



L'air

Marie-Lise Chanin

I - Réponses aux questions fréquemment posées

La composition de l'atmosphère a-t-elle changé de façon inquiétante depuis le début de l'ère industrielle ?

Oui, la composition chimique de l'air que nous respirons a été considérablement modifiée depuis le début de l'ère industrielle. Même si les changements portent sur des concentrations très faibles (moins d'1 % de sa masse totale) par rapport à celle des constituants majeurs de l'atmosphère que sont pour 78% l'azote moléculaire (N₂) et pour 20% l'oxygène moléculaire (O₂), certains composants chimiques peuvent avoir un effet non négligeable d'une part sur le climat et d'autre part sur la qualité de l'air. On doit cependant noter qu'au cours des dernières décennies, la qualité de l'air s'est améliorée au moins en Europe et aux États-Unis et ceci est dû essentiellement à la disparition des centrales à charbon. Ce n'est malheureusement pas le cas au-dessus du territoire chinois. D'autre part l'air à l'intérieur des habitations (où l'on passe 80% du temps) est soumis à d'autres sources de pollution locales (poussières domestiques, pollens, acariens, solvants et produits chimiques et particules fines d'origine diverse) qui n'affectent pas la composition générale de l'atmosphère mais qui ont des effets néfastes sur la santé (voir la fiche « santé »).

La composition de l'atmosphère avait-elle changé auparavant ?

Oui, notamment au cours des centaines de milliers d'années où l'on dispose de mesures de dioxyde de carbone et de méthane obtenues à partir des archives glaciaires en Antarctique et en Arctique qui mettent clairement en évidence ces changements. Mais ceux-ci correspondaient à la succession de périodes glaciaires et interglaciaires de longue période due aux changements de paramètres astronomiques modifiant l'ensoleillement et non à l'activité humaine. Les changements que nous observons aujourd'hui en diffèrent sur deux plans : ils se produisent à une échelle de temps beaucoup plus courte (quelques décennies) et de plus ils ont conduit à des niveaux de concentration jamais atteints au cours du dernier million d'années.

Quels sont les principaux changements ?

Pour prendre quelques exemples parmi les gaz jouant un rôle important comme gaz à effet de serre, on peut indiquer les taux d'augmentation suivants depuis 1750 pour le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote et l'ozone troposphérique tels que fournis par l'Organisation Météorologique Mondiale en 2013 :

CO ₂	CH ₄	NO ₂	O ₃
142%	253%	121%	500%

On peut aussi citer le cas de nombreux gaz qui n'existaient pas dans l'atmosphère préindustrielle, notamment les fameux CFC qui ont été les premiers responsables de la destruction de l'ozone stratosphérique (cf. fiche L'ozone stratosphérique), mais également de nombreuses substances chimiques créées pour les besoins de la société.

Ces changements sont-ils réversibles ?

La réponse à cette question dépend d'une part de la durée de vie de ces gaz dans l'atmosphère (c'est-à-dire du temps nécessaire à leur disparition par absorption dans l'océan ou par réaction chimique par exemple), et d'autre part du besoin que ressent la communauté humaine pour continuer à les utiliser donc à les relâcher dans l'atmosphère. La durée de vie de certains gaz à effet de serre (CO_2 et CFC par exemple) est de plusieurs décennies, le méthane CH_4 quant à lui ayant une durée de vie de l'ordre de 10 ans. En revanche, certains polluants comme NO_2 et O_3 subissent des transformations chimiques rapides et leur présence dans l'atmosphère est de courte durée et donc, à condition de supprimer leur source (notamment la circulation automobile), on pourrait restaurer rapidement une qualité de l'air acceptable.

Quelles sont les principales conséquences des changements de la composition atmosphérique?

Pour répondre à cette question, il convient de classer les constituants en fonction soit de leur influence sur le climat (gaz à effet de serre ou aérosols), soit de leur impact sur la qualité de vie.

Gaz à effet de serre

Même s'il est essentiellement fait référence au gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO_2) quand on parle de gaz à effet de serre, il existe d'autres gaz contribuant à augmenter l'effet de serre. Il est bon tout d'abord de rappeler que l'effet de serre existait sur terre préalablement au développement industriel et qu'il a d'ailleurs permis à l'homme de vivre avec une température agréable en moyenne d'environ $15\text{ }^\circ\text{C}$ par rapport à la valeur de $-18\text{ }^\circ\text{C}$ que la terre connaîtrait sans l'effet de serre. Le principal gaz à effet de serre sur terre n'est pas le dioxyde de carbone (CO_2) mais la vapeur d'eau (H_2O) qui contribue à 60% de l'effet total, bien que ne représentant que 0,2% de la masse totale de l'atmosphère. Outre ces deux principaux contributeurs, il faut aussi citer le méthane (CH_4), l'hémioxyde d'azote (N_2O), l'ozone troposphérique (O_3) et les chlorofluorocarbures (CFC) et leurs substituts (cf. chapitre Ozone stratosphérique). Il est important de noter que la stabilité chimique de certains de ces gaz (CO_2 , CH_4 , CFC) en font des gaz sans danger pour la santé et ils ne peuvent donc être qualifiés de « polluants », si on s'en tient à la définition de la pollution comme une dégradation de l'air par des substances chimiques.

La conséquence de l'augmentation de ces gaz à effet de serre est d'augmenter la température moyenne de l'atmosphère proche de la surface ainsi que la température des océans et donc de modifier le climat. Le changement observé depuis un siècle est de l'ordre de 1° et, suivant les différents scénarios on peut s'attendre au cours de ce XXI^e siècle à une augmentation de la température moyenne du globe de 2° à $4,5^\circ$. (cf. fiche changement climatique)

Polluants

L'atmosphère au niveau du sol est le siège de nombreuses réactions chimiques produites d'une part par l'oxydation de la vapeur d'eau en présence de lumière qui produit le radical hydroxyle très réactif (OH), et d'autre part par les nombreuses émissions d'oxydes d'azote

(NO et NO₂), d'oxyde de carbone, CO, produit par les processus de combustion, d'ozone, de soufre, d'hydrocarbures produits par l'activité industrielle et de méthane CH₄ provenant de multiples sources naturelles ou non. L'agriculture de son côté est responsable de l'émission de l'hémioxyde d'azote (N₂O) qui est émis dans l'atmosphère par les processus de nitrification et dénitrification provoqués par les bactéries dans le sol (voir figure 1).

Ces différents composés interagissent chimiquement en présence du rayonnement solaire. Un des produits de ces réactions est le dioxyde d'azote (NO₂), qui peut être dissocié par le rayonnement solaire et conduit à la formation d'ozone O₃ qui joue un rôle majeur dans la troposphère. En plus de l'action des composés organiques volatils (COV), le taux de production de l'ozone troposphérique est contrôlé par la présence du monoxyde et du dioxyde d'azote. Comme les oxydes d'azote sont produits en grande partie par la combustion de matières fossiles, par les feux de biomasse et les activités agricoles, le niveau d'ozone est directement affecté par les activités humaines (voir figure 2). Lors d'épisodes de forte pollution, notamment dans les villes où la circulation automobile est intense, des brouillards photochimiques sont observés au voisinage des sources d'oxyde d'azote, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures (substances que l'on appelle les précurseurs d'ozone) et font l'objet d'alertes à la pollution pour prévenir des effets sur la santé.

Aérosols

On appelle « aérosols » atmosphériques des particules solides et liquides en suspension dans l'atmosphère. Leur taille est variable et peut aller de quelques nanomètres à quelques micromètres (microns) et ils correspondent à des compositions chimiques très variées. Contrairement aux constituants existant sous forme gazeuse, ils ne rentrent pas dans des réactions chimiques, mais donnent lieu suivant leur taille à une « pollution » invisible ou à des brouillards, des fumées avant de tomber sous l'effet de la gravité ou d'être entraînés par les précipitations.

Les principaux responsables de ces aérosols sont, comme pour les gaz à effet de serre et les gaz polluants, la combustion de matières fossiles et surtout du charbon, les feux de brousse, la circulation automobile et notamment les moteurs à diesel responsables des particules les plus fines. La nature y contribue également par le transport de poussières désertiques et épisodiquement par les éruptions volcaniques qui injectent des tonnes de poussières et de composés soufrés dans l'atmosphère (voir figures 3, 4, 5 et 6).

Les aérosols outre leur effet nocif sur la santé humaine (asthme, allergie, problèmes respiratoires...) ont également un effet sur le climat. Le rôle d'écran du rayonnement solaire entraîne un refroidissement de la surface qui s'oppose donc localement à l'augmentation de température due à l'effet de serre. Les régions du monde les plus polluées en aérosols peuvent donc bénéficier d'un léger refroidissement climatique. Les aérosols peuvent également jouer un rôle de noyaux de condensation favorisant la formation de la nébulosité et donc modifier les conditions atmosphériques et pluviométriques. Mais la pollution a surtout pour conséquence de rendre l'atmosphère irrespirable et représente un fléau pour la santé de la population. C'est surtout le cas dans des villes comme Beijing et la plupart des grandes capitales des pays utilisant le charbon comme source d'énergie, ce qui a fortement influencé la politique énergétique de ces pays. La Chine n'aurait sans doute pas signé l'accord de Paris en 2017 seulement pour limiter l'augmentation des gaz à effet de serre. Limiter la pollution est actuellement leur principale motivation.

Les conséquences de la présence des « polluants » sont-elles les mêmes sur toute la planète ?

Oui pour les espèces qui restent longtemps dans l'atmosphère et non pour les autres.

Parmi les gaz à effet de serre, seuls le dioxyde de carbone, le méthane et les chlorofluorocarbures ont des temps de résidence suffisamment longs dans l'atmosphère pour leur permettre d'être « en équilibre de mélange » et donc répartis quasi uniformément dans toute l'atmosphère. Les autres, plus actifs chimiquement, ne seront présents qu'au voisinage des régions où ils sont produits et ne contribueront donc que de façon localisée et épisodique à l'augmentation (ou à la diminution) du réchauffement dû à l'effet de serre. C'est le cas de l'ozone troposphérique et des aérosols dont le temps de résidence dans l'atmosphère est de quelques jours, parce qu'ils rentrent en réaction chimique pour le premier ou qu'ils sédimentent rapidement pour les seconds. Cependant si les sources de ces émissions sont permanentes, la présence de ces espèces devient indépendante de leur temps de résidence et leur effet peut alors avoir un impact sur le climat à l'échelle globale. C'est le cas par exemple du nuage d'aérosols présent en permanence au-dessus de la Chine qui perturbe la circulation océanique dans l'océan Pacifique.

Que peut-on faire en tant que citoyen pour réduire ces effets ?

Il faut ici distinguer la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la réduction de la pollution.

La réduction des gaz à effet de serre est un thème à la pointe de l'actualité et tout laisse à croire qu'il le restera longtemps. Parce que la croissance de ces gaz au cours du siècle dernier est à l'origine d'un changement climatique d'origine anthropique et que la production d'énergie est une des principales causes de l'émission de CO₂, ce thème est traité à la fois dans le chapitre « climat » et dans le chapitre « énergie ». Il ne faut pas oublier la contribution des autres gaz à effet de serre à la pollution: le méthane (CH₄) par exemple dont la croissance est essentiellement proportionnelle à l'augmentation de la population, l'ozone troposphérique polluant secondaire mais très lié à la circulation automobile, les oxydes d'azote conséquences de l'utilisation abusive d'engrais. On voit donc bien qu'en réformant notre mode de vie, nous pourrions contribuer à réduire ces effets, à condition de le faire collectivement. C'est le but de l'Accord de Paris signé en 2017 et dont l'objectif est de limiter l'augmentation de température à 2°C (pour aboutir à 1°5, c'est déjà trop tard)

Surveille-t-on en permanence les espèces polluantes ? Les mesure-t-on de façon opérationnelle localement et à l'échelle globale ?

De nombreuses méthodes ont été mises au point au fil des ans pour mesurer les différentes espèces mentionnées ci-dessus de façon locale de façon notamment à informer les populations lorsque les émissions dépassent un stade de nocivité reconnue par les organismes de santé publique. Cela est le cas en particulier dans les grandes agglomérations urbaines des pays développés. Airparif par exemple fournit pour l'Île-de-France les taux d'émission des différents polluants journallement depuis plusieurs années et ces informations devraient avoir un impact sur le comportement de la population.

Mais cela n'est que récemment, depuis 2006, qu'un instrument placé à bord d'une plateforme spatiale opérationnelle fournit ce type d'information à l'échelle globale. Il s'agit de l'Interféromètre Infra-Rouge IASI qui mesure plus d'une vingtaine de constituants journallement avec une couverture globale. Ce type d'information s'est révélé très important pour la surveillance d'émissions générées par des éruptions volcaniques (le volcan Eyjafjallajökull en Islande en 2010) et les importants feux de forêts des récentes années (en Grèce, en 2007, en Australie en 2009, en Russie en 2010). La transmission des informations aux sites qui les demandent se fait dans les quelques heures après l'acquisition, ce qui est essentiel pour prévenir les populations qui pourraient être affectées.

II - Texte plus détaillé et figures

Changement de la composition atmosphérique et rôle respectif des différents composants dans la pollution et dans le changement climatique

La composition atmosphérique a continuellement changé au cours des différentes ères géologiques et bien avant que l'homme puisse être mis en cause dans ces changements. On sait notamment que le dioxyde de carbone et le méthane ont changé au cours des centaines de milliers d'années où l'on dispose de mesures obtenues à partir des archives glaciaires en Antarctique et en Arctique (voir la figure 1 de la fiche « Le changement climatique dû aux activités humaines »). Mais ces changements étaient indépendants de l'activité humaine. Les changements que nous observons aujourd'hui en diffèrent sur deux plans : ils se produisent à une échelle de temps beaucoup plus courte (quelques décennies) et, de plus, ils conduisent à des niveaux de concentration de certains constituants jamais atteints au cours du dernier million d'années. On doit cependant noter qu'au cours des dernières décennies, la qualité de l'air s'est améliorée au moins en Europe et aux États-Unis. On se souvient, au moins par l'intermédiaire de la littérature du « fog » londonien, mais le noircissement des monuments de Paris dans les années 1950 en est également la preuve. Cette amélioration est due essentiellement à la disparition de l'utilisation du charbon. Ce n'est malheureusement pas le cas partout dans le monde et notamment au-dessus de la Chine où comme nous le montrons plus loin un nuage brun est en permanence en suspension dans l'atmosphère.

Aujourd'hui on peut donc affirmer que la composition chimique de l'air que nous respirons a été considérablement modifiée depuis le début de l'ère industrielle. Même si les changements portent sur des concentrations très faibles (moins d'1 % de la masse totale de l'atmosphère) par rapport à celle des constituants majeurs de l'atmosphère, l'azote moléculaire (N₂) pour 78% et l'oxygène moléculaire (O₂) pour 20%), certains composants chimiques peuvent avoir un effet non négligeable d'une part sur le climat et d'autre part sur la qualité de l'air.

Les changements de la composition atmosphérique

Les changements de la composition atmosphérique peuvent avoir deux types d'effet : d'une part ils ont une influence sur le climat (c'est le cas des gaz à effet de serre et des aérosols) et d'autre part sur la qualité de vie et la santé (c'est le cas de la plupart des polluants). Quelques-uns de ces gaz appartiennent aux deux catégories, l'ozone troposphérique par exemple.

Gaz à effet de serre

Quand on parle de gaz à effet de serre, on fait souvent référence au gaz carbonique ou dioxyde de carbone, CO₂, bien qu'il existe d'autres gaz contribuant à augmenter l'effet de serre. Rappelons que l'effet de serre existait sur terre préalablement au développement industriel et que grâce à lui, la terre a une température de 33°C supérieure à ce qu'elle serait sans l'effet de serre. Dans ces conditions de froid, il n'y aurait pas d'eau sous forme liquide et notre planète serait difficilement habitable. Ce qui nous concerne ici est l'augmentation des concentrations des gaz contribuant à un réchauffement supplémentaire de la surface.

Le principal gaz à effet de serre sur terre n'est d'ailleurs pas le dioxyde de carbone (CO₂) mais la vapeur d'eau (H₂O) qui contribue à 60% de l'effet total, bien que ne représentant que 0,2% de la masse totale de l'atmosphère, mais ce dernier n'est pas la conséquence de l'activité humaine. Outre ces deux principaux contributeurs, il faut aussi citer le méthane (CH₄), l'hémioxyde d'azote (N₂O), l'ozone troposphérique (O₃) et les chlorofluorocarbures (CFC) et leurs substituts. Parmi ces gaz à effet de serre, seuls le dioxyde de carbone, et les

chorofluorocarbures ont des temps de résidence très longs dans l'atmosphère (plusieurs décennies), parce qu'ils ne rentrent pas ou peu dans des cycles de réactions chimiques avec d'autres constituants ; le méthane CH₄ a un temps de résidence plus court, de 8 à 10 ans, mais avec un pouvoir de réchauffement 25 fois celui de CO₂. Ces gaz sont donc en équilibre de mélange dans toute l'atmosphère. Les autres, plus actifs chimiquement, ne seront présents qu'au voisinage des régions où ils sont produits et ne contribueront donc que de façon localisée à l'augmentation de l'effet de serre. L'augmentation globale des gaz à effet de serre a été de l'ordre de 50% depuis le début de l'ère industrielle (avec les risques que cela comporte pour le climat), dont évidemment une contribution importante est dû au CO₂ qui a crû de 35%, mais aussi à des contributions non négligeables du méthane et de l'ozone troposphérique qui ont l'un et l'autre doublé et aux chorofluorocarbures et à leurs substituts qui n'existaient pas dans l'atmosphère préindustrielle.

Tableau 1 – Quelques exemples d'augmentation observée depuis 1750 parmi les gaz jouant un rôle important comme gaz à effet de serre pour le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote et l'ozone troposphérique :

CO ₂	CH ₄	NO ₂	O ₃
35%	150%	20%	100% (en région industrielle).

Pour comprendre la cause de ces changements, disons un mot rapide sur la source de ces différentes émissions :

- le dioxyde de carbone est essentiellement produit par la combustion des ressources fossiles : charbon, pétrole, gaz, qui depuis le début de l'ère industrielle ont représenté les sources principales d'énergie. La lutte contre l'effet de serre aujourd'hui implique un changement dans les sources d'énergie. Le lecteur se réfèrera sur ce point à la fiche « climat » et à la fiche « énergie » ;
- on constate que le méthane CH₄ est le gaz dont l'augmentation est la plus forte. Il est produit dans l'atmosphère pour moitié par les activités microbiennes dans des milieux anaérobiques (privés d'oxygène), notamment dans les zones humiques : marais, lacs, rizières. Il est aussi produit pour une grande partie dans le système digestif des ruminants et par l'activité humaine. Sa concentration dans l'atmosphère a augmenté de façon très importante au cours des deux derniers siècles du fait de l'augmentation de la population, de l'intensification de l'agriculture, de la multiplication des décharges et de l'utilisation des gaz fossiles ;
- les oxydes d'azote (NO et NO₂) sont essentiellement produits par les processus de combustion, bien qu'il existe aussi des sources naturelles telles que les feux de biomasse et les éclairs par temps d'orage. Leur durée de vie est courte dans la basse atmosphère (quelques heures à quelques jours). Ils ne s'accumulent donc pas en grande quantité sauf près de leurs sources, mais ils sont très réactifs et ils jouent un rôle majeur dans la formation de l'ozone troposphérique et dans la destruction de l'ozone stratosphérique ;
- la concentration d'ozone (O₃) au niveau du sol a été mesurée depuis plus d'un siècle et on constate que, dans les régions urbanisées et industrielles, la concentration de l'ozone à la surface a au moins quadruplé depuis l'ère préindustrielle. Le taux de croissance de l'ozone est variable dans l'espace ; il dépend de l'urbanisation et de l'industrialisation ;

- enfin les halocarbures (incluant les chlorofluorocarbures ou CFC) n'existaient pas pour la plupart dans l'atmosphère préindustrielle. Ils ont été développés pour de multiples applications : agents réfrigérants dans les réfrigérateurs et systèmes à air conditionné, agents propulseurs dans les bombes d'aérosols, produits nettoyants etc., du fait de leur stabilité chimique et donc de leur sécurité pour l'utilisateur. La durée de vie dans l'atmosphère des CFC peut atteindre 50 à 100 ans. Ces gaz sont surtout connus pour leur effet destructeur de l'ozone stratosphérique et le lecteur se rapportera sur ce point à la fiche sur l' « ozone stratosphérique », mais ils sont aussi de puissants gaz à effet de serre ;
- il est important de noter que la stabilité chimique de la plupart de ces gaz (notamment CO₂, CH₄ et les CFC au sol) en fait des gaz sans danger pour la santé et ils ne peuvent donc être qualifiés de « polluants », si on s'en tient à la définition de la pollution comme une dégradation de l'air par des substances chimiques. Cela n'est pas le cas pour l'ozone et le protoxyde d'azote dont nous reparlerons dans le paragraphe suivant.

Qualité de l'air : la pollution

L'atmosphère au niveau du sol est le siège de nombreuses réactions chimiques produites d'une part par l'oxydation de la vapeur d'eau en présence de lumière qui produit le radical hydroxyle très réactif (OH), et d'autre part par les nombreuses émissions d'oxydes d'azote (NO et NO₂), d'oxyde de carbone, CO, produits par les processus de combustion, d'ozone, de soufre et d'hydrocarbures produits par l'activité industrielle. L'hémioxyde d'azote (N₂O) quant à lui est émis dans l'atmosphère par les processus de nitrification et dénitrification provoqués par les bactéries dans le sol.

Le radical hydroxyle OH peut être converti en radical hydroperoxyde (HO₂) par réaction entre OH et le monoxyde de carbone (CO), le méthane ou d'autres hydrocarbures. Ce radical HO₂ peut être converti à nouveau en radical OH par réaction avec le monoxyde d'azote (NO). Ainsi les concentrations en OH et HO₂ sont fortement affectées par les concentrations de gaz émis par les activités humaines. Un produit de la réaction entre HO₂ et NO est le dioxyde d'azote (NO₂), qui peut être dissocié par le rayonnement solaire. Ce processus photochimique conduit à la formation d'un atome d'oxygène qui est immédiatement converti en ozone O₃ et joue donc un rôle majeur dans la troposphère. Dans presque tous les cas, le taux de production de l'ozone troposphérique est contrôlé par la présence du monoxyde d'azote. Comme les oxydes d'azote sont produits en grande partie par la combustion de matières fossiles, par les feux de biomasse et les activités agricoles, le niveau d'ozone est directement affecté par les activités humaines. La formation de ces deux polluants étant très liée aux activités industrielles et leur durée de vie dans l'atmosphère étant courte du fait de leur réactivité, ils ne se trouvent pas en équilibre de mélange dans l'atmosphère et sont concentrés autour des sources de production comme le montrent les figures suivantes.

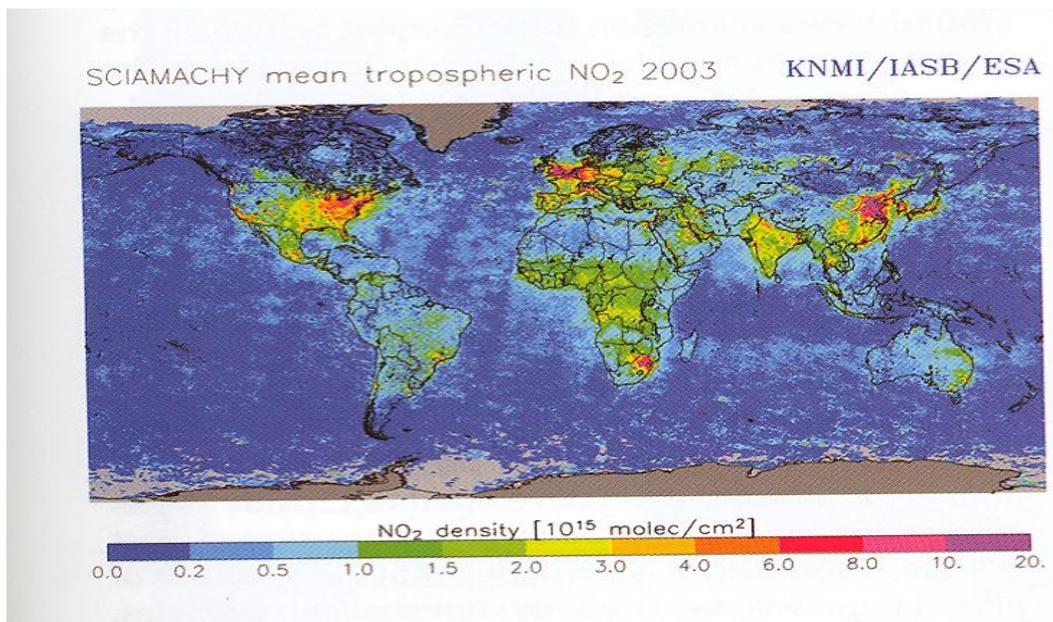


Figure 1 – La distribution de NO₂ à l'échelle globale moyennée sur une année, à partir de l'instrument SCHIAMACHY à bord du satellite européen ENVISAT. On voit clairement les sources d'émission dans les régions industrielles.

Lors d'épisodes de pollution intense, des brouillards photochimiques sont observés au voisinage des sources d'oxyde d'azote, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures (substances que l'on appelle les précurseurs d'ozone). Ceci se produit en particulier lorsque les conditions météorologiques sont stables, et les niveaux d'ozone sont alors très élevés, et peuvent affecter la santé des populations. De plus les niveaux d'ozone sont plus élevés au printemps et en été, en présence de rayonnement solaire. Dans la région du centre de la France en 2018, 65% des communes ont subi un dépassement du seuil critique et 25 jours de dépassement du seuil de protection de la santé (Figure 2).

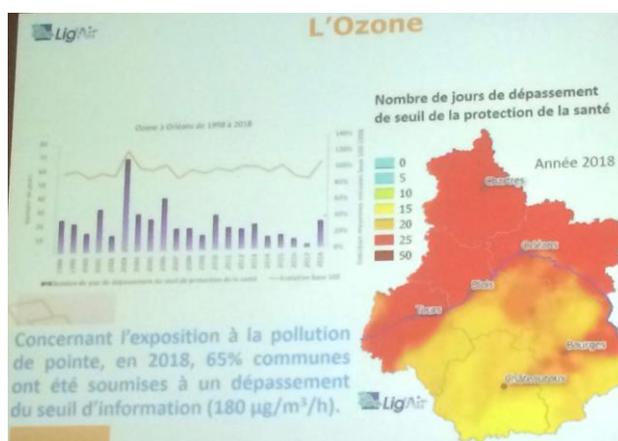


Figure 2 : la situation dans la région Centre de la France vis-à-vis de la pollution à l'ozone en 2018.

Dans certaines régions, on assiste ainsi à une augmentation systématique et récurrente d'ozone, comme par exemple dans le bassin méditerranéen chaque été (Figure 3). Dans cette région, l'ensoleillement fréquent, la conjonction de la proximité de plusieurs grandes villes où les précurseurs d'ozone sont émis, et les phénomènes dynamiques qui transportent de l'ozone depuis la stratosphère vers la troposphère permettent d'expliquer les pics d'ozone observés.

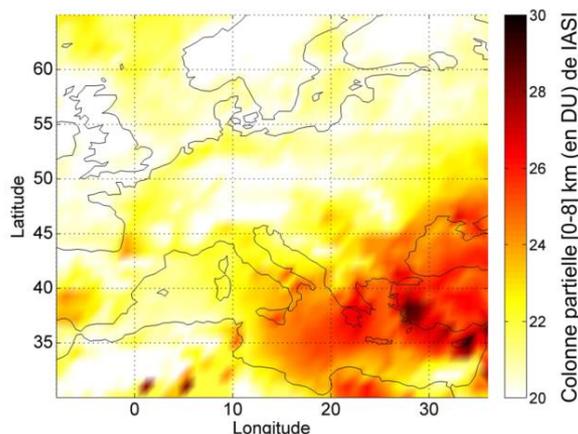


Figure 3 : Concentrations élevées d’ozone mesurées en juin-juillet-août 2010 dans la zone méditerranéenne par le satellite IASI/MetOp. De fortes concentrations sont observées chaque été, surtout à l’est du bassin.

On voit aussi dans la figure 4 que la présence d’ozone troposphérique est très inhomogène à l’échelle du globe et que les maxima sont observés dans l’hémisphère Nord au-dessus des régions les plus industrialisées : États-Unis, Asie, Europe. Les émissions dues aux feux de brousse sont observables au-dessus de l’Afrique de l’ouest.

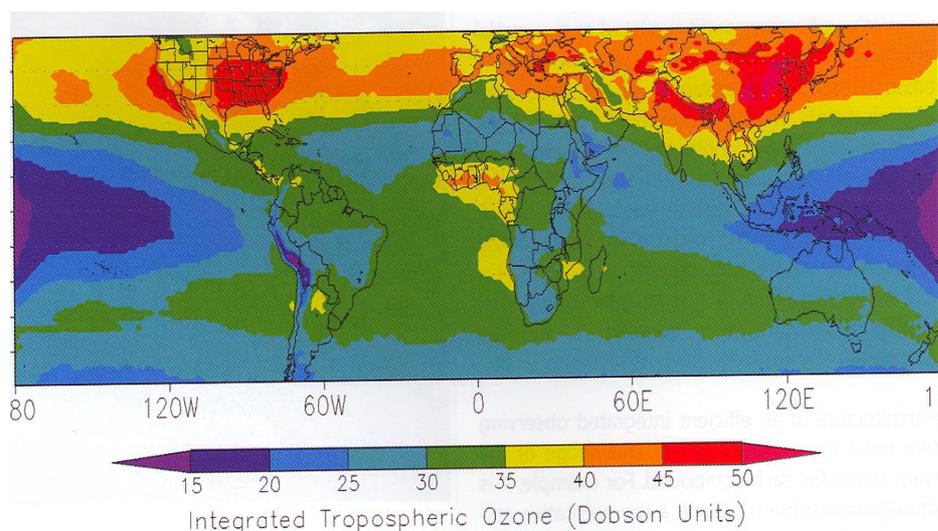


Figure 4 – L’ozone troposphérique à partir d’images satellitales de TOMS et SBUV pendant l’été, montrant d’une part la localisation des sources majeures et le transport à grande échelle dans l’Hémisphère Nord.

La formation des aérosols atmosphériques résulte en grande partie de transformations chimiques et microphysiques se produisant dans la troposphère. Les aérosols organiques proviennent en grande partie de l’oxydation des composés organiques volatiles, comme les terpènes émis par la végétation. Les aérosols sulfatés sont produits à la suite de la conversion par les molécules de peroxyde d’hydrogène (H_2O_2) et d’ozone (O_3) du dioxyde de soufre (SO_2). La présence de ce dernier composé dans l’atmosphère est due essentiellement à la combustion du charbon. La présence d’une telle pollution qui a pris le nom de « nuage brun » au-dessus de la Chine est quasi permanente ; elle due à la combustion d’un charbon dont la teneur en soufre est très élevée (figure 5). Le problème soulevé par ce type de pollution est en passe de devenir un problème de santé publique dans certaines grandes villes de Chine (Wuhai par exemple).

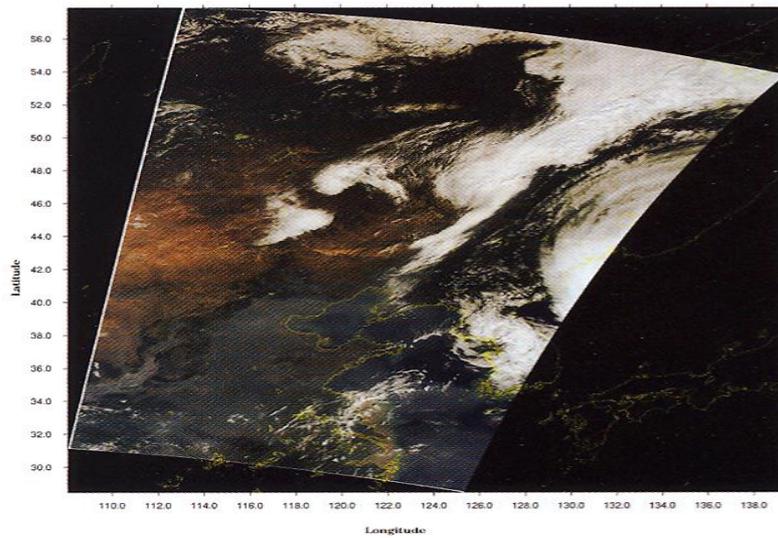


Figure 5 – Photographie obtenue à partir du satellite ADEOS 2 du nuage d’aérosol baptisé « brown cloud » présent de façon quasi permanente au-dessus de la Chine.

Depuis 2006, l’instrument IASI placé à bord de la plateforme opérationnelle METOP mesure plus d’une vingtaine de constituants journallement avec une couverture globale. Ce type d’information s’est révélé très important pour la surveillance d’émissions générées par des éruptions volcaniques telles que le nuage de SO_2 du le volcan Eyjafjallajökull en Islande en 2010 (figure 6).

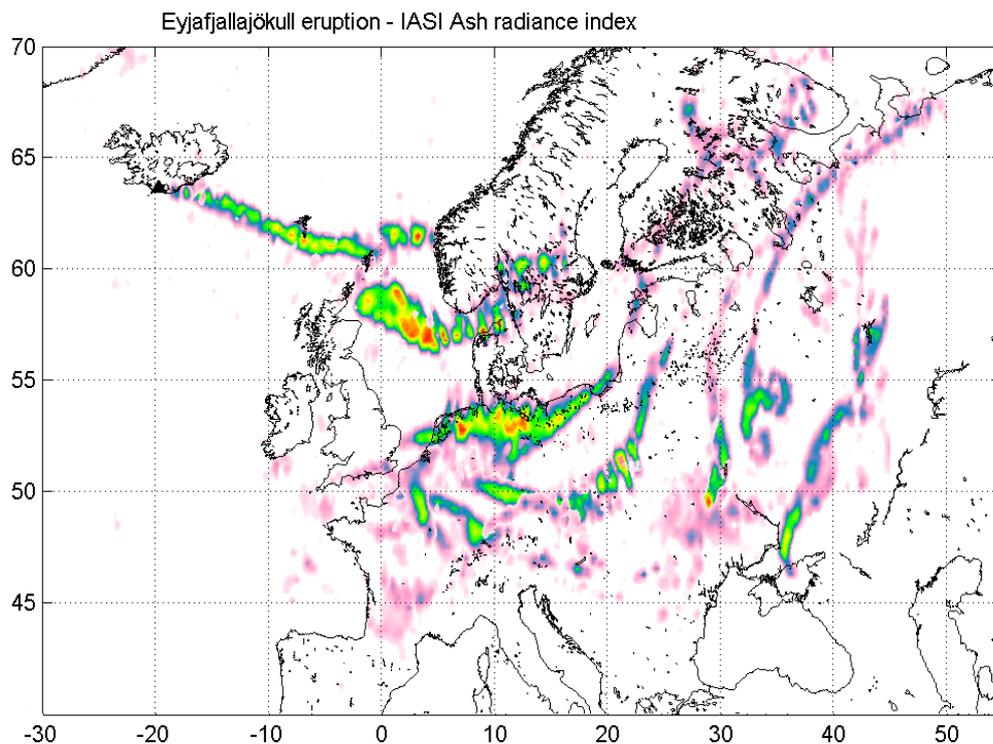


Figure 6 – Traces successives du panache volcanique vu par IASI du 14 après-midi au 18 Avril 2010 matin (une trace toutes les 12 heures).

La combustion de matières fossiles et les feux de brousse, outre le fait qu'ils produisent des gaz à effet de serre et des polluants, comme nous l'avons vu ci-dessus, sont aussi responsables localement d'une augmentation importante des aérosols et des poussières qui restent en suspension dans l'atmosphère. La nature y contribue épisodiquement par les éruptions volcaniques qui injectent des tonnes de poussières et de composés soufrés dans l'atmosphère comme on le montre sur la figure 6, mais également grâce au transport de poussières désertiques et par les feux de forêts comme on le voit dans la figure suivante.

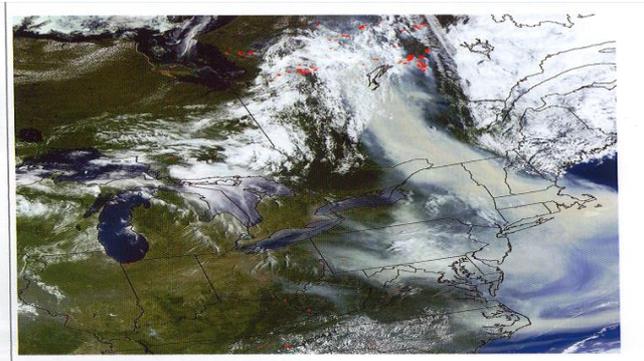


Figure 7 – Plume provenant des feux des forêts canadiennes vue à partir du satellite MODIS.

La surveillance des grands incendies de forêts dans les années récentes (en Grèce, en 2007, en Australie en 2009, en Russie en 2010) a été effectuée aussi par l'interféromètre IASI avec la mesure simultanée de plusieurs gaz polluants : CO, C₂H₂, CH₃OH et l'ammoniac NH₃. Ceci a permis notamment de signaler aux autorités russes que les émissions de CO au-dessus de Moscou en été 2010 avaient dépassé d'un facteur 2 le stade de danger pour la population.

En Europe, après la prise de conscience de l'impact des pluies acides sur la végétation, les émissions d'oxydes de soufre ont fait l'objet d'un contrôle sévère. Cependant on réalise depuis peu que la pollution à partir des navires marchands est la principale source de SO₂ sur le continent européen comme le montre la figure 8, et à ce jour elle ne fait l'objet d'aucune réglementation, malgré les nombreuses réglementations existantes.

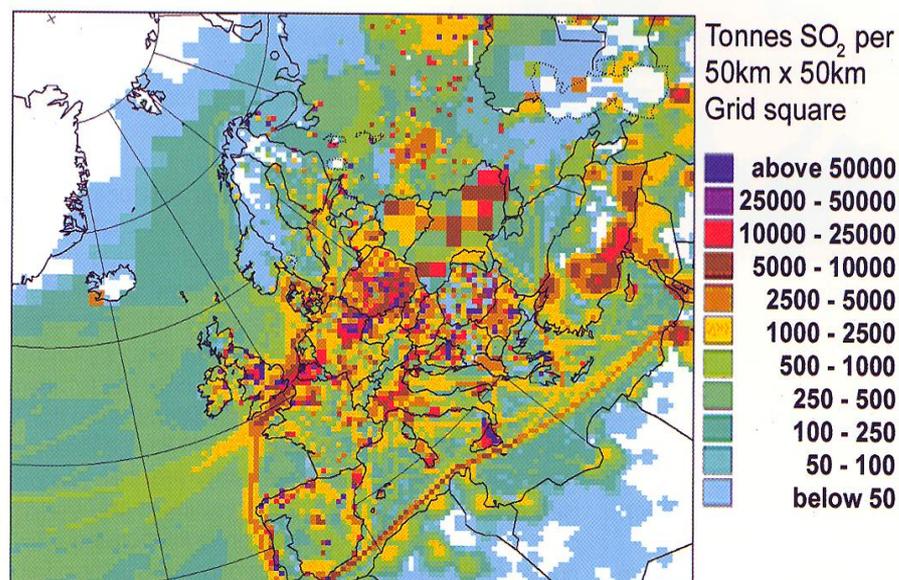


Figure 8 – Émissions de SO₂ en Europe montrant les émissions à partir de navires desservant l'Europe à partir de l'Océan Atlantique et de la Méditerranée.

Les aérosols et poussières, outre leur effet nocif sur la santé humaine ont également un effet sur le climat. Les aérosols peuvent jouer un rôle de noyaux de condensation favorisant la formation de la nébulosité et donc modifier les conditions atmosphériques et pluviométriques. D'autre part leur rôle d'écran du rayonnement solaire leur confère un rôle de refroidissement qui s'oppose donc localement à l'augmentation de température due à l'effet de serre. Les régions du monde les plus polluées en aérosols peuvent donc, en compensation de la pollution rendant en général l'atmosphère irrespirable, bénéficier d'un léger refroidissement climatique.

Ceci est le cas, mais sans les inconvénients dus à la pollution, lorsque les poussières d'origine volcanique sont projetées dans la stratosphère où elles persistent pendant 1 ou 2 années entraînant effectivement un refroidissement de l'ordre de 0,5 °C, comme cela a été observé lors de la dernière grande éruption volcanique du Mt Pinatubo en 1991. Ceci a même suggéré au Prix Nobel de Chimie (1985), Paul Crutzen, d'imaginer comme une possibilité de lutte contre un réchauffement excessif du climat une injection de tonnes d'aérosols soufrés dans la stratosphère par ballons. Cette possibilité fait partie de la panoplie des suggestions de géoingénierie et n'est évidemment envisagée qu'en cas d'extrême urgence !

Les réglementations imposées pour la qualité de l'air ont-elles réussi à réduire la pollution.

La question que l'on peut se poser est de savoir si les nombreuses mesures prises par les gouvernements pour réduire la pollution atmosphérique, que ce soit en Europe ou aux Etats Unis ont eu des conséquences. Hormis l'amélioration due à l'arrêt de l'utilisation du charbon qui a amélioré la qualité de l'air dans les années 50, y a t'il plus récemment une diminution de la pollution ? Un des constituants intéressant dont il est intéressant de suivre l'évolution est l'ozone troposphérique, car, bien que ce soit un polluant secondaire, sa production est liée à la présence des NO_x et des COV, donc de polluants dont la croissance continue.

D'autre part on dispose pour l'ozone d'une longue série de mesures : en effet les premières mesures de l'ozone troposphérique ont été faites en France (au parc Montsouris et au Pic du Midi) et datent des années 1900 où la concentration était alors de 10 ppb. Les mesures reportées sur la figure 9 ont été obtenues en différentes régions du globe dans des stations relativement isolées des agglomérations, et donc elles représentent la concentration de l'ozone de fond, notamment en Europe où les stations sont en altitude pour 3 d'entre elles.

On peut noter sur cette figure que, grâce aux mesures prises ces dernières années, les niveaux d'ozone tout en restant élevés montrent récemment une diminution en Europe. Les réglementations imposées par la Commission Européenne commencent donc à apporter des résultats, notamment si on les compare à d'autres pays d'activité industrielle comparable (USA, Japon). La croissance d'un facteur 4 en Europe n'est pas surprenante puisque l'augmentation des concentrations d'ozone est directement liée à l'augmentation des émissions anthropiques des précurseurs principaux de l'ozone.

Les raisons pour expliquer que l'ozone continue à croître dans la plupart des sites sont complexes, et incluent une combinaison de facteurs dont le rôle respectif est encore difficile à quantifier :

- le rapport entre les émissions en NO et NO₂ qui a changé;
- la variabilité météorologique ;
- les feux de forêts ;
- l'augmentation des émissions de COV par la végétation induit par le réchauffement atmosphérique ;

- l'augmentation de l'import d'ozone via la stratosphère ;
- l'augmentation du niveau de fond d'ozone (notamment car le méthane continue à augmenter) ;
- les équilibres modifiés dans les réactions chimiques qui produisent/détruisent l'ozone

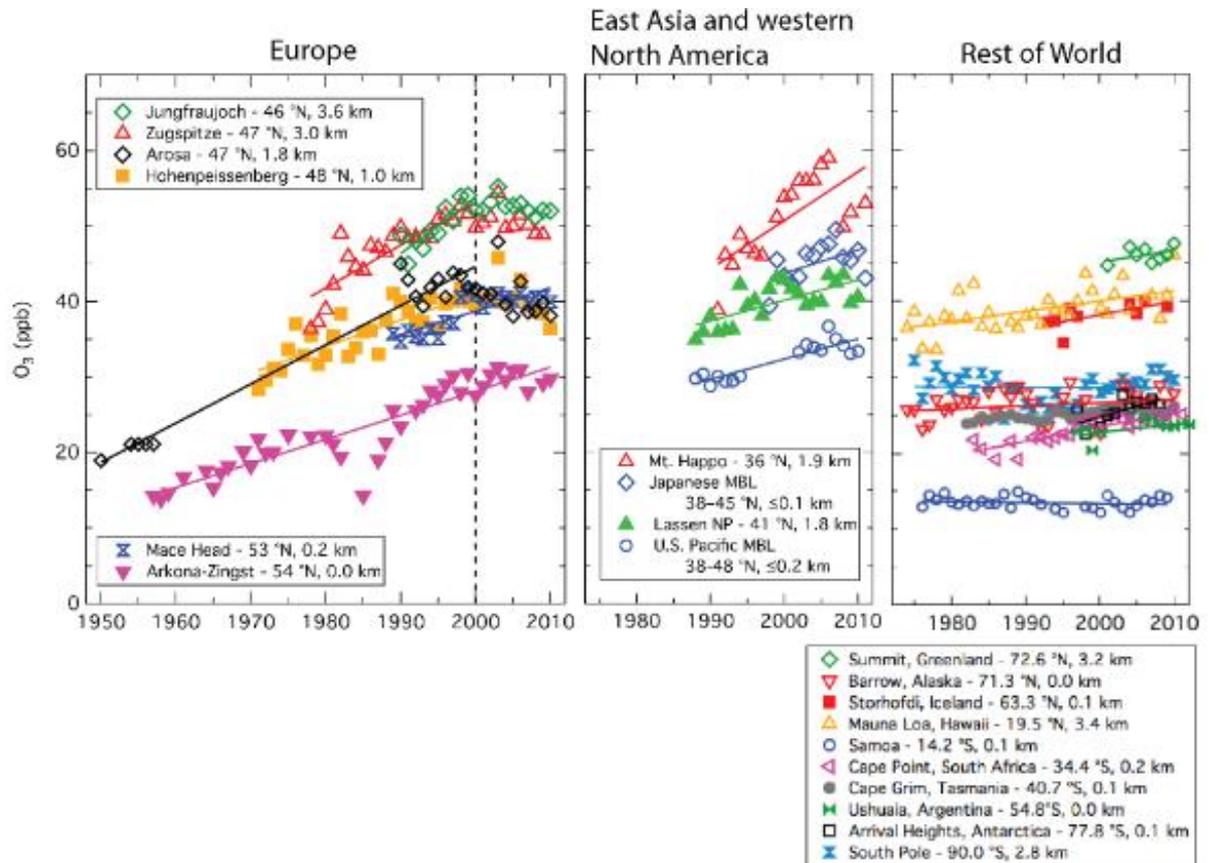


Fig 9 : Evolution de l'ozone troposphérique obtenue à partir des stations d'observation situées hors agglomération et pour beaucoup en altitude. Seules les stations européennes montrent un ralentissement de la croissance et même un début de décroissance à partir de l'année 2000. Ce n'est pas le cas pour les stations des États-Unis et de l'Est Asiatique où la croissance continue. On remarque par contre une croissance inexistante ou très faible dans les sites éloignés de l'activité urbaine.