

Photos : ALMARCAIX

Quelques moyens fixes et mobiles utilisés dans la campagne ESCOMPTE.

CONTRIBUTION DU PROGRAMME ESCOMPTE^I À L'ÉTUDE DE LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LE LUBERON

Bernard CROS* et Pierre DURAND**

RÉSUMÉ:

ESCOMPTE est une expérience d'étude de la pollution de l'air à l'échelle régionale dans un domaine de 120 km x 120 km centré sur Marseille. À partir de l'étude d'un épisode de pollution de l'air survenu en juin 2001 dans la région, on donne des éléments pour mieux comprendre ce phénomène qui intéresse parfois le Luberon.

Mots-clés:

pollution atmosphérique, ozone, ESCOMPTE.

ABSTRACT:

Contribution of the ESCOMPTE field experiment to the knowledge of the air quality in Luberon

From an air pollution event met in June 2001 during the ESCOMPTE field experiment, elements are presented to explain this phenomenon occurring in the Luberon sometimes. ESCOMPTE is an experiment to study the air pollution at a regional scale. The experimental area (120 km x 120 km) is centred to Marseilles.

Keywords:

air pollution, ozone, ESCOMPTE.

I. ESCOMPTE est l'acronyme de : Expérience sur Site pour CONtraindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Émissions.

* Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, Coordinateur du programme ESCOMPTE.

** Directeur de recherche au CNRS, Centre national de recherches météorologiques, Coordinateur du programme ESCOMPTE.

Dans la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur trois associations (AIRFOBP, AIRMARAIX et QUALITAIR), regroupées au sein de la coordination régionale Air-Alpes-Méditerranée, effectuent la surveillance de la qualité de l'air. Elles donnent chaque jour une indication en déterminant la valeur de l'indice ATMO qui évolue entre 1 (excellent) et 10 (très mauvais). Cet indice ne tient compte que des polluants majeurs : dioxyde de soufre, oxydes d'azote, particules et ozone et ne s'applique qu'aux zones couvertes par les réseaux de mesures donc, en règle générale, qu'aux agglomérations.

La pollution atmosphérique est un phénomène d'une grande complexité en raison de la diversité des processus qui entrent en jeu. Elle dépend de trois facteurs principaux : les émissions de polluants primaires, leur transport et leur évolution physico-chimique à des échelles cohérentes de temps et d'espace. Son étude dans un lieu donné nécessite la connaissance approfondie des caractéristiques d'émissions naturelles et anthropiques, de la topographie de toute la zone d'influence et des conditions météorologiques locales et synoptiques.

Une seule station fonctionne dans le massif du Luberon, elle mesure en continue les concentrations d'ozone au Mourre Nègre (Mathiot & Léopold, 2000). Les indications obtenues sont précieuses mais encore insuffisantes pour comprendre les évolutions et surtout les fortes concentrations que ce polluant secondaire peut atteindre sur ce territoire. Les stations urbaines d'Apt et Manosque sont trop récentes pour fournir des résultats exploitables dans cette optique. Le programme ESCOMPTE dont le domaine d'étude centré sur Fos-Berre-Marseille couvre le massif du Luberon peut aider à la compréhension de ces évolutions et plus généralement de la pollution de l'air dans la région.

LE PROGRAMME ESCOMPTE

Il vise à étudier les processus dynamiques et chimiques qui conduisent aux niveaux de pollution photochimique observés à l'échelle régionale.

Il s'appuie sur trois éléments majeurs :

- un cadastre d'émissions détaillé recensant les principales espèces minoritaires, d'origine naturelle et anthropique, susceptibles d'intervenir dans les cycles de

réaction relevant de la pollution photochimique ;

- une base de données, construite à partir d'une campagne de terrain, et contenant la documentation aussi complète que possible des champs dynamiques et chimiques observés à l'échelle régionale lors de quelques épisodes de pollution photochimique ;

- plusieurs modèles de transport et/ou de chimie fonctionnant à différentes échelles et résolutions, capables, une fois qualifiés sur le jeu de données constitué, d'expliquer les mécanismes mis en jeu. Les processus impliqués dans ces problèmes de pollution sont hautement non-linéaires et la modélisation couplée chimie-transport (CTM) est une étape indispensable dans la compréhension des relations de cause à effet.

Cette stratégie vise à terme à rendre opérationnels des outils de prévision à l'échelle supra-urbaine et régionale.

ESCOMPTE a choisi de faire porter son effort sur la pollution photochimique liée aux émissions anthropiques d'oxydes d'azote (NOx) et de composés organiques volatils (COV) mais aussi de prendre en compte des mécanismes qui intègrent photo-oxydants et particules ainsi que les interactions entre émissions anthropiques et biogènes (Durand *et al.*, 2002).

La région et la période choisies pour cet exercice (zone de 120 km de côté centrée sur Berre-Marseille pendant l'été) sont le siège de mécanismes dynamiques complexes. Ces mécanismes sont liés

- aux situations météorologiques qui prévalent lors des épisodes de pollution photochimique : régime anticyclonique avec vents faibles ou nuls,

- à la géographie de la zone (transition terre-mer sur une côte tortueuse qui donne lieu à des cycles complexes de brise et de canalisation par les reliefs des circulations de petites échelles) ;

- à l'hétérogénéité des surfaces (zone urbaine de Marseille, étang de Berre, diversité des couverts naturels ou anthropisés) qui impose une variabilité spatiale du bilan d'énergie de surface, et donc de la couche limite² qui en résulte ;

- à l'hétérogénéité de plus grande échelle (Alpes, vallée du Rhône, Méditerranée...) qui crée des forçages d'échelle supérieure.

LA CAMPAGNE DE TERRAIN

Cette campagne s'est déroulée entre le 5 juin et le 13 juillet 2001

Pour répondre aux objectifs du programme un important dispositif expérimental a été mis en place

Dispositif expérimental

Quarante sites ont été nécessaires au déploiement de l'instrumentation d'ESCOMPTE. Ce dispositif est venu en complément des stations opérationnelles des réseaux d'observation de Météo-France et des associations de surveillance de la qualité de l'air. Un poste important de l'instrumentation était constitué par la flotte aérienne : 4 avions et un ULM basés à l'aéroport d'Avignon, un autre à Nîmes. Vingt instruments de télédétection active (profilage de vent et d'ozone par lidars, sodars et radars) et trois radiosondages mobiles ont assuré une continuité temporelle des mesures en altitude. Ils ont documenté la masse d'air en vent et ozone le long des trajectoires les plus probables des panaches issus des zones-source (Marseille, Fos-Berre). Ces panaches ont été suivis par des ballons plafonnants qui ont volé dans la couche limite où évolue la plus grande partie des polluants. Enfin des mesures en mer ont été effectuées à bord du Thetis II de l'Institut des sciences de l'univers (INSUE) et du ferry Napoléon Bonaparte de la SNCM (Société nationale Corse-Méditerranée).

L'ensemble du matériel aéroporté et de télédétection ne fonctionnait que pendant les épisodes de pollution (périodes d'observations intensives : POI) tandis que les stations au sol couvraient en continu toute la campagne. Le dispositif d'alerte et de déclenchement des POI bénéficiait de l'aide de deux types de modèles de prévision utilisés en mode opérationnel, d'une part la batterie de modèles météorologiques ; d'autre part, des modèles de la qualité de l'air : modèles globaux CHIMERE de l'Institut Pierre Simon Laplace et MOCAGE de Météo-France et modèle statistique des associations locales de surveillance de la qualité de l'air.

La pollution photochimique dans la zone ESCOMPTE et le Luberon

Il existe actuellement un large consensus pour penser que le problème des niveaux élevés d'ozone ne peut se traiter sans connaître les contributions respectives du local et du régional. De nombreuses études (Pont & Fontan, 2000) et des simulations réalisées à l'échelle régionale confirment l'importance de la contribution de grande échelle sur les concentrations observées à l'échelle locale ; en particulier pour l'ozone qui dépend d'espèces-réservoir susceptibles d'être transportées sur de longues distances. C'est ainsi que, pour la région qui nous occupe, il y a une bonne corrélation entre les maxima journaliers d'ozone obtenus sur différents sites ruraux distants de plus de 300 km répartis dans une zone allant du Puy-de-Dôme à Marseille (fig. 1). Ceci montre bien que les fortes teneurs en ozone mesurées par exemple au Mourre Nègre ne sont pas simplement liées à des phénomènes locaux mais également influencées par des phénomènes d'échelle plus grande qui, en quelque sorte, déterminent le bruit de fond de la pollution photochimique dans la région.

Quatre épisodes de pollution ont été documentés pendant ESCOMPTE, chacun d'eux correspond à des conditions météorologiques différentes. Cependant, nos références se limiteront à l'épisode de forte pollution du 21 au 26 juin 2001 qui a touché le Luberon. Cet épisode est représentatif du phénomène dans la région.

Contexte météorologique (fig. 2)

C'est un scénario classique piloté à grande échelle par la position d'une dorsale d'altitude orientée Nord-Sud, qui prolonge une zone anticyclonique située au nord de l'Afrique et au Sud de l'Europe.

Cette dorsale, au fil des jours, se décale progressivement vers l'est. Lorsque son axe est situé sur la partie ouest de la France on observe sur le domaine ESCOMPTE un flux Nord-Ouest, faisant parfois

2. La couche limite ou couche limite atmosphérique (CLA) est la partie la plus basse de l'atmosphère dans laquelle nous évoluons. Cette couche d'épaisseur variable (1000 à 2000 m la journée au dessus du continent) est la plus directement affectée par la pollution ; elle est surmontée par l'atmosphère libre, beaucoup moins influencée par les phénomènes locaux. Ces deux domaines sont généralement séparés par une inversion de températures, zone où la température décroît avec l'altitude, qui limite leurs échanges.

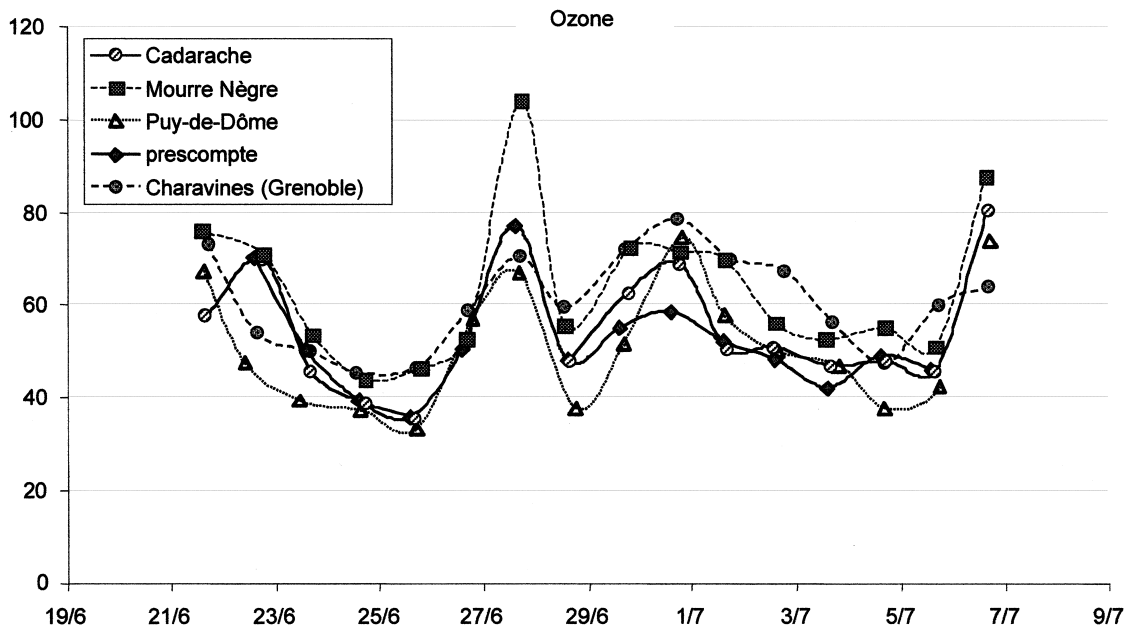


Fig. 1 : évolution des maxima journaliers d'ozone mesurés sur différents sites ruraux répartis dans une zone géographique allant du Puy de Dôme à Marseille (sources AIRFOBEP, AIRMARAI, AMPAC et ASCOPARG³). Ils sont calculés en faisant la moyenne des concentrations entre 12 h et 15 h. Ces maxima journaliers sont normalement représentatifs des concentrations en ozone dans la couche limite atmosphérique.

suite à un épisode de Mistral qui va en s'atténuant. C'est ce qui a été observé du 21 au 23 juin. Les vents près de la surface sont faibles la nuit, de secteur nord, ils se renforcent et virent progressivement dans la journée sous l'influence de la brise qui tente de se développer, pour donner l'après-midi un écoulement d'ouest sur le domaine. Le 24 juin, la dorsale est axée du Maghreb à la mer du Nord. Il s'établit peu à peu sur toute la région et jusqu'au 26 juin des conditions anticycloniques favorables au régime de brise.

Ces deux conditions, l'une de grande échelle (anticyclone), l'autre locale (régime de brise), favorisent chimiquement (fort ensoleillement et température élevée) et dynamiquement (vent synoptique faible et transport des panaches par la brise de mer) la pollution photochimique sur la région.

Transport des polluants

Dans la mesure où les émissions, industrielles et urbaines, sont principalement localisées dans des zones proches de la côte, la circulation de brise de mer joue un rôle majeur dans le transport et la redistribution de ces émissions et indirectement sur la dilution des polluants en limitant la hauteur de la couche limite. La direction de la brise est liée à l'orientation de la côte et aux effets orographiques.

On peut distinguer trois cas de régime de brise : deux sont des brises composées, l'une avec un flux synoptique nord - nord-ouest (résidus de Mistral) donnant naissance à un flux longeant la côte, l'autre avec un flux de sud qui renforce la brise pure et qui est dirigée principalement vers la vallée du Rhône ; le troisième, correspond à des vents synoptiques nuls, c'est un régime de brise pure. Lorsque ces masses d'air s'enfoncent à l'intérieur des terres, elles sont soumises aux

3. Ces deux derniers organismes sont les Associations agréées de suivi de la qualité de l'air, respectivement de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) et de Grenoble (Isère).

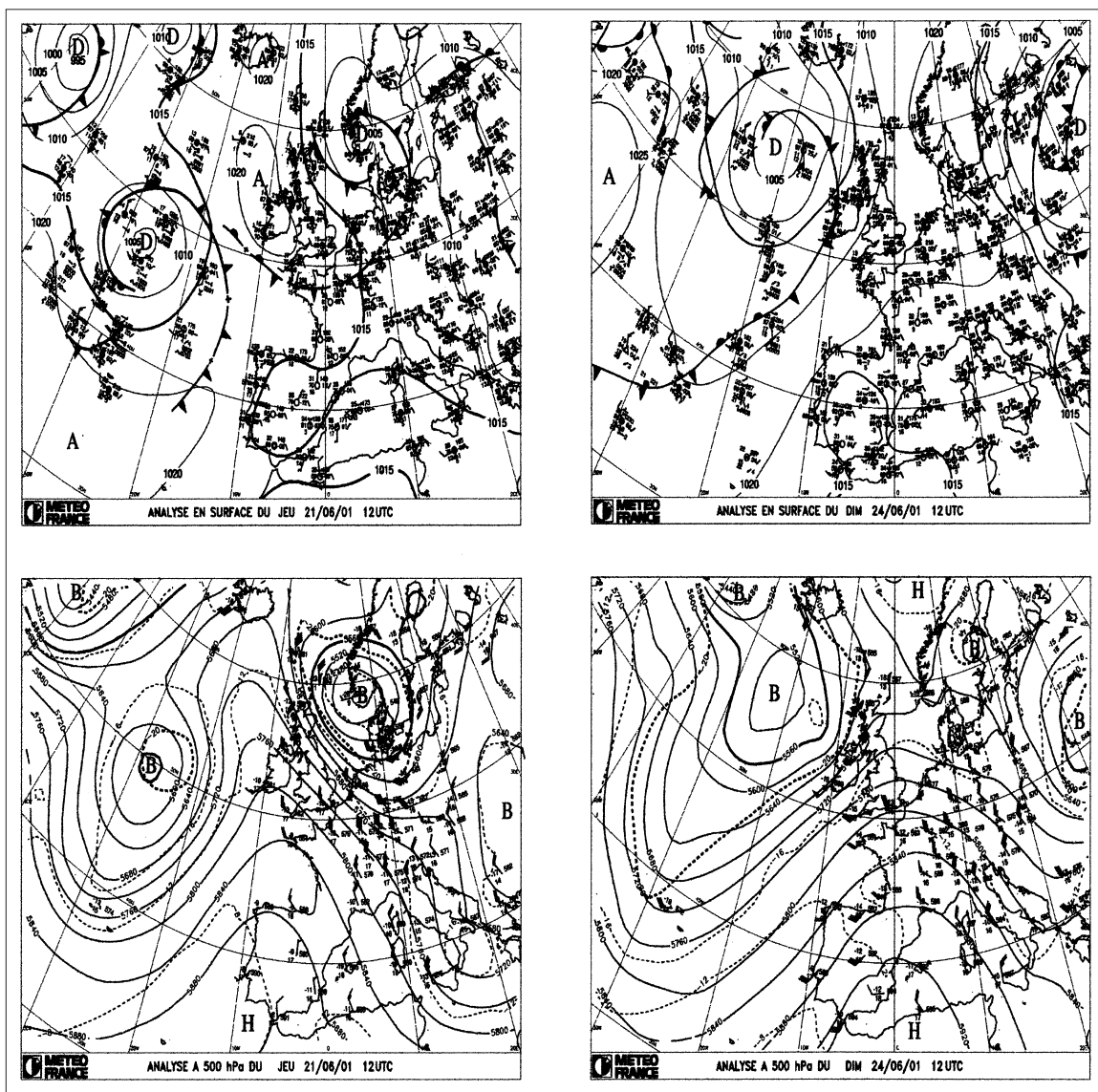


Fig. 2: carte météorologique en surface et en altitude (500 hPa) de l'Atlantique Nord et de l'Europe les 21 et 24 juin 2001 à 12.00h TU.

effets orographiques: canalisation par les vallées (Huveaune, Durance, Rhône...), contournement ou franchissement des reliefs (Sainte-Baume, Sainte-Victoire, Luberon...)

Effets orographiques

La figure 3 met en évidence des effets orographiques notamment l'existence d'un flux qui se partage entre la vallée du Rhône et celle de la Durance en raison des reliefs qu'il rencontre.

On voit également que les flux d'air dans ces deux vallées voisines sont de directions opposées. Ceci peut

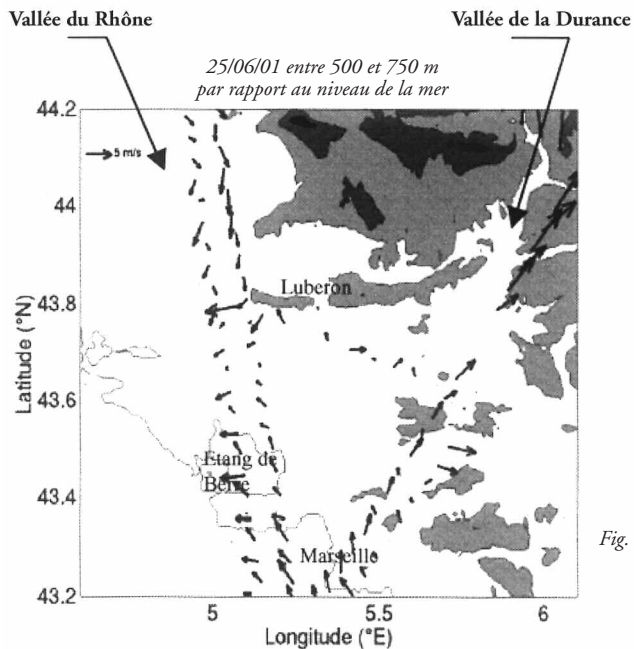


Fig. 3: champ de vent horizontal entre 500 et 750 m au-dessus de la mer obtenu le 25 juin 2001 à partir des mesures du lidar WIND embarqué à bord du Falcon 20. (BASTIN et al, 2001).

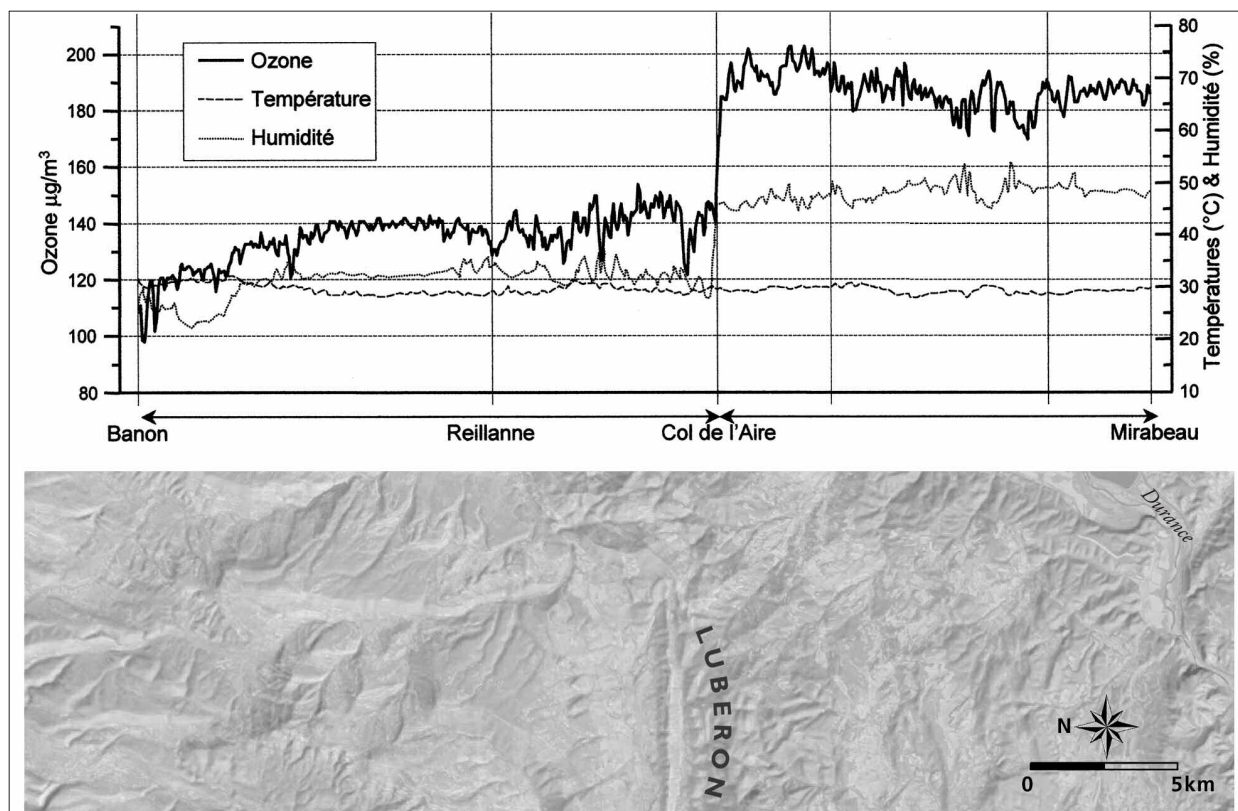


Fig. 4: coupe nord-sud entre Banon et Mirabeau des concentrations d'ozone en surface le 24 juin dans un flux de sud-ouest.

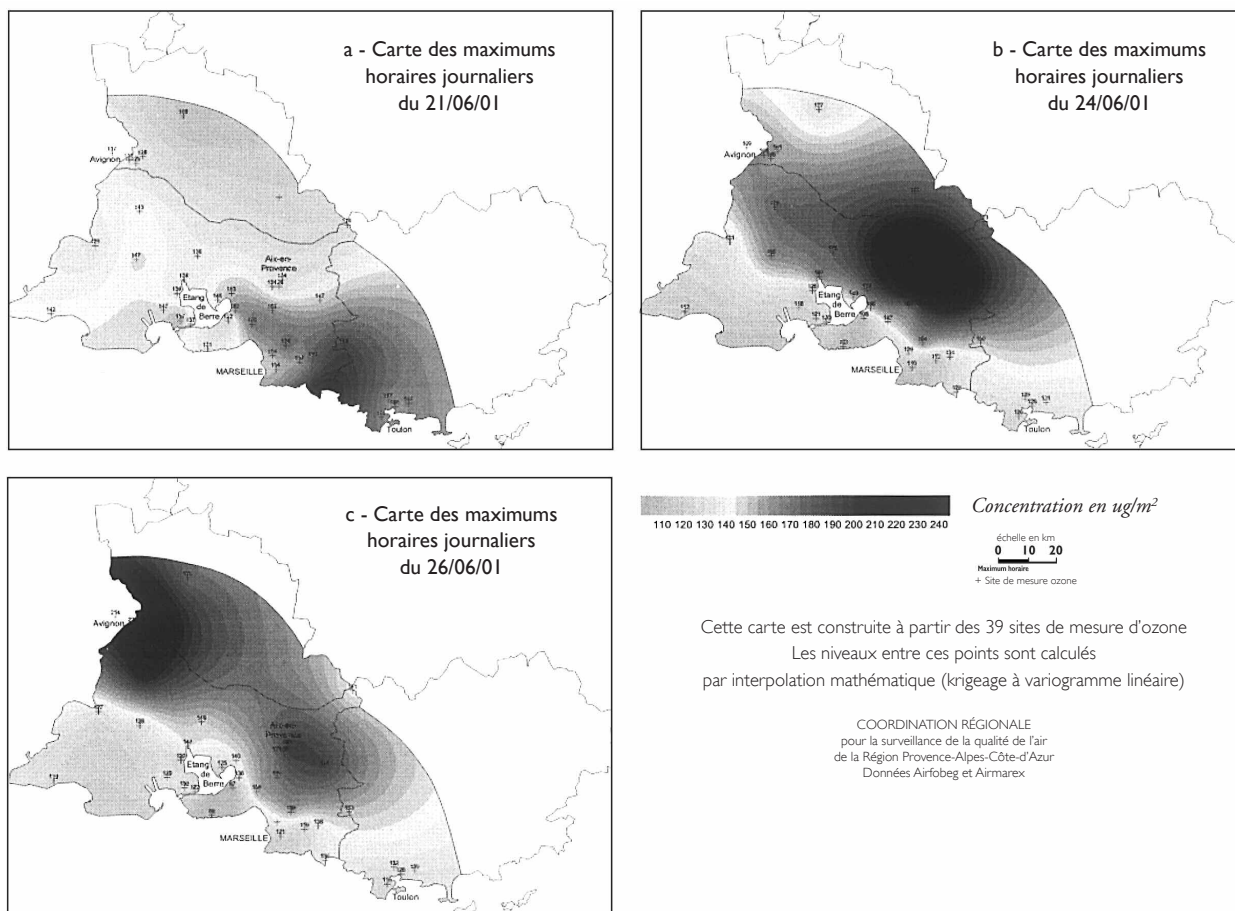


Fig. 5: Champs d'ozone en surface les 21(a), 24 (b) et 26 (c) juin 2001 obtenus par interpolation mathématique des données des stations AIRFOBEP et AIRMARAIX.

s'expliquer par la présence d'un vent synoptique nord nord-ouest et la vallée du Rhône est assez large pour canaliser ce flux et s'opposer à l'extension de la brise de mer qui remonte assez loin dans la vallée de la Durance et propage les panaches pollués issus de l'agglomération de Marseille. Ceci peut expliquer que certains jours comme ce 25 juin 2001 la partie est du Luberon présente des concentrations en ozone beaucoup plus élevées que la partie ouest.

La variation brutale des concentrations d'ozone en surface le 24 juin au matin sur un axe nord-sud (fig. 4) illustre le blocage par le relief du Luberon du panache pollué et sa canalisation dans la vallée de la Durance.

L'ozone en surface

Les trois cartes de la figure 5 illustrent l'évolution de l'ozone en surface pendant l'épisode. Elles représentent le champ en surface des valeurs maximales obtenues à partir des relevés des stations de mesure interpolés par un modèle.

Les polluants et précurseurs émis le 21 juin de la zone industrielle de l'Étang de Berre et de l'agglomération de Marseille sont entraînés le long de la côte par une brise composée de secteur Ouest. Les niveaux d'ozone les plus élevés sont enregistrés sur le Sud des Bouches-du-Rhône et à l'ouest des côtes varoises. Le

panache pollué n'atteint pas le Luberon ni la vallée de la Durance. On enregistre 190 mg/m³ d'ozone à Plan d'Aups et seulement 100 au Mourre Nègre. Des mesures en mer au large de Toulon confirment l'extension du panache vers l'est.

Le 24 juin par brise pure de secteur Sud à Marseille et Sud-Ouest au nord de l'Etang de Berre font converger les panaches des deux zones sources vers le pays aixois et la vallée de la Durance. Les niveaux d'ozone les plus élevés sont relevés dans la région d'Aix (max. horaire: 256 mg/m³). Les niveaux de SO₂ (marqueur de la zone industrielle) sont également élevés ce jour-là (160 mg/m³). Le niveau d'ozone au Mourre Nègre est alors de 180 mg/m³ en fin d'après-midi.

Le 26 juin les deux panaches de Marseille et de Fos-Berre sont dissociés et polluent respectivement la vallée du Rhône et la région d'Aix où le seuil d'information de 180 mg/m³ est dépassé. Le Luberon est surtout touché à l'ouest, au sommet on enregistre plus de 200 mg/m³ de minuit à six heures du matin et après 16 heures.

La teneur en ozone pendant cette période a été mesurée au Mourre Nègre (fig. 6). Ses variations confortent l'analyse de surface. Le panache pollué n'atteint le sommet du Luberon que le 24 juin dans l'après-midi alors que l'épisode de pollution a démarré le 21 juin dans la région de Marseille et sur la côte. Le 17 souffle un vent de secteur nord (Mistral) avec des teneurs en ozone relativement faibles correspondant au bruit de fond régional.

Mesures en altitude

Pendant toute la campagne l'espace aérien a été documenté par des mesures aéroportées (avions et ballons) et des mesures par télédétection (lidars, radars, radiosondages). Ces mesures ont permis d'estimer le rôle du relief, les entrées (ou sorties) de polluants notamment par les couches atmosphériques supérieures, ainsi que les évolutions chimiques et dynamiques des panaches.

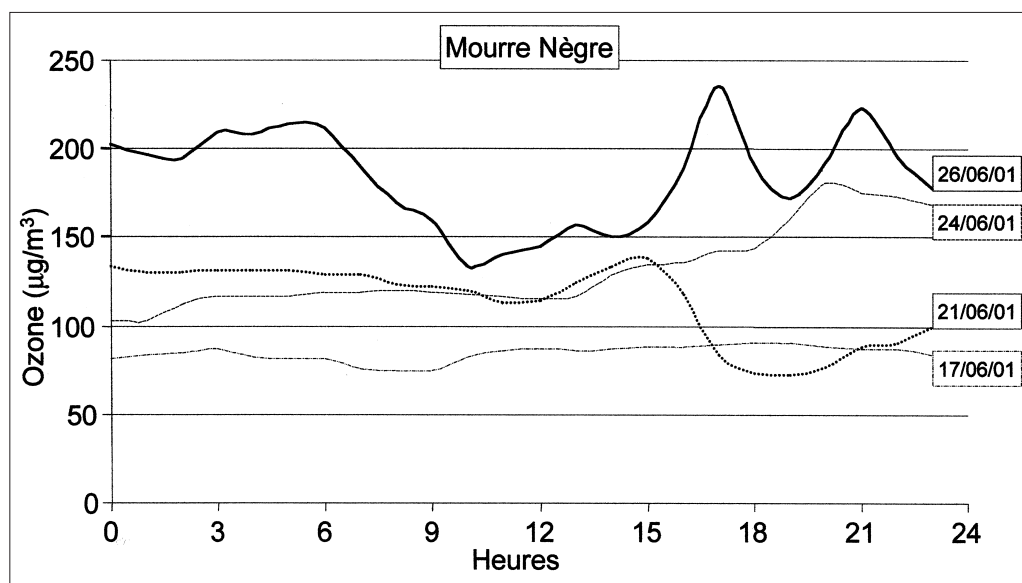


Fig. 6: évolution des concentrations d'ozone en mg/m³ au sommet du Luberon (Mourre Nègre) les 17, 21, 24 et 26 juin 2001. (source AIRFOBEP).

Rôle du relief

Les petits massifs montagneux de la région (Alpilles, Luberon, Sainte-Baume, Sainte-Victoire, etc.) se comportent comme des barrières Est Ouest aux écoulements de Nord ou aux mécanismes de brise de Sud. Bien que les conditions expérimentales (pollution photochimique) correspondent plutôt à des vents faibles, les perturbations orographiques restent très perceptibles.

Un relief comme le Luberon est susceptible de générer des mécanismes dynamiques assurant un couplage fort entre la couche limite et la troposphère libre, avec des conséquences évidentes sur les bilans de masse. Ils entraînent :

- des perturbations permanentes des champs thermodynamiques au voisinage des reliefs ;
- des mécanismes se propageant dans la basse troposphère libre et capables d'augmenter les échanges avec la couche limite ;
- l'accroissement du mélange dans la couche limite par l'intermédiaire de sillages et de déferlements.

C'est ainsi que lorsque la couche qui surmonte la couche limite est moins chargée en ozone (du fait par exemple d'une rentrée d'air maritime) ou plus chargée (apport lointain) l'action dynamique du relief peut participer à la diminution ou à l'augmentation des concentrations en ozone dans les plus basses couches de l'atmosphère au voisinage des reliefs.

Chimie des panaches

Les vitesses de production d'ozone que l'on a calculées lors de ces épisodes de pollution sont élevées. Sur l'ensemble du domaine ESCOMPTE, elles sont généralement supérieures à 10 ppb/h (20 mg/m³/h) et peuvent atteindre 50 ppb/h (100 mg/m³/h). L'étude de la variation de la vitesse de production d'ozone en fonction de la concentration des NO_x permet de déterminer le régime chimique de production d'ozone. Pour la période la plus intense de l'épisode étudié (24 au 26 juin) la production d'ozone est contrôlée par les oxydes d'azote.

D'autre part l'efficacité de production d'ozone c'est-à-dire le nombre de molécules d'ozone produites dans le panache par molécule de NO est différent selon l'origine du panache. Pour une même quantité de NO émis, le panache urbain (Marseille) produit près de

deux fois plus d'ozone que le panache industriel de Fos-Berre.

On a estimé que pour l'ensemble du domaine touché par cet épisode de pollution les sources locales contribuent pour près de 60 % à la teneur en ozone.

Interaction biogénique-anthropique

Pour la période expérimentale choisie, les émissions d'hydrocarbures naturels, comme les émissions de NO_x associées aux apports de fertilisants, peuvent être significatives. Les mesures effectuées sur différents couverts végétaux naturels (forêts de chênes, de pins, garrigues...) et systèmes agricoles perturbés sont en cours d'analyse ; elles vont permettre d'évaluer ces émissions susceptibles de participer à la formation de l'ozone et ainsi d'estimer la part du naturel et de l'anthropique dans cette formation.

CONCLUSION

La campagne de mesure associée au cadastre des émissions sur la zone ESCOMPTE va produire une base de données qui sera accessible à partir de juin 2003. Ces données vont permettre de valider et d'améliorer les modèles prédictifs de chimie et de transport à l'échelle régionale. Ces modèles sont des outils indispensables pour évaluer l'efficacité des politiques de réduction des émissions polluantes (études de scénarios) ainsi que pour développer un système opérationnel de surveillance et de prévision de la qualité de l'air.

BIBLIOGRAPHIE

BASTIN S., DROBINSKI P., BENECH B., BOCK O., CACCIA J.-L., CAMPISTRON B., DABAS A., DELVILLE P., DELBARRE H., DURAND P., FREJAFON E., GUENARD V., REITBUCH O. & WERNER C., 2002, Preliminary analysis of IOP2b sea breeze case by ground-based remote sensors and the airborne Doppler Lidar WIND, 4^e atelier ESCOMPTE, Marseille, 18-19 au 19 mars 2002.

DURAND P., CROS B., CACCIA J.-L., DROBINSKI P., GODETY., KOTTMEIER C., LAVERDET G., LOHOU F., MASCLET P., PONCHE J.-L. & WORTHAM H., 2002, The ESCOMPTE program: an overview, 7th Scientific conference of the IGAC, 18-25 September 2002, Heraklion, Greece.

MATHIOT S. & LÉOPOLD A., 2000, La surveillance de la pollution photochimique par l'ozone dans le Luberon, *Courrier scientifique du Parc naturel régional du Luberon*, N° 4, pp. 147-150.

PONT V. & FONTAN J., 2000, Local and regional contributions to photochemical atmospheric pollution in southern France, *Atmospheric Environment*, N° 34, pp. 5209-5223.