

Chimie atmosphérique et climat

Guy Brasseur a dirigé l'Institut Max Planck de météorologie¹ (Hambourg, Allemagne), et a fait partie du National Center for Atmospheric Research (Boulder, CO, États-Unis).

La chimie atmosphérique fait intervenir des processus complexes, et son impact sur le climat est difficile à quantifier. Son rôle s'ajoute à celui du CO₂ et à celui de l'activité solaire. À longue échéance, cependant, c'est le CO₂ qui déterminera principalement la réponse du système climatique à l'activité humaine.

1 La composition atmosphérique de la Terre

Il faut d'abord rappeler que la composition de l'atmosphère terrestre a évolué depuis la formation de la planète il y a plus de 4 milliards d'années. La **Figure 1** montre que l'oxygène n'est apparu que relativement récemment, et qu'au cours du temps, il y a eu des variations importantes de la composition de l'atmo-

sphère, qui est aujourd'hui essentiellement constituée d'azote, d'oxygène et d'un grand nombre de composés mineurs. On pourrait penser que ces derniers n'ont qu'une importance très secondaire, mais, en réalité, ils jouent un rôle important à la fois pour la chimie de l'atmosphère et la qualité de l'air, mais aussi évidemment pour les problèmes climatiques, comme nous le verrons ensuite.

La composition chimique de l'atmosphère et le climat ont évolué de manière coordonnée. La **Figure 2** montre d'une part l'évolution des deux gaz à effet de serre, le CO₂ et le méthane CH₄, et d'autre part l'évolution de la température au cours des 400 000 dernières années. Cette évolution est liée à celle des paramètres orbitaux de la Terre autour du Soleil (voir aussi le **Chapitre de V. Courtillot** dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, EDP

1. www.mpimet.mpg.de

Figure 1

Évolution chronologique de la composition chimique de l'atmosphère. Sa composition actuelle est : N_2 (78 %), O_2 (21 %), Ar (1 %), CO_2 ($3,8 \cdot 10^{-4}$), CH_4 ($1,6 \cdot 10^{-6}$), H_2 ($5 \cdot 10^{-7}$), N_2O ($3,5 \cdot 10^{-7}$), CO ($7 \cdot 10^{-8}$), H_2O et O_3 variables.

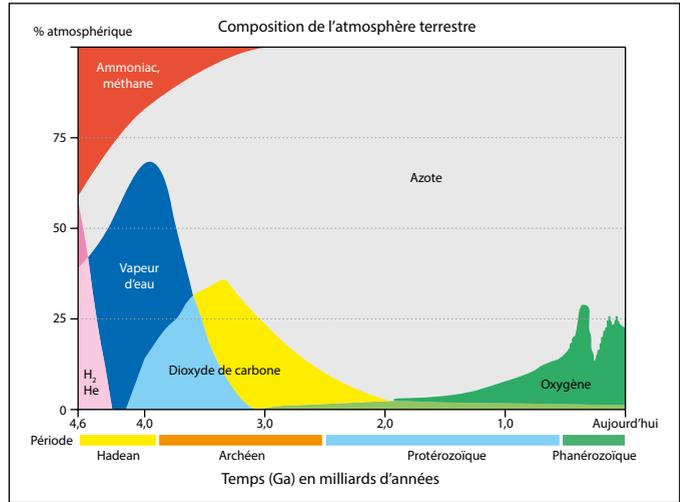
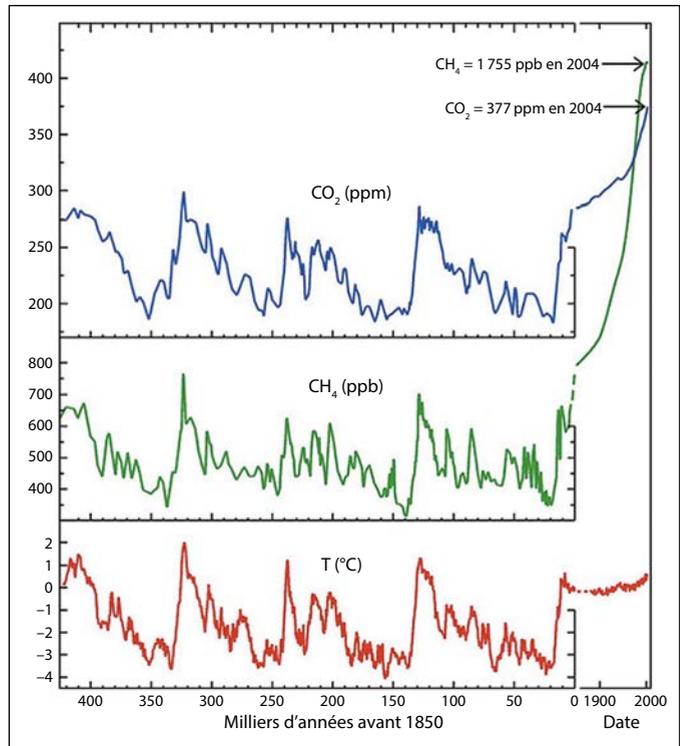


Figure 2

L'analyse des carottes de glace prélevées dans l'Antarctique nous montre que l'évolution passée du climat, liée aux changements des paramètres orbitaux de la Terre autour du Soleil, a été accompagnée de changements dans la composition chimique de l'atmosphère. Aujourd'hui, la planète se trouve dans un état très différent de ce qu'on a connu.



Sciences, 2016), et à des phénomènes d'amplification propres au système terrestre.

Sur la partie droite de la Figure 2, un zoom sur l'époque actuelle montre que l'évolution

à la fois du CO_2 et du méthane se situe véritablement en dehors de la zone des fluctuations naturelles que l'on a connues dans ce passé relativement lointain. Aujourd'hui, notre

planète se trouve dans un état qui est très différent de celui qu'on a connu, et la question est de voir quelle sera la réponse à long terme du système terrestre à une telle perturbation.

2 L'atmosphère est un réacteur chimique loin de l'équilibre

En fait, l'atmosphère est un réacteur chimique qui est très loin de l'équilibre parce qu'un certain nombre de forces extérieures l'empêchent d'atteindre cet équilibre (**Figure 3**) :

- l'énergie solaire, qui entretient les réactions photochimiques² de dissociation qui se produisent pendant le jour ;
- la biosphère³, qui produit des émissions de composés réactifs ; par exemple,

2. Réaction photochimique : réaction se produisant grâce à l'énergie lumineuse absorbée.

3. Biosphère : ensemble des écosystèmes de la Terre (organismes vivants et leur milieu de vie), ce qui correspond à une mince couche de l'atmosphère où la vie est présente (20 km maximum au-dessus du sol).

beaucoup d'hydrocarbures sont produits par les forêts, et des quantités importantes d'oxydes d'azote sont produites par les sols. Les concentrations atmosphériques d'oxygène et de CO_2 sont déterminées par des processus liés à la biosphère ;

- l'activité humaine est un phénomène nouveau dans l'histoire de la Terre qui perturbe la composition chimique de l'atmosphère et qui, par ailleurs, introduit des problèmes sur la qualité de l'air.

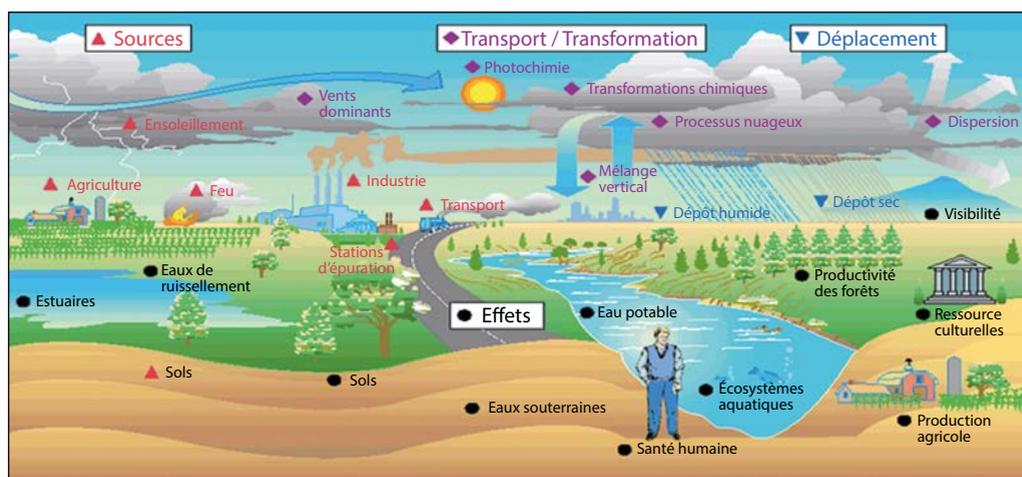
2.1. L'ozone stratosphérique nous protège des radiations UV-visible

L'ozone stratosphérique⁴ O_3 est indispensable à la vie sur Terre car il nous protège du rayonnement solaire ultraviolet. Sa présence résulte d'un équilibre entre sa production par action du rayonne-

4. Stratosphère : deuxième couche de l'atmosphère, située entre une dizaine et une cinquantaine de kilomètres du sol. La couche d'ozone se situe en majeure partie dans la stratosphère.

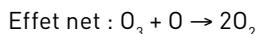
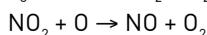
Figure 3

Les forces extérieures agissant sur le réacteur chimique hors équilibre qu'est l'atmosphère.



ment solaire ultra-violet sur l'oxygène moléculaire O_2 , et des réactions de destruction photocatalytiques. Le premier mécanisme de production et de destruction photochimique de l'ozone (Figure 4A) a été introduit par Sydney Chapman en 1930 (Figure 4AB).

L'ozone formé est détruit par un certain nombre de processus photocatalytiques dont le principal fait intervenir l'oxyde d'azote NO :



L'oxyde d'azote provient essentiellement de processus biologiques sous forme de N_2O – qui se décompose dans la stratosphère en oxyde d'azote –, mais aussi de plus en plus d'effets anthropiques ; par exemple, dans les années 1970, on a beaucoup parlé de l'effet possible des émissions d'oxyde d'azote dans la stratosphère par l'aviation supersonique⁵.

D'autres composés comme le chlore peuvent aussi catalyser

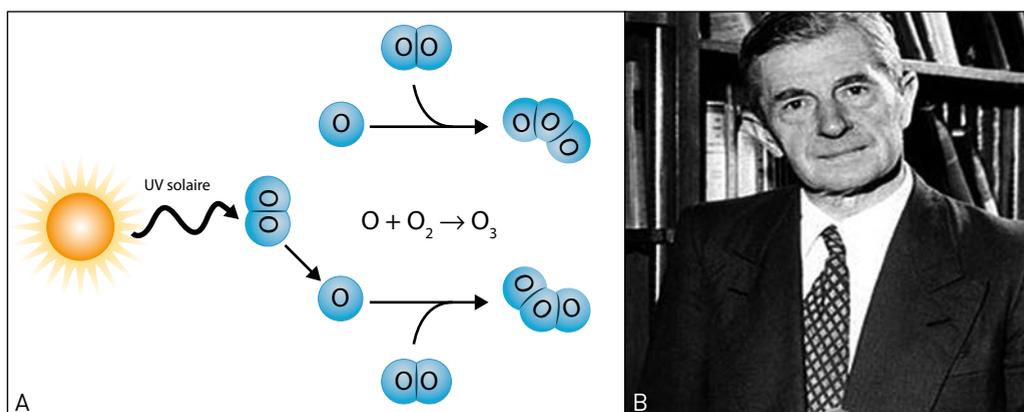
la destruction de l'ozone. Le chlore présent dans la stratosphère est essentiellement d'origine industrielle et a été produit en grande quantité à partir des rejets de chlorofluorocarbures (CFCs) qui ont été dispersés dans l'atmosphère et qui aujourd'hui sont la cause essentielle de la destruction de l'ozone dans les régions polaires de la stratosphère. Le trou d'ozone se produit par des processus complexes qui activent le chlore. Cette activation du chlore se produit sur la surface de cristaux de glace qui constituent les nuages polaires⁶ observés

Figure 4

A) Schéma du mécanisme photochimique de la formation de la couche d'ozone par action du rayonnement solaire ultra-violet sur le dioxygène O_2 . Ce mécanisme a été proposé par l'astronome et géophysicien Sydney Chapman (B).

5. Aviation supersonique : aviation capable de se déplacer à une vitesse supérieure à la vitesse du son.

6. Nuages polaires : nuages se formant dans les régions à une vingtaine de kilomètres d'altitude lorsque l'air y est très froid. Leurs dimensions peuvent atteindre la centaine de kilomètres pour une épaisseur d'un à plusieurs kilomètres et sont constitués de cristaux de glace, ce qui leur donne une apparence nacré, mais aussi parfois d'acide nitrique, ce qui leur donne une couleur orange. Bien qu'aux altitudes concernées l'humidité relative soit très faible, ces nuages se forment progressivement, et les nuages d'acide nitrique jouent un rôle dans la diminution de l'ozone stratosphérique des pôles.



entre 16 et 25 km d'altitude dans ces zones extrêmement froides de l'atmosphère. Dès que le Soleil réapparaît au printemps (septembre) dans la région polaire australe, l'ozone est détruit en quelques semaines par réactions photocatalytiques. La destruction de l'ozone est très prononcée dans l'Antarctique où les températures sont 10 à 20 °C plus basses que dans la stratosphère arctique. Ces basses températures favorisent la formation de nuages de cristaux de glace.

La diminution de l'ozone en Antarctique est visualisée par un véritable « trou » dans la couche d'ozone (**Figure 5A**) pendant le printemps austral. Même si on en parle beaucoup moins qu'il y a une dizaine d'années, le trou d'ozone devrait rester présent jusqu'aux alentours de 2050-2060, c'est-à-dire le temps que le chlore d'origine anthropique disparaisse de la stratosphère. On voit sur la **Figure 5B** que dans ces régions, la quantité d'ozone pendant la période

d'ensoleillement du printemps austral (juin-septembre) est à peu près réduite de 50 % par rapport à ce qu'elle était avant 1960. C'est un exemple qui met en lumière le rôle important de la chimie atmosphérique.

Des observations par satellites (**Figure 6**) montrent que la formation du trou d'ozone au-dessus du continent antarctique est liée à la présence dans cette région de quantités importantes de monoxyde de chlore ClO. Celui-ci catalyse la destruction de l'ozone de manière très rapide (en quelques semaines) au moment où le Soleil arrive pour permettre à cette réaction photocatalytique de se produire.

La diminution de l'ozone polaire est moins marquée au pôle Nord dont la température stratosphérique est plus élevée qu'au pôle Sud. Il y a donc dans l'hémisphère Nord moins de nuages stratosphériques polaires qui activent le chlore. Mais il peut se produire, comme ce fut le cas en 2011, un hiver stratosphérique très froid dans l'hémisphère

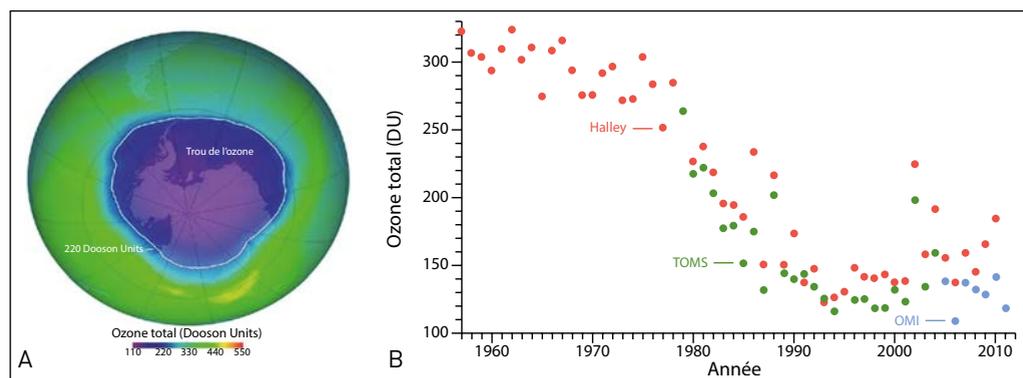
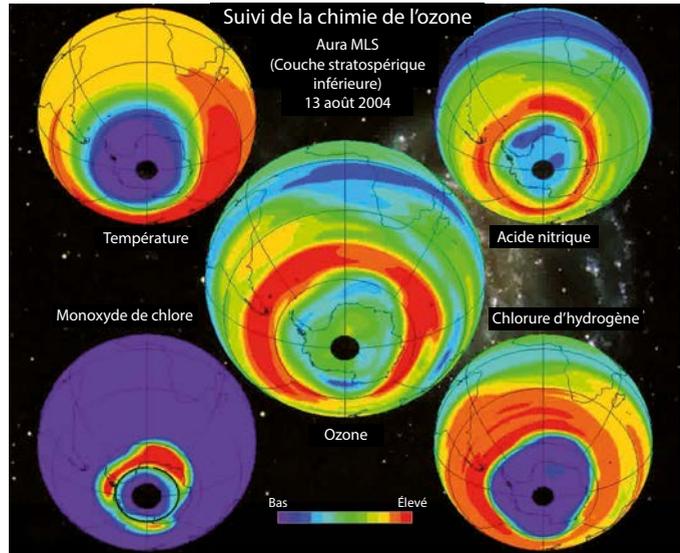


Figure 5

A) Début de la formation du trou d'ozone en 1980 ; B) diminution de la quantité d'ozone en Antarctique durant les cinquante dernières années.

Figure 6

Observations satellites permettant de mettre en évidence l'impact du trou d'ozone sur la température, la concentration en acide nitrique NO, en monoxyde de chlore ClO et en chlorure d'hydrogène HCl dans l'atmosphère.



Nord, pendant lequel ces nuages sont apparus avec pour conséquence une destruction importante de l'ozone. De faibles quantités d'ozone ont été observées cette année-là en Europe du Nord ; par contre, en 2014, cela ne s'est pas produit, comme d'ailleurs la plupart des autres années (Figure 7).

2.2. La formation d'ozone à la surface et la dégradation de la qualité de l'air

Dans les villes, l'ozone à proximité du sol est formé par une série de réactions photochimiques qui font intervenir les oxydes d'azote et différents hydrocarbures. Ceux-ci sont émis en grande

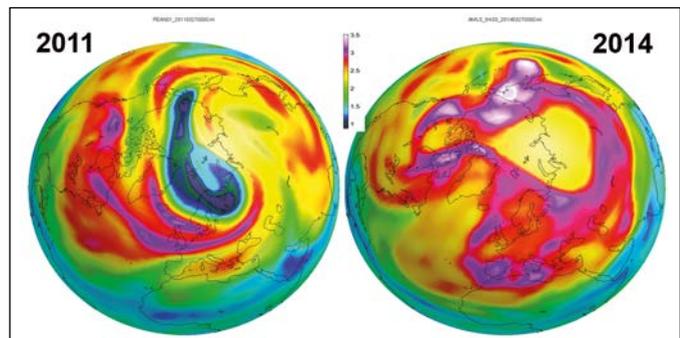


Figure 7

Lien entre la température de l'Arctique, supérieure à celle de l'Antarctique, et l'absence de trou d'ozone en cette région. Analyse des données Aura-MLS par BASCOE dans la stratosphère inférieure ($\theta = 485\text{K}$) en Mars.

Source : Simon Chabrilat, BISA.

partie par l'industrie, les activités domestiques et par les transports (**Figure 8**). Ici on se soucie moins des propriétés absorbantes de l'ozone que de son rôle d'oxydant : l'ozone que l'on respire est à la source de maladies respiratoires et cardiaques. Nous devons donc veiller à nous protéger des épisodes d'ozone qui se produisent de manière régulière pendant l'été dans les régions urbaines.

La modélisation de la qualité de l'air à l'échelle globale nous permet aujourd'hui de simuler la répartition spatiale de l'ozone, et de déterminer comment il se produit, est transporté puis détruit. La **Figure 9** montre la présence de quantités importantes d'ozone dans les zones industrielles (couleurs chaudes) mais aussi dans les zones où l'on brûle de la biomasse, notamment en Afrique. Ce sont dans ces

régions que les précurseurs d'ozone sont émis en grande quantité.

Aujourd'hui, grâce à de tels modèles mathématiques, on peut prévoir quotidiennement les concentrations des polluants à l'échelle globale. La **Figure 10** est un exemple de prévision pour le 18 novembre 2015, faite au centre européen de Reading⁷ pour les oxydes d'azote. Les quantités sont surtout importantes là où les émissions sont élevées, c'est-à-dire dans les zones urbaines, dans les zones industrielles, et très élevées en particulier en Chine. On repère aussi sur les océans les émissions qui résultent

7. Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme basé en Grande Bretagne. Ce centre donne des prévisions de la qualité de l'air pour dix jours. Météo France y participe en tant qu'État membre.

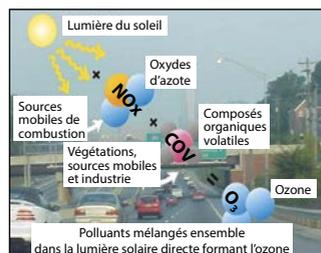


Figure 8

L'ozone O_3 à la surface de la Terre est due aux rejets de l'activité humaine. Dans les villes, l'ozone est formé par réactions photochimiques entre les oxydes d'azote (NOx) et des hydrocarbures ($COVs$) émis par le transport, l'industrie et les activités domestiques.

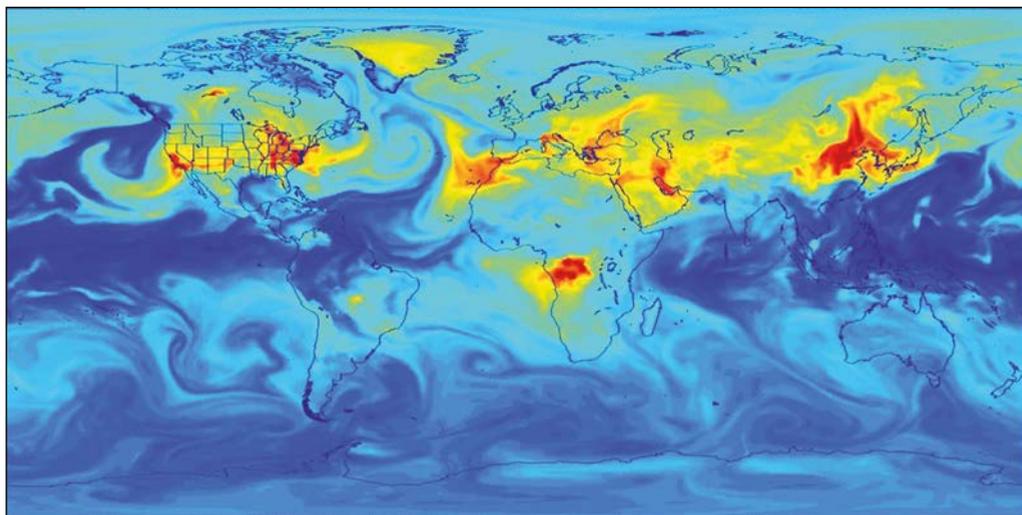


Figure 9

Modèle global de l'ozone à la surface de la Terre mettant en évidence l'impact de l'activité humaine (résolution spatiale de 50 km).

Source : Louisa Emmons, NCAR.

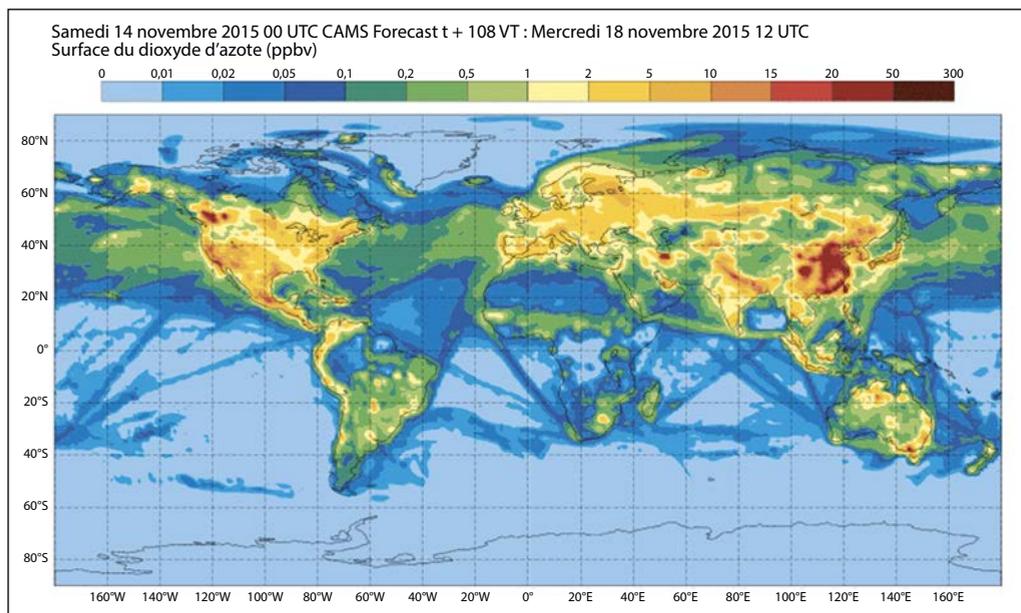


Figure 10

Prévision de la qualité de l'air à l'échelle globale pour le 18 novembre 2015.

des navires qui sont propulsés par des moteurs en général très polluants.

2.3. La formation des aérosols atmosphériques

On définit l'aérosol atmosphérique comme un mélange dynamique de particules solides et liquides en suspension dans l'air. Ces particules proviennent de sources naturelles et anthropiques (liées à l'activité humaine). La **Figure 11** montre combien la pollution de l'air peut être intense, notamment en Chine.

Les aérosols atmosphériques ont un impact direct et indirect sur le climat. L'effet direct résulte d'une interaction entre le rayonnement solaire et les particules atmosphériques. Les fines particules, par exemple les sulfates, diffusent la lumière et réduisent la quantité d'énergie qui atteint le sol. Ils contribuent à

refroidir la planète. D'autres particules comme la suie absorbent le rayonnement et tendent à réchauffer le système terrestre. Différents effets indirects existent aussi et se manifestent par des changements des propriétés optiques ou de la durée de vie des nuages. Les conséquences sur le climat de ces effets indirects restent mal quantifiées. Les sources de particules sont nombreuses (**Figure 12**). Elles peuvent être d'origine industrielle ou liées au transport. Il y a aussi des aérosols qui sont émis par l'océan, c'est le sel marin. De temps à autre des poussières sont transportées des déserts. On observe fréquemment des épisodes pendant lesquels des poussières provenant du Sahara sont transportées vers l'Europe.

La **Figure 13** présente un modèle de répartition globale d'aérosols, sur lequel on peut



Figure 11

Illustration de quelques causes de la dégradation de la qualité de l'air.

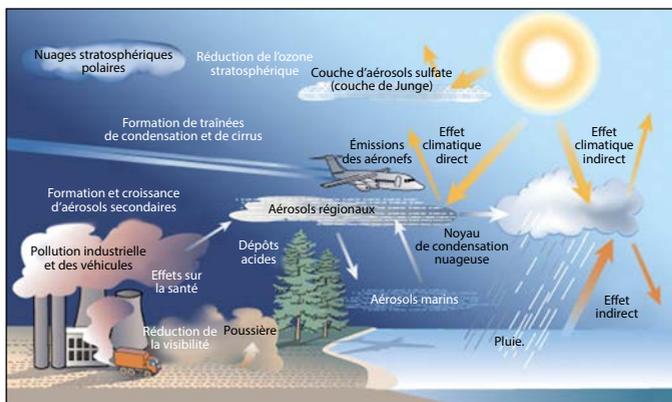


Figure 12

Les émissions d'aérosols ont de multiples sources, humaines ou non, directes ou non.

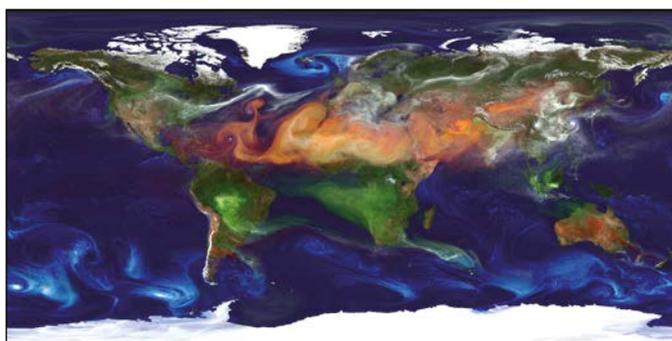


Figure 13

Modèle global des aérosols à la surface de la Terre.
 Jaune : poussière d'origine désertique ; bleu : sels marins ; vert : effet des feux de forêt ; blanc : effet des sulfates.

voir au centre, en jaune, la présence de poussières d'origine désertique ; en bleu sont figurées celle des sels marins ; en vert l'effet des feux de forêts, essentiellement visibles dans les tropiques ; en blanc, l'effet des sulfates résultant notamment de la combustion du charbon. Cette dernière contribution est particulièrement marquée en Chine.

3 La qualité de l'air : un problème majeur pour notre société

On parle beaucoup du climat, qui est un problème très important, mais on oublie parfois que la qualité de l'air est un problème urgent qui touche des populations entières. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, trois millions de personnes meurent chaque année prématurément à cause de la pollution extérieure, et il faut y ajouter environ trois autres millions de décès dus à la pollution intérieure, surtout dans les pays en développement où l'on fait du cooking⁸. Vivre dans une vallée polluée de la Chine équivaut à fumer quarante cigarettes par jour ! Ces composés réactifs ont un effet important sur le climat qui s'ajoute à celui du CO₂. On sait maintenant faire des prévisions sur la qualité de l'air comme le montrent les quatre différents modèles régionaux européens de la *Figure 14*.

8. Environ la moitié des foyers de la planète fait la cuisine grâce à des combustibles fossiles provenant de la biomasse. Cela entraîne une grave pollution intérieure et donc de nombreuses maladies respiratoires, surtout chez les femmes et les enfants.

3.1. L'impact des gaz réactifs et des aérosols sur le climat

Le courbe rouge de la *Figure 15* montre l'intensité du rayonnement solaire UV-visible qui arrive sur Terre ; la partie en rouge représente la quantité d'énergie qui pénètre effectivement jusqu'au sol, qui représente environ 75 % de l'énergie reçue. Une partie de ce rayonnement (dans l'ultra-violet) est absorbée par l'ozone dans la stratosphère. De même, la courbe bleue représente l'émission par la Terre des rayonnements infrarouges, et la partie bleue l'énergie effectivement émise vers l'espace. Celle-ci ne représente que 15 à 30 % de l'énergie émise au sol. Une partie importante de la radiation infrarouge est absorbée par les gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui conduit à un réchauffement de la planète. Sans la présence des gaz à effet de serre, la température de la Terre serait environ 30 °C plus basse que celle qui est observée.

Ce sont donc ces absorptions par des constituants de l'atmosphère, les gaz à effet de serre (CO₂, vapeur d'eau, méthane, ozone), qui vont en grande partie déterminer l'équilibre entre l'énergie qui est absorbée par le système terrestre et celle qui est émise vers l'espace. C'est le forçage radiatif⁹ dont dépend le réchauffement climatique (*Figure 16*).

Les gaz à effet de serre et les espèces chimiques comme l'ozone et les aérosols pro-

9. Forçage radiatif : équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère.

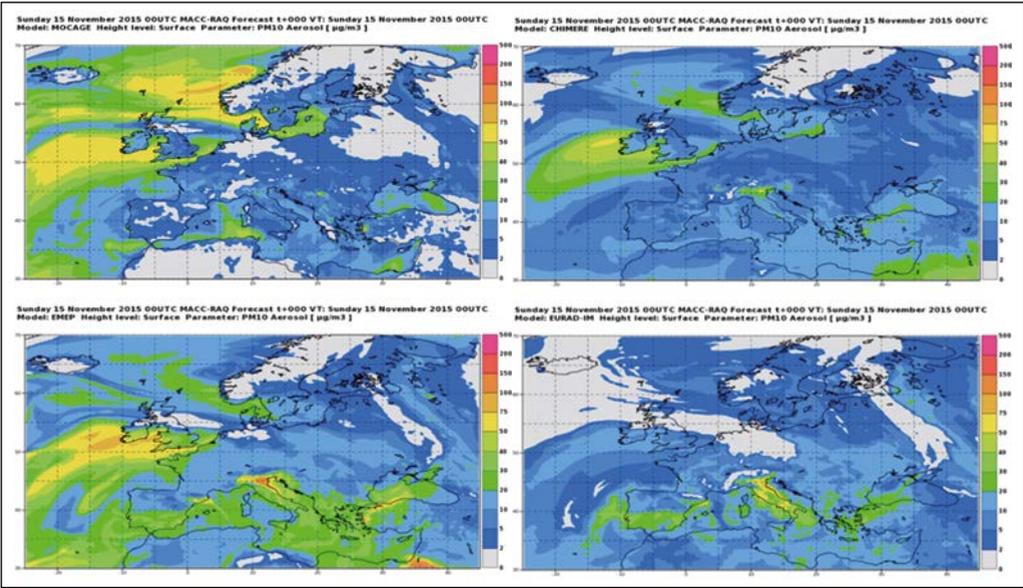


Figure 14

Variation de la prévision de la qualité de l'air en fonction du modèle utilisé (ici, quatre modèles régionaux), à l'échelle régionale en Europe. PM10, le 15 novembre 2015. PM10 : particules de diamètre inférieur à 10 micromètres.

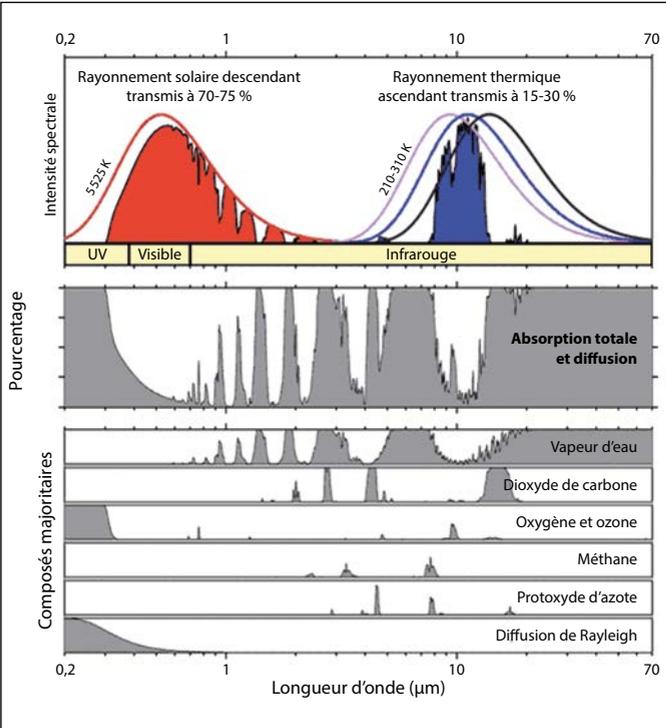


Figure 15

Rayonnement transmis par l'atmosphère : le rayonnement infrarouge émis par la Terre est en partie absorbé par les gaz à effet de serre et les aérosols contenus dans l'atmosphère.

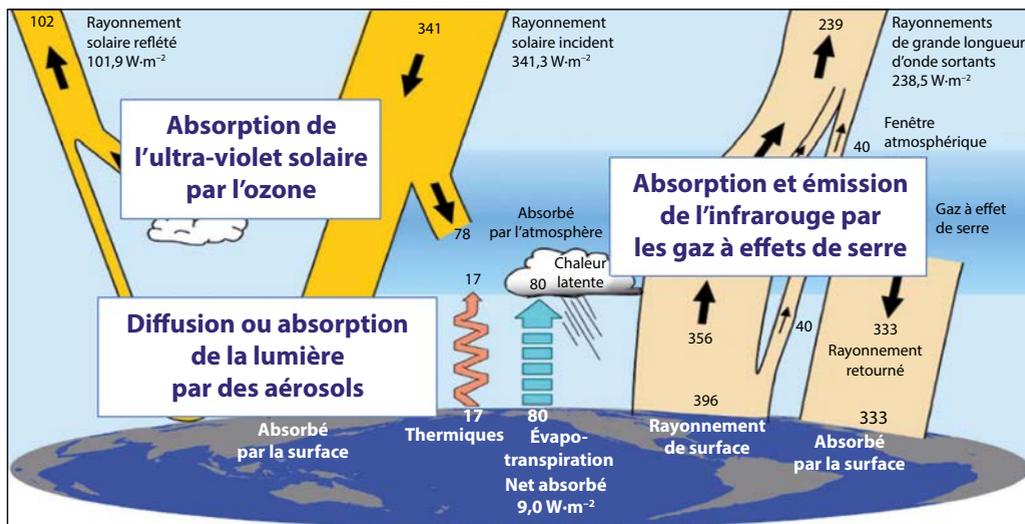


Figure 16
Flux d'énergie global (en $W \cdot m^{-2}$) et interactions avec les gaz de l'atmosphère.

duisent un forçage radiatif par effet direct. D'autres gaz produisent un forçage radiatif par effet indirect parce qu'ils vont influencer certains gaz à effet de serre comme le méthane ou des polluants qui produisent un forçage radiatif. Les particules de l'atmosphère peuvent, selon leur type d'interaction avec les radiations solaires, soit refroidir, soit réchauffer la troposphère et la surface de la Terre (Figure 17).

La suie, par exemple, va réchauffer, tandis que les sulfates vont refroidir l'atmosphère.

L'impact est important. Par exemple, dans la modélisation représentée sur la Figure 18A, tous les sulfates ont été éliminés en supposant qu'on veuille assainir l'atmosphère ; on voit que si c'était le cas, la Terre se réchaufferait de presque un degré (Figure 18B). Il en résulterait donc un accroissement de température comparable à celui dû au CO_2 depuis l'ère préindustrielle.

La Figure 19 montre le forçage radiatif produit par différentes espèces chimiques depuis la période préindustrielle (1750).

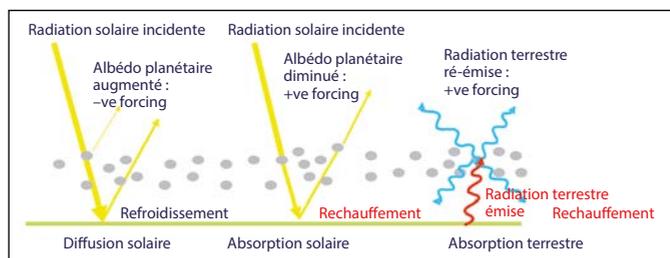


Figure 17
Effet radiatif direct des aérosols troposphériques.

Source : Crown copyright Met Office.

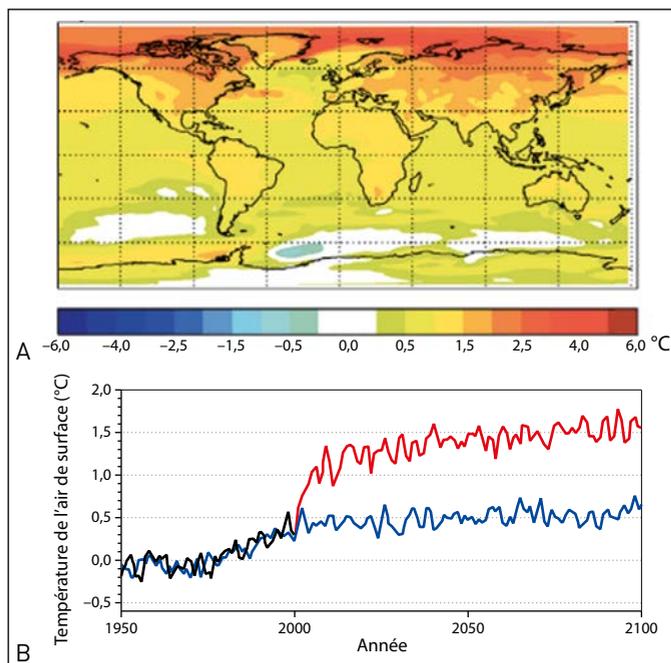


Figure 18

Impact des aérosols à base de sulfate sur la température à la surface de la planète. A) Modèle global montrant l'élévation de la température qui résulterait de l'élimination des aérosols à base de sulfate ; B) température de l'air à la surface de la Terre. Courbe rouge : sans sulfates ; courbe bleue : avec sulfates.

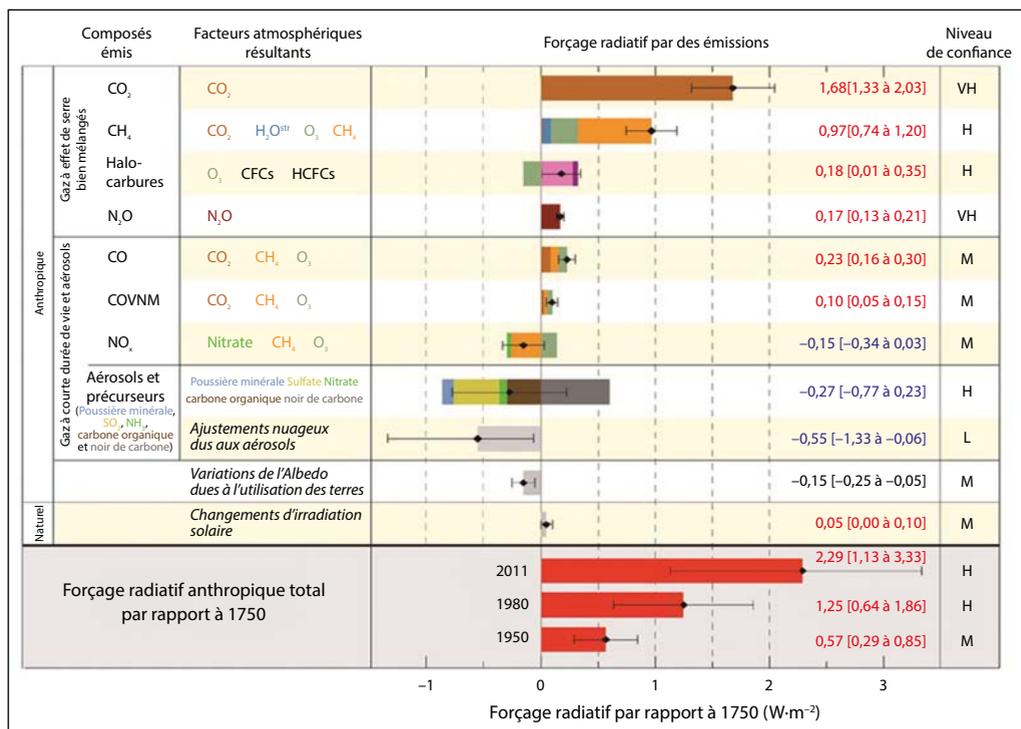


Figure 19

Effets indirects de la chimie atmosphérique sur le climat. COVNM : Composés organiques volatils non méthaniques.

Source : IPCC, AR5, WG1, 2013.

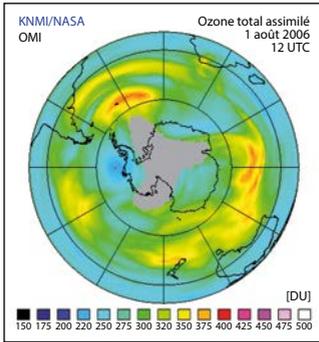


Figure 20

Observation satellite du trou d'ozone en 2006 montrant un impact sur la dynamique de l'hémisphère Sud.

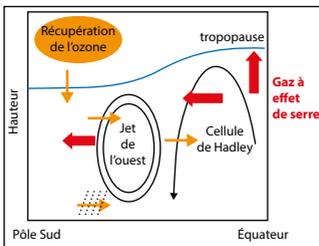


Figure 21

Futurs changements prévisibles sur l'hémisphère Sud.

Source : d'après Son et coll. (2010).

Figure 22

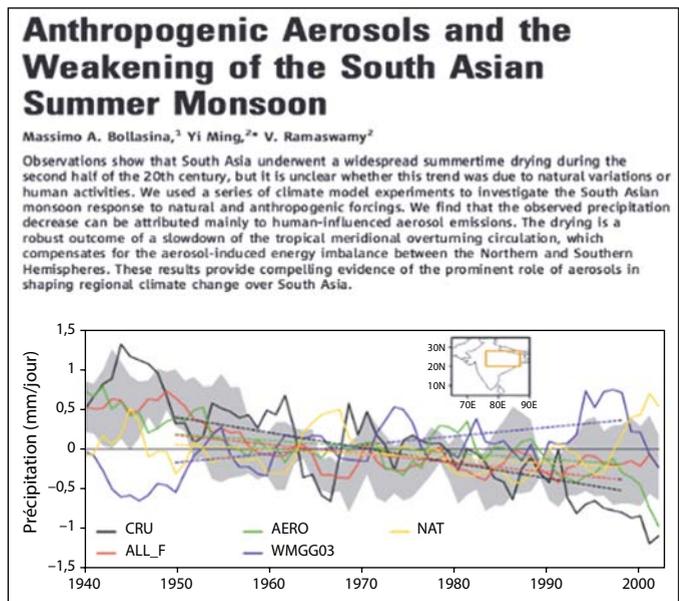
Les aérosols anthropogéniques des pays industrialisés et l'affaiblissement de la mousson d'été en Asie.

3.2. Le Trou d'ozone et le climat

Les phénomènes d'origine chimique de l'atmosphère ont une influence significative sur l'évolution du climat. Le trou d'ozone (Figure 20), par exemple, modifie quelque peu la dynamique de l'atmosphère dans l'hémisphère Sud. Les modèles montrent que la disparition du trou d'ozone, prévue vers 2050, conduira vraisemblablement au déplacement en latitude des grandes cellules de la circulation atmosphérique, dans une direction qui est opposée à celle qui devrait résulter de l'addition des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il y aura donc une sorte de compensation entre les deux processus qui va se produire : l'augmentation des gaz à effet de serre dans les années futures mais aussi la disparition du trou d'ozone (Figure 21).

Un autre exemple d'interaction entre la chimie et la dynamique de l'atmosphère est fourni par l'effet de la pollution de l'air sur la mousson indienne (Figure 22). La formation de particules atmosphériques liée à l'activité des pays industriels, plus importante dans l'hémisphère Nord, produit vraisemblablement une modification de la circulation dans les tropiques et, en particulier, de la localisation et de l'intensité de la mousson. D'après certains modèles, cela expliquerait l'affaiblissement observé de la mousson avec ses conséquences importantes sur l'agriculture de l'Inde ou de l'Asie du Sud.

Puisque les composés réactifs et les aérosols ont un impact significatif sur le climat, il a été suggéré de contrôler en premier lieu la concentration à relativement courte durée



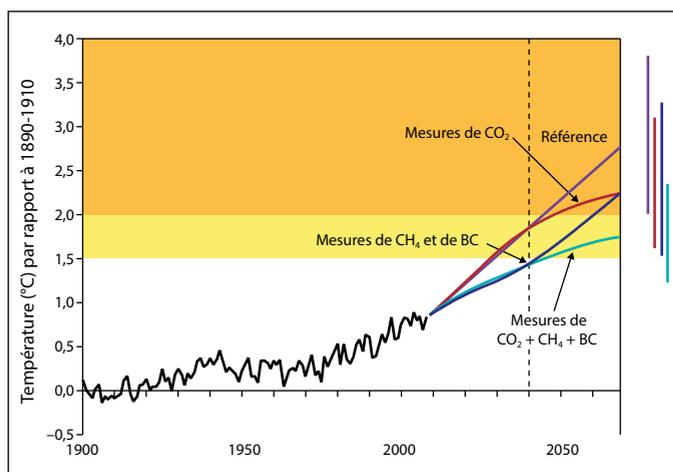


Figure 23

Prévision de l'évolution de la température avec la diminution des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 et BC).

Source : DrewShindell et coll. (2012). *Science*, 335 : 183.

de vie comme le méthane et l'ozone (Figure 23). Les effets sur le réchauffement de la planète devraient se manifester rapidement. Cette stratégie est intéressante mais insuffisante car, à long terme, l'augmentation de la température de la Terre ne sera maîtrisée que par une limitation des émissions de CO_2 .

4 L'impact des changements climatiques sur la qualité de l'air

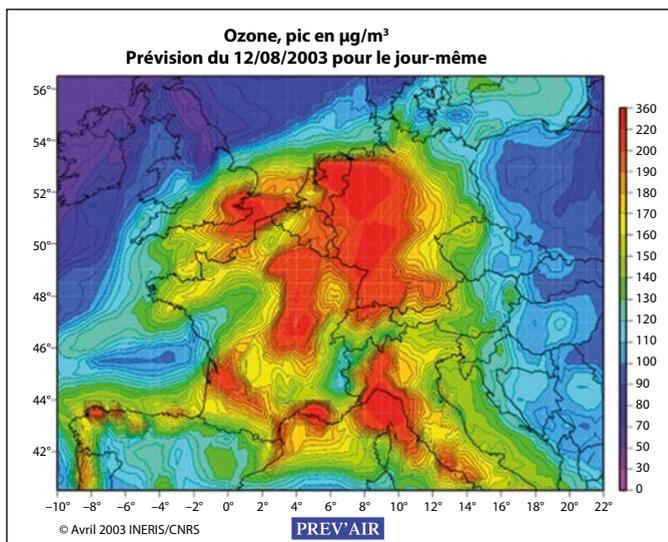
Nous devons aussi nous attendre à un impact des changements climatiques sur la composition chimique de l'atmosphère et donc sur la qualité de l'air. Il est difficile de quantifier cet impact. On peut s'attendre à un réchauffement des continents supérieur au réchauffement global, ce qui devrait augmenter l'ozone et les

aérosols atmosphériques dans ces régions. Les précipitations pourraient augmenter parce le réchauffement entraînera une augmentation de l'évaporation. Cette augmentation des précipitations entraînera une élimination des espèces solubles des aérosols atmosphériques. L'augmentation de la nébulosité tendra par ailleurs à réduire la production d'ozone. Le réchauffement des pôles devrait diminuer la circulation des vents entre l'équateur et les pôles.

Le bilan de toutes ces conséquences est donc complexe et difficile à déterminer, et il est donc intéressant de voir ce qui s'est passé pendant la vague de chaleur de 2003, qui représente peut-être une préfiguration d'une augmentation de la température. La Figure 24 montre l'apparition immédiate de pics d'ozone extrêmement importants. On estime à plu-

Figure 24

Pic d'ozone lors de la vague de chaleur de l'été 2003 en Europe, un exemple d'impact des changements climatiques sur la qualité de l'air. On estime qu'en Europe il y a eu 44 000 décès prématurés pendant cette période.



sieurs dizaines de milliers le nombre de décès prématurés pendant cette vague de chaleur et on pense qu'un tiers,

peut-être même la moitié de ces décès, a été causé par la dégradation de la qualité de l'air qui en a résulté.

Le système terrestre est complexe

Les différents exemples présentés dans ce chapitre montrent qu'il existe des rétroactions importantes entre la composition chimique de l'atmosphère et le climat. Ces interactions font intervenir des processus qui lient la chimie avec la température, la dynamique de l'atmosphère, et aussi les émissions par la biosphère terrestre. Ces processus ne sont pas tous très bien connus, en particulier l'effet de la biosphère sur la composition chimique de l'atmosphère. Une meilleure étude expérimentale de ces processus est donc nécessaire. La modélisation du système terrestre permet de quantifier, d'étudier ces interactions, mais dans cette démarche scientifique, il est évident qu'il demeure des incertitudes et des questions qui requièrent un effort de recherche.

Des progrès restent à faire. Il existe des solutions qui permettront à la fois d'améliorer la qualité de l'air et de préserver le climat. La réduction de l'ozone dans la troposphère est un exemple, la réduction de la suie dans l'atmosphère en est un autre. Ce sont des mesures qui auront un effet sur le climat et sur la qualité de l'air à très court terme, mais qui ne doivent pas nous faire oublier qu'en définitive, à long terme, c'est la réduction du CO₂ qui est importante si on veut limiter les effets de l'activité humaine sur le climat du futur.