

ROLE DES MEGAPOLES DANS LE RECHAUFFEMENT GLOBAL : PROGRAMME MEGAPOLI

Guillaume Siour¹, LISA, UMR-CNRS 7583, universités Paris 12 et Paris 7

1. Université Paris 12 Val de Marne, Faculté de Sciences et de Technologie,
61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex

Tél : 01 45 17 16 73

Courriel : guillaume.siour@lisa.univ-paris12.fr

Résumé

Au cours du siècle dernier, la population mondiale a connu une forte explosion démographique, passant de 1,65 milliards à 6,67 milliards d'individus (UN 1999). Cette croissance s'est accompagnée d'un changement de répartition de la population : d'après les estimations les plus récentes, en 2007, la population urbaine serait devenue égale à la population rurale, alors qu'elle n'en représentait que 30% en 1950 (UN 2008). A l'heure actuelle, il existe 50 villes dans le monde dont la population excède 7 voire 10 millions d'habitants. Ces larges zones urbaines sont appelées mégapoles ou « mégacités ». Ces mégacités ne diffèrent pas seulement des zones urbaines plus petites en terme de densité de population. La population de nombreuses mégacités a augmenté trop rapidement pour que les infrastructures existantes puissent la supporter (réseaux routiers, transports en communs...), la prise en charge des problèmes environnementaux (qualité de l'air, gestion des déchets et des ressources...) y reste donc un vrai défi (Gurjar et Lelieveld, 2005).

Les mégacités concentrent une partie importante des émissions de polluants primaires de leur pays. Ainsi, Londres, Paris et Mexico City émettent respectivement 19,9%, 27,9% et 26,7% des composés anthropiques de leurs pays (OCDE, 2006). Les panaches qui en sont issus contiennent donc de grandes quantités de précurseurs d'ozone et d'aérosols mais aussi de gaz à effet de serre (CO, CH₄, COV), à même de jouer un rôle significatif à l'échelle globale (Molina et Molina, 2004). Des études récentes de modélisation (Lawrence et al., 2007 ; Sudo et Akimoto, 2007) montrent que le transport de panaches urbains peut affecter la composition de l'atmosphère sur de grandes distances allant de la centaine de kilomètres pour les moyennes et hautes latitudes, jusqu'à l'échelle globale pour les basses latitudes via la haute troposphère et donc influencer à la fois la qualité de l'air et le climat.

De plus l'évolution des mégacités est intimement liée au problème du changement climatique global, dans la mesure où le climat influe à la fois sur les mécanismes clés contrôlant la qualité de l'air (augmentation des concentrations d'ozone de 1-10 ppb l'été et particulièrement dans les zones urbaines, Jacob et al. 2008) ainsi que sur l'urbanisation des différentes zones du globe. Mais le climat est également impacté par celles-ci en retour au travers de leurs apports de polluants dans l'atmosphère sur l'ensemble du globe (Gurjar et Lelieveld, 2005). La question de l'impact de ces mégapoles sur le climat et son évolution au cours des prochaines décennies est actuellement au cœur des préoccupations scientifiques présentées ici au travers du projet MEGAPOLI qui vise - entre autres objectifs - à quantifier les émissions de ces mégacités pour comprendre leur impact aux différentes échelles concernées.

Mots clés : villes, impact, pollution, climat, développement

1. Introduction

L'impact des émissions anthropiques sur l'atmosphère s'exprime à différentes échelles d'espace, et donc de temps. A l'échelle régionale, l'accumulation de résidus de combustion tels que les Composés organiques volatiles (COV), les oxydes d'azote (NO_x) et les particules entraîne la formation d'ozone (O₃) qui - outre le fait qu'il soit un gaz à effet de serre - possède des propriétés irritantes pour les voies respiratoires et est responsable de dommages importants sur les cultures ainsi que sur le bâti (Van Dingenen et al., 2008, Lefèvre et al., 2002). A une échelle plus grande,

continentale à globale, l'accumulation de ces polluants est responsable de l'augmentation de l'intensité de l'effet de serre, et contribue donc au réchauffement global de la planète. Malgré de nombreux efforts engagés depuis les années 1970 sur le contrôle des émissions anthropiques (directive NEC National Emission Ceilings pour l'Europe et Clean Air Act pour les Etats-Unis), les concentrations d'ozone et de gaz à effet de serre, parmi lesquels le dioxyde de carbone (CO₂) n'ont cessé d'augmenter durant la fin du 20^{ième} siècle (GIEC 2007).

En parallèle, la seconde partie du 20^{ième} siècle a connu une forte explosion démographique menant la population mondiale de 1,65 milliards à 6,67 milliards d'individus (UN, 1999). Cette croissance s'est accompagnée d'un mouvement de la population vers les zones urbaines, créant un phénomène peu maîtrisé de croissance rapide de la taille des villes. En 2007, la population urbaine est devenue pour la première fois supérieure en nombre à la population rurale, avec 3,29 milliards d'individus contre seulement 740 millions en 1950 (UN, 2008). Et 50 villes dans le monde possèdent aujourd'hui une population qui excède 7 voire 10 millions d'habitants. Ces larges zones urbaines sont appelées mégapoles ou « mégacités ».

La communauté scientifique suspecte ces mégapoles d'avoir à la fois un impact direct sur la qualité de l'air locale mais aussi un impact spécifique sur la composition de l'air à grande échelle, via le transport à longue distance de panaches urbains de grandes dimensions (Akimoto et *al.*, 2003). Ces mégapoles peuvent par conséquent également influencer le climat (Crutzen, 2004). La raison principale de ce fort impact multi-échelles est que ces mégapoles concentrent une partie importante des émissions de polluants primaires de leur pays. Ainsi, Londres, Paris et Mexico City émettent respectivement 19,9%, 27,9% et 26,7% des polluants anthropiques émis sur leurs territoires nationaux respectifs (OCDE, 2006). Les panaches qui en sont issus contiennent donc de grandes quantités de précurseurs d'ozone et d'aérosols mais aussi de gaz à effet de serre (CO, CO₂, CH₄, COV), ce qui les rend capables de jouer un rôle individuel et collectif (par le mélange de panaches) significatif à l'échelle globale (Molina et Molina, 2004).

Il reste toutefois difficile à l'heure actuelle de quantifier les interactions entre les émissions des mégapoles, la qualité de l'air et le climat. Si en Europe et aux Etats-Unis de nombreuses campagnes de terrain ont été menées pour étudier le devenir et l'impact des émissions anthropiques (Solomon et *al.*, 2000), dans les autres régions du globe les études se heurtent la plupart du temps au manque de données descriptives (étendue des zones urbaines, nature des activités polluantes, quantification des émissions, données d'observations...). Or des villes critiques comme Delhi ou encore Shanghai - qui d'après un rapport des Nations Unies de 2008 concentrent respectivement 15,9 et 15 millions d'habitants - sont situées dans des pays en constant développement et combinent à la fois une forte industrialisation et un trafic routier dense. Enfin, même sur des zones bien décrites comme l'Europe, l'impact direct et indirect sur l'atmosphère des larges zones anthropisées doit être quantifié, et la perspective d'une étendue des zones urbaines et d'une densification des émissions dans des mégapoles doit être considérée.

Le Projet MEGAPOLI (Megacities : Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLution and climate effects, and Integrated tools for assessment and mitigation) financé par la Communauté Européenne à l'automne 2007, vise à étudier et à quantifier les impacts de ces mégapoles européennes et extra-européennes. Ce projet a pour but d'élaborer et d'évaluer des méthodes de

calcul d'impact des mégapoles sur la qualité de l'air et le climat. La méthodologie adoptée est la recherche d'une meilleure modélisation de ces zones, via la mise à disposition des cadastres d'émissions les plus fiables, le raffinement de la représentation des processus physico-chimiques mis en jeu dans le transport et l'évolution des polluants gazeux et particulaires, la modélisation de scénarios prospectifs d'émissions jusqu'en 2050, et le calcul des impacts et rétroactions existant entre les mégapoles, la qualité de l'air, et le climat.

2. Pollution, politiques environnementales et mégapoles

2.1 Problématiques associées aux différentes échelles d'espace

L'impact de l'activité anthropique sur l'atmosphère est multiple. Il s'exprime à différentes échelles d'espace et de temps, et au travers de phénomènes de nature très différente. L'observation la plus directe de l'impact humain sur la composition de l'atmosphère est la pollution des centres villes induite par l'accumulation locale des polluants gazeux et particulaires, issus en grande partie des processus de combustion automobiles, et pouvant former une brume appelée smog. Cette brume, qui génère une diminution mesurable de la visibilité, est composée d'une grande variété de gaz (NO_x, dioxyde de soufre, COV...) et de particules dits primaires. Mais la pollution s'exprime aussi de manière secondaire. Elle résulte alors de la photo-oxydation des espèces primaires émises dans l'atmosphère, et s'accompagne de la formation d'aérosols supplémentaires et de l'évolution des particules primaires. Elle se forme en quelques heures sous le vent des émissions primaires et, si du point de vue gazeux elle est principalement composée d'ozone (issue des NO_x et des COV), elle contient également de très nombreux composés organiques et azotés sous forme oxydée.

De nombreux polluants présents à cette échelle possèdent des effets phytotoxiques et irritants pour les voies respiratoires, mais aussi des effets cancérigènes reconnus (Buse et *al.*, 2003; WHO, 2003). L'ozone, polluant gazeux principal à l'échelle urbaine et régionale, pose ainsi de réels problèmes de santé publique en raison de son caractère irritant, et des dommages irréversibles qu'il cause aux cultures, aux plantes et aux espaces naturels, générant des problèmes tant économiques que de préservation de notre patrimoine écologique.

Depuis la fin du 20^{ième} siècle, de nombreux efforts sur les émissions anthropiques ont été consentis par l'ensemble des pays développés afin de réduire l'intensité de la pollution locale, primaire mais aussi secondaire. Pourtant, les observations relèvent la persistance d'épisodes de pollution primaire dans tous les grands centres-villes (EEA, 2007), à l'image du nuage brun communément présent sur Paris et illustré en Figure 2.



Figure 1 : Pollution à New-York en 1988

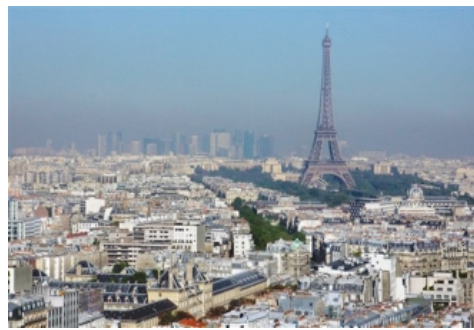


Figure 2 : Pollution à Paris en 2006

L'agence Européenne pour l'environnement (AEE) indique ainsi qu'en 2006, 47% de la population européenne est encore fréquemment exposée à des concentrations atmosphériques élevées de polluants oxydants, et particulièrement d'ozone (EEA, 2007). La carte de la Figure 3 illustre ce phénomène et représente le nombre de dépassements du seuil de 90 ppbv (seuil d'information à la population, Directive 2002/3/EC) relevés en 2006 en Europe, les couleurs correspondant au nombre de journées de dépassement. Elle montre que la majorité du continent a été exposée au moins une fois en 2006 à des concentrations élevées en ozone, et plus de 10 fois pour de nombreuses régions du centre et du sud de l'Europe. Toutefois, la problématique de l'ozone n'est pas qu'un phénomène de pointes. Elle est également largement liée à l'existence d'un bruit de fond atmosphérique élevé en ozone. La Figure 4 présente ainsi le nombre de jours de dépassement de la valeur réglementaire de 60 ppbv sur 8h : on y voit que la quasi-totalité de l'Europe est exposée à des valeurs moyennes excédant cette limite plus de 25 jours durant l'année 2006.

La formation de l'ozone résulte, nous l'avons mentionné, de l'oxydation des Composés Organiques Volatils en présence d'oxydes d'azotes. Les mécanismes associés à ce processus de transformation sont aujourd'hui bien documentés dans la littérature (Guicherit et Roemer, 2000; Solomon et al., 2000). Notre connaissance de la formation de l'ozone peut être schématisée de manière très simplifiée par la Figure 5. On y observe le rôle initiateur des COV réduits (primaires), et l'action catalytique des oxydes d'azotes qui permet la continuité d'un cycle d'oxydation producteur d'ozone, fonctionnant avec des radicaux atmosphériques générés sous l'action du rayonnement solaire. L'existence de nombreux points de compétition dans ce cycle rend complexe la maîtrise de l'ozone via celle de ses précurseurs primaires.

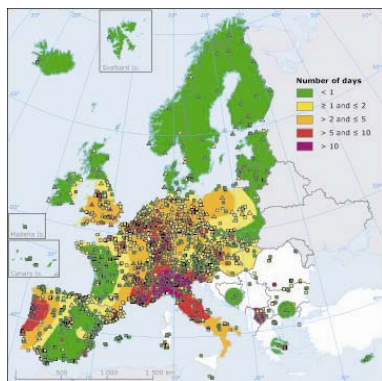


Figure 3 : Nombre de jours de dépassement du seuil réglementaire de 90 ppbv d'ozone en 2006

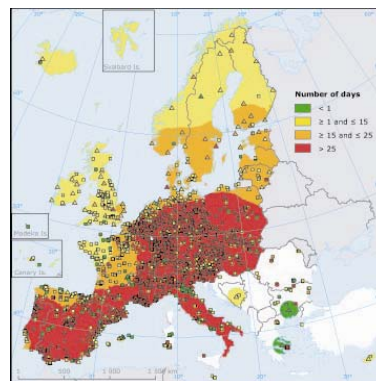


Figure 4 : Nombre de jours de dépassement du seuil réglementaire de 60 ppbv d'ozone pendant 8h en 2006

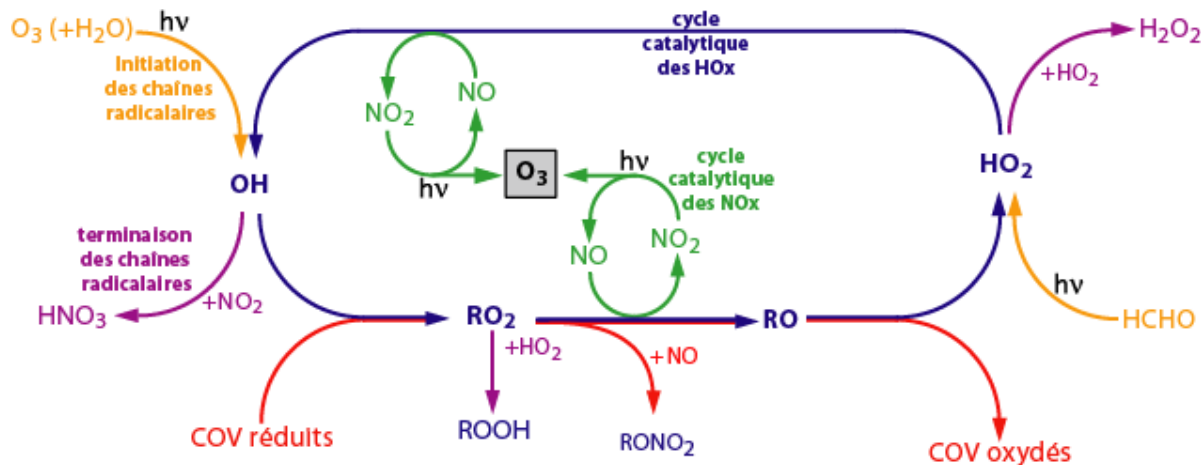


Figure 5 : Cycle catalytique de formation de l'ozone [Camredon et Aumont, 2007]

Le temps de vie des composés en trace dans l'atmosphère varie fortement selon leur nature. La Figure 6 ci-dessous nous montre que le temps de vie d'une espèce est associé à une échelle spatiale : plus l'espèce est stable, plus son temps de vie est long, et elle sera susceptible de se transporter et de s'homogénéiser dans l'atmosphère. Ainsi, certains composés anthropiques comme le CH_4 ou le CO_2 qui ont respectivement des temps de vie de 10 et 100 ans, peuvent impacter l'atmosphère depuis l'échelle hémisphérique jusqu'à l'échelle globale. Les modifications de la composition de l'atmosphère à toutes échelles sont donc fortement liées à l'émission et la transformation des mêmes panaches, et la pollution locale doit être considérée comme l'élément premier de la chaîne de perturbation de l'atmosphère à l'échelle globale.

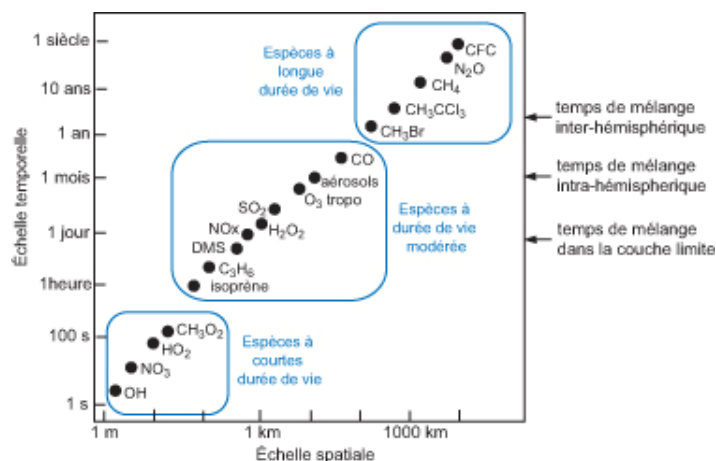


Figure 6 : Temps de vie de différentes espèces en fonction de l'échelle spatiale impactée [Seinfeld et Pandis, 1998].

A cette échelle, les perturbations ne sont pas liées à la dégradation de la qualité de l'air, mais à l'action des gaz et particules sur la température de surface. Ainsi, on connaît bien le rôle de CO_2 et de CH_4 qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge et peuvent donc renvoyer le rayonnement tellurique vers la surface, jouant ainsi un rôle dans l'effet de serre planétaire. C'est l'accumulation de ces gaz à effets de serre (GES) du fait de leur temps de vie important qui va entraîner une modification de l'amplitude de cet effet de serre. La Figure 7, extraite du 4^e rapport du GIEC (2007) représente l'estimation du forçage radiatif induit par les GES et les particules. Malgré de fortes incertitudes, le forçage anthropique est aujourd'hui reconnu comme positif, et estimé à $+1,5 \text{ W.m}^{-2}$.

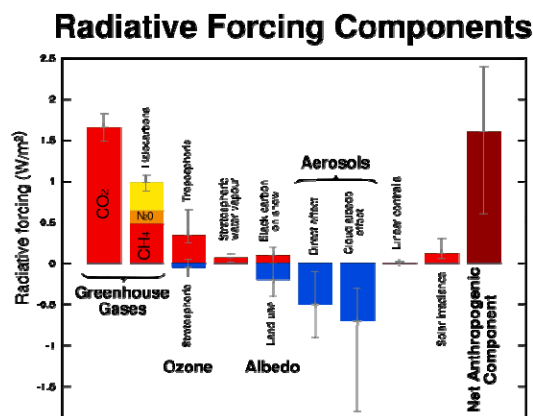


Figure 7 : estimation du forçage radiatif du aux activités anthropiques

2.2 Politiques environnementales et évolution de la pollution

De nombreuses mesures de contrôle des émissions anthropiques ont été mises en œuvre depuis une cinquantaine d'années, initialement en Europe et aux Etats-Unis. Pour ce qui concerne les gaz à effet de serre, la réglementation la plus récente est celle de Kyoto, dont les accords ont été ratifiés par 172 pays et sont entrés en vigueur en février 2005. Ces accords imposent aux signataires une réduction de 5,2% de leurs émissions de 6 gaz à effet de serre d'ici à 2012, par rapport aux niveaux de 1990. Toutefois, il faut prendre en compte l'inertie du système atmosphérique : si on prend

l'exemple du CO₂ (figure 8), ses concentrations devraient continuer à fortement augmenter durant les prochaines années, du fait de son long temps de vie.

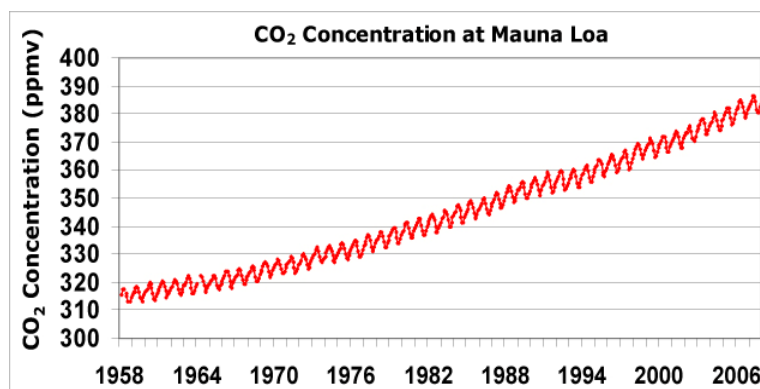


Figure 8 : évolution de la concentration de CO₂ de 1958 à nos jours

Du point de vue de la qualité de l'air, les premières actions européennes communes remontent à la fin des années 1970 avec le protocole sur la pollution transfrontière (<http://www.unece.org/env/lrtap/full%20text/1979.CLRTAP.f.pdf>). Le choix d'une action commune à l'échelle continentale a permis dès cette période une optimisation des effets de la réduction locale des émissions. Il en est de même avec les états unis qui en 1970 adoptent le Clean Air Act (<http://www.epa.gov/air/caa/>) qui a autorisé l'élaboration de règlements fédéraux et d'État afin de limiter les émissions à la fois de sources industrielles et mobiles. Plus près de nous, la directive européenne NEC (National Emission Ceiling) ratifiée en 1999 à Göteborg impose à chaque état membre un plafond national d'émissions pour les grandes familles de polluants primaires (composés organiques volatiles non méthaniques COVNM, NO_x, NH₃, SO₂), à respecter pour 2010. L'effet de ces réglementations est visible sur les mesures locales des polluants, comme on peut le voir sur la Figure 9 : les niveaux moyens sont en baisse significative depuis le début des années 1990.

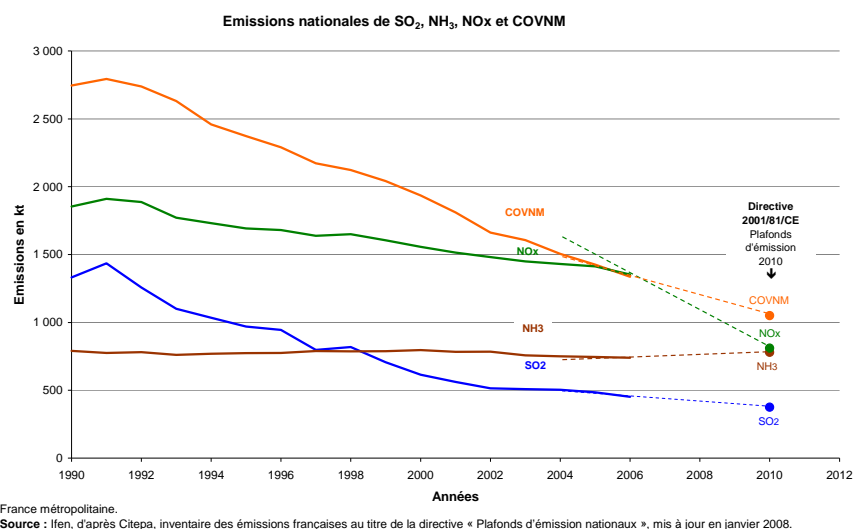


Figure 9 : Evolution des concentrations des principaux précurseurs d'ozones de 1990 à 2010.

Une nuance doit toutefois être apportée à ce tableau : si les plafonds seront probablement respectés pour ce qui est de COVNM, un grand pas reste à franchir pour de nombreux pays pour ce qui concerne les émissions de NO_x. Bien qu'en baisse de 27% depuis 1990, elles devaient sur les derniers chiffres de 2006 encore diminuer de 40% pour respecter la directive européenne. Les dernières projections transmises à la Commission Européenne indiquent que seuls onze États membres sont en passe de respecter leurs plafonds nationaux d'émission pour NO_x. De nouvelles mesures de réduction ont récemment été mises à l'étude dans les pays concernés par ce problème. Enfin, malgré la diminution des teneurs urbaines et régionales en polluants primaires, les concentrations de polluants secondaires - comme l'ozone - restent plus difficiles à maîtriser. Comme nous l'avons vu en Figure 5 il n'existe pas de relation simple entre la diminution des précurseurs et la concentration d'ozone, et les observatoires de la pollution régionale indiquent que les concentrations d'ozone restent élevées malgré les efforts consentis. Ainsi, la Figure 11 montre une augmentation des moyennes annuelles en ozone sur le territoire français entre 1994 et 2007, où elles atteignent la valeur de 60 µg.m⁻³.

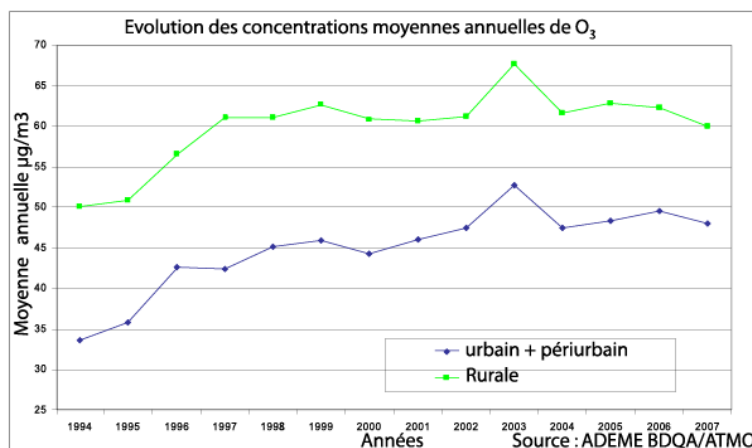


Figure 10 : évolution des concentrations d'ozone en moyenne annuelle de 1994 à 2007.

Quelles explications associer à ce phénomène ? Quelles solutions envisager ?

- **Zones émettrices et bruit de fond hémisphérique**

Dans un premier temps, les études scientifiques indiquent la nécessité de prendre en compte l'effet sur les zones européennes et Nord-Américaines d'une augmentation des émissions dans le reste du globe. En effet, les émissions anthropiques sont fortement en hausse dans de nombreux pays en cours de développement. La Figure 11 illustre l'évolution mondiale des émissions d'oxydes d'azote, réalisée à partir de différents modèles d'émissions, entre 1970 et l'année 2000. Les émissions européennes y décroissent de façon significative à partir de 1990 pour atteindre au début du 21^{ième} siècle un niveau inférieur à celui de 1970. On observe sur cette figure un très fort accroissement des émissions du continent asiatique, de près d'un facteur 3, entre 1995 et nos jours. Lelieveld et Dentener (2000) indiquent qu'au vu de la forte croissance des émissions anthropiques asiatiques, cette zone du globe aura de plus en plus d'influence sur le bruit de fond en ozone à l'échelle hémisphérique. Dentener et *al.* (2005) confirment ces tendances et indiquent que les moyennes annuelles de concentration d'ozone augmenteront encore d'ici à 2020, l'amplitude attendue étant de +5 ppbv pour l'hémisphère Nord avec des augmentations locales plus fortes, comme en Inde où

l'accroissement prévu est de 15 ppbv. Que ce soit l'émergence de zones rapidement urbanisées dans les pays en voie de développement, ou l'augmentation de la densité de population des plus grandes villes du monde, il apparaît donc que chacun des gros points émetteurs du globe participe à une augmentation du bruit de fond en ozone que l'on n'arrive pas encore à maîtriser.

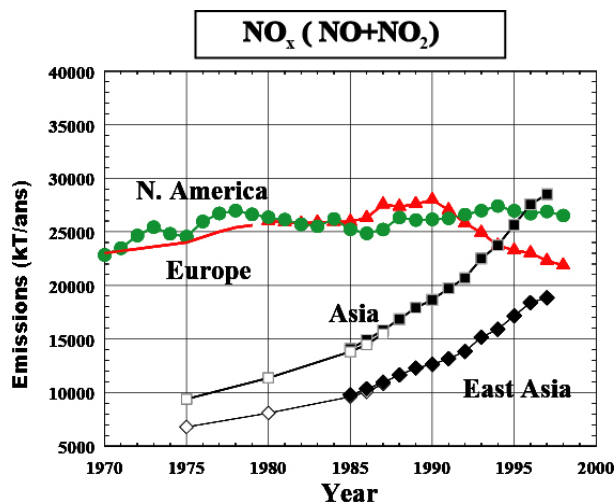


Figure 11 : Naja et al 2003, Akimoto 2003

La Figure 12 et la Figure 13 présentent les flux d'émissions pour l'année 2000, respectivement pour le CO₂ et les NO_x, estimés par le modèle global d'émissions EDGAR (<http://www.rivm.nl/edgar/new/>). Comme on peut le voir sur cette figure, la majeure partie des émissions anthropiques est attribuée aux zones de très forte densité urbaine. Certaines zones urbaines en Asie, en Europe et aux états unis, concentrent ainsi des émissions de plusieurs dizaines de milliers de tonnes par an d'oxydes d'azote et de dioxyde de carbone. En outre, de nombreuses études et observations (satellites notamment) ont montré l'altération directe de la composition de l'air à grande échelle par les larges points urbanisés (villes, ensemble d'agglomérations) des continents européen, nord-américain, et asiatique. Il apparaît ici particulièrement important de comprendre comment évoluent ces zones urbaines pour pouvoir prévoir l'évolution de leur impact sur le bruit de fond de l'atmosphère globale.

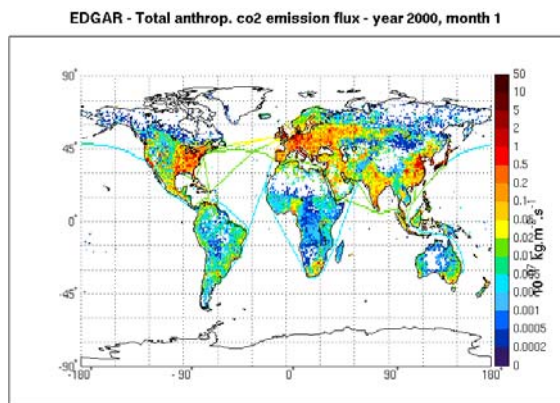


Figure 12 : émissions globales de CO₂ du modèle EDGAR

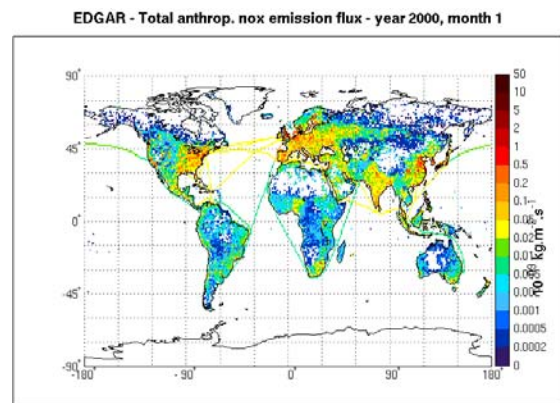


Figure 13 : émissions globales de NO_x du modèle EDGAR

- **Evolution du climat**

En second lieu, il est clairement apparu ces dernières années que si l'évolution du climat est dépendante de l'accumulation de phénomènes régionaux, les problèmes de pollution régionale sont eux aussi sensibles à l'évolution du climat (via la modification des émissions de COVNM par la végétation, ou encore via les phénomènes météorologiques extrêmes comme les vagues de chaleur). Ainsi, l'année 2003 a clairement mis en relation l'occurrence de situations météorologiques extrêmes, l'existence d'un bruit de fond global élevé en oxydants, la très grande capacité locale de production d'ozone, et son accumulation à grande échelle. Les mesures environnementales nationales et continentales ne s'avèrent donc pas suffisantes pour réduire significativement les problèmes de fortes concentrations d'ozone.

L'association des problématiques de toutes échelles amène donc les scientifiques, comme ce fut le cas à la fin du 20^{ième} siècle pour les phénomènes de pollution, à envisager le problème sous un angle plus large, et donc à concevoir la construction en synergie des réglementations liées à la pollution et à l'évolution du climat.

3. Appréhension du phénomène de mégapoles : illustration avec le programme MEGAPOLI

3.1 Mégapoles : état des lieux des connaissances

D'après un récent rapport des nations unies (UN, 2008), la population urbaine est devenue en 2007 supérieure en nombre à la population rurale. On dénombre aujourd'hui une trentaine de villes dont la population est supérieure à 5 millions d'habitants. Ces villes sont appelées Mégacités ou Mégapoles et sont représentées sur la Figure 14. Comme on peut le voir sur cette carte, la majorité des mégapoles est concentrées dans les pays émergents. A l'intérieur de ces mégapoles, les activités anthropiques (industrielles, automobiles...) sont très intenses et constituent une large fraction des émissions de chaque pays. En outre, la structure dense des panaches issus de ces grandes villes les rend susceptibles d'être facilement transportés vers la haute troposphère, zone habituellement non directement impactée par l'activité humaine, et de modifier fortement sa réactivité et donc son

comportement et sa composition chimiques. Pour quantifier ce nouveau type d'impact il faut disposer d'inventaire d'émissions fiables, pour chaque région fortement émettrice du globe.

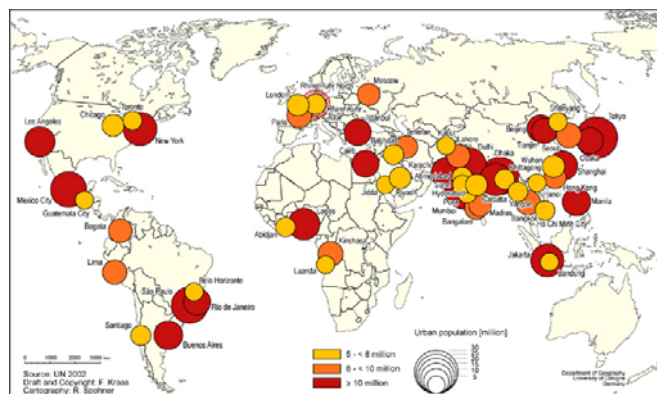


Figure 14 : Projection pour 2015 des principales mégapoles du monde UN 2008

En Europe et aux Etats-Unis, les nombreux programmes scientifiques mis au point pour soutenir les politiques environnementales ont permis de quantifier le plus précisément possible les émissions anthropiques. Mais les données d'émission dont on dispose hors de ces zones sont pour la plupart mal résolues, voire lacunaires.

La Figure 15 présente les différents mécanismes d'interactions et connexions identifiés entre les mégapoles, la qualité de l'air et le climat. Si on en connaît la structure, aucune de ces flèches n'est encore quantifiée.

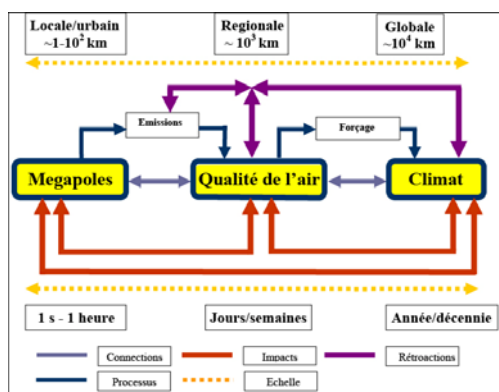


Figure 15 : Interactions entre Mégapoles, Qualité de l'air et climat

Cette figure montre que, comme toute ville, une mégapole émet localement une certaine quantité de polluants qui vont dans l'espace de une à deux heures modifier la qualité de l'air sur une échelle plus grande, ici décrite comme régionale. La qualité de l'air force alors directement le climat via le phénomène de forçage radiatif dû à la présence de panaches chargés en aérosols et en gaz à effet serres. A l'échelle globale, des rétroactions sont possibles entre le climat et la qualité de l'air. Un bon exemple de cette rétroaction est observé durant les périodes caniculaires, où la situation météorologique extrême se montre un paramètre fortement aggravant de la pollution locale. Le climat peut aussi rétroagir sur les émissions de polluants primaires, et sur les composés biogéniques, acteurs majeurs de la pollution régionale.

Les outils dont dispose la communauté scientifique ont suffisamment évolués (modèles globaux de climat et modèles urbains, régionaux et continentaux de qualité de l'air) pour entreprendre une étude de ces phénomènes d'échelles multiples. Dans le cadre d'un appel d'offres récent de la Communauté Européenne, deux projets visant à relier science et politiques environnementales ont été financés. Les deux projets, CityZen et MEGAPOLI, ont démarré en 2008 et se termineront en 2011. Ils sont dédiés à l'étude de la pollution issue des grandes mégapoles mondiales ainsi que leur impact actuel et futur sur la qualité de l'air et le climat. A titre d'illustration, le projet MEGAPOLI est décrit ci-dessous dans ses grandes lignes.

3.2 Le projet MEGAPOLI : illustration d'une structuration pour répondre aux besoins actuels

Le Projet MEGAPOLI (Megacities: Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLution and climate effects, and Integrated tools for assessment and mitigation) est un projet de recherche financé par la communauté Européenne qui vise à répondre à trois principales questions :

1. Evaluer l'impact multi échelles des grandes mégapoles.
2. Quantifier les rétroactions entre mégapoles, qualité de l'air, le climat.
3. Développer des outils intégrés pour l'évaluation des politiques environnementale.

MEGAPOLI représente une véritable intégration de domaines jusque-là peu interactifs, à savoir des scientifiques de la communauté du climat, de la qualité de l'air, de la dynamique, des expérimentateurs, à différentes échelles allant de l'échelle de la rue jusqu'à l'échelle globale. Il regroupe 23 partenaires provenant de 11 pays européens représentés, mais aussi 12 partenaires hors d'Europe, tels que représentés sur la Figure 16 et la Figure 17. Ce nombre reflète la forte combinaison d'expertises nécessaire pour entreprendre un travail d'une telle ampleur.

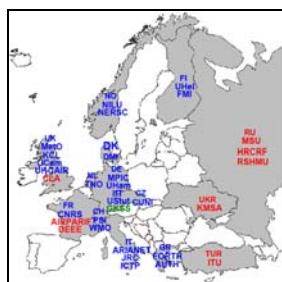


Figure 16 : Les acteurs Européens du projet MEGAPOLI

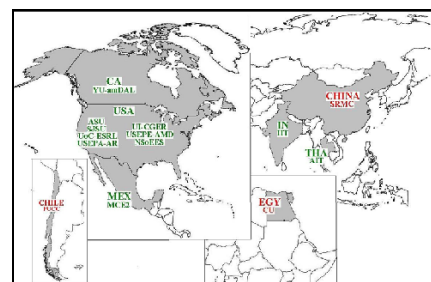


Figure 17 : Les acteurs extra-Européen du projet MEGAPOLI

Le projet portera sur trois niveaux d'étude représentés en Figure 18. Le premier niveau comprendra des études de modélisations allant de l'échelle de la rue à l'échelle régionale puis globale. A ce niveau, seules les mégapoles comme Paris, Londres, la région de la Ruhr ainsi que de la vallée du Pô ont été sélectionnées car elles constituent les principaux foyers de la population de l'union Européenne. De nouvelles observations de l'évolution des panaches urbains seront en parallèle recueillies grâce à des campagnes de mesure d'envergure se déroulant à Paris en 2009. Ces campagnes doivent permettre de mieux contraindre les modèles notamment en ce qui concerne

l'évolution des aérosols organiques dans les panaches urbains, point extrêmement critique autant du point de vue politique que du point de vue scientifique.

Le deuxième niveau comprendra des modélisations moins raffinées, allant de l'échelle régionale seulement, à l'échelle globale. Les villes associées (Moscou, Istanbul ...) ont été choisies car il existe des données qui permettront de les représenter dans les modèles avec un bon niveau de confiance.

Enfin le troisième niveau traitera des l'ensemble des mégapoles mondiales qui abritent plus de 5 millions de personnes. Il inclura donc les villes dont la description dans les bases de données n'est pas suffisante pour permettre une modélisation régionale. Elles seront le sujet d'études globales étudiées par des modèles de grande échelle ou avec l'aide d'observation satellitaires, ces études devant permettre d'évaluer leurs effets globaux sur la qualité de l'air.



Figure 18 : Hiérarchie des Mégapoles dans le projet MEGAPOLI

Les données issues des nombreux modèles seront insérées dans des modèles dits intégrés, permettant de traiter les informations fournies par les modèles et d'aboutir à une évaluation des coûts et bénéfices de possibles politiques environnementales pour l'ensemble du globe. Le point limitant des travaux reste toutefois toujours l'accès à des données de qualité, provenant à la fois d'observations de terrain et de bases de données d'entrée pour les modèles.

4. Conclusion

L'évolution des connaissances scientifiques ainsi que la mise en commun des savoirs faire de différentes communautés au sein d'une même problématique et d'un même projet, permettent aujourd'hui de pouvoir envisager l'étude d'un phénomène aussi complexe que celui de la pollution atmosphérique induite par les mégapoles.

Les premières études, relatives aux mégapoles européennes, sont actuellement en cours. Les autres niveaux d'études permettront d'aboutir dans un premier temps à l'obtention de données nouvelles sur les niveaux de pollution dans de grandes mégapoles extra européennes. Par comparaison aux niveaux rencontrés en Europe de l'Ouest et en Europe Centrale, ces données alimenteront une réflexion sur la manière dont la structure des villes, l'intensité de leurs émissions et leur localisation géographique affectent la pollution photochimique locale et régionale. Mais ces résultats

permettront surtout de discuter de l'évolution de panaches supposés très riches en composés primaires et secondaires très réactifs, et de leur mélange dans le bruit de fond troposphérique continental, faisant un premier lien avec l'évolution pressentie des niveaux de fond moyens de polluants primaires et secondaires dans l'hémisphère Nord.

Bibliographie

- H. Akimoto: Global Air Quality and Pollution, *Science*, 302 : 1716-1719, 2003.
- Alan Buse, Gina Mills, Harry HarmenS, Patrick Bükér, Felicity Hayes, Philip Williams, Lisa Emberson, Steve Cinderby, Mike Ashmore, Mike Holland, Ludwig De Temmerman and the participants of the ICP Vegetation : Air Pollution and Vegetation, *Annual Report UNECE ICP Vegetation*, 2003.
- M. Camredon, B. Aumont, J. Lee-Taylor J, S. Madronich : The SOA/VOC/NOx system: an explicit model of secondary organic aerosol formation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7 (21): 5599-5610, 2007.
- Camredon M., Aumont B. : Modélisation de l'ozone et des photooxydants troposphériques. I. L'ozone troposphérique : production/consommation et régimes chimiques, *Pollution Atmosphérique*, 193, 2007
- Paul J. Crutzen : New Direction: The growing urban heat and pollution «island effect» -impact on chemistry and climate, *Atmospheric Environment*, 38: 3539-3540, 2004.
- F. Dentener, D. Stevenson, J. Cofala, R. Mechler, M. Amann, P. Bergamaschi, F. Raes, R. Derwent : The impact of air pollutant and methane emission controls on tropospheric ozone and radiative forcing: CTM calculations for the period 1990-2030, *Atmospheric Chemistry and physics*, 5: 1731-1755, 2005.
- EEA 2007 : Air pollution by ozone in Europe in summer 2006, *EEA Technical report No 5/2007*.
- GIEC 2007 : climate change 2007 : *Synthesis Report*.
- Robert Guicherit et Michiel Roemer : Tropospheric ozone trends, *Chemosphere - Global Change Science*, 2 : 167-183, 2000.
- Lefèvre, R.A., Ausset, P. : Atmospheric pollution and building materials : stone and glass, Geological Society, Special Publication "Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies", London, 205, 329-345, 2002.
- J. Lelieveld et F. Dentener : What controls tropospheric ozone?, *Journal Geophysical Research*, 105(D3), 3531-3551, 2000.
- M.J. Molina, L.T. Molina : Megacities and atmospheric pollution, *Journal Waste Management Association*, 54: 644-680, 2004.
- Manish Naja and Hajime Akimoto : Ozone in background and photochemically aged air over central Europe: Analysis of long-term ozonesonde data from Hohenpeissenberg and Payerne, *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, no. D2, 4063, 2003.
- OCDE : Competitive Cities in a Global Economy, ISBN 92-64-02709-2, 2006.
- Rita Van Dingenen, Frank J. Dentener, Frank Raes, Maarten C. Krol, Lisa Emberson and Janusz Cofala : The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation, *Atmospheric Environment*, Volume 43, Issue 3, January 2009, Pages 604-618.
- Paul Solomon, Ellis Cowling, George Hidy, Cari Furiness : Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe, *Atmospheric Environment*, 34: 1885-1920, 2000.
- Seinfeld, J.H., and Pandis, S.N. : Atmospheric chemistry and physics, Wiley, New York, 1998.
- United Nation : The World at Six Billion, 1999.
- United Nation : World Urbanization Prospects, The 2007 Revision, 2008.
- World Health Organisation : Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide , Report on a WHO Working Group, Bonn, Germany, 2003.