

Modèles d'atmosphère locale et qualité de l'air en région montagneuse, étude de scénarios

Jean-Pierre Chollet, Charles Chemel, Eric Chaxel & Guillaume Brulfert

Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, Université de Grenoble

BP. 53, 38041 GRENOBLE CEDEX 9

(2) et Centre for Atmospheric and Instrumentation Research, University of Hertfordshire, U.K.

(3) et GIERSA-COPARLY, 69500 Bron; (4) et AIR APS, 73000 Chambéry

jean-pierre.chollet@ujf-grenoble.fr

Résumé :

La qualité de l'air dans les régions montagneuses dépend d'une dynamique atmosphérique locale aux vallées qui interagit avec les échelles synoptiques de météorologie. La modélisation associe un calcul tri dimensionnel instationnaire de type simulation des grands échelles à des schémas de réaction chimique. Ces modèles sont évalués par comparaison de leurs résultats avec des mesures collectées sur le terrain et par la bonne reproduction de phénomènes typiques de ces régions tels que les vents de vallée et l'évolution diurne de la hauteur de couche mélangée. Les modèles sont utilisés dans le cadre de scénarios pour évaluer des impacts d'émission sur la qualité de l'air. L'imbrication de domaines de calcul permet de prendre en compte la très large gamme d'échelles de mouvement. On s'appuie sur l'étude de deux sites réels : la vallée de Chamonix encaissée entre de fortes pentes, l'agglomération grenobloise avec des émissions de pollution typique d'une ville importante.

Abstract :

Air quality in mountainous regions depends on dynamics local to valleys and interaction with synoptic scales. Large eddy simulations of flow field is combined with a set of chemical reactions. On site measurements well compare to results from the model, with features typical of complex terrain : valley wind and evolution of the convective mixing layer. These models are used to run scenarios for testing the efficiency of emission strategies. Domain nesting makes possible to take account of a wide range of motion scales. Two sites are considered here : a deep valley between steep slopes in Chamonix, a populated aread with significant pollutant emission in Grenoble.

Mots-clefs :

atmosphère ; pollution ; modélisation

1 Introduction

La qualité de l'air est un enjeu majeur de santé public. Les mesures sur sites, telles que celles assurées par les AASQA (Agences de surveillance de Qualité de l'air) apportent des informations essentielles mais ont une représentativité limitée au site observé et aux espèces chimiques mesurées. Le modèle mathématique est un outil complémentaire pour progresser dans la compréhension des processus et produire des évaluations quantitatives sur lesquelles peuvent s'appuyer les décideurs politiques. Les polluants sont émis au voisinage du sol puis transportés et diffusés mais aussi transformés dans l'atmosphère et enfin déposés au sol ou ingérés par les organismes vivants. Aucune relation simple ne peut être proposée entre quantités émises et déposées du fait de la non linéarité des phénomènes de transport par l'écoulement, de dispersion turbulente et de réaction chimique. Le problème a un caractère multi-échelle à la fois en temps et espace, l'évolution de qualité de l'air sur un site limité à quelques dizaines de km^2 sur un épisode de l'ordre de la semaine n'est indépendante ni de la météorologie régionale ni des évolutions saisonnières.

Des systèmes de modélisation de la qualité de l'air ont été proposés en particulier le système PREVAIR (Vautard *et al.* (2001)) à l'échelle de la France avec une focalisation sur la région parisienne, ainsi que dans le cadre d'ESCOMPTE (Cros *et al.* (2004)) pour la région de Marseille. Le modèle présenté ici peut être vu comme une déclinaison particulière de tel système au cas des régions de montagne. La météorologie locale aux vallées est très marquée par le relief avec la génération de vents de pente et vents de vallée ainsi que des phénomènes de blocage sous des inversions très stables.

Les modèles considérés ici sont déterministes et basés sur les équations de la dynamique des fluides et de la cinétique chimique. L'application à un cas réel impose de les compléter par des modèles représentatifs des échanges (QDM, chaleur, humidité) au sol, ainsi que des modules d'émission de polluants. Deux études sur sites réels différents sont utilisées ici : la vallée de Chamonix avec un relief très escarpé (dans le cadre du programme POVA Pollution des Vallées Alpines, en collaboration avec AIR APS) et l'agglomération grenobloise qui est le siège d'importantes émissions de type urbain (dans le cadre d'une collaboration avec ASCOPARG).

2 Dynamique de l'atmosphère et modélisation

2.1 Une dynamique multi-échelle

Pour tenir compte des interactions entre échelles tout en concentrant l'essentiel de l'effort de calcul sur un domaine limité, les champs de vitesse, température et pression sont calculés dans plusieurs domaines imbriqués $D_0 \subset D_1 \subset D_2$. Les conditions aux limites d'un domaine D_i sont données par les solutions calculées sur le domaine D_{i+1} .

Le modèle est basé sur un solveur non hydrostatique de manière à bien représenter la dynamique verticale, particulièrement importante aux échelles locales qui sont considérées ici. La modélisation est de type LES (Simulation des Grandes Echelles) avec viscosité turbulente calculée à partir d'une énergie cinétique sous maille explicitement évaluée en chaque point de calcul et à chaque instant et d'une longueur de mélange basée sur la taille de maille pondérée par une fonction dépendante de la stabilité de l'atmosphère. Plusieurs codes de calcul sont utilisés par la communauté des atmosphériciens. Basés sur les mêmes principes, ils sont cependant plus ou moins adaptés aux différentes échelles et types de terrain, ce qui a orienté les choix faits pour cette étude. Le modèle en vallée de Chamonix (Brulfert *et al.* (2005)) est basé sur le code MM5 (Grell *et al.* (1995)) pour les grilles à $\Delta x = 27 km, 9km, 3km$ et le code ARPS (Xue *et al.* (2000)) pour les grilles à $\Delta x = 1 km, 300m$. Le calcul sur l'agglomération grenobloise (Chaxel (2006)) associe le code MM5 à $\Delta x = 18 km, 6km, 3km$ au code METPHOMOD (Perego (1993)) à $\Delta x = 6 km, 2km$. Ce dernier code a la particularité d'être formulé en grille cartésienne, bien adaptée au relief de falaises autour de Grenoble.

Les résultats des modèles ont été confrontés aux mesures (vent, température, humidité) des stations sol ainsi qu'à des distributions verticales obtenues au cours de campagnes de durée limitée. On s'est attaché en particulier à vérifier (Brulfert *et al.* (2005)) la bonne représentation des phénomènes particuliers aux sites de montagne : l'établissement et le retournement bi quotidien du sens de vent de vallée en été et l'épaisseur de couche convective mélangée. Compte tenu de la focalisation de l'étude sur les épisodes de pollution et donc de beau temps, le modèle n'a pas été conçu pour prendre en compte l'eau liquide (précipitations, nuages).

2.2 Couplage dynamique - chimie

L'évolution de la chimie atmosphérique est calculée à partir d'un schéma de réactions chimiques. Il faut expliciter les concentrations d'un grand nombre d'espèces chimiques ainsi que les réactions élémentaires entre ces espèces ou groupes d'espèces. De manière à pouvoir représenter des épisodes de pollution de natures différentes, il faut typiquement considérer 77 espèces interagissant par 237 réactions. Chaque espèce chimique évolue selon une équation de transport-diffusion qui utilise les vitesses et diffusions turbulentes déterminées dans la partie dynamique du modèle et qui inclut un terme source de production-consommation calculé avec les équations de réaction.

La pollution évolue sous l'effet non seulement des émissions locales mais aussi en fonction de valeurs de fond régional, tout particulièrement pour l'ozone. Il faut donc spécifier des valeurs aux limites du domaine dans une logique d'imbrication identique à celle utilisée pour la partie dynamique. Ceci est réalisé par l'utilisation du modèle CHIMERE (Vautard *et al.* (2001)) aux pas de grille $\Delta x = 18 \text{ km}$, 6 km . La vérification s'est appuyée sur les mesures au sol d'ozone et d'oxydes d'azote (Brulfert *et al.* (2005)), en particulier pour s'assurer de la pertinence du modèle d'émission qui correspond à la condition à la limite au sol et reste une source importante d'incertitudes. Des détails sur le module de chimie utilisé à plus petite échelle et la manière dont il est couplé avec le module de dynamique sont donnés dans Brulfert *et al.* (2005) pour Chamonix et dans Chaxel (2006) pour Grenoble.

3 Mise en oeuvre, analyse et scénarios

3.1 Vallée de Chamonix

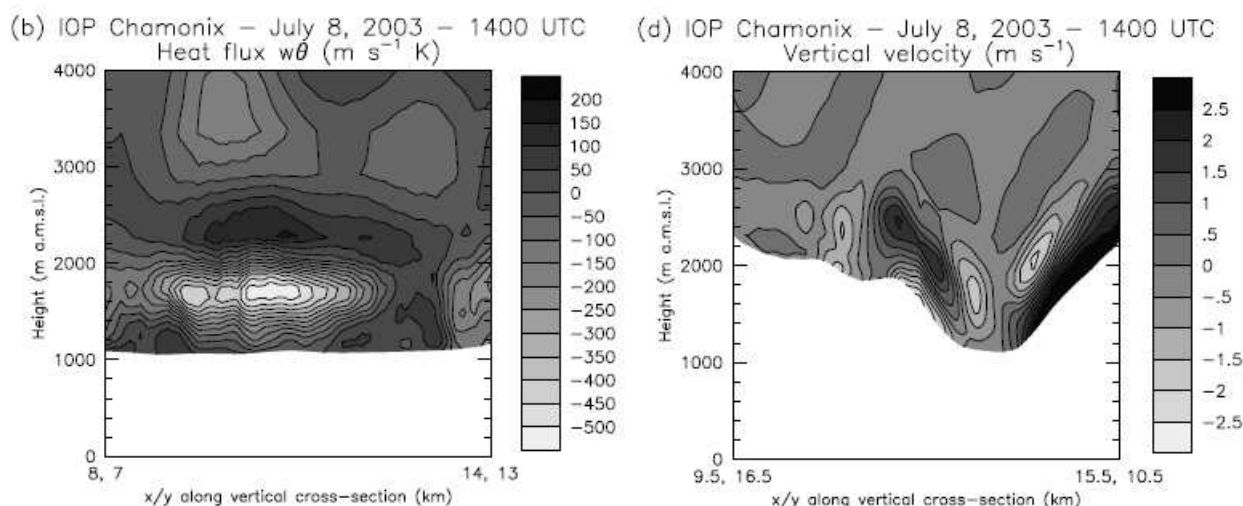


FIG. 1 – Vallée de Chamonix : flux vertical de chaleur dans une section longitudinale à la vallée (à gauche) et vitesse verticale dans une section transversale à la vallée (à droite), le 8 juillet 2003 à 14h

Comme le forçage du modèle est fait avec un ensoleillement réaliste, les différences entre été et hiver sont très marquées. En été, se développe par convection thermique une couche mélangée en général jusqu'à hauteur des reliefs dominant la vallée (figure 1), cette couche se résorbe pendant la nuit. En hiver, la stabilité de l'atmosphère crée une inversion qui bloque les échanges verticaux, et l'air froid descend la vallée en une veine très fortement stratifiée guidée par la topographie. Le caractère complètement tri dimensionnel du modèle permet d'observer et

analyser des phénomènes locaux et de les associer à des accidents de topographie, par exemple la confluence de la mer de glace dans la vallée de Chamonix qui modifie localement le système de vent (Chemel & Chollet (2006)).

L'étude réalisée en parallèle sur la vallée de la Maurienne a confirmé l'existence des mêmes phénomènes avec cependant des différences dues à des effets : (i) d'orientation avec un meilleur alignement de l'axe de la vallée sur les vents dominants et une plus faible différence d'ensoleillement entre versants, (ii) une plus grande longueur -d'un facteur 3,5- avec une surface de bassin versant amont plus importante développant plus fortement l'ascendance thermique qui agit comme moteur du fort vent de vallée des journées d'été.

3.2 L'agglomération grenobloise

La topographie de l'agglomération grenobloise est complexe, au confluent de 3 vallées, avec des reliefs très hétérogènes et irréguliers qui sélectionnent différentes échelles du mouvement. La dynamique locale développe des caractéristiques propres en fonction de la géométrie de ces vallées mais aussi de l'ensemble des 3 massifs environnants (Vercors, Chartreuse et Belledonne). D'une journée à l'autre, les champs de vent peuvent varier fortement avec des conséquences sur les espèces chimiques transportées. A titre d'exemple, la figure 2 montre la production locale d'ozone ainsi que le champ de vent au voisinage du sol pour deux journées. On constate deux régimes différents : l'un (le 5 aout) pour lequel il y a convergence des vents de nord et sud, conduisant à accumulation de l'ozone dans la partie sud de l'agglomération et son transport vertical en altitude, l'autre (le 6 aout) dans lequel le panache de la ville se développe librement vers le sud.

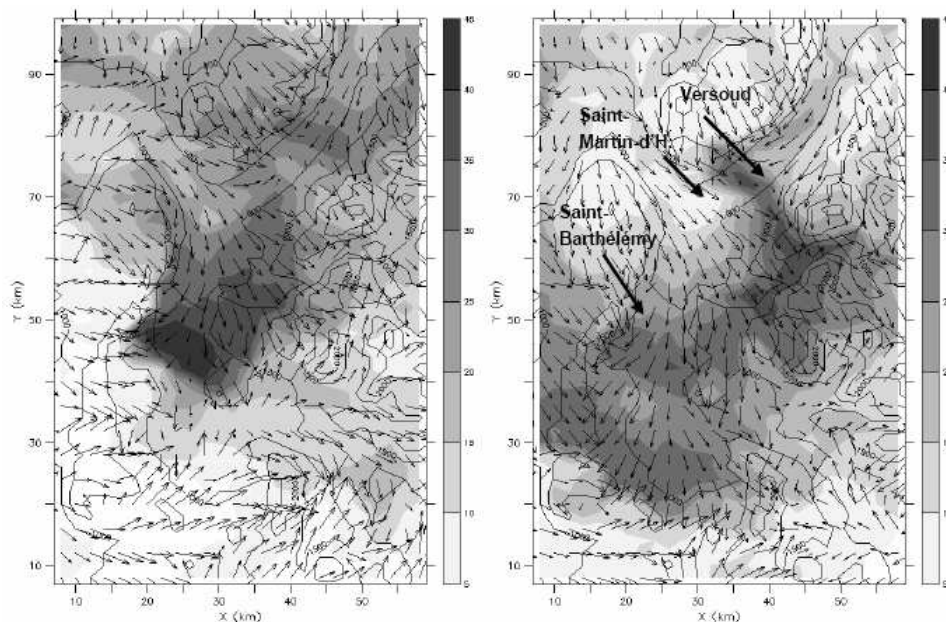


FIG. 2 – Concentration d'ozone due à la production locale pO_3 (en ppbV) et composante horizontale du champ de vent, à 15h les 5 aout (à gauche) et 6 aout (à droite)

4 Scénarios

L'utilisation du modèle ne se limite pas à la reproduction d'épisodes ayant fait l'objet de campagne de mesures. Par l'exécution de scénarios, il est possible de se projeter dans l'avenir

et par exemple d'estimer l'impact sur la qualité de l'air d'une évolution du trafic routier. Plutôt que de tenter de réaliser un scénario météorologique bien contrôlé mais arbitraire qui n'a que peu de chances de respecter les équilibres mécaniques et thermodynamiques de l'atmosphère, on utilise des épisodes réels du passé. Par contre, différents cadastres d'émission peuvent être activés en fonction de différentes hypothèses socio économiques.

Ainsi pour Chamonix, 5 types de temps ont été identifiés. L'analyse de 4 années de données a permis d'associer à chacun de ces types de temps une fréquence statistique et un épisode réel représentatif qui a fait l'objet du calcul complet de simulation du champ météorologique. Deux régimes apparaissent comme très particuliers aux vallées : le vent de vallée en été et l'inversion en hiver. Plusieurs hypothèses d'émission ont été associées à différentes politiques d'évolution du trafic routier et du chauffage domestique. Chaque scénario d'émission fait alors l'objet d'une simulation numérique d'évolution des espèces chimiques utilisant les champs de vent et température associés aux épisodes météorologiques. Une moyenne annuelle de champs de concentrations peut ensuite être reconstituée. Ces scénarios sont détaillés dans Brulfert *et al.* (2006) et permettent d'évaluer un impact annuel allant de 4% à 10% pour les NOx à la suite d'une modification du trafic routier et de 0% à 12% pour les particules PM10 après passage au gaz naturel de tous les chauffages domestiques.

La même utilisation de la simulation pour évaluer des impacts d'évolution de trafic routier a été faite sur Grenoble en appui au Plan de Protection de l'Atmosphère. Les impacts de réchauffement climatique peuvent aussi être traités, d'une part en travaillant sur des épisodes tels que la canicule 2003 qui pourraient avoir des occurrences plus fréquentes dans l'avenir, d'autre part en introduisant directement aux limites du domaine un incrément de température, de 3K en été dans Chaxel (2006).

5 Conclusions

La mécanique de l'atmosphère dans les régions de montagne est déterminante pour l'évolution de la qualité de l'air, aussi bien en été alors que dominant les mélanges convectifs qu'en hiver avec des stratifications en couches très stables. Le relief joue un rôle majeur dans cette dynamique en sélectionnant des orientations et des échelles préférentielles. La chimie troposphérique est ensuite couplée à ces modèles de dynamique pour produire des distributions en temps et espace des concentrations des différentes espèces. Le même modèle permet de traiter aussi bien une réalité réelle, épisodes passés et en particulier ceux documentés par des campagnes de mesure, qu'une réalité virtuelle, épisodes scénarisés aux horizons futurs ou prévisions qui ne sont pas considérées ici.

La modélisation permet de bien reproduire les phénomènes y compris aux échelles relativement petites des vallées et ce malgré la complexité du terrain. Les spécificités de chaque site sont bien prises en compte tant en ce qui concerne la dynamique purement locale que son interaction avec les vents synoptiques.

Les outils de modélisation disponibles dans la communauté scientifique et qui partagent un grand nombre de leurs modules avec des modèles opérationnels en prévision, sont relativement nombreux, performants, aptes à être combinés. Ils sont conçus pour fonctionner en imbrication pour prendre en compte le caractère multi échelles des écoulements géophysiques. L'intérêt porté à des échelles plus locales conduit à chercher une amélioration de la modélisation du mélange turbulent sous maille et surtout une amélioration de la représentation, à différentes échelles, des écoulements stables ; ces derniers, fréquents la nuit et/ou en hiver, posent un problème encore mal résolu de résolution verticale et de forte dépendance aux conditions initiales et aux limites.

Les incertitudes de ces modèles sont difficiles à évaluer en raison des interactions complexes entre processus et d'effets de seuil, par exemple la rupture d'un plafond d'inversion. Les causes principales d'erreur sont sans doute à chercher actuellement dans les cadastres d'émission même si, dans le souci actuel de calculer des solutions à des échelles de plus en plus petites (le quartier voire la rue dans une ville), la dynamique devient de plus en plus difficile à modéliser dans le détail en raison de l'effet de plus en plus fort de la représentation du couvert, urbain ou rural, du sol.

Références

- Brulfert, G., Chemel, C., Chaxel, E., Chollet, J.P. 2005 Modelling photochemistry in Alpine valleys. *Atmospheric Chemistry and Physics* **5** 2341-2355
- Brulfert, G., Chemel, C., Chaxel, E., Chollet, J.P., Jouve, B., Villard, H. 2006 Assessment of 2010 air quality in two Alpine valleys from modelling : weather type and emission scenarios. *Atmos. Environ.* **40** 7893-7907
- Chaxel, E. 2006 Photochimie et aérosol en région Alpine : mélange et transport *thèse de l'Université J. Fourier, Grenoble*, <http://tel.archives-ouvertes.fr/>
- Chemel, C. 2005 Transport et mélange en terrain complexe, application à la dynamique atmosphérique dans les vallées encaissées *thèse de l'Université J. Fourier, Grenoble*, <http://tel.archives-ouvertes.fr/>
- Chemel, C., Chollet, J.P. 2006 Observations of the daytime boundary layer in deep Alpine valleys. *Boundary-Layer Meteorology* **119** 239-262
- Couach, O., Balin, I., Jiménez, R., Ristori, P., Perego, S., Kirchner, F., Simeonov, V., Calpini, B., Van den Bergh, H. 2003 An investigation of ozone and planetary boundary layer dynamics over the complex topography of Grenoble combining measurements and modeling *Atmos. Chem. Phys* **3** 549-562,
- Cros, B., Durand, P., Cachier, H., Drobinski, P., Fréjafon, E., Kottmeier, C., Perros, P.E. , Peuch, V.H. , Ponche, J.L., Robin, D., Saïd, F., Toupance, G., Wortham, H. 2004 The ESCOMPTE program : an overview *Atmospheric Research* **69** 241-279.
- Grell, G. A., Dudhia, J., and Stauffer, D. R. A. 1995 Description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) *NCAR/TN-398*.
- Perego, S. 1993 Metphomod - a numerical mesoscale model for simulation of regional photo-smog in complex terrain : model description and application during Pollumet (Switzerland) *Meteorol Atmos Phys* **70** 43- 69
- Vautard, R., Beekmann, M., Roux, J., Gombert, D. 2001 Validation of a deterministic forecasting system for the ozone concentrations over the Paris area *Atmos. Environ.* **35** 2449-2461
- Xue, M., Droegemeir, K.K., Wong, V. 2000 The Advanced Regional Prediction System (ARPS) - A multi- scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I : Model dynamics and verification *Meteorol Atmos Phys* **75** 161-193.