

Qualité de l'air et changement climatique : de multiples et complexes interactions

Air quality and climate change: Multiple and complex interactions

Pascal DEVOLDER*

Résumé

Parmi les problèmes environnementaux, l'humanité doit faire face à deux inquiétudes : d'une part la dégradation de la qualité de l'air urbain, variable selon les situations locales, d'autre part le changement climatique global, par essence d'extension mondiale. Dans la période récente, plusieurs rapports [1, 2, 3a] ont analysé de manière détaillée les impacts réciproques entre la qualité de l'air et le réchauffement climatique ainsi que les évolutions prévisibles. Dans le présent article, on tente de synthétiser les faits essentiels et les tendances prévisibles développés dans ces récents rapports.

On passe d'abord en revue les impacts climatiques directs des principaux polluants, en mettant l'accent sur les précurseurs d'ozone et sur la matière particulaire. On expose ensuite qualitativement les impacts de ces polluants sur les écosystèmes qui, en s'adaptant, peuvent en retour modifier les paramètres climatiques. Enfin, plus succinctement, on présente les évolutions prévisibles de la qualité de l'air qui résulteront du réchauffement climatique. La conclusion reprend le message fort issu des rapports, à savoir l'imbrication complexe des deux objectifs : celui de la préservation de la qualité de l'air et celui de la limitation du changement climatique, ainsi que le corollaire : seules les stratégies intégrant les deux objectifs seront efficaces dans la durée.

Mots clés

Changement climatique. Pollution de l'air. Interactions.

Abstract

Among many environmental stakes, humanity currently faces two problems: on one hand, a degradation of the quality of urban air, more or less acute according to local conditions, on the other hand the climatic change, obviously of worldwide extent. In the recent period, a series of extensive reports [1, 2, 3a] analysed in detail the connexions between air quality and global warming ; the present article tries to synthesize the essential data and the expected trends presented in these reports.

The impacts of the main pollutants on climate are first reviewed, with particular attention to the role of ozone precursors and of particulate matter. Then, we consider qualitatively the influence of ecosystems on climatic parameters after modifications of these ecosystems induced by released pollutants. And last, the probable impacts of the current climate change on air quality are briefly listed. Our conclusion follows the very strong message carried by all reports: the two objectives, i.e. the reduction of pollution and the limitation of temperature increase are strongly correlated; and only strategies integrating the two objectives will be successful in the long term.

Keywords

Climatic change. Air pollution. Interactions.

* Laboratoire de physico-chimie des processus de combustion et de l'atmosphère – UMR CNRS 8522 – Université des Sciences et Technologie de Lille 1 – 59655 Villeneuve-d'Ascq Cedex (France) – E-mail : pascal.devolder@orange.fr

1. Introduction

Dans beaucoup de pays, de nouvelles dispositions réglementaires sont périodiquement adoptées depuis plusieurs décennies afin de limiter les épisodes de pollution à l'ozone et les émissions de particules dans les zones urbaines ; c'est aussi le cas de l'Union européenne qui édifie pas à pas une législation spécifique visant à améliorer la qualité de l'air [1].

Par ailleurs, il n'est plus possible d'ignorer le défi, global et redoutable, que constitue le changement climatique. Pour en limiter l'ampleur, les conférences internationales recommandent régulièrement une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), le CO₂ en première ligne. Le protocole de Kyoto (1997) avait prévu, pour les pays industrialisés et à l'horizon 2008-2012, une réduction de 5,2 % des émissions de GES par rapport à leur niveau de 1990. Le conseil européen a fixé, pour 2020, un objectif de réduction de 20 à 30 % des émissions de GES pour l'Europe. Et comme l'a rappelé à l'automne 2007 le Grenelle de l'environnement, la France doit se placer sur la trajectoire d'une division par quatre de ses émissions de GES d'ici l'an 2050.

Jusqu'à un passé récent, les stratégies liées à ces deux problématiques, la limitation du changement climatique et la préservation de la qualité de l'air, avaient souvent été élaborées de manière indépendante, comme s'il n'y avait aucune corrélation entre les deux objectifs. Outre le dernier rapport du GIEC* [2], qui aborde la question sur le plan planétaire, plusieurs rapports d'experts européens se sont récemment attachés à présenter les liens entre changement climatique et qualité de l'air, soit pour le Royaume Uni et l'Europe de l'Ouest [3] soit pour toute l'Europe [4].

Or, depuis plus d'une décennie, diverses études avaient suggéré que certaines mesures visant à réduire la pollution régionale pouvaient avoir contribué à accroître ou parfois, au contraire, à masquer le réchauffement climatique ; à cet égard, le rôle joué par les aérosols sulfatés est emblématique puisqu'il est maintenant bien établi que ce type d'aérosols, dont la contribution aux pluies acides est claire, a contribué à atténuer le réchauffement atmosphérique [5a, 6, 7], par exemple au-dessus de larges aires très polluées de la Chine. Le rôle « atténuateur » de ces aérosols sulfatés est aussi clairement mis en avant pour expliquer le léger refroidissement planétaire ($\approx 0,5$ °C) observé pendant environ un an après certaines éruptions volcaniques particulièrement violentes [8-10]. D'autres aérosols ont un effet inverse : récemment, une équipe de climatologues [11]

a montré que la fonte accélérée des glaciers himalayens de moyenne altitude est due pour moitié aux immenses panaches de pollution (*"Atmospheric Brown Clouds"*), fréquents en Asie du Sud-Est (l'autre cause de cette fonte étant le réchauffement global « classique » associé aux GES).

Dans la suite, on utilisera indifféremment les termes « aérosols », « matière particulaire » (*Particulate Matter* en anglais : PM) ou « particules » quel que soit l'état physique de la particule (solide ou liquide), en notant toutefois que l'expression PM (ou les particules) est plutôt employée dans le domaine de la qualité de l'air et le mot aérosol est davantage usité lorsqu'on s'intéresse au pouvoir de réchauffement des aérosols.

Avant d'aborder les multiples interactions entre le changement climatique et la qualité de l'air, on doit rappeler que la machine climatique évolue de manière complexe en raison de la présence de « rétroactions ». Plusieurs rétroactions sont liées au cycle de l'eau : rappelons au passage que c'est la vapeur d'eau atmosphérique qui possède le pouvoir d'échauffement global** le plus élevé (supérieur à celui du CO₂) mais qu'elle n'est pas cataloguée comme GES car majoritairement d'origine naturelle (à part les émissions stratosphériques liées au transport aérien).

Une augmentation de température de l'air atmosphérique stimule l'évaporation donc accroît la couverture nuageuse. Ceci contrecarre le réchauffement climatique puisque les nuages renvoient vers l'espace environ 30 % de l'énergie solaire incidente (c'est l'effet albédo). Ce comportement est qualifié de « rétroaction négative » puisque suite à une perturbation (l'augmentation de température), le système climatique répond par un déplacement d'équilibre dont l'effet est de contrecarrer l'action***.

Au contraire, cette même vapeur d'eau est à l'origine de « rétroactions positives ». En effet, l'augmentation du contenu en eau de l'atmosphère accroît le réchauffement de l'air puisque la vapeur d'eau est un GES. Par ailleurs, le réchauffement de la troposphère provoque une fusion accrue de la neige et des glaces de mer, découvrant ainsi davantage de surfaces (océans ou terres) beaucoup plus sombres qui renvoient moins les radiations solaires ; ces deux effets augmentent l'énergie solaire captée par le système terre/atmosphère et donc accélèrent son réchauffement.

Les rétroactions décrites ci-dessus, positives ou négatives, peuvent être considérées comme internes à la machine climatique puisqu'elles impliquent un élément essentiel du système climatique : l'eau. Elles expliquent le caractère non linéaire du système

* GIEC : Groupement intergouvernemental sur l'évolution du climat (en anglais : IPCC).

** Le forçage radiatif (ou forçage, en W/m²) est la variation de puissance radiative du bilan énergétique de la planète suite à une variation de concentration d'un constituant atmosphérique ; le pouvoir d'échauffement global intègre ce forçage sur la durée atmosphérique du constituant, en adoptant la valeur relative 1 pour le pouvoir de réchauffement.

*** En toute rigueur, cette rétroaction négative est surtout l'apanage des nuages de basse altitude, pour lesquels l'effet d'albédo est prédominant ; au contraire, pour les nuages hauts et froids, l'absorption de l'infrarouge tellurique l'emporte sur l'effet d'albédo, d'où une rétroaction positive.

climatique : sa réponse n'est pas en directe proportion avec la perturbation qui lui est appliquée. L'existence de multiples rétroactions positives est source d'inquiétudes car elles pourraient enclencher un emballement du réchauffement global. En effet, on verra ci-après que les interactions du système climatique avec les diverses pollutions créent aussi des rétroactions, délicates à intégrer rigoureusement dans les modèles climatiques. On utilise plus généralement le terme d'« interactions » pour décrire les influences réciproques du climat et de la pollution de l'air. On peut déjà mentionner un exemple de telles interactions : l'élévation de température modifie le volume des émissions de méthane et des divers COV* émis par les écosystèmes et, par voie de conséquence, la quantité d'aérosols dont certains COV sont les sources ; or méthane et aérosols ont des impacts indirects sur le niveau de pollution (voir 3^e paragraphe).

L'article est structuré comme suit ; après une présentation synoptique des interactions (paragraphe suivant), on passe en revue les impacts des polluants sur le changement (ou le réchauffement) climatique (3^e paragraphe) puis les impacts de ce dernier sur la qualité de l'air (4^e paragraphe).

2. Généralités : des sources anthropogéniques aux écosystèmes impactés

Par le truchement d'une série d'interactions plus ou moins complexes avec l'environnement, l'émission d'un polluant peut engendrer plusieurs types de pollutions. Dans ce paragraphe, on commence par passer en revue de manière très globale les impacts des divers polluants.

La Figure 1 présente une vue synoptique simplifiée des relations de cause à effet pour diverses sources de polluants d'origine uniquement anthropique (c'est-à-dire à l'exclusion des sources naturelles). La colonne de gauche (« sources ») liste les principales sources de polluants (production d'énergie, agriculture et élevage, industrie, transports, déchets) et chacune des bulles des autres colonnes est reliée à ses diverses causes de la colonne située à sa gauche et à ses impacts de la colonne située à sa droite. Cette figure appelle les commentaires complémentaires suivants :

- la colonne "*Compounds*" ne liste que les composés moléculaires « primaires » émis directement par les activités humaines. Le méthane, qui n'est pas à proprement parler un polluant, est inclus par convention dans la liste car il intervient dans la formation d'ozone et se trouve être le deuxième plus important GES après le CO₂ ;
- en sus de l'acidification et de l'eutrophisation, la colonne "*Effects*" mentionne les particules et l'ozone car ce sont tous deux des polluants « secondaires », c'est-à-dire issus de processus physico-chimiques initiés par les polluants primaires. L'ozone « régional » résulte d'épisodes sporadiques de pollution (la pollution photochimique), d'extension régionale ; on le distingue ici de l'ozone « troposphérique » (dit parfois « de fond »), qui est présent loin de toute source de pollution ; ce dernier a vu sa concentration augmenter de 38 % [5a] depuis le début de l'ère industrielle et constitue actuellement le troisième GES ;
- la colonne "*Receptors*" liste les écosystèmes naturels ou anthropisés qui sont affectés par la pollution. Dans la suite, on va s'intéresser aux interactions entre le climat et les éléments des colonnes "*Compounds*" et "*Effects*".

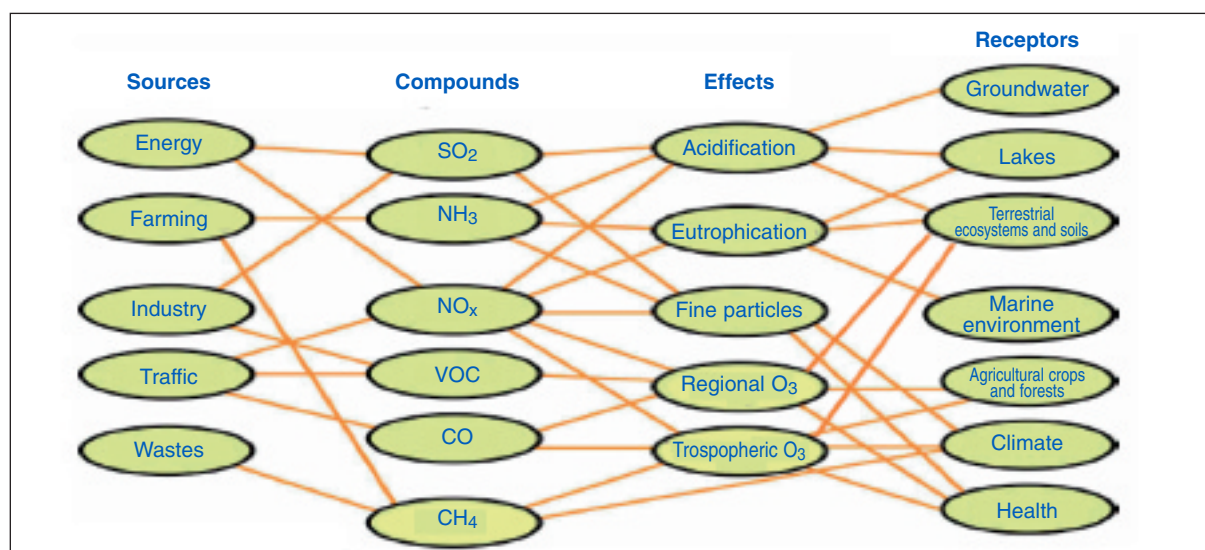


Figure 1.

Vue synoptique des liens entre les processus gouvernant la qualité de l'air à l'échelle régionale et les impacts sur les écosystèmes et le climat (extrait de [3a]).

* COV : composé organique volatil (en anglais : VOC).

La Figure 1 ne fait pas apparaître les interactions qui peuvent exister entre les éléments de la colonne "Receptors", par exemple l'influence du changement climatique sur la santé des populations, point que nous n'aborderons pas. Dans la suite, on s'intéressera à certaines autres interactions, par exemple celles entre le climat et les écosystèmes naturels (par exemple les forêts) ou anthropisés (par exemple les cultures et les sols).

3. Influence des polluants atmosphériques sur le changement climatique

3.1. Généralités

On va maintenant discuter de manière plus détaillée les divers effets de chacun des polluants sur la composition chimique de l'atmosphère, le climat, les écosystèmes, etc. Bien qu'ils ne participent pas directement à la mesure de la qualité de l'air, CO₂ et N₂O (l'oxyde nitreux) sont ici listés parmi les polluants en raison de leur statut de GES. Comme pour l'exemple de l'aérosol soufré, mentionné dans l'introduction, chaque polluant peut contribuer au réchauffement climatique ou, *a contrario*, avoir tendance à le ralentir.

Le Tableau 1 (tiré de [3a]) rassemble et résume les impacts de sept polluants moléculaires et des particules « primaires ». Les impacts sur les écosystèmes ont déjà été présentés Figure 1. On va maintenant dissocier les impacts directs (par modifi-

cation du forçage radiatif) des impacts indirects (par variation de processus chimiques atmosphériques) ; ces aspects sont présentés dans les trois colonnes de droite du Tableau 1. Comme pour la Figure 1, le Tableau 1 se limite aux polluants anthropogéniques et appelle les explications suivantes :

- 1^{re} et 2^e colonnes : y sont listés les polluants primaires et leurs sources, qu'ils soient émis sous forme moléculaire ou particulaire ;
- la 3^e colonne présente une caractéristique importante : la durée de vie atmosphérique de chaque polluant ;

Les colonnes suivantes mentionnent les divers impacts des polluants en ce qui concerne :

- 4^e et 5^e colonnes : la qualité de l'air ou l'action sur les écosystèmes (acidification, eutrophisation), ainsi que l'incidence sur la santé humaine ;
- 6^e colonne : la capacité de génération d'ozone troposphérique, qui sera détaillée dans le Tableau 2 ;
- 7^e colonne : la contribution au forçage radiatif, qui peut être positive ou négative. Les oxydes d'azote (NO_x = NO + NO₂), le monoxyde de carbone (CO) et les COV ont chacun un forçage radiatif négligeable mais, comme on le verra plus loin, ils influent sur la vitesse du processus de formation d'ozone à partir de CH₄, ce qui par contrecoup modifie l'intensité des forçages radiatifs dus au méthane et à l'ozone troposphérique ;
- 8^e colonne : la capacité oxydante de l'atmosphère ; cette dernière notion caractérise la vitesse avec

Tableau 1.
Nature et diversité des impacts des principaux polluants (tiré de [3a]).

Pollutant*	Main anthropogenic sources	Lifetime in the atmosphere	Potential effects				
			AQ/health effects	Acid deposition/eutrophication	tropospheric O ₃ **	Radiative forcing/climate	Oxidising capacity of atmosphere
SO ₂ (→SO ₄ ²⁻)	Fossil fuel combustion	~ days	SO ₂ & SO ₄ ²⁻ aerosol	Add deposition		SO ₄ ²⁻ short-term cooling	
NO _x (NO + NO ₂) (→ NO ₃ ⁻)	Stationary combustion and transport	~ days	NO ₂ & NO ₃ ⁻ aerosol	Add deposition and eutrophication	✓	NO _x indirect effect on CH ₄ and O ₃ NO ₃ ⁻ short-term cooling	✓
NH ₃ (→NH ₄ ⁺)	Agriculture	~ days	(NH ₄ ⁺ aerosol)	Add deposition and eutrophication		NH ₄ ⁺ short-term cooling	
N ₂ O	Soils, biomass	> 100 years				Warming	
CO ₂	Combustion	50-200 years				Warming	
CH ₄	Fossil fuel, agriculture, landfills	12 years (adjustment time)			✓	Warming	✓
CO	Traffic	~ 1 month	Yes		✓	Indirect effect on CH ₄ and O ₃	✓
VOCs	Fuel combustion, solvents, traffic	Varies by compound	Some species		✓	Indirect effect on CH ₄ and O ₃	✓
Primary particles PM ₁₀ /PM _{2.5}	Combustion, traffic and grinding/dusty processes	~ days	Yes in combination with secondary PM: SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , organics, etc.			Short-term warming and cooling	

* Sulphur dioxide (SO₂), sulphate (SO₄²⁻), nitrogen oxides (NO_x), nitric oxide (NO), nitrogen dioxide (NO₂), nitrate (NO₃), ammoniac (NH₃), ammonium (NH₄⁺), nitrous oxide (N₂O), carbon oxide (CO₂), methane (CH₄), carbon monoxide (CO) and volatile organic compounds (VOCs).

** Ozone (O₃) is a secondary pollutant. It affects human health, vegetation and crops. It is also important as a GHG, and in atmospheric chemistry and cleaning (or oxidizing) capacity of the atmosphere.

laquelle un panier d'espèces réactives (en premier lieu le radical hydroxyle OH) attaque les polluants primaires pour les transformer en une multitude de polluants secondaires ; ces derniers peuvent soit rester des petites espèces moléculaires (par exemple l'ozone, des COV oxygénés), soit s'agglutiner en particules de diverses tailles après des processus d'agrégation.

On peut déjà remarquer que la plupart des substances qui affectent la qualité de l'air ont des durées de vie relativement courtes, de quelques jours à une année pour fixer les idées, au contraire du principal GES (CO₂), dont la durée de vie atmosphérique excède le siècle. Ceci a une conséquence importante : si le réchauffement attendu pour le milieu du siècle (plus de 2 °C [2]) ne peut plus guère être réduit, la rémanence beaucoup plus courte des substances impliquées dans les phénomènes de pollution autorise encore l'espoir d'une limitation de leur contribution au réchauffement climatique.

Il est commode et classique de passer séparément en revue les effets dus d'un côté aux aérosols, de l'autre ceux liés aux processus physico-chimiques impliquant des espèces moléculaires ; ces deux catégories de polluants – les aérosols et les produits moléculaires – trouvent leur importance par le fait qu'ils contrôlent largement la formation de l'ozone. Il faut cependant admettre qu'une séparation entre l'impact des particules et celui des processus chimiques se révèle inappropriée pour certaines classes de polluants, par exemple les COV, puisque certains finissent par former des aérosols dits « secondaires » tout en contribuant à générer des molécules d'ozone.

3.2. Rôle des composés moléculaires gazeux : impact de la photochimie troposphérique

Selon le GIEC [5a], depuis le début de l'ère industrielle, l'augmentation du forçage radiatif dû au seul apport d'ozone d'origine anthropique est d'environ 0,4 W/m², soit 15 % de la part due aux GES (2,6 W/m²) mais 25 % du total dû à la perturbation humaine (1,6 W/m²). Les divers précurseurs de l'ozone : NO_x, COV, CH₄ et CO, dont l'implication dans la production d'ozone est rappelée ci-après, ont donc clairement un effet indirect sur le climat. Pour ce XXI^e siècle, on prévoit une augmentation du forçage radiatif de + 0,55 W/m² due à la seule charge supplémentaire en ozone [3b].

On va d'abord rappeler succinctement la manière dont les divers polluants gazeux contrôlent l'ozone troposphérique et par là influent sur le forçage radiatif global. L'ensemble des réactions chimiques ci-dessous schématise de manière très simplifiée les étapes-clés parmi les nombreux processus physiques ou transformations chimiques à l'origine de la pollu-

tion photochimique* [12, 13] ; les COV sont ici écrits globalement comme des hydrocarbures de formule chimique RH

- les réactions de formation de l'ozone troposphérique (les sources) :
 - la photolyse de NO₂ : $\text{NO}_2 + h\nu + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3 + \text{NO}$
 - l'intrusion d'ozone stratosphérique
- les réactions de destruction de l'ozone (les puits) :
 - la photolyse de l'ozone : $\text{O}_3 + h\nu + \text{vapeur d'eau} \rightarrow \text{OH}$
 - le dépôt au sol
- l'oxydation des COV grâce à la capacité oxydante de l'atmosphère :

de multiples séquences de réactions chimiques conduisent à l'oxydation des divers COV et à leur transformation en COV « oxygénés » ; elles sont initiées par un ensemble de radicaux très réactifs, parmi lesquels le radical OH joue le rôle essentiel :

- $\text{OH} + \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{HO}_2$
- $\text{OH} + \text{RH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{RO}_2 + \text{autres espèces}$
- $\text{OH} + \text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{O}_2 + \text{autres espèces}$

Les espèces radicalaires instables : HO₂, RO₂, CH₃O₂ peuvent ensuite générer le dioxyde d'azote par une série de réactions chimiques en présence de quantités suffisantes de monoxyde d'azote :

$(\text{HO}_2, \text{RO}_2 \text{ ou } \text{CH}_3\text{O}_2) + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{autres espèces}$

L'importance du radical OH en tant que « puits » pour la plupart des polluants peut être quantifiée par la fraction de dégradation initiée par ce radical pour quelques polluants typiques dans une troposphère « moyenne » (et donc de l'élimination du polluant). On trouve ainsi [14], pour CH₄ : 90 %, pour CO : 80 %, pour l'isoprène (le plus important COV naturel) : 90 %, pour le sulfure de diméthyle : 90 % ; pour les terpènes (d'autres COV importants) et pour NO₂ : 50 %.

Parmi les divers précurseurs d'ozone, le méthane se distingue par sa durée de vie atmosphérique beaucoup plus longue (Tableau 1), ce qui explique sa répartition relativement homogène dans chaque hémisphère. Par conséquent, tout effet issu d'une variation des émissions de CH₄ se manifestera avec un temps de latence long, de l'ordre de la décennie. Pour la même raison d'une diffusion loin des sources, toute réduction de CH₄ à l'échelle d'une seule région voire même de l'Union européenne aura peu d'effet sur le niveau d'ozone troposphérique de notre continent.

Puisque ce ne sont pas des GES, les précurseurs d'ozone autres que CH₄ : CO, les COV, les NO_x, n'ont qu'un effet indirect sur l'équilibre radiatif de l'atmosphère. En outre, leurs temps de résidence relativement courts font que toute variation de leurs sources affectera la quantité d'ozone généré sur des échelles de temps plus courtes, de la semaine au mois.

* Les réactions chimiques présentées dans ce paragraphe ne décrivent pas les processus réactionnels effectifs mais seulement les espèces importantes du bilan de séquences réactionnelles consécutives.

Tableau 2.

Forçages radiatifs résultants : effets d'une augmentation (↑) des émissions régionales de quatre polluants sur les variations (augmentation : ↑ ou diminution : ↓) de l'ozone, du méthane et du radical OH ainsi que la résultante pour le réchauffement climatique ; les échelles spatiale et temporelle de la variation induite sont indiquées.

↑ CH ₄ échelle régionale	⇒	↓ OH (<i>décennie</i>) échelle globale	⇒	↑ CH ₄ + ↑ O ₃ (<i>décennie</i>) échelle globale	Forçage positif
↑ CO échelle régionale	⇒	↑ O ₃ (<i>mois</i>) échelle régionale	⇒	↑ CH ₄ + ↑ O ₃ (<i>décennie</i>) échelle globale	Forçage positif
↑ NO _x échelle régionale	⇒	↑ O ₃ et ↑ OH (<i>mois</i>) échelle locale	⇒	↓ CH ₄ + ↓ O ₃ (<i>décennie</i>) échelle globale	Faible Forçage négatif
Impact des COV : comme celui de CO					

Le Tableau 2, inspiré de [3b], résume de manière qualitative l'impact indirect sur le forçage radiatif d'une variation, à une échelle régionale, des émissions de chacun des polluants.

Une augmentation des émissions de méthane (1^{re} ligne du tableau) induit, à l'échelle de la décennie, une diminution de la concentration en radicaux OH à l'échelle globale et avec une échelle de temps décennale qui a pour conséquence une augmentation lente des concentrations en ozone de fond et de méthane sur l'ensemble du globe ; ces effets se conjuguent en un forçage radiatif positif.

Par des processus comparables, l'augmentation des émissions de CO (2^e ligne du tableau) à une échelle régionale induit *in fine* un forçage radiatif positif ; on estime [3b] qu'actuellement ce forçage radiatif dû à CO vaut la moitié de celui dû au méthane.

Pour les NO_x émis par les sources de surface (3^e ligne du tableau), diverses simulations concluent que le forçage radiatif global résultant, malgré une contribution initialement positive (due à l'ozone formé rapidement), qui s'inverse aux temps longs (suite à la diminution de la durée de vie de CH₄), sera très faible. Toutefois, des forçages radiatifs d'ampleur non négligeable, localement positifs ou négatifs, pourraient exister, notamment en Asie [3b]. La même compensation entre des variations positives et négatives prévaut pour les NO_x émis par les flottes aériennes.

Les émissions régionales de COV (4^e ligne du tableau) ont qualitativement les mêmes impacts que celles de CO, avec une différence pour ceux des COV qui peuvent former des composés de type PAN (nitrate de peroxyacétyle) qui séquestrent temporairement les NO_x ; dans leurs cas, l'augmentation de leurs émissions a pour effet de stimuler l'oxydation de CH₄, d'où une réduction de forçage induit.

Il faut ici mentionner la spécificité de l'impact des hydrocarbures fossiles. Après combustion de ces derniers, le forçage radiatif direct dû au CO₂ l'emporte très largement sur celui induit indirectement par les NO_x produits simultanément. Au contraire, pour toutes les sources de polluants autres que celles

issues de la combustion des hydrocarbures fossiles, les impacts indirects sur le climat sont dus à des composés autres que CO₂.

3.3. Rôle de la matière particulaire

3.3.1. Les principaux aérosols « primaires » ou « secondaires » (d'après [7, 15, 16])

Dans l'atmosphère coexistent différents types d'aérosols que l'on peut classer selon leur genèse :

- Les aérosols **primaires** sont des « particules » solides ou liquides emmenées dans l'atmosphère par le vent. On peut citer les embruns marins, les poussières des déserts ou les particules dégagées par les feux de végétation, qui sont tous de source naturelle et constituent l'essentiel (plus de 90 %) des émissions particulières. D'autres particules sont liées à l'activité humaine : certains aérosols carbonés : les suies (ou le « carbone-suie »), le carbone « organique », issus de la combustion des hydrocarbures fossiles, ainsi que les particules émises lors des brûlis. La taille des aérosols primaires varie *grosso modo* de 1 à 10 microns.
- Les aérosols **secondaires**, de plus petite taille, proviennent de l'agrégation de produits de réactions de gaz atmosphériques émis par la biosphère naturelle (les sources biogéniques) ou par des activités humaines. Ce sont par exemple les aérosols sulfatés, dans lesquels l'élément soufre provient des produits de combustion du charbon ou de l'oxydation du sulfure de diméthyle, émis par les océans. L'importance particulière de ces aérosols soufrés vis-à-vis du changement climatique tient au fait que les émissions anthropogéniques et biogéniques sont de même ampleur [16]. L'oxydation d'une classe importante (en volume émis) de COV d'origine biogénique, les terpènes, conduit aussi à la formation de quantités notables d'aérosols carbonés secondaires.

3.3.2. Modes d'impact des aérosols sur le réchauffement atmosphérique : rôles directs ou indirects [3a, 3b, 7, 16]

Il faut distinguer le rôle direct, lié à l'interaction aérosol/rayonnement, qui modifie l'équilibre radiatif

de l'atmosphère, d'un rôle indirect, lié à l'influence des particules sur l'ampleur et les propriétés de la couverture nuageuse. La voie principale d'interaction directe résulte de leur capacité de réflexion de la lumière solaire (qui l'emporte largement sur l'absorption) d'où un forçage radiatif négatif. Mais on doit aussi mentionner le fait que les aérosols assurent une certaine diffusion de la lumière dans la canopée, ce qui améliore probablement l'efficacité de la photosynthèse.

Pour chacun des aérosols, l'effet résultant, pour le changement climatique, de leurs rôles direct et indirect, dépend de leur nature chimique, mais peut aussi varier au cours de leur durée de vie atmosphérique car la matière particulaire subit des modifications lors de son transit dans l'atmosphère. Pour la plupart, les particules présentes dans l'atmosphère sont constituées d'un mélange complexe de plusieurs espèces chimiques. Selon D.-J. Jacob [17], la composition en masse d'un aérosol continental typique est la suivante : sulfate : 37 %, carbone organique : 24 %, ammonium : 11 %, nitrate : 4 %, non identifié : 19 %. De telles compositions chimiques ont évidemment un impact multiforme. Enfin, il faut savoir que la plupart des données expérimentales disponibles sont confinées aux basses couches atmosphériques – voire au sol – des régions développées [18] ; encore peu d'études ont concerné les océans, qui occupent cependant 70 % de la surface terrestre.

Les contributions au forçage radiatif des divers aérosols sont résumées dans le Tableau 3 [5b, 5c] ; pour comparaison, les forçages radiatifs directs des GES sont aussi présentés. Les fourchettes d'incertitude illustrent bien le chemin à parcourir pour cerner l'impact des aérosols.

Un fait majeur est toutefois à rappeler : il existe un consensus solide au sein de la communauté [6] pour affirmer que, considérée comme un tout indifférencié, la matière particulaire est actuellement responsable – de manière directe ou indirecte – du plus grand forçage négatif sur le climat : $-1,2 \text{ W/m}^2$ (Tableau 3) ; et comme déjà mentionné dans l'introduction, ce forçage négatif peut aller, dans certaines zones continentales, jusqu'à excéder le forçage positif exercé par les GES et contrebalancer alors le réchauffement.

Il est aussi reconnu que ce sont les particules les plus petites (moins de 1 micron) qui jouent le plus grand rôle car elles diffusent davantage les radiations solaires et constituent de meilleurs noyaux de condensation. Cette dernière propriété n'est pas sans ambiguïté en ce qui concerne ses effets indirects car, face à une émission accrue de particules dans la basse troposphère, il y aura une extension de la couverture nuageuse, ce qui correspond bien à une rétroaction négative (c'est l'effet dit "*cloud-albedo*"). En outre, ces nuages chargés en polluants seront constitués de gouttelettes plus petites leur conférant ainsi une durée de vie plus longue (c'est l'effet dit "*cloud-lifetime*"), ce qui prolonge la rétroaction négative. Toutefois, et *a contrario*, il peut s'ajouter une faible rétroaction positive si suffisamment de particules absorbantes sont présentes. Enfin, un autre paramètre fluctuant est à prendre en compte : l'ampleur du forçage radiatif variera selon que le nuage chargé en aérosols sera au-dessus d'une surface fort réfléchissante (un nuage, de la neige) ou d'une surface plus sombre (un océan, une forêt).

Le Tableau 3 appelle les explications complémentaires suivantes [3b, 5b, 5c] :

- **Les aérosols sulfatés** : leur effet direct, associé à leur capacité de réflexion des radiations solaires, est bien quantifié et se révèle déterminant quand ils passent au-dessus de surfaces sombres ; il est largement conditionné par la présence de nuages voisins car :
 - les nuages transforment les molécules soufrées en aérosols de sulfates puis les éliminent par précipitation ;
 - la perturbation radiative associée au nuage est très supérieure à celle induite par le mélange d'air sec et de molécules soufrées ;
- **Les aérosols carbonés** : issus de la combustion d'hydrocarbures fossiles ou de la biomasse, ils sont de deux types principaux : le carbone organique et les suies. Ces dernières absorbent très efficacement le rayonnement solaire, d'où leur contribution positive au forçage, laquelle peut être partiellement ou totalement compensée par une contribution opposée due au carbone organique dégagé par les mêmes sources.

Tableau 3.

Contributions d'origine anthropique au forçage radiatif des GES (bordures fines) et des divers aérosols (bordures épaisses) (d'après [3b, 5b, 5c]). Les nombres positifs ou négatifs expriment la variation depuis l'ère préindustrielle.

Source du forçage radiatif	Mode d'action	Valeur du forçage radiatif (W/m^2)	Référence
CO ₂	Direct	+ 1,66 ($\pm 0,17$)	[5b]
Tous GES (sauf O ₃)		+ 2,63 ($\pm 0,26$)	
Déforestation et pratiques agricoles		- 0,2 ($\pm 0,2$)	
Tous aérosols :	Direct	- 0,5 ($\pm 0,4$)	[5b]
Aérosols : " <i>cloud albedo</i> "	Indirect	- 0,7 (entre + 0,4 et - 1,1)	[5b]
Aérosols : " <i>cloud lifetime</i> "		Négative (très incertaine)	[3b]
Tous aérosols : effets direct et indirect		- 1,2 (entre - 0,2 et - 2,3)	[5c]

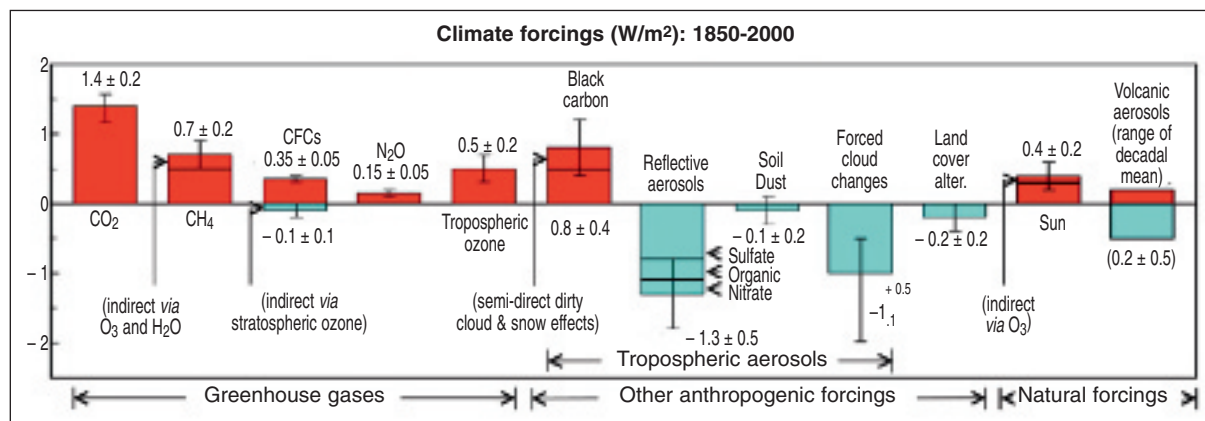


Figure 2.

Détail des variations des forçages radiatifs depuis l'ère préindustrielle (tiré de [19]).

En complément du Tableau 3, construit à partir du dernier rapport du GIEC de 2007 et qui rassemble de manière globalisée les variations des forçages, il est intéressant d'examiner plus en détail la présentation synoptique (Figure 2, faite en 2001 par J. Hansen *et coll.* [19]). On y compare :

- les forçages de chacun des GES, anthropiques ou non ;
- les estimations des forçages naturels (activité solaire, éruptions volcaniques) ;
- une estimation du forçage dû à l'impact des aérosols sur la durée de vie des nuages, donnée non encore validée par le GIEC.

3.4. Autres effets indirects des polluants sur le climat : par le truchement de perturbations des écosystèmes (d'après [3b, 5d])

On s'intéresse maintenant à l'impact de la pollution sur les écosystèmes qui, en réaction à la perturbation, modifient leurs échanges avec l'atmosphère et par là même influencent le climat. Pour beaucoup d'écosystèmes, le sens et l'ampleur de l'adaptation sont incertains ; chaque écosystème évolue avec sa dynamique temporelle propre. On peut néanmoins énoncer quelques tendances générales qui sont attendues suite à une variation de la teneur atmosphérique de quelques GES :

- le gaz carbonique : selon les projections du GIEC, l'augmentation de la concentration en CO₂ va stimuler la croissance végétale des divers puits de carbone, dont les forêts. Cependant, en sens inverse, l'élévation concomitante de température va accélérer aussi des processus microbiens du sol qui sont des sources de CO₂ ;
- les oxydes d'azote et l'ozone troposphérique : il est bien établi que le développement de beaucoup d'écosystèmes est facilité par des apports mesurés en nitrates mais, au contraire, on pense qu'une concentration trop élevée en ozone est préjudiciable car ce dernier est un puissant oxydant ;

- le méthane : il est reconnu que l'acidification des zones humides par les sulfates diminue leurs émissions de méthane. En sens inverse, les dépôts de nitrates sur les sols stimulent généralement les émissions de méthane, probablement en raison d'un blocage de certains processus microbiens ;
- l'oxyde nitreux : une étude a suggéré qu'une augmentation de 2 °C de la température des sols pouvait doubler l'émission de N₂O [3b].

Ces réponses des écosystèmes aux actions des polluants, encore mal quantifiées, alimentent les craintes d'une sous-estimation de possibles rétroactions positives et confortent les tentatives de limiter au maximum le réchauffement climatique.

3.5. Conséquences climatiques globales des émissions des polluants (GES et aérosols)

Un paramètre important qui conditionne leur impact est la durée de vie atmosphérique de chaque polluant, allant d'au moins un siècle pour CO₂ à quelques jours pour les aérosols sulfatés (Tableau 1). Les concentrations de polluants très peu stables répondront donc vite à une variation de leur émission. Au contraire, l'inertie de la concentration de CO₂ est bien connue [5a] ; comme l'illustrent les projections du GIEC pour le xxi^e siècle, si l'on se contentait de ramener vers l'an 2100 les émissions de CO₂ à leur niveau de l'an 2000, la concentration de CO₂ n'en aurait pas moins doublé à cette date ([3b] ; paragraphe 3.3).

Une autre question générale est relative au fait que certaines sources majeures de polluants sont régionales, les grandes régions industrielles ou urbaines surtout. C'est le cas des panaches de pollution fréquemment présents en Chine (et plus généralement les "Atmospheric Brown Clouds" de l'Asie du Sud). On pourrait s'attendre à des variations régionales du réchauffement associé à ces pollutions de courte durée. Une série de modélisations examinant séparément l'impact de trois types de polluants : les GES, les aérosols sulfatés et les aérosols de carbone-suie, montre [3b] que, globalement, les

champs calculés des variations de température au sol (variations positives ou négatives) sont relativement homogènes dans chaque hémisphère, ce qui s'interprète comme la prééminence des facteurs orographiques moyennés par le transport. La moindre élévation de température de surface calculée au-dessus de la Chine est expliquée [3b] par la présence de nuages de pollution si densément chargés en suies qu'ils en réduisent la pénétration des radiations solaires jusqu'au sol tandis que la troposphère moyenne peut alors subir un réchauffement.

En ce qui concerne l'élévation de la température moyenne observée au siècle dernier, on estime que les GES auraient induit une augmentation de 1 °C qui a été ramenée à 0,7 °C par les aérosols.

Enfin, plusieurs études expérimentales *in situ* semblent indiquer, au niveau régional, un lien entre la pollution de l'air et les caractéristiques des nuages, confirmant que la pollution particulaire, en réduisant la taille des gouttes d'eau dans les nuages, a tendance à réduire les précipitations [3b].

3.6. Implications pour les politiques de qualité de l'air (d'après [3b])

Les paragraphes précédents montrent bien qu'il faut prendre en compte davantage de critères dans les stratégies de maintien de la qualité de l'air, en sus de l'impact sur la santé. Malgré la complexité et la multiplicité des interactions et des rétroactions entre qualité de l'air et changement climatique, on peut dégager quelques idées générales :

- vu la multiplicité des impacts des oxydes d'azote, leur contrôle ne peut plus être conçu dans l'optique de la seule limitation des niveaux d'ozone et de NO₂ [3b] ;
- à propos de la combustion des hydrocarbures fossiles, il faut dépasser la seule prise en compte des émissions de CO₂ et NO_x. Par exemple, Fiore *et al.* [20] montrent qu'une réduction des émissions de méthane procure un double dividende au niveau du globe : une diminution de l'ozone troposphérique et une amélioration de la qualité de l'air, ce qui n'est pas le cas des réductions de NO_x, qui n'améliorent que localement la qualité de l'air ;
- par ailleurs, l'effet sur le climat des émissions du transport aérien autres que le CO₂, directement en haute troposphère ou basse stratosphère ne peut plus être négligé ;
- les effets indirects des aérosols sur le forçage radiatif et sur le régime des précipitations doivent être mieux quantifiés. De même, l'intégration de leurs effets sur le long terme, c'est-à-dire sur des échelles de temps pertinentes pour le changement climatique, de la décennie (le futur « intermédiaire ») au siècle, sont nécessaires ;
- les écosystèmes, maillons essentiels du cycle du carbone et donc du système climatique, sont influencés par les émissions anthropogéniques contenant les éléments soufre ou azote ainsi que par le niveau d'ozone troposphérique.

4. Impacts prévisibles du réchauffement climatique en cours sur la qualité de l'air (d'après [3c, 5d, 6])

4.1. Généralités : l'évolution de la température globale selon les modèles (d'après le GIEC [5d, 6])

L'une des conclusions importantes du dernier rapport du GIEC est le consensus établi à propos de la « sensibilité » de notre système climatique, à savoir l'augmentation de la température moyenne au sol qui résulterait d'un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂. Le GIEC avance une fourchette allant de 2 à 4,5 °C, avec 3 °C comme valeur la plus probable [6]. À partir de cette valeur, les prévisions d'évolution du climat dépendent évidemment du scénario particulier, encore à écrire en partie, qui sera choisi par l'espèce humaine, quant au volume des émissions anthropiques futures. Le GIEC a considéré six scénarios « de référence », allant du plus « vertueux », consécutif à une modification de notre mode de vie, jusqu'au plus vorace en énergies fossiles, parfois aussi appelé *"business as usual"* ; il leur correspond, pour l'élévation de température calculée vers 2100, des valeurs allant de + 1,8 à + 4 °C. Signalons que très récemment, dans un article repris par la presse généraliste (*Le Monde*, 11 Avril 2008), J. Hansen *et coll.* [21] affirment qu'une valeur de la sensibilité proche de 6 °C devrait plutôt être retenue si toutes les rétroactions étaient prises en compte par les modèles du GIEC, par exemple l'écoulement accéléré des glaciers des calottes polaires, à présent avéré, notamment au Groenland, ainsi qu'un ensemble de rétroactions lentes du cycle du carbone.

Toutes les prévisions concernant les futurs climats de notre planète sont issues de modèles globaux de « circulation générale » dits « couplés océan/atmosphère », sur la base des divers scénarios évoqués ci-dessus. Cependant, vu la taille de leurs mailles de calcul, de l'ordre de 100 km, ces modèles globaux ne peuvent directement prédire les conséquences du changement climatique en termes de qualité de l'air ou de régime des précipitations à des échelles régionales, voire locales. Il faudrait pour cela coupler chimie et climat à ces échelles fines et on ne dispose actuellement que de modèles couplant partiellement le climat avec la chimie ou le transport, modèles qui sont pourvus de paramétrages simplifiés (pas de couplage avec l'océan) mais plus réalistes (prise en compte de l'orographie régionale). Il n'est cependant pas encore question d'effectuer des prévisions journalières (pour la description d'un épisode de pollution) ou d'intégrer des forçages naturels ou anthropiques associés à des sources locales. Divers rapports estiment que ces projections locales seront disponibles à l'horizon 2020 [3c].

4.2. Évolution générale de quelques paramètres clés et leur incidence sur la pollution à l'échelle globale ou européenne (d'après [3c, 5c, 5d, 6, 22, 23])

Les modèles globaux ne prédisent évidemment pas une augmentation uniforme de la température mais, avant d'examiner les conséquences pour l'Europe, il faut au préalable rappeler les grandes tendances prévues par le GIEC [5c, 5d, 6]. Quelques tendances importantes pour l'évolution de la qualité de l'air sont reprises ci-dessous.

4.2.1. Les températures

Elles augmenteront beaucoup plus aux hautes latitudes qu'aux tropiques, ainsi que sur les continents, par comparaison aux océans. Les conséquences prévisibles pour l'Europe sont les suivantes :

- une modification saisonnière des problèmes liés à la qualité de l'air avec, en été (i), d'une part un accroissement des épisodes de pollution photochimique (ii) et d'autre part une augmentation des émissions de COV biogéniques précurseurs d'ozone. L'isoprène en est un exemple représentatif puisqu'il est établi [3c] que ses émissions quadruplent quand la température passe de 20 °C à 30 °C, ce qui est cohérent avec l'observation que les COV biogéniques ont été à l'origine d'environ 40 % du pic d'ozone observé pendant les jours les plus chauds de la canicule européenne d'août 2003 ;
- cette canicule européenne deviendrait alors un épisode typique en été vers environ 2040 [3c]. De telles évolutions auront des conséquences plus délétères dans le sud de l'Europe ; un assèchement marqué du bassin méditerranéen est prévu ;
- la résilience de beaucoup d'écosystèmes sera probablement dépassée en Europe, en raison de la conjugaison du réchauffement climatique et des perturbations associées : plus de sécheresses et d'incendies naturels, un inévitable changement des pratiques agricoles, la pollution, etc. Ceci affectera nécessairement la nature des émissions des écosystèmes et les dépôts des polluants qui s'y produisent. On estime que la structure des écosystèmes serait transformée pour des augmentations de température excédant de 1,5 à 2,5 °C les valeurs actuelles et, plus inquiétant, la grande majorité des organismes et des écosystèmes aurait des difficultés à s'adapter au changement climatique.

4.2.2. L'humidité

L'autre paramètre météorologique clé modifié par le changement climatique est le contenu en eau de l'atmosphère. Le GIEC [5d] prévoit un accroissement général des épisodes de fortes précipitations, essentiellement en hiver pour l'Europe de l'Ouest. Certains modèles climatiques régionaux [3c] suggèrent que l'humidité relative va peu varier, d'où l'augmentation du contenu en eau de l'atmosphère. Il faut noter que

les émissions de trois GES : CO₂, CH₄, N₂O, diminuent avec l'humidité du sol mais augmentent avec sa température, ce dernier paramètre étant prépondérant.

4.2.3. La concentration en radicaux OH

Aucune variation notable de la concentration en radicaux hydroxyles n'est prévue par le GIEC [5c] dans les prochaines décennies car il est estimé que les effets des changements des émissions de NO_x, de CO et des COV vont se compenser. Cependant, certains modèles [3a] prévoient une augmentation de la concentration en radicaux OH dans l'hémisphère Nord, en rapport avec l'augmentation de température et de vapeur d'eau, ce qui rapprocherait les retombées des pluies acides des sources de NO_x ou de SO₂.

4.2.4. L'ozone

En ce qui concerne les pollutions régionales par l'ozone, on s'attend à une augmentation en raison de l'élévation de température et d'une réduction des vents presque partout. Par contre, le GIEC ne se prononce pas sur l'évolution de l'ozone de fond car les deux tendances suivantes s'opposent [5c] :

- l'augmentation de température accélère probablement les réactions de production d'ozone et rend plus instables les COV du type PAN qui séquestrent les NO_x ;
- l'augmentation des précipitations et de la charge en eau favorisent les processus d'élimination de l'ozone.

En outre, il y a encore trop d'incertitude sur la variation des échanges entre troposphère et stratosphère.

Certains modèles régionaux couplant chimie et climat [3c] prévoient pourtant une diminution de l'ozone troposphérique, sauf dans les zones où les émissions de NO_x sont importantes. Malgré la diminution programmée des émissions, d'autres auteurs [23] pronostiquent une augmentation de l'ozone aux latitudes moyennes de l'Europe car la réduction des émissions régionales des précurseurs y serait annulée par l'augmentation d'ozone au niveau global ; les épisodes de pollution y seraient alors plus fréquents (c'est la tendance globale couramment admise) mais avec des pointes d'ozone plus faibles qu'actuellement. D'autres modèles [3b] prédisent une forte augmentation d'ozone en Europe centrale et du Sud mais une diminution en Europe du Nord.

4.2.5. La qualité de l'air

Le GIEC [5c] reste prudent en annonçant qu'une dégradation est possible en raison des multiples changements induits par le changement climatique, concernant notamment la dispersion des polluants, l'augmentation des émissions de la biosphère, des feux et des poussières, etc. Mais il y a bien trop d'incertitudes, et surtout les éventuelles variations de la qualité de l'air dépendront beaucoup de particularités régionales. Depuis environ une décennie, l'Union européenne se distingue par une politique volon-

tariste dans le domaine de l'environnement (on peut rappeler l'objectif récent de limiter à 2 °C l'augmentation de la température globale pendant ce siècle). Dans plusieurs rapports, l'Agence européenne de l'environnement [4a, 4b, 4c] examine les retombées de cet objectif dans le cadre des réglementations existantes relatives à la qualité de l'air. Selon ses conclusions (qui rejoignent celles de [23, 24]), d'ici 2030, la qualité de l'air va s'améliorer en moyenne en Europe mais pas suffisamment pour contenir des impacts négatifs sur la santé. De manière intéressante, la limitation du réchauffement global à 2 °C conforterait les stratégies de maintien de la qualité de l'air en réduisant sensiblement leurs coûts tout en amplifiant la réduction des émissions de polluants. L'exemple européen illustre bien les limites des réglementations visant exclusivement la qualité de l'air : un rapport de 2007 de l'Agence européenne de l'environnement [4c] constate que les concentrations d'ozone et de PM ne diminuent plus depuis 1997 malgré une réduction sensible des polluants primaires (l'explication avancée invoque l'intrusion d'ozone stratosphérique et le transport de polluants au travers de l'Atlantique).

5. Conclusion

Dans cet article, on a illustré la complexité et la multiplicité des liens et impacts réciproques qui relient deux problématiques : celle du changement climatique et celle de la qualité de l'air. On comprend que toute action motivée par l'une d'entre elles ne doit pas méconnaître les éventuelles retombées sur l'autre. L'idée selon laquelle la qualité de l'air pourrait être durablement préservée grâce à des réglementations régionales (voire à l'échelle des pays développés) s'avère fallacieuse ; de même, seule une réduction du total mondial des émissions des GES est efficace pour limiter les conséquences du réchauffement dans l'Union européenne.

Face à ces contraintes, il faut naturellement privilégier les mesures ayant un double avantage, permettant à la fois la lutte contre le réchauffement et celle contre la pollution photochimique. L'ampleur du double bénéfice attendu doit être estimé sur deux plans : d'une part sur celui de critères pertinents pour chaque problématique (la limitation de la hausse de température, le maintien de la qualité de l'air, la préservation des écosystèmes, etc.) et d'autre part au plan monétaire, à savoir les coûts des mesures réglementaires intégrant les deux objectifs.

Il faut reconnaître que de nombreuses incertitudes scientifiques persistent : l'ampleur de certaines rétroactions, les multiples rôles des divers aérosols, l'hétérogénéité de leurs sources, etc., mais plusieurs constatations doivent dès à présent conforter l'urgence d'une action :

- même sur la base des projections de leurs scénarios les plus optimistes, les experts du GIEC nous enjoignent à réorienter nos modèles de développement avant la fin de la prochaine décennie car

la poursuite des trajectoires socio-économiques actuelles conduirait à une dégradation majeure de notre environnement, d'autant que certaines tendances lourdes engendrent mécaniquement une augmentation de la pollution et des émissions de GES : d'abord l'accroissement de la population mondiale ainsi que la part croissante de sa fraction urbaine, ensuite le développement économique accéléré de pays émergents rassemblant plus de la moitié de la population mondiale ;

- beaucoup d'études économiques confortent les injonctions des climatologues. On se contentera ici de faire référence au rapport largement médiatisé de l'économiste N. Stern [25], centré sur le coût du changement climatique. Stern conclut que des politiques plus ou moins différées d'adaptation ou de remédiation seraient *in fine* beaucoup plus coûteuses que l'action immédiate.

L'urgence et la gravité de la menace climatique et de son corollaire, la dégradation de la qualité de l'air, ne doivent pas conduire à un fatalisme résigné car des leviers d'action, dont certains sont déjà bien identifiés, existent. En outre, plusieurs éléments sont favorables à la recherche de synergies entre les deux fronts de la lutte (le climat et la pollution), par exemple :

- beaucoup de GES et de polluants proviennent, directement ou indirectement, des mêmes sources. C'est le cas de la combustion des hydrocarbures fossiles qui est une source de première importance pour les deux problématiques. La réduction de l'emploi des combustibles fossiles sera hautement bénéfique pour les deux objectifs ;
- toutes les études économiques disponibles montrent que les mesures réglementaires intégrant les deux objectifs (climat et qualité de l'air) impliquent des coûts moindres que les stratégies de lutte indépendante sur chaque front ;
- le traitement conjoint des deux problématiques permet aussi de tirer parti de la rapidité de réponse de la troposphère quant aux processus contrôlant la qualité de l'air. Ainsi, alors que la réduction des émissions de CO₂ ne peut avoir d'effet perceptible qu'à l'échelle de décennies, certaines mesures d'amélioration de la qualité de l'air devraient se traduire rapidement par une atténuation du réchauffement (par exemple [26]).

Remerciements

Nous remercions le Département pour l'Environnement, l'Alimentation et les Affaires Rurales du Royaume Uni (DEFRA, réf. [3]) pour l'autorisation de reproduire les figures de son récent rapport (*a UK perspective, the role of air quality pollutants in climate change, Air Quality Expert Group, third report (2007)*).

Je remercie Yves Fouquart pour une lecture critique du manuscrit ainsi que pour ses nombreuses précisions concernant les rôles complexes des nuages et des aérosols, et Jeanne Muchembled pour une relecture attentive du manuscrit.

References

- [1] Amann M, Bartok I, Cofala J *et al.* Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe Programme (CAFE). Final report, contract n° B4-3040/2002/340248/MAR/C1, corrected version, 2005.
- [2] Solomon S, Qin D, Manning M *et al.* (eds). IPCC 2007: Climate Change 2007. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA, 2007.
- [3a] Pilling M, ApSimon H, Carruthers D *et al.* Air Quality and Climate Change: a UK perspective, chapter 2: Scientific background. Air Quality Expert Group, third report (2007), DEFRA Publications (Department for the Environment, Food and Rural Affairs), UK. www.defra.gov.uk/environment/airquality/aqeg
- [3b] Pilling M, ApSimon H, Carruthers D *et al.* Air Quality and Climate Change: a UK perspective, chapter 3: the role of air quality pollutants in climate change. Air Quality Expert Group, third report (2007), DEFRA Publications (Department for the Environment, Food and Rural Affairs), UK. www.defra.gov.uk/environment/airquality/aqeg
- [3c] Pilling M, ApSimon H, Carruthers D *et al.* Air Quality and Climate Change: a UK perspective, chapter 4: impact of climate change on air quality. Air Quality Expert Group, third report (2007), DEFRA Publications (Department for the Environment, Food and Rural Affairs), UK. www.defra.gov.uk/environment/airquality/aqeg
- [4a] Air quality and ancillary benefits of climate change. European Environment Agency. Technical report n° 4/2006. www.eea.europa.eu.int/enquiries
- [4b] Air pollution and climate change policies in Europe: exploring linkages and the added value of an integrated approach. European Environment Agency. Technical report n° 5/2004. www.eea.europa.eu.int/enquiries
- [4c] Air pollution in Europe. European Environment Agency. Technical report n° 2/2007. www.eea.europa.eu.int/enquiries
- [5a] Salomon S, Qin D, Manning M *et al.* Frequently Asked Questions, IPCC 2007: climate change 2007, the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA, 2007.
- [5b] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P *et al.* 2007: Changes in Atmospheric constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007, the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M, Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA, 2007.
- [5c] Denman KL, Brasseur G, Chidthaisong A *et al.* 2007, Coupling between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: Climate Change 2007, the Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M, Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA, 2007.
- [5d] Adger N, Aggarwal P, Agrawala S *et al.* Impacts, Climate Change 2007: Adaptation and Vulnerability. Working group II. Contribution to the Fourth Assessment, report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA, 2007.
- [6] Delecluse P, Gillet M, Joussaume S *et al.* Résumé à l'intention des décideurs. Groupe de travail I, 4^e rapport d'évaluation du GIEC, bilan 2007 des changements climatiques, les bases scientifiques et physiques, 2 février 2007. <http://onerc.gouv.fr>
- [7] Boucher O. Le double jeu des aérosols. *La Recherche* 2007 ; 414 : 40-3.
- [8] Fluteau P. Les effets climatiques des éruptions volcaniques. Hors série *Science et Avenir* mars-avril 2007 ; 65.
- [9] Le Treut H, Monfray P, Reverdin G *et al.* Évolution de climat : peut-on se fier aux modèles ? *Le journal du CNRS* 2004 ; 172 : 18-27.
- [10] Kolbert V. Les nouveaux Cassandre du climat. *Courrier International* oct.-nov.-déc. 2006 hors série : 27-9.
- [11] Ramanathan V, Ramana M, Roberts G *et al.* *Nature* 2007 ; 448 : 575-8.
- [12] Elrod MJ. Greenhouse Warming Potentials from the Infrared Spectroscopy of Atmospheric Gases. *J Chem Educ* 1999 ; 76 (12) : 1702-5.
- [13] Camredon M, Aumont B. Modélisation chimique de l'ozone et des oxydants gazeux. I – L'ozone troposphérique : production/consommation et régimes chimiques. *Pollution Atmosphérique* 2007 ; 193 : 51-60.
- [14] Ehhalt DH. Photooxydation of trace gases in the troposphere. *PCCP* 1999 ; 1 : 5401-8.
- [15] Mirabel P. Les processus multiphasiques. *L'actualité chimique*, janvier 2001 : 15-7.
- [16] Mégie G, Delmas R, Peuche VH. Physique et chimie de l'atmosphère. Éditeur : Belin, 2007.
- [17] Jacob DJ. Heterogeneous chemistry and tropospheric ozone. *Atmos Environ* 2000 ; 34 : 2131-59.

- [18] Maenhaut W. Future needs for global monitoring and research of aerosol chemical composition. *Atmos Envi* 2008 ; 42 : 1070-2.
- [19] Hansen J, Sato M. Climate (or radiative) forcing-change in the average net radiation at the top of the troposphere. *Proc Natl Acad Sci USA* 2001 ; 98 : 14778-83.
- [20] Fiore AM, Jacob DJ, Field BD, Streets DG, Fernandes SD, Jang C. Linking ozone pollution and climate change: the case for controlling methane. *Geophys Res Letters* 2002 ; 29 (19) : 25,1- 25,4.
- [21] Hansen J, Sato M, Kharecha, Beerling P, Masson-Delmotte V, Pagani M, Raymo M, Royer DL, Zachos C. Target atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim? arXiv: 0804.1126 (April 2008).
- [22] Sciama Y. Dossier Climat. Il est trop tard pour attendre. *Research EU*, juin 2007 ; 52 : 8-11.
- [23] Vautard R, Hauglustaine D. Impact of global climate on regional air quality. *C R Geosciences* 2007 ; 339 : 703-8.
- [24] Derwent RW. New directions: prospects for regional ozone in North-West Europe. *Atm Environ* 2008 ; 42 : 1958-60.
- [25] www.hm-treasury.gov.uk/media/E/F/stern_longsummary_french.pdf
- [26] Web INSU-CNRS. Les polluants de courte durée de vie contribuent au réchauffement de l'Arctique. 20-11-2007. www.insu.cnrs.fr/a2401

