

**Martine Rebetez**

# LA SUISSE SE RÉCHAUFFE

Effet de serre  
et changement climatique

*Troisième édition revue et mise à jour*



Presses polytechniques et universitaires romandes

# 1

## LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES À L'ÉCHELLE DE LA PLANÈTE

### LE RÉCHAUFFEMENT DU CLIMAT DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS

Durant le 20<sup>e</sup> siècle, les mesures de température ont montré une augmentation moyenne pour l'ensemble de la surface du globe de +0,7°C. Cependant, le globe ne se réchauffe pas de manière homogène ou continue, ni dans l'espace, ni dans le temps. La hausse des températures s'est renforcée durant la dernière partie du siècle. La décennie 1990 s'est montrée de loin la plus chaude et les températures les plus élevées ont été relevées en 1998. La seconde année la plus chaude depuis le début des mesures, en 1861, a été 2005, puis 2002, 2003 et 2004. Les dix années les plus chaudes sont toutes survenues depuis 1991, dont neuf après 1995. Et cinq des six années les plus chaudes ont été mesurées depuis 2001. Le phénomène *El Niño* (voir la question des modifications de la pression atmosphérique au chapitre 2) a contribué au record de 1998 en réchauffant durant toute l'année civile la partie sud et tropicale du Pacifique. L'année 2002 s'est aussi placée sous le signe d'*El Niño*, mais d'une ampleur nettement réduite, ce qui lui a attribué le 3<sup>e</sup> rang. Le phénomène s'est terminé au printemps 2003, réchauffant encore légèrement les températures jusqu'en mars, ce qui a placé la moyenne de 2003 juste après celle de 2002 mais au-dessus de celle de 2004, année sans *El Niño*, comme 2001. La deuxième année la plus chaude, 2005, le fut aussi sans *El Niño*. Les années 1999 et 2000, pourtant sous l'influence du phénomène *La Niña*, qui entraîne un important refroidissement du Pacifique, se sont malgré tout placées parmi les dix plus chaudes. S'agissant uniquement de l'hé-

misphère nord, moins influencé par *El Niño*, le classement n'est pas exactement le même, mais les dix années les plus chaudes proviennent ici aussi toutes du 21<sup>e</sup> siècle et de la décennie 1990.

Des mesures effectuées depuis plus de quarante ans montrent que l'atmosphère s'est réchauffée jusqu'à une altitude de 8000 mètres. Le réchauffement touche aussi les océans : on l'a mesuré jusqu'à plus de trois kilomètres de profondeur.

A l'échelle du globe, les températures ont commencé à se réchauffer depuis le milieu du 19<sup>e</sup> siècle, mais principalement durant deux périodes du 20<sup>e</sup> siècle, d'une part de 1920 à 1945, et d'autre part dès 1975. De 1945 à 1975, le réchauffement s'est poursuivi dans l'hémisphère Sud, mais pas dans l'hémisphère nord, qui a subi au contraire un léger refroidissement, spécialement dans les zones qui s'étaient beaucoup réchauffées avant 1945 (voir plus loin l'effet des aérosols dans les causes des changements climatiques). Dès les années 1980, l'hémisphère nord s'est réchauffé à nouveau davantage que l'hémisphère sud.

Plus les données sont récentes, plus elles sont abondantes, plus leur qualité est élevée, et meilleure est la connaissance de leur répartition spatiale. A l'échelle du globe, les données des 20<sup>e</sup> et 21<sup>e</sup> siècles sont nettement plus fiables que celles du 19<sup>e</sup> siècle, que l'on travaille encore à reconstruire. Les recherches les plus récentes montrent que le réchauffement a probablement déjà débuté vers le milieu plutôt que vers la fin du 19<sup>e</sup> siècle, ce que confirmerait le recul de la plupart des glaciers de montagne, qui s'est engagé approximativement à cette époque.

### *Le climat, un système complexe en équilibre*

Si le réchauffement des températures n'a pas été constant au cours du siècle, c'est parce que le système climatique est très complexe et qu'il ne réagit pas de manière linéaire aux modifications qu'il subit. En effet, le système climatique comprend non seulement l'atmosphère, élément déjà complexe en soi, mais aussi les océans et l'ensemble de l'hydrosphère, la cryosphère (toutes les neiges et glaces) et la biosphère. L'atmosphère est par exemple en interaction avec les surfaces océa-

niques, dont la température dépend notamment de la circulation interne des courants marins dans toute la profondeur de l'océan. Cette température dépend aussi de la fonte des calottes polaires qui apporte une eau douce et froide dans l'océan. Les glaces elles-mêmes ont une action directe sur l'atmosphère dont elles dépendent également.

Il en va de même pour la biosphère : si une surface terrestre est couverte de forêts ou au contraire désertique, son impact sur l'atmosphère sera différent. En effet, sa rugosité ne sera pas la même et elle agira sur la vitesse du vent. L'humidité disponible variera, de même que l'*albédo* (part du rayonnement solaire diffusé ou réfléchi directement par la surface).

L'atmosphère, quant à elle, est le lieu du rayonnement, de l'ultraviolet à l'infrarouge, en provenance et en direction du soleil. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol, mais aussi de la composition chimique de l'atmosphère et de son humidité, pour ne citer que ces paramètres. L'humidité est étroitement liée à l'ensemble du système hydrologique et la composition chimique dépend, entre autres, de la couverture végétale et des émissions humaines.

Ainsi, toute modification intervenant en un point d'un système aussi complexe peut mettre du temps avant d'entraîner une réaction. Après un certain délai, la réaction peut alors être rapide et en quelque sorte rattraper son retard par rapport à l'événement qui en est la cause. Ainsi, le système peut absorber des modifications sans rien en faire paraître, puis, brusquement, réagir comme s'il avait soudain atteint un trop-plein. Inutile de préciser qu'il est toujours extrêmement difficile de prévoir quand ce point limite sera atteint. On a longtemps espéré par exemple que les océans absorberaient l'excédent de gaz carbonique que les humains émettent dans l'atmosphère. Force est de constater que non seulement la quantité de ce gaz est en nette augmentation dans l'atmosphère, malgré une absorption océanique importante, mais également que la température du globe s'accroît, malgré l'absorption par les océans d'une partie des gaz et de l'énergie excédentaire.

Géographiquement, on constate que le contraste se renforce également entre les régions océaniques et les régions continentales.

les, qui se réchauffent davantage. Or l'hémisphère Nord comprend beaucoup plus de régions continentales que l'hémisphère Sud. Ce contraste est très net depuis les années 1970 : les régions situées aux latitudes moyennes à hautes de l'hémisphère Nord (environ 35 à 65°N) se sont réchauffées dans des proportions particulièrement élevées, spécialement depuis les années 1980. Il est probable que ce phénomène soit dû en partie à la modification des pressions intervenues sur l'Atlantique Nord (voir à ce sujet la question de l'indice NAO au chapitre 2) qui a entraîné un fort réchauffement des hivers de l'Europe du Nord et de la Sibérie.

La Suisse se situe dans une vaste région, allant du Nord de l'Espagne au Nord de la Russie, qui s'est réchauffée dans des proportions plus importantes que la moyenne du 20<sup>e</sup> siècle, en particulier durant les dernières décennies. D'autres régions du globe, de surfaces plus réduites, se sont réchauffées autant et même davantage – c'est le cas du Nord de la Chine ou du Canada – tandis que certaines se sont réchauffées dans des proportions moindres et même, de manière exceptionnelle cependant, se sont refroidies – c'est le cas du Sud-Ouest du Groenland ou de la région océanique située au Sud-Est de ce même Groenland. Dans ce dernier cas, on estime que le refroidissement est aussi à mettre en lien avec les modifications des pressions sur l'Atlantique Nord.

### *Quelles perspectives pour le 21<sup>e</sup> siècle ?*

En moyenne planétaire, il faut s'attendre à un réchauffement qui devrait se situer dans une fourchette allant de +1,4°C à +5,8°C d'ici l'an 2100 (par rapport à 1990) selon les projections du rapport *IPCC* 2001. Toutefois, certaines recherches récentes montrent que ces valeurs pourraient encore être nettement sous-estimées. L'ampleur des incertitudes repose non seulement sur les inconnues qui régissent les mécanismes complexes d'interactions du système climatique, mais surtout sur la façon dont le monde va évoluer dans les années qui viennent. L'un des paramètres les plus importants concerne les quantités de gaz à effet de serre qui vont être émises ces prochaines décennies. Un autre

paramètre, en partie lié au premier, concerne l'évolution démographique.

Comme ce fut le cas au 20<sup>e</sup> siècle, le réchauffement prévu pour le 21<sup>e</sup> siècle devrait se répartir de manière très inégale à la surface du globe. Les différentes projections prévoient un réchauffement de l'ordre de +3 à +5°C en moyenne pour la région alpine à l'horizon 2070-2100. Les incertitudes dans ce genre de projections sont encore très grandes bien entendu, quoique les scientifiques s'accordent à penser que l'hémisphère Nord et tout particulièrement sa partie la plus septentrionale subira un réchauffement nettement plus important que celui de la moyenne du globe. Désormais, chaque année qui passe devrait permettre d'affiner les projections, car les inconnues vont peu à peu se réduire.

## CAUSES NATURELLES ET HUMAINES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le climat de la terre n'est pas aussi stable qu'une courte vie humaine pourrait le laisser croire. Tout est question d'échelle. Si la vitesse du réchauffement attendue pour le 21<sup>e</sup> siècle est extraordinaire, de tout temps, le climat a subi toutes sortes de variations, et à différentes échelles, que ce soit durant les derniers millénaires, durant les derniers millions d'années ou durant les milliards d'années depuis qu'existe la vie sur la planète.

### *Les fluctuations des paramètres orbitaux*

La principale cause naturelle des changements climatiques sur terre réside dans les fluctuations de l'énergie solaire. Ces fluctuations ont régi le climat terrestre jusqu'à l'aube du 20<sup>e</sup> siècle de notre ère. D'une part, le soleil n'a pas toujours émis la même quantité d'énergie, et, d'autre part, la position de la terre varie par rapport à celle du soleil, ce qui amène notre planète à recevoir plus ou moins d'énergie, ou à la voir répartie différemment selon les saisons ou la latitude. On distingue trois paramètres orbitaux déterminant les fluctuations de l'énergie solaire

transmise à la terre : l'*excentricité orbitale*, l'*obliquité axiale* et la *précession des équinoxes*.

Les modifications de l'*excentricité orbitale* proviennent du fait que l'ellipse tracée par la terre autour du soleil n'est pas parfaitement sphérique et qu'elle se modifie de manière cyclique : son degré d'aplatissement est proche de zéro à son minimum et atteint jusqu'à 7% à son maximum lors d'un cycle complet de 100 000 ans. Ainsi, la terre est plus ou moins proche du soleil en fonction du moment du cycle dans lequel elle se trouve.

Si l'axe de la terre était perpendiculaire au plan de l'écliptique, il n'y aurait pas de saisons car le soleil atteindrait une zone donnée de la sphère avec le même angle durant toute l'année. C'est l'*obliquité axiale*, dont l'orientation reste la même toute l'année, qui permet l'existence des saisons. L'axe de la terre est actuellement de  $23^{\circ}27'$  par rapport au plan de l'écliptique, mais, sur un cycle de 41 000 ans, il varie sensiblement, soit de  $21^{\circ}8'$  à  $24^{\circ}4'$ .

Parce que la terre n'est pas parfaitement sphérique, une lente rotation de l'axe autour de la perpendiculaire au plan de l'écliptique s'effectue, à une échelle encore différente, comme dans le cas d'une toupie qui n'est pas parfaitement équilibrée. Ainsi, sur un cycle moyen de 21 000 ans (qui peut être réparti plus exactement en un cycle majeur de 23 000 ans et un cycle mineur de 19 000 ans), chaque saison se produit tantôt lorsque la terre est éloignée du soleil, tantôt lorsqu'elle en est plus proche. C'est ce que l'on appelle la *précession des équinoxes*. Aujourd'hui, la terre est proche du soleil en décembre. Il y a environ 11 000 ans, elle en était proche en juillet.

Infimes à première vue, les changements de paramètres orbitaux ont pourtant entraîné des modifications suffisamment importantes de la température pour générer par exemple la formation et la destruction des grandes calottes glaciaires : en calculant la position exacte de la terre par rapport au déroulement de chacun de ces trois cycles qui se superposent, on a pu mettre clairement en évidence les liens avec les changements climatiques passés. Sur le même principe, on peut modéliser les quantités d'énergie susceptibles d'atteindre la terre à l'avenir : en tenant compte uniquement de ces paramètres, et donc en l'ab-

sence théorique de toute intervention humaine ou d'éruption volcanique par exemple, notre marche naturelle vers la prochaine glaciation se serait poursuivie durant les 5000 prochaines années, puis on aurait assisté à un léger réchauffement avant une autre longue période de lent refroidissement menant à des conditions véritablement glaciaires d'ici à 60 000 ans.

La reconstruction récente des températures du dernier millénaire confirme les calculs des paramètres orbitaux et met en évidence un refroidissement très lent dès l'an 1000 de notre ère jusqu'au 19<sup>e</sup> siècle. Ce rafraîchissement des températures a touché l'hémisphère nord et a déjà débuté il y a 4000 ans. A partir du 19<sup>e</sup> siècle, le réchauffement dû à l'activité humaine a progressivement pris de plus en plus d'importance par rapport aux fluctuations naturelles. Durant la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle et actuellement, les émissions de gaz à effet de serre sont clairement à l'origine de la majeure partie du réchauffement. Plusieurs méthodes ont permis de le démontrer : en particulier, des simulations numériques ont pu reproduire ce qu'aurait été la température des deux derniers siècles sans l'augmentation des gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère, c'est-à-dire en tenant compte seulement des causes naturelles de changement. Les résultats correspondent assez bien à la réalité observée jusque vers 1950, mais ils s'en distancient de plus en plus par la suite. Lorsque l'on introduit l'influence des gaz à effet de serre et des aérosols dans le modèle, on parvient en revanche à des résultats correspondant très bien à notre réalité.

### *Le rayonnement solaire*

On observe des changements autres que ceux affectant les paramètres orbitaux, comme les modifications intervenant dans la quantité d'énergie *émise* par le soleil. Ces modifications se mesurent à deux échelles bien différentes.

En premier lieu, sur plusieurs milliards d'années, on observe une augmentation très lente de l'énergie solaire. En effet, il y a un peu plus de 3 milliards d'années, respectivement 2 milliards d'années, le soleil émettait environ 30%, respectivement 10%

d'énergie en moins qu'aujourd'hui. L'apparition de la végétation sur terre a entraîné une modification progressive de la chimie atmosphérique avec une augmentation de l'oxygène et une diminution du dioxyde de carbone. A une échelle de l'ordre du milliard d'années, la diminution de la teneur en dioxyde de carbone a permis à la terre de ne pas subir un réchauffement proportionnel à l'augmentation de l'énergie émise par le soleil.

En second lieu, à très court terme, les cycles de taches solaires entraînent à la fois des augmentations et des diminutions de l'énergie émise par le soleil, ceci par exemple sur des périodes d'environ 11 ans. Dans un délai si court, de telles modifications sont absorbées par le système climatique, surtout par les océans, et elles ne se traduisent pas par des variations à long terme de la température du globe.

### *L'activité volcanique*

Le volcanisme est une autre cause naturelle des changements climatiques : en effet, une éruption volcanique émet de grandes quantités de poussières dans l'atmosphère, qui font écran à l'énergie solaire pendant quelques années (et entraînent donc un refroidissement des températures). En outre, l'éruption modifie la composition chimique de l'atmosphère en augmentant par exemple les teneurs de certains gaz comme le dioxyde de carbone ou le méthane (des gaz à effet de serre qui entraînent un réchauffement). A court terme, le bilan va toujours dans le sens d'un refroidissement. Les plus grandes éruptions volcaniques, par exemple celles du *Pinatubo*, aux Philippines, en 1991, du *Mont St-Helen* aux Etats-Unis, en 1980, ou d'*El Chichon*, au Mexique, en 1982, ont disséminé des millions de tonnes de poussières dans l'atmosphère qu'elles ont refroidie de quelques dixièmes de degrés durant plusieurs années.

### *Les océans, véritables régulateurs thermiques*

La circulation océanique constitue le plus grand modérateur des températures de la planète. Les volumes d'eau absorbent et

restituent l'énergie. Même à une échelle plus réduite, on peut percevoir humainement ce mécanisme aux abords d'un grand lac comme le Léman. Il absorbe de l'énergie en été, en réchauffant progressivement ses eaux, et la restitue en hiver en se refroidissant beaucoup plus lentement que ne le font les surfaces terrestres environnantes : la terre va geler rapidement tandis que le lac mettra beaucoup plus de temps à se refroidir. Le lac de Joux gèle fréquemment en hiver et cela est aussi arrivé à celui de Zurich, mais plus rarement. Le gel de ce lac est d'ailleurs un indice utilisé par les historiens du climat pour repérer les hivers les plus froids dans le passé. Le Léman, en revanche, est trop volumineux pour geler durant l'hiver ; ses eaux ont d'ailleurs besoin de températures très froides pour être brassées jusqu'en profondeur, ce qui arrive de plus en plus rarement ces dernières années. Ce phénomène d'absorption et de restitution d'énergie offre aux abords du lac un climat plus tempéré que celui des autres régions.

A une toute autre échelle, les océans emmagasinent et restituent de grandes quantités d'énergie, grâce à la circulation des eaux entre la surface et la profondeur. Ce mécanisme ne concerne pas seulement le cycle annuel, il peut fonctionner à beaucoup plus long terme, ce qui permet d'absorber une grande part des changements climatiques intervenant dans des cycles relativement courts. Les océans ne parviennent cependant pas à compenser la totalité de l'énergie supplémentaire due aux rejets de gaz à effet de serre d'origine humaine.

A l'inverse, un changement significatif dans la circulation océanique peut aussi être la cause de changements climatiques, en modifiant les échanges de chaleur avec l'atmosphère. Cela a déjà été le cas par le passé et l'on pourrait craindre à l'avenir qu'un réchauffement entraîne une fonte rapide d'une partie des calottes de glaces polaires, et que cet afflux d'eau froide et douce génère une perturbation importante de la circulation océanique. Celle-ci, à son tour, apporterait des changements climatiques extrêmement brusques et importants dont il n'est pas exclu qu'ils impliquent, avec la disparition du *Gulf Stream*, un refroidissement catastrophique de l'Europe. Cette hypothèse n'est heureusement pas la plus vraisemblable pour l'avenir.

Certains changements cycliques dans la circulation atmosphérique, comme celui d'*El Niño* (voir le chapitre 2), sont aussi étroitement liés à la circulation océanique.

*Les sources des émissions de gaz à effet de serre et l'augmentation de leur concentration*

Le rayonnement solaire qui parvient à la surface de la terre est réexpédié en direction de la stratosphère sous forme de rayonnement infra-rouge. Certains gaz, comme la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone ou le méthane agissent comme le vitrage d'une serre en empêchant le rayonnement de passer et donc l'énergie de s'échapper. Ces gaz existent pour la plupart à l'état naturel et leur présence permet à la température terrestre d'être nettement plus élevée. Les calculs ont montré que, sans les gaz à effet de serre, la température à la surface du globe serait en moyenne de  $-18^{\circ}\text{C}$ , alors qu'elle atteint maintenant un peu plus de  $15^{\circ}\text{C}$ .

Les gaz à effet de serre de source humaine (ou « anthropogène ») sont le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ), le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ), les chlorofluorocarbones (CFC) et les hydrofluorocarbones (HFC). Toute forme de combustion ou de décomposition de matière végétale contribue à augmenter la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, par exemple le fait de brûler du pétrole, du charbon, du gaz ou encore du bois. Le mécanisme de la constitution du principal gaz à effet de serre d'origine humaine, le dioxyde de carbone, est le suivant : le carbone (C) constituant la matière végétale est associé à l'oxygène (O) se trouvant dans l'atmosphère, pour former des molécules de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Il s'agit d'un cycle naturel par lequel les molécules de  $\text{CO}_2$  présentes dans l'atmosphère vont à nouveau permettre la formation de matière végétale, que ce soit à la surface de la terre ou dans les océans. Si la teneur en dioxyde de carbone augmente aujourd'hui dans l'atmosphère, c'est principalement parce que nous brûlons à la fois de la matière végétale fossile (pétrole ou charbon) et de grands volumes de forêts tropicales. Schématiquement on peut dire que, en quelques dizaines d'années, les humains renvoient dans l'atmosphère

d'énormes quantités de dioxyde de carbone qui avaient été absorbées très progressivement par la planète, depuis des millions d'années.

Le dioxyde de carbone de source anthropogène provient pour les trois quarts de la combustion de carburants fossiles (5,5 gigatonnes de carbone par an) et pour un quart de la déforestation. Lors de la période préindustrielle, sa concentration dans l'atmosphère s'élevait à 0,028% ou 280 ppm (= parties par million). Elle s'élève aujourd'hui à 0,038% ou 380 ppm. Une telle concentration n'a jamais été atteinte depuis au moins 650 000 ans et probablement bien plus longtemps.

Le méthane provient principalement de l'agriculture (des rizières et de l'élevage des ruminants) et accessoirement de la combustion. La concentration actuelle dans l'atmosphère s'élève à 1800 ppb (= parties par milliard, abrégé de l'anglais *billion*) alors qu'elle n'était que de 700 ppb lors de la période préindustrielle. Le niveau de concentration actuel n'a jamais été atteint durant les 60 derniers millions d'années au moins.

Le protoxyde d'azote provient principalement de l'utilisation de fertilisants dans l'agriculture et en second lieu de la combustion. Sa concentration est passée de 275 à 320 ppb depuis la période préindustrielle.

Les CFC, eux, n'existent pas à l'état naturel, ils sont uniquement d'origine industrielle. Leur production a été fortement réduite dès les années 1980 grâce au protocole de Montréal dont l'objectif était de supprimer ces gaz chlorés qui détruisent la couche d'ozone. Ils ont été remplacés par les HFC qui ne détruisent pas la couche d'ozone mais qui sont de puissants gaz à effet de serre. Actuellement, les quantités de CFC n'augmentent plus que très faiblement, voire diminuent progressivement dans l'atmosphère, tandis que celles de HFC sont en augmentation.

### *La contribution spécifique de chaque gaz au réchauffement*

Chaque gaz à effet de serre a une capacité plus ou moins grande à réchauffer l'atmosphère. Si l'on attribue à une molécule de CO<sub>2</sub> un potentiel de réchauffement de référence fixé à

une unité, chaque molécule de méthane a un potentiel de 56, chaque molécule de protoxyde d'azote de 280 et chaque molécule de CFC ou HFC un potentiel de réchauffement allant de 500 à 16000. En tenant compte des quantités de chaque gaz émises dans l'atmosphère et de leur potentiel de réchauffement respectif, on peut connaître la contribution de chacun d'entre eux à l'augmentation de l'effet de serre sur la planète depuis 1750. On la calcule en unités d'énergie, le Watt par  $m^2$ . Uniformément répartie sur la planète, une énergie supplémentaire de  $1 \text{ W}/m^2$  est susceptible d'entraîner une augmentation de la température globale de  $1^\circ\text{C}$ . Or, de 1750 à 2000, les quatre principaux gaz à effet de serre ont procuré à notre planète un potentiel énergétique supplémentaire de  $2,43 \text{ W}/m^2$ . La part du  $\text{CO}_2$  à ce processus s'est élevée à 60%, celle du méthane à 20%, celle des CFC et HFC à 14% et celle du  $\text{N}_2\text{O}$  à 6%.

Pour estimer l'impact total de l'activité humaine sur le climat, il faut également tenir compte d'autres facteurs. Par exemple, l'ozone présent naturellement dans la stratosphère jouant aussi un rôle de gaz à effet de serre, la diminution de la couche d'ozone stratosphérique, très problématique pour la vie sur la planète, contribue par ailleurs à réduire l'effet de serre. Cette diminution correspond à 6% de l'effet conjugué des quatre principaux gaz décrits ci-dessus (soit  $-0,15 \text{ W}/m^2$ ). En revanche, la formation d'ozone troposphérique (le même gaz, mais sous forme de polluant se formant à proximité du sol, en raison de la pollution par ses précurseurs que sont les oxydes d'azote et les composés organiques volatils) contribue à augmenter l'effet de serre de 14% supplémentaires (soit  $+0,35 \text{ W}/m^2$ ) par rapport aux quatre principaux gaz. Cependant, la répartition de l'ozone troposphérique varie beaucoup d'une région à l'autre et sa concentration peut diminuer rapidement en cas de cessation des émissions de ses précurseurs. Ce n'est pas le cas des autres gaz à effet de serre qui ont des durées de vie de quelques dizaines à plusieurs centaines d'années et dont la répartition autour de la planète est relativement homogène.

Contrairement aux gaz à effet de serre, les émissions d'aérosols (particules en suspension dans l'air), provenant des proces-

sus de combustion en général, et les émissions de soufre en particulier, sont locales et ont des conséquences à court terme. Elles contribuent à un refroidissement qu'on estime à 20% par rapport au réchauffement dû aux quatre principaux gaz à effet de serre (soit  $-0,49\text{W/m}^2$ ). L'effet des aérosols est limité dans le temps, car leur durée de vie dans l'atmosphère va de quelques jours à quelques semaines, alors que celle des gaz à effet de serre va d'une dizaine à plusieurs centaines d'années. Tandis que ces derniers s'accumulent constamment tout autour de la terre, l'effet des aérosols est ponctuel, dans le temps et dans l'espace. Il dépend en outre du type de nuages qu'ils génèrent : les nuages épais, cumuliformes, provoquent un refroidissement en empêchant le rayonnement ultraviolet de traverser, mais les nuages élevés et minces, les cirrus, réchauffent l'atmosphère en retenant côté terre le rayonnement infra-rouge. Il est vraisemblable que la stabilisation du réchauffement mesurée surtout dans l'hémisphère nord, entre 1950 et 1980, soit due au moins en partie à la forte augmentation des émissions de soufre durant cette période. La prise en compte de ce facteur est une des raisons principales qui ont entraîné la révision à la hausse des pronostics de réchauffement entre les deux rapports *IPCC* de 1995 et de 2001.

Depuis 1750 les variations naturelles des paramètres astronomiques ont entraîné une augmentation de l'énergie reçue par la terre équivalente à 12% de l'effet des quatre principaux gaz à effet de serre ( $+0,3\text{ W/m}^2$ ). La plus grande part de cette augmentation remonte à la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle. Les importantes éruptions volcaniques, survenues entre 1880 et 1920 ainsi qu'entre 1960 et 1991 ont eu, au contraire, des effets négatifs. Le bilan des effets naturels combinés des paramètres astronomiques et des éruptions volcaniques, ainsi que du cycle des taches solaires est proche de zéro depuis 1960 et négatif depuis 1980.

En résumé, si le réchauffement observé dans la première partie du 20<sup>e</sup> siècle peut être attribué en partie à des causes naturelles, ce n'est assurément plus le cas pour la fin du siècle.

## LA RECONSTITUTION DE L'HISTOIRE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

On le sait, le climat a varié au cours des temps, mais les observations instrumentales (au moyen d'instruments de mesures comme les thermomètres, pluviomètres, baromètres, etc.), qui permettent de l'attester, n'existent guère que depuis le milieu du 19<sup>e</sup> siècle. A cette époque de telles observations n'étaient pas très nombreuses et concernaient presque exclusivement les terres émergées de l'hémisphère nord. Progressivement, les sites de mesures se sont multipliés et ont couvert une surface toujours plus représentative de l'ensemble du globe. Pour reconstituer les périodes antérieures et compléter celles qui sont encore mal décrites par les observations instrumentales, on fait appel à des indicateurs sensibles au climat que l'on trouve dans différents milieux naturels.

### *Les techniques de reconstitution*

La *dendrochronologie* ou *dendroclimatologie*, l'étude des cernes des arbres, permet une bonne reconstitution des températures d'années successives, essentiellement celles de la période de végétation. Cette méthode est utilisable dans toutes les régions bénéficiant d'une saison d'été et d'une saison d'hiver, ce qui constitue les marques annuelles – les cernes – et jouissant d'un climat permettant la croissance des arbres. Les arbres sur pied sont utilisés, dont certains peuvent être âgés de plusieurs siècles, mais aussi les arbres fossiles ou les poutres de constructions anciennes. Une telle méthode permet de reconstituer les températures ou les précipitations jusqu'à plusieurs millénaires en arrière.

On utilise aussi les carottes de glace, les sédiments lacustres et marins, ainsi que les pollens (la *palynologie*), pour reconstituer la végétation correspondant aux caractéristiques climatiques d'une époque. L'analyse des isotopes d'oxygène (les atomes d'oxygène comportent un nombre variable de neutrons), dans les sédiments ou dans les cernes des arbres, permet de

connaître la température des précipitations car plus celle-ci est basse, plus la proportion d'oxygène 18 ( $^{18}\text{O}$ ) est faible. D'autres méthodes encore, comme l'observation des coraux, qui sont sensibles à la lumière et à la température de l'eau et qui illustrent bien les modifications du niveau de la mer, permettent de reconstituer les climats passés. On recourt également aux nombreuses sources qu'offre la littérature, comme les correspondances mentionnant le temps qu'il fait, les notes quotidiennes de certains observateurs, les mentions du gel des lacs ou les dates de processions religieuses pour faire tomber la pluie, ou encore certaines peintures ou gravures représentant les glaciers. Dès les années 1980, l'Université de Berne s'est montrée pionnière dans la mise au point de méthodes de quantification de ces indices.

L'accumulation de toutes ces données approximatives et le recoupement de diverses méthodes permettent finalement de se faire une idée toujours plus précise des climats passés, les reconstitutions étant généralement meilleures pour les périodes les plus récentes et moins précises pour les temps plus reculés. Cette reconstitution est particulièrement intéressante s'agissant des périodes les plus chaudes, susceptibles de ressembler, au moins en partie, au climat qui nous attend.

### *L'histoire des climats de notre planète*

Il y a plus de trois milliards d'années, le soleil émettait jusqu'à 30% d'énergie en moins par rapport à aujourd'hui. Mais la température sur terre n'était pas aussi froide que cette différence pourrait le laisser entendre, car, avant et au début de l'activité de la photosynthèse sur la terre, il y avait de grandes quantités de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, et peu ou pas d'oxygène, si bien qu'un effet de serre renforcé compensait la moindre énergie en provenance du soleil. Puis les quantités de dioxyde de carbone ont diminué progressivement, parallèlement à l'accroissement de l'activité de la photosynthèse, tandis que l'énergie en provenance du soleil augmentait.

Durant la période géologique du *pliocène*, il y a 1,8 à 6 millions d'années, à la fin de l'ère tertiaire, on sait qu'il y eut

une phase relativement chaude, avec des précipitations plus importantes que celles d'aujourd'hui, surtout dans les régions actuellement arides, comme en Afrique du Nord, où les températures estivales étaient plus basses que celles observées de nos jours. Aux latitudes moyennes, en revanche, les températures estivales étaient d'environ 3°C supérieures à celles d'aujourd'hui.

Plusieurs conditions étaient très différentes de la période actuelle, par exemple la géographie des océans et des continents, la topographie, les formes de vie végétale et animale, ou les concentrations de dioxyde de carbone. Ces différences limitent les possibilités de comparaison avec l'époque actuelle. Et il faut également souligner le fait que nos connaissances et surtout nos datations sont particulièrement imprécises pour cette période très ancienne.

Au quaternaire, durant la période géologique du *pléistocène*, qui s'est terminée il y a environ 10 000 ans, on a assisté à une succession de périodes glaciaires et interglaciaires. Le maximum de la dernière glaciation a été atteint il y a 18 000 à 20 000 ans. Les phases les plus douces ont connu des températures légèrement plus élevées qu'aujourd'hui dans l'hémisphère nord, aux latitudes moyennes, atteignant toutefois jusqu'à 4 à 8°C de plus dans les régions les plus nordiques, comme la Sibérie, le nord du Canada ou le Groenland. Dans tout l'hémisphère nord, les précipitations ont été supérieures à celles de la période actuelle.

L'*holocène*, la période postglaciaire commencée il y a 10 000 ans et s'étendant jusqu'à nos jours, a connu plusieurs périodes relativement chaudes entre 7000 et 3000 av. J.-C. Chacune d'entre elles a été accompagnée d'une augmentation des précipitations et d'une élévation du niveau des lacs dans les régions subtropicales ou de hautes latitudes. Aux latitudes moyennes, les précipitations ont été plutôt inférieures à celles d'aujourd'hui. Durant ces mêmes périodes, les températures furent plus élevées qu'actuellement aux hautes latitudes nord mais inférieures dans le Sahara, sur la péninsule d'Arabie et en Asie centrale.

*De l'optimum climatique médiéval au petit âge glaciaire*

Le dernier millénaire a connu une période relativement chaude appelée l'*optimum climatique médiéval*. (Notons que ce type d'appellation provient du fait que, du point de vue européen, et surtout du nord de l'Europe, les périodes les plus douces étaient les plus favorables au développement humain, et donc qualifiées d'*optimales*.) En fait, cette période chaude a vraisemblablement touché l'ensemble du globe, mais sans être uniforme, ni synchrone, ni continue, pas même dans le seul hémisphère nord. Au nord de la Scandinavie, elle s'est déroulée entre 900 et 1200, dans d'autres régions plutôt entre 1200 et 1300, comme au sud du Groenland et à l'ouest des Etats-Unis. Elle a été suivie par une phase relativement froide, appelée le *petit âge glaciaire*.

Les populations normandes qui s'étaient établies au Groenland durant l'*optimum* et qui avaient construit l'église de Hualsey, dont on peut voir aujourd'hui les ruines, sont finalement mortes de faim avec le retour du froid qui a progressivement décimé leurs troupeaux et empêché les bateaux de les ravitailler. Il fit particulièrement froid dans l'hémisphère nord entre 1600 et 1850, période appelée le *minimum de Maunder*, mais le refroidissement a commencé plus tôt dans certaines régions, comme en Chine, où on l'observe déjà avant 1400. Dans l'hémisphère sud, les 16<sup>e</sup> et 17<sup>e</sup> siècles ont été les plus froids. A l'échelle du globe, les différences de température furent de l'ordre de 0,1 à 0,2°C, soit des valeurs inférieures au réchauffement mesuré au 20<sup>e</sup> siècle. Pourtant, elles ont notablement affecté certaines populations, notamment celles installées dans des régions permettant tout juste leur survie, que ce soit en raison du froid ou de la sécheresse.