'OMM récolte en temps réel les informations fournies par 9 satellites, 3 000 avions, 11 000 stations d'observation terrestre, 1 300 stations de ballons-sondes, 4 000 bateaux en mer, 1 200 balises flottantes portant des stations météorologiques automatiques et des milliers de radars. Les satellites fournissent une quantité d'informations variées, de la composition de l'atmosphère en passant par la hauteur de la mer, la couverture nuageuse, l'étendue des glaciers ; ils permettent également de visualiser la formation des tempêtes. Les stations météorologiques, sur mer comme sur terre, mesurent la température, l'humidité,

la pression de l'air, les précipitations et les vents. Les ballons-sondes sont également lâchés chaque jour pour mesurer divers paramètres atmosphériques. Attachées à leur ballon gonflé d'hélium, ces stations enregistrent la température, la pression, l'humidité de l'air, ainsi que la vitesse et la force des vents jusqu'à 30 km en altitude. Ces instruments dressent un portrait global du changement climatique que nous sommes en train de vivre.

Des chiffres au diagnostic : comment les chiffres sont traités

Le siècle dernier reste bien entendu le plus documenté. Le réseau de stations météorologiques était alors devenu suffisamment dense pour permettre d'établir des cartes de la variation de température dans les différentes régions du globe. L'évolution climatique de la planète au xx^e siècle est le plus souvent résumée par un chiffre emblématique : $+ 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Cette valeur décrit l'anomalie moyenne de température observée sur le xx^e siècle à la surface de la Terre. Mais à quoi correspond-elle ? La méthode de calcul de la moyenne globale de température en surface a été élaborée par le climatologue anglais Phil Jones, de l'université d'East Anglia, à la fin des années 1970 et par l'équipe de Jim Hansen de la NASA à New York. Phil Jones proposait alors de couvrir le globe d'un filet imaginaire, d'un maillage de 5° de longitude par 5° de latitude et de définir ainsi 2 592 boîtes de tailles différentes (plus elles sont proches des pôles, plus leur surface est petite). Dans chacune d'elles, il s'agissait alors de rechercher les données journalières disponibles et d'en faire la moyenne annuelle. Cette moyenne était comparée à la moyenne sur trente ans déterminée dans cette même boîte, la différence entre les deux donnant un nombre appelé « anomalie annuelle ». Les trente années de référence ont d'abord été la période 1951-1980, puis 1961-1990. En veillant à pondérer l'anomalie de chaque boîte par sa surface, Jones a fait ensuite la moyenne des anomalies calculées dans chacune d'elles, pour estimer l'anomalie annuelle de température sur chaque hémisphère.

Le principe du calcul semblait simple, mais l'appliquer était une autre paire de manches. Car peu de stations disposent d'archives continues et

homogènes sur un siècle. La dispersion irrégulière des points de mesure pose également un problème. Seules l'Europe et l'Amérique du Nord disposent de données fiables depuis le XIX^e siècle. En Asie, en Antarctique, en Sibérie, elles ne sont disponibles que depuis les années 1950. Enfin, les mesures en mer ne sont abondantes que le long des voies de navigation commerciale. Le Pacifique Sud s'en trouve quasiment oublié. Malgré ces imperfections, la méthode donne des résultats cohérents, jamais démentis alors même que le nombre de données disponibles connaît une croissance phénoménale depuis le début du XX^e siècle. Vers le milieu des années 1980, Jones estime à partir des données de 1 873 stations continentales que la moyenne du réchauffement sur les deux hémisphères est de + 0,45 °C. Ces données sont comparables à celles obtenues par d'autres chercheurs qui emploient des méthodes différentes. Pourtant, seules 680 boîtes du maillage planétaire, soit 31 % des terres émergées, contiennent des données. En 2003, plus de 3 000 stations nouvelles, dont des stations marines, ont été ajoutées pour effectuer le calcul. Ces améliorations successives changent peu le résultat. Si le réchauffement global en surface passe de 0,45 °C à 0,6 °C, cette différence est largement liée au réchauffement marqué de la dernière décennie du XX^e siècle. Depuis, le phénomène s'est accentué. Le réchauffement s'établit désormais à 0,89 °C sur la période 1901-2012.

Les conséquences du réchauffement

Première conséquence du réchauffement : les glaces fondent. Depuis 1990, la calotte de glace qui recouvre le Groenland rétrécit, et de plus en plus vite. Elle perdait 123 milliards de tonnes de glace par an dans les années 1990, et 228 aujourd'hui. La calotte antarctique montre elle aussi des signes d'affaiblissement. Elle perdrait aujourd'hui 112 milliards de tonnes de glaces par an, une perte qui serait plus importante sans quelque gains de glace dans la partie est, généreusement enneigée chaque année.

Mais la fonte la plus spectaculaire affecte la banquise arctique. Depuis le début des observations, en 1979, elle n'a cessé de rétrécir, à toutes les saisons. Elle a perdu en moyenne 13 % de sa surface depuis 1978. Plus impressionnant : la banquise d'été, cette partie de la

banquise qui ne fond pas d'une année sur l'autre et devrait donc être pérenne, a rétréci d'environ 40 %. Mais il n'y a pas que son étendue qui diminue. Le centre de la banquise aurait également minci de plus de deux mètres depuis 1980. Plus fine, elle se disloque plus facilement sous les poussées du vent. Dispersée sous forme d'icebergs, elle devient encore plus sensible au réchauffement de l'eau. Le phénomène ne peut donc qu'accélérer, et c'est bien ce que l'on observe depuis une dizaine d'années.

Côté pôle Sud, les bilans sont plus délicats. La glace de mer, elle, grandit. Mais de peu : elle a gagné quelque 5 % depuis 1978.

Il y a glace et glace

La Terre porte différents types de glaces. On distingue les glaciers formés par l'accumulation de neige, et la banquise, formée à partir de l'eau de mer. On trouve des glaciers de montagne sur les cinq continents (essentiellement en Amérique, dans la Cordillère des Andes et les Rocheuses, en Europe dans les Alpes, en Asie centrale dans l'Himalaya et en Russie). Mais 99 % de l'eau douce gelée est emprisonnée dans les calottes glaciaires qui recouvrent le continent Antarctique et le Groenland. On parle de calottes ou d'inlandsis car cette glace recouvre les reliefs. Ces glaciers s'avancent sur la mer, et forment des plateformes de glace. Au fur et à mesure de l'avancement du glacier continental, qui progresse sous l'effet de son propre poids, ces plateformes vèlent (c'est-à-dire libèrent) des icebergs. Les icebergs sont donc constitués d'eau douce.

L'eau salée gèle quant à elle dans des conditions particulières, à $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Elle constitue la banquise qui recouvre le pôle Nord (il n'y a là aucun continent susceptible de porter des précipitations neigeuses). On trouve également de la banquise autour du continent Antarctique.

Enfin, nos glaciers de montagne, s'ils représentent une masse d'eau nettement plus faible, s'amenuisent également, avec constance. La tendance ne cesse de s'aggraver. Au cours des dix dernières années, le nombre de glaciers mis sur surveillance n'a cessé d'augmenter. Le verdict est donc extrêmement solide, et concerne la grande majorité des glaciers de montagne.

Et la neige ? La couverture neigeuse est par nature variable. La neige fond au printemps. Mais de plus en plus tôt... Dans l'hémisphère Nord la surface recouverte par la neige diminue année après année. Selon les satellites, depuis 1967, la neige de juin a diminué de moitié. Certes, c'est la plus fragile. Les autres mois, la diminution serait plutôt de l'ordre de 7 %.

Autre conséquence du réchauffement global : la mer monte. Chacun sait que lorsque la banquise fond, le niveau de la mer ne s'en trouve pas modifié ; il suffit de laisser fondre un glaçon dans un verre d'eau pour s'en convaincre. Mais ce n'est pas le cas lorsque cette glace provient d'un glacier de montagne ou des calottes des régions polaires. À ces deux contributions s'ajoutent celles liées à la dilatation des océans car, comme la plupart des matériaux, l'eau se dilate en chauffant, et au stockage plus ou moins important d'eau sur les continents en fonction des taux de remplissage de différents réservoirs – barrages par exemple – ou de pompage des eaux souterraines.

La hausse du niveau des océans est mesurée depuis 150 ans avec des jauges, et depuis une vingtaine d'années par les satellites. Depuis le début XIX^e siècle, le niveau des mers aurait augmenté de 20 cm. Si peu ? Le chiffre semble rassurant. Sauf que... le phénomène s'amplifie : alors que les mers ont en moyenne monté de 1,7 mm par an depuis le début du siècle dernier, elles grignotent depuis vingt ans les terres de 3,2 mm en moyenne chaque année. On estime relativement bien les différentes contributions sur cette période : un peu moins de 40 % sont dus à la dilatation des océans, autour de 25 % aux glaciers de montagne, de 20 % au Groenland et à l'Antarctique, les 15 % restant étant liés à la diminution de l'eau stockée sur les continents.

Le diagnostic est moins tranché pour les autres phénomènes climatiques. Depuis 1900, au niveau de la planète, les pluies ne semblent pas plus abondantes, à l'exception probablement des régions continentales de l'hémisphère Nord aux moyennes latitudes marquées par une augmentation des précipitations depuis 1950 et, en Amérique du Nord et en Europe, par une augmentation de la fréquence ou de l'intensité des fortes pluies.

Les statistiques mondiales n'indiquent pas non plus d'augmentation ni de la fréquence, ni de l'amplitude de ces inondations. Tout du moins

pas au niveau global. Car quand on observe ce qui se passe dans chaque région, certaines, comme l'Amérique du Nord, le Proche-Orient ou l'Inde ont effectivement connu plus d'épisodes de précipitations intenses, et plus d'inondations. En revanche, les inondations en Europe centrale ou du nord, à l'ouest de la Méditerranée, se sont révélées plutôt moins fortes qu'au cours des siècles précédents.

Pour les sécheresses, la tendance n'est pas non plus très marquée. Certaines régions, comme la Méditerranée, ont visiblement connu des sécheresses plus intenses, mais d'autres, comme l'Amérique du Nord, en comptent moins.

Qu'en est-il des autres catastrophes naturelles, tempêtes et cyclones ? Le réchauffement observé des eaux superficielles devrait les favoriser. Pourtant, au niveau global, la tendance n'est pas assez marquée, sauf sur l'Atlantique Nord où les cyclones tropicaux seraient plus intenses depuis 1970. Mais les données statistiques sont encore trop insuffisantes pour crier au loup.

Au-delà de ces chiffres, l'ensemble du système climatique (atmosphère, océans, neiges et glaces) témoigne du réchauffement. Cet ensemble d'observations convergentes a amené les auteurs du cinquième rapport du GIEC à affirmer que « Le réchauffement du système climatique est sans équivoque ».

UN REGARD VERS LE PASSÉ

Le climat change, soit... En lui-même ce constat n'a rien de nouveau. Un simple regard vers le passé le confirme. Ce regard, celui du paléoclimatologue, est nécessaire afin de comprendre comment fonctionne le système climatique, et d'en dessiner les évolutions futures.

Les scientifiques ont découvert de nombreuses traces laissées par les climats anciens sur Terre, dans le sol, les glaces, la coquille des coquillages ou le tronc des arbres. Toute la difficulté du travail du paléoclimatologue consiste à combiner ces enregistrements d'origine diverse, pour dresser une histoire du climat cohérente et solide, et en comprendre les mécanismes.

L'analyse isotopique: un outil de choix

L'analyse des isotopes – variante d'un élément chimique dont le noyau comprend un nombre de neutrons différent – tient une place importante en paléoclimatologie. En premier lieu celle des isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène, atomes constitutifs de la molécule d'eau. Dans les régions les plus ensoleillées, sous l'équateur, l'eau de mer s'évapore. La vapeur d'eau est entraînée par convection (mouvement vertical) et advection (mouvement horizontal) vers les régions plus froides, c'est-à-dire vers les pôles. Au cours de son transit, elle égrène des averses de pluie, puis de neige dans les régions les plus froides, essentiellement au-dessus des grandes calottes polaires du Groenland, au nord, et de l'Antarctique, au sud. L'essentiel de la vapeur d'eau se condense toutefois

très rapidement, bien avant d'avoir rejoint les pôles. Lors de ce voyage vers les pôles, les premières gouttes d'eau à tomber contiennent une proportion légèrement plus importante d'oxygène 18 (oxygène lourd) ou d'hydrogène lourd (deutérium) que la vapeur d'eau dont elles sont issues. En effet, les molécules d'eau qui en contiennent, plus lourdes, se condensent plus facilement. Au fur et à mesure de ces précipitations, la vapeur d'eau qui reste dans la masse d'air s'appauvrit en isotopes lourds. Si bien que chaque précipitation est moins chargée en isotopes que la précédente... Et ce sont les dernières, les neiges formées dans les régions les plus froides, qui contiennent le moins d'oxygène 18 et de deutérium. Or, plus il fait froid, plus la vapeur d'eau se condense tôt au cours de son transit vers les pôles. Plus il fait froid, moins il y a d'oxygène 18 dans la glace qui s'amoncelle en couches successives aux pôles où, depuis plusieurs millions d'années, la neige ne fond jamais.

Les périodes glaciaires se caractérisent par l'accumulation de glace, pauvre en oxygène 18, sur les continents. Cette accumulation – à l'origine d'une baisse du niveau des mers de plus de 100 m au dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans – se traduit donc par des eaux océaniques plus riches en oxygène 18. D'autres isotopes stables, du carbone, de l'azote, de l'oxygène, de l'argon et d'autres gaz rares, sont également sources d'information tandis que les isotopes radioactifs (du carbone, du potassium, de l'uranium...) peuvent être utilisés comme outils de datation. La quantité de ces éléments instables diminue en effet naturellement au cours du temps. Il suffit de connaître la concentration initiale de ces éléments lors de la formation du matériau et leur vitesse de décroissance, pour avoir une bonne idée de l'âge auquel le matériau (ici, la coquille), s'est formé.

Sous la mer, les climats passés

Les traces les plus anciennes du climat s'appuient sur des indices géologiques ou sur l'étude des fossiles. Ce sont les sédiments marins qui fournissent les enregistrements continus les plus anciens. Ils contiennent des couches superposées de restes de petits coquillages marins de taille millimétrique, des foraminifères, tombés au fond des mers à leur mort. Les espèces de foraminifères présentes dépendent de la température de l'eau. Certaines espèces se forment préférentiellement dans les eaux chaudes, d'autres dans