



Pollution atmosphérique et climat

Augustin Colette, Laurence Rouil, Bertrand Bessagnet, Simone Schucht,
Sophie Szopa, Robert Vautard, Laurent Menut

► **To cite this version:**

Augustin Colette, Laurence Rouil, Bertrand Bessagnet, Simone Schucht, Sophie Szopa, et al.. Pollution atmosphérique et climat. Pollution Atmosphérique: climat, santé, société, Le Kremlin Bicêtre: Revue Pollution atmosphérique, 2013, pp.78-83. ineris-00961814

HAL Id: ineris-00961814

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00961814>

Submitted on 20 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Pollution atmosphérique et climat / Air Quality and Climate Change

A. Colette (1), L. Rouïl (1), B. Bessagnet (1), S. Schucht (1), S. Szopa (2), R. Vautard (2), L. Menut (3)

1. INERIS, [*]: augustin.colette@ineris.fr
2. LSCE/IPSL/CEA/CNRS/UVSQ
3. LMD/IPSL/ CNRS/Ecole Polytechnique/UPMC

Soumis à *Pollution Atmosphérique*, numéro spécial « Climat »

Mot Clés : Pollution Atmosphérique, Changement Climatique, Transport à Longue Distance, Modélisation Chimie-Transport

Key Words : Atmospheric pollution, Climate Change, Long Range Transport, Chemistry Transport Modelling.

Abstract :

Climate change and air quality are closely related: through the policy measures implemented to mitigate these major environmental threats but also through the geophysical processes that drive them. We designed, developed and implemented a comprehensive regional air quality and climate modelling system to investigate future air quality in Europe taking into account the combined pressure of future climate change and long range transport. Using the prospective scenarios of the last generation of pathways for both climate change (emissions of well mixed greenhouse gases) and air pollutants, we can provide a quantitative view into the possible future air quality in Europe. We find that ozone pollution will decrease substantially under the most stringent scenario but the efforts of the air quality legislation will be adversely compensated by the penalty of global warming and long range transport for the business as usual scenario. For particulate matter, the projected reduction of emissions efficiently reduces exposure levels.

Résumé :

Changement climatique et qualité de l'air sont intimement liés : à travers les politiques de gestion mises en œuvre pour atténuer ces menaces environnementales majeures mais aussi à travers les processus géophysiques qui les gouvernent. Afin de pouvoir étudier l'évolution de la pollution atmosphérique en Europe en prenant en compte l'influence conjointe du changement climatique et du transport à longue distance, nous avons conçu, développé et mis en œuvre un système complet de modélisation régionale du climat et de la qualité de l'air. En utilisant des scénarios prospectifs de dernière génération relatifs au changement climatique (émissions de gaz à effet de serre) mais aussi

pour les polluants à courte durée de vie, nous avons pu proposer une quantification de l'évolution future de la qualité de l'air en Europe. D'après le scénario le plus volontariste, la pollution liée à l'ozone sera réduite de manière substantielle mais les efforts positifs induits par les politiques de gestion de la qualité de l'air seront contrebalancés par le changement climatique et le transport à longue distance pour le scénario *statu-quo*. En ce qui concerne les particules, les réductions d'émissions futures réduiront de manière efficace les niveaux d'exposition.

1 Introduction

Même si leurs impacts respectifs se caractérisent généralement par des échelles de temps et d'espaces différentes, qualité de l'air et climat restent intimement liés, autant par les processus géophysiques qui les régissent que par les stratégies de gestion et d'atténuation qui les concernent.

- La pollution atmosphérique est très fortement contrainte par la dynamique de l'atmosphère et donc par le climat qui définit la fréquence et l'amplitude des phénomènes météorologiques. Le climat est lui-même sensible à la composition chimique de l'atmosphère, du fait des propriétés radiatives (directes et indirectes) des espèces traces, notamment particulières.
- Les politiques d'atténuation du changement climatique reposent sur des mesures technologiques (comme les stratégies d'économie d'énergie ou la transition vers des nouvelles sources d'énergie) qui ont également un impact sur les émissions de polluants atmosphériques. Réciproquement les mesures de gestion de la qualité de l'air influent aussi sur les émissions de gaz à effet de serre. Dans les deux cas il faut noter que ces effets indirects ne vont pas systématiquement dans le sens d'une réduction mutuelle des émissions de polluants et de gaz à effet de serre.

Ces interactions multiples appellent des approches intégrées afin d'identifier les mesures de gestion les plus coût-efficaces (Cohan and Napelenok, 2011) et qui auraient des effets positifs tant sur la qualité de l'air que sur le réchauffement climatique. En Europe, l'outil privilégié à la fin des années 1990 pour définir les stratégies de gestion optimales de réduction des émissions de polluants atmosphériques dans les pays Européens était le modèle RAINS (*Regional Air Pollution Information and Simulation*) (Amann and Lutz, 2000). Afin de prendre en compte l'effet combiné des mesures ciblant le climat et la qualité de l'air, cet outil a évolué au milieu des années 2000 vers le modèle GAINS (*Greenhouse Gas - Air Pollution Interactions and Synergies*) (Amann et al., 2011).

Si ces modèles d'aide à la décision permettent bien d'évaluer la sensibilité du système atmosphérique à une évolution des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre, ils ne prennent pas encore en compte l'impact géophysique du climat sur la pollution, ni l'impact de la pollution sur le forçage radiatif. Par ailleurs, les modèles comme GAINS ou RAINS sont par construction une linéarisation du système atmosphérique développée à partir d'un grand nombre de simulations du modèle de chimie-transport EMEP (Simpson et al., 2012). La validité de cette linéarisation reste limitée à des changements incrémentaux d'émission de petite ampleur autour de l'état de référence. Cette hypothèse de linéarité est remise en question dès qu'on s'intéresse à des échelles de temps climatologiques. Quand il s'agit d'étudier l'impact de changements d'émissions de grande ampleur, ou les effets non-linéaires du climat sur la qualité de l'air, les modèles de chimie-transport demeurent donc les outils privilégiés, malgré leur coût en termes de temps de calcul.

Nous présentons ici l'état de l'art de la modélisation de l'impact du climat sur la qualité de l'air en Europe. Après une partie méthodologique revenant sur les données d'entrées nécessaires en termes d'émissions de polluants ou de gaz à effet de serre et les différents types de modèles impliqués, nous présenterons quelques résultats récents qui seront mis en perspective avec la littérature existante.

2 Méthodologie

2.1 Inventaires d'émissions

Les projections d'évolution du forçage radiatif développées pour le prochain rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sont les *Representative Concentration Pathways* (RCP) (van Vuuren et al., 2011). Il existe quatre trajectoires qui diffèrent en termes de forçage radiatif résultant à la fin du siècle. Le scénario le plus restrictif (RCP2.6) conduit à un forçage radiatif de 2.6W/m^2 d'ici 2100, ce qui devrait conduire à un réchauffement de l'ordre de 2°C alors que le scénario le plus permissif, mène à un forçage radiatif de 8.5W/m^2 à la fin du siècle conduisant à un réchauffement de l'ordre de 3.5 à 5.0°C d'ici 2100 d'après le modèle IPSL-CM5, suivant les versions du modèle (Dufresne et al., 2013).

Au-delà de la trajectoire de forçage radiatif, les RCP incluent une information sur les émissions d'espèces traces qui sont utilisées pour comprendre le couplage entre climat et composition de l'atmosphère à l'échelle globale. Ces données sont établies dans le cadre du projet ACCMIP (*Atmospheric Composition Change Model Intercomparison Project*) (Lamarque et al., 2012). Ces émissions d'espèces traces n'ont toutefois pas été développées à des fins de modélisation de la qualité de l'air et plusieurs auteurs ont mis en garde quant à leur utilisation pour de telles applications (Butler et al., 2012; Fiore et al., 2012). La seule alternative disponible à ce jour a été développée dans le cadre du *Global Energy Assessment* (GEA) (Riahi et al., 2012). Ces derniers

scénarios ont l'avantage d'inclure une représentation explicite des politiques de gestion de la qualité de l'air (Rao et al., 2012), ce qui peut conduire à des différences importantes par rapport aux RCP (Colette et al., 2012).

2.2 Chaîne de modélisation

La modélisation de l'impact du climat sur la qualité de l'air à l'échelle régionale requiert la mise en œuvre de quatre types de modèles. Les travaux dont les résultats sont présentés dans cet article reposent sur les outils mentionnés ci-dessous :

- Un modèle de circulation générale couplée océan/atmosphère. Ici on utilise les simulations conduites dans le cadre de la plus récente des itérations du projet *Climate Model Intercomparison Exercise* (CMIP5) (Taylor et al., 2012) avec le modèle IPSL-CM5A-MR (Dufresne et al., 2013) développé par l'Institut Pierre-Simon Laplace.
- Un modèle de climat régional. Les champs climatiques à l'échelle globale sont fournis à une résolution spatiale insuffisante pour être utilisés sur l'Europe, et ils sont donc raffinés dynamiquement avec le modèle de météorologie méso-échelle WRF (Skamarock et al., 2008). Cette initiative est coordonnée sur le plan international dans le cadre de l'exercice CORDEX (*Coordinated Regional Climate Modelling Experiment*, (Giorgi et al., 2009)).
- Un modèle global de chimie atmosphérique. La composition future de l'atmosphère globale est évaluée avec le modèle LMDz-OR-INCA (Hauglustaine et al., 2004) qui prend en compte de manière conjointe le climat et la composition de l'atmosphère. Ce modèle permet donc de quantifier l'impact des émissions sur l'ensemble du globe (et donc de prendre en compte le transport hémisphérique des polluants) ainsi que l'impact du climat global sur la chimie atmosphérique en dehors de l'Europe. Les travaux relevant de cette partie de la chaîne de modélisation sont coordonnés au plan international dans le projet ACCMIP.
- Un modèle de qualité de l'air régional. Le modèle CHIMERE (Menut et al., 2013) est utilisé pour quantifier l'évolution de la pollution à partir des émissions de polluants des scénarios GEA, du climat global du modèle IPSL-CM5-MR raffiné spatialement sur l'Europe avec WRF, et en utilisant les conditions aux limites chimiques de LMDz-OR-INCA.

3 Résultats

Nous présentons ici les résultats de la modélisation combinée de la qualité de l'air et du climat régional à l'horizon 2050. La Figure 1 représente les cartes de concentrations d'ozone (moyenne estivale des maxima journaliers) et de PM_{2.5} (moyenne annuelle) pour la situation actuelle ainsi que l'évolution pour les deux scénarios prospectifs à l'horizon 2050 : un statu quo (ou *business as usual*)

qui ignore la mise en œuvre de politique climatique et un scénario d'atténuation qui ambitionne de limiter le réchauffement global à 2°C d'ici 2100. Ces deux scénarios sont donc très différents en termes de consommation énergétique, ce qui a un effet sur les émissions de gaz à effet de serre (qui sont pris en compte dans les modèles de climat impliqués dans l'étude) mais aussi sur les émissions de polluants (pris en compte dans les modèles de chimie transport). Cependant les deux scénarios partagent les mêmes hypothèses relatives à la politique de gestion de la qualité de l'air. Ca n'est donc que la politique liée à la demande d'énergie qui influera, indirectement, sur les émissions de polluants. . Pour chacun des scénarios, les résultats reposent sur des simulations de 10 ans afin de minimiser l'impact de la variabilité météorologique. Pour la période actuelle, les années 1995-2004 sont utilisées alors que les projections reposent sur la décennie 2045-2054. Par contre, à chaque fois les émissions sont constante sur la période de 10 années météorologique, on utilise alors les données de l'année 2005 pour l'actuel et 2050 pour le futur.

3.1 Projection d'évolution de l'ozone

La carte de maxima d'ozone pour la situation actuelle (historique, en haut à gauche de la Figure 1) reproduit les caractéristiques habituelles (Colette et al., 2011) avec un gradient nord-sud prononcé mis à part les principales zones polluées d'Europe de l'Ouest. L'utilisation de champs climatiques au lieu de prévisions ou de réanalyses météorologiques n'est pas anodin, et dans ce cas précis il apparaît que le modèle de climat est moins favorable à la production d'ozone que les réanalyses (Colette et al., 2013). Cette responsabilité est attribuée principalement au modèle de climat global qui souffre d'un biais froid et nuageux du fait d'une circulation thermohaline trop lente dans l'océan atlantique nord (Hourdin et al., 2012). Il faut noter que ce biais froid n'en fait pas nécessairement un 'mauvais modèle' même si cela pose des défis significatifs dans les études d'impact comme ici. La question des incertitudes et des biais des projections climatiques est largement couverte dans les travaux du GIEC (IPCC, 2007). A titre d'exemple, un modèle qui consisterait en une climatologie du passé pourrait être à la fois très performant sur la période historique et très peu sensible au changement climatique.

Les panneaux inférieurs de la Figure 1 montrent l'évolution des champs d'ozone d'ici 2050 par rapport à la simulation historique. Pour les deux scénarios, on observe une baisse des maxima d'ozone avec toutefois d'importantes différences.

Dans le cas du scénario d'atténuation, les efforts relatifs à l'efficacité énergétique impactent nettement les émissions des précurseurs de l'ozone, et la baisse d'ozone est généralisée. Une analyse de décomposition montre que cette décroissance est induite principalement par la baisse des émissions de précurseurs en Europe et dans le reste du monde. Le climat contribue cependant à

augmenter les niveaux d’ozone. On parlera donc de pénalité climatique. Cette pénalité climatique est induite par l’augmentation de la température et du flux solaire incident (via leur impact sur la photochimie et la production de précurseurs d’ozone d’origine biotique). Il s’agit d’un processus déjà bien établi dans la littérature (Hedegaard et al., 2012; Langner et al., 2012; Manders et al., 2012; Meleux et al., 2007). Les résultats présentés ici confirment ce diagnostic, tout en reposant sur la version la plus récente des projections RCP à l’échelle régionale.

La diminution des niveaux d’ozone est beaucoup plus limitée pour le scénario de base (qui correspond à une situation dite « *business as usual* »), même si elle demeure significative sur une grande partie de l’Europe. L’analyse de décomposition montre que les émissions de précurseurs sont suffisamment significatives pour conduire à une réduction des maxima d’ozone. Même si ce scénario ignore la mise en œuvre de mesures d’efficacité énergétique, il suppose que la législation Européenne relative à la qualité de l’air sera bien implémentée, ce qui semble ici être suffisamment efficace pour réduire l’exposition aux pics d’ozone. A l’inverse, les émissions non-Européennes et l’évolution du climat global constituent des pénalités très importantes qui contrebalancent la baisse imputable aux émissions Européenne.

3.2 Projection d’évolution des particules fines

La situation actuelle et l’évolution future des particules fines est donnée sur les panneaux de droite de la Figure 1. La simulation historique (en haut) reproduit bien les maxima sur les zones polluées d’Europe de l’Est, ainsi que la vallée du Pô, Paris, Londres et le Benelux.

Comme pour l’ozone, les projections pour 2050 s’accordent sur une baisse des concentrations de particules fines. En termes d’exposition, les concentrations de PM_{2.5} pondérées par la densité de population décroissent de 60% et 80% pour les scénarios de statu quo et atténuation respectivement. Si les deux trajectoires pour 2050 diffèrent légèrement, elles sont toutefois beaucoup plus proches que pour l’ozone, ce qui souligne l’importance des politiques de gestion de la qualité de l’air pour les particules. L’implémentation des politiques énergétiques liées au changement climatique ont ici moins d’impact que pour l’ozone.

Il faut cependant noter que le changement climatique lui-même (i.e. l’évolution géophysique plutôt que les mesures technologiques associées aux politiques climatiques) a un impact significatif sur l’évolution des particules fines. L’analyse de décomposition détaillée dans (Colette et al., 2013) montre que le changement climatique régional contribue à diminuer les concentrations de PM_{2.5}. Cette baisse est principalement attribuée à la légère augmentation des précipitations moyennes en Europe (hors Méditerranée). Cependant on observe une réponse différenciée suivant le type de constituant particulaire avec une sensibilité au changement climatique renforcée pour les nitrates

d'ammonium par rapport aux sulfates, ce qui suggère que d'autres paramètres météorologiques tels que la température ou la disponibilité de la vapeur d'eau jouent un rôle. Il est important de souligner qu'au contraire de l'ozone, il est difficile de qualifier de strictement pénalisant l'impact du climat sur les particules et l'on trouve dans la littérature autant d'études rapportant une pénalité qu'un bénéfice du climat (Hedegaard et al., 2012; Manders et al., 2012; Tai et al., 2012).

4 Conclusion et perspectives

Les chaînes de modélisation du climat et de la qualité de l'air atteignent un degré de maturité suffisant pour proposer des projections à l'horizon 2050 intégrant les principaux facteurs d'influence. Le travail présenté ici intègre les rôles respectifs (1) des politiques de gestion du climat et de la qualité de l'air (via les émissions de gaz à effet de serre et des polluants et précurseurs) ; (2) du changement climatique global et sa déclinaison régionale sur l'Europe ; (3) de la chimie de l'atmosphère à l'échelle globale en prenant en compte un focus sur l'Europe.

Ce système de modélisation régional du climat et de la qualité de l'air permet de quantifier l'évolution future des expositions à l'ozone et aux particules fines tout en soulignant le rôle respectif de chaque facteur. Le principal enjeu en termes de politiques de gestion consiste à anticiper les éventuels pénalités et bénéfices croisés. Si l'on a mis en évidence par la présente étude que les scénarios d'émission prospectifs à l'horizon 2050 conduisent sans ambiguïté à une décroissance de l'exposition à la pollution atmosphérique, sous réserve que les objectifs de réduction des émissions de polluants atmosphériques fixés légalement soient bien respectés, il existe des pénalités qui pourraient compromettre les stratégies de gestion. Le changement climatique régional constitue une pénalité pour l'ozone en contribuant à nettement augmenter les concentrations. Mais la principale pénalité qui pèse sur l'ozone est attribuée à l'évolution des concentrations de fond liées aux émissions distantes (non-Européennes). Pour les particules, notre étude suggère que le climat puisse constituer un bénéfice net en contribuant à baisser les niveaux de PM2.5 à la faveur d'une légère augmentation des précipitations en Europe (hors méditerranée).

Les résultats présentés reposent sur les scénarios prospectifs les plus récents et ils prennent en compte l'ensemble des facteurs géophysiques jouant un rôle. Cependant cette chaîne de modélisation constitue une unique réalisation alors que dans le domaine des projections climatiques les approches d'ensemble sont la règle, de façon à prendre au mieux en compte les incertitudes. On a vu par exemple que le modèle de climat utilisé ici souffrait d'un biais froid et humide, ce qui influe sur le bénéfice climatique identifié pour les particules alors que d'autres études suggèrent une pénalité. Il est essentiel d'envisager dès à présent des approches de modélisation d'ensemble et/ou

des techniques de correction de biais des modèles climatiques afin de mieux contraindre les incertitudes.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien du programme Primequal du Ministère en Charge de l'Écologie et de l'ADEME via le projet SALUT'AIR ainsi que du GIS Climat-Environnement-Société via le projet ACHIA. Les travaux de modélisation ont été effectués sur les calculateurs du Centre de Calcul Technologie et Recherche (CCRT).

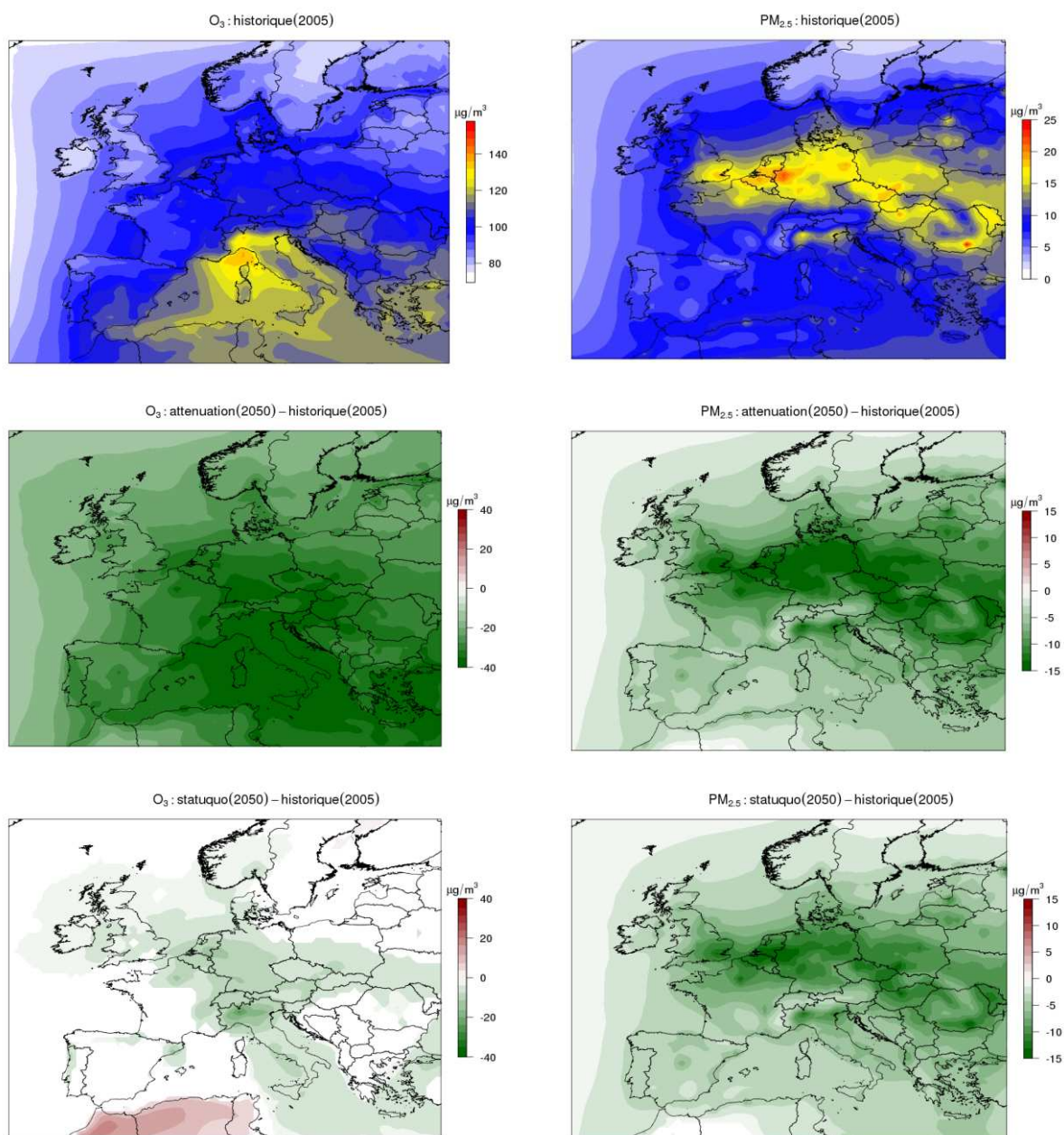


Figure 1 : Ozone (moyenne des maxima journaliers sur les trois mois d'été, à gauche) et particules (moyenne annuelle de PM_{2.5}, à droite). La première ligne décrit la situation actuelle (historique), et les suivantes la différence – par rapport à l'historique – pour deux réalisations différant par leurs politiques climatiques (atténuation et statu quo – ou *business as usual*) pour 2050 qui intègrent les impacts du climat global, du climat régional, des émissions de polluants locales, et du transport à longue distance. Ozone (left : summer mean of the daily maxima), and particulate matter (right : annual mean PM_{2.5}). The first row gives the current (historical) situation and the following the differences (with respect to the historical) for two possible futures (atténuation and business as

usual) for 2050 that take into account the combined pressure of global climate change, regional climate change, Europe-wide emission mitigation strategies, and long range transport of pollutants.

Références

- Amann, M., Bertok, I., Borcken-Kleefeld, J. *et al.*, Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications, *Environmental Modelling and Software* 26(2011), pp. 1489-1501.
- Amann, M. and Lutz, M., The revision of the air quality legislation in the European Union related to ground-level ozone, *Journal of Hazardous Materials* 78(2000), pp. 41-62.
- Butler, T.M., Stock, Z.S., Russo, M.R. *et al.*, Megacity ozone air quality under four alternative future scenarios, *Atmos. Chem. Phys.* 12(2012), pp. 4413-4428.
- Cohan, D.S. and Napelenok, S.L., Air Quality Response Modeling for Decision Support, *Atmosphere* 2(2011), pp. 407-425.
- Colette, A., Bessagnet, B., Vautard, R. *et al.*, European atmosphere in 2050, a regional air quality and climate perspective under CMIP5 scenarios, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* submitted(2013).
- Colette, A., Granier, C., Hodnebrog, O. *et al.*, Air quality trends in Europe over the past decade: a first multi-model assessment, *Atmos. Chem. Phys.* 11(2011), pp. 11657-11678.
- Colette, A., Koelemeijer, R., Mellios, G. *et al.*, Cobenefits of climate and air pollution regulations, The context of the European Commission Roadmap for moving to a low carbon economy in 2050. In: E.E. Agency, Editor, *Technical Report of the European Topic Centre on Air Quality and Climate Mitigation*, ETC/ACM - EEA, Copenhagen (2012), p. 78.
- Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S. *et al.*, Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5 *Climate Dynamics* in press.(2013).
- Fiore, A.M., Naik, V., Spracklen, D.V. *et al.*, Global air quality and climate, *Chemical Society Reviews* 41(2012), pp. 6663-6683.
- Giorgi, F., Jones, C. and Asrar, G.R., Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *WMO Bulletin* 58(2009), pp. 175-183.
- Hauglustaine, D.A., Hourdin, F., Jourdain, L. *et al.*, Interactive chemistry in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model: Description and background tropospheric chemistry evaluation, *J. Geophys. Res.* 109(2004), p. D04314.
- Hedegaard, G.B., Christensen, J.H. and Brandt, J., The relative importance of impacts from climate change vs. emissions change on air pollution levels in the 21st century, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 12(2012), pp. 24501-24530.
- Hourdin, F., Foujols, M.-A., Codron, F. *et al.*, Impact of the LMDZ atmospheric grid configuration on the climate and sensitivity of the IPSL-CM5A coupled model, *Climate Dynamics*(2012), pp. 1-26.
- IPCC, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: S. Solomon *et al.*, Editors, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. (2007).
- Lamarque, J.F., Shindell, D.T., Josse, B. *et al.*, The Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP): overview and description of models, simulations and climate diagnostics, *Geosci. Model Dev. Discuss.* 5(2012), pp. 2445-2502.
- Langner, J., Engardt, M., Baklanov, A. *et al.*, A multi-model study of impacts of climate change on surface ozone in Europe, *Atmos. Chem. Phys.* 12(2012), pp. 10423-10440.
- Manders, A.M.M., van Meijgaard, E., Mues, A.C. *et al.*, The impact of differences in large-scale circulation output from climate models on the regional modeling of ozone and PM, *Atmos. Chem. Phys.* 12(2012), pp. 9441-9458.
- Meleux, F., Solmon, F. and Giorgi, F., Increase in summer European ozone amounts due to climate change, *Atmospheric Environment* 41(2007), pp. 7577-7587.
- Menut, L., Bessagnet, B., Khvorostyanov, D. *et al.*, Regional atmospheric composition modeling with CHIMERE, *Geosci. Model Dev. Discuss.* 6(2013), pp. 203-329.

- Rao, S., Chirkov, V., Dentener, F. *et al.*, Environmental Modeling and Methods for Estimation of the Global Health Impacts of Air Pollution, *Environmental Modeling & Assessment*(2012), pp. 1-10.
- Riahi, K., Dentener, F., Gielen, D. *et al.*, Energy Pathways for Sustainable Development. In: N. Nakicenovic, Editor, *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*, IIASA, Laxenburg, Austria and Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY (2012).
- Simpson, D., Benedictow, A., Berge, H. *et al.*, The EMEP MSC-W chemical transport model - technical description, *Atmos. Chem. Phys.* 12(2012), pp. 7825-7865.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J. *et al.*, A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *Technical Note*, NCAR (2008).
- Tai, A.P.K., Mickley, L.J. and Jacob, D.J., Impact of 2000-2050 climate change on fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality inferred from a multi-model analysis of meteorological modes, *Atmos. Chem. Phys.* 12(2012), pp. 11329-11337.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J. and Meehl, G.A., An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(2012), pp. 485-498.
- van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M. *et al.*, The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change* 109(2011), pp. 5-31.