

# Ozone et flux d'air dans l'arrière-pays niçois : mesures et modélisation à fine échelle spatiale durant un épisode estival (le 10 août 2006)

## Ozone and airflow in the Nice countryside: measurements and modelling at fine spatial scale during a summer episode (August 10th, 2006)

Pierre CARREGA\*, Nicolas MARTIN\*, Christophe YOHA\*

### Résumé

La pollution par l'ozone constitue un double enjeu environnemental qui préoccupe de plus en plus les sociétés. Il intègre la sphère du réchauffement climatique puisque ce polluant est un gaz à effet de serre, et par ailleurs il constitue un danger pour la santé. Or, le département des Alpes-Maritimes réunit tous les facteurs favorables à l'expression de la pollution photochimique : les émissions de polluants primaires par la circulation routière et par les forêts produisent des quantités d'ozone non négligeables sous un puissant rayonnement ultraviolet d'avril à septembre. La configuration topographique conjuguée à un climat méditerranéen ne permet pas un brassage suffisant de l'air pour diluer correctement cette pollution atmosphérique. Ce polluant connaît une forte variabilité temporelle mais également spatiale qui est insuffisamment appréhendée par le réseau de surveillance de la qualité de l'air d'Atmo PACA. Cet aspect mérite d'être approfondi par des mesures itinérantes d'ozone afin de mieux quantifier l'exposition de chacun, en particulier dans la partie nord des Alpes-Maritimes où la densité des stations de mesures est faible. Quelle est l'origine spatiale de l'ozone observé dans cette zone transfrontalière ? D'où proviennent les masses d'air polluées : de France ou d'Italie ? Pour y répondre des mesures d'écoulements d'air et des modélisations météorologiques, à l'aide du modèle RAMS, sont menées précisément dans le secteur de rencontre des brises montant de chaque côté de la chaîne frontalière.

### Mots clés

Mesures fixes et itinérantes. Variabilité spatiale à fine échelle. Modélisations météorologiques.

### Abstract

The ozone pollution constitutes a double environmental problem which worries more and more societies. It concerns the global warming as this pollutant is a greenhouse gas, and besides it constitutes a danger for health. The department of the Alpes-Maritimes (South-East of France) combines all the favourable factors for photochemical pollution : the primary pollutant emissions by the road traffic and by the forests produce important quantities of ozone under a powerful ultraviolet radiation from April till September. The topographic configuration conjugated to a Mediterranean climate does not allow a sufficient admixture to dilute correctly this atmospheric pollution. This pollutant knows a strong temporal but also spatial variability which is partially described by the Atmo PACA air quality network. This aspect deserves to be deepened by itinerant ozone measurements to quantify better the exposure of each others, especially in the north part of the Alpes-Maritimes where the density of the measurements stations is very weak. What is the spatial origin of the ozone observed in this cross-border zone? Where from result the polluted air masses: France or Italy? Measures of air flows and meteorological modelling (RAMS) are led to answer this question, particularly where the breezes from Italy and France are converging, on the boundary range.

### Keywords

Fixed and itinerant measurements. Spatial variability with fine scale. Meteorological modelling.

\* Université de Nice-Sophia Antipolis – UMR 6012 – Espace du CNRS – équipe Gestion et Valorisation de l'Environnement – 98, boulevard E. Herriot – BP 3209 – 06204 Nice Cedex 3.  
[carrega@unice.fr](mailto:carrega@unice.fr) – [nicolas.martin@unice.fr](mailto:nicolas.martin@unice.fr) – [christophe.yohia@wanadoo.fr](mailto:christophe.yohia@wanadoo.fr)

## Introduction

L'importance croissante de l'ozone ne cesse d'être reconnue, aussi bien pour ses conséquences sur les plantes et sur la santé humaine [1], que pour son implication dans de complexes processus photochimiques, en particulier dans les régions à été chaud.

L'augmentation du niveau de fond de la concentration est quasiment continue [2, 3, 4], ce qui se constate au premier chef dans les valeurs relevées par les analyseurs des réseaux de surveillance, avec, pour corollaire probable, une élévation des valeurs moyennes.

Les montagnes méditerranéennes, et en particulier le sud-est de la France, sont concernées par ce problème, d'autant plus qu'elles sont bordées de grandes agglomérations en plaine ou en bord de mer, dont l'activité génère des polluants primaires (NO<sub>x</sub>, COVs) en conditions climatiques favorables puisque l'été y est chaud, sec, et ensoleillé, facteurs favorables à la production d'ozone. Ainsi, les Alpes du Sud françaises sont entourées par de grandes agglomérations parfois industrialisées : à l'est par Turin ; au sud-est par Gênes et Savone ; au sud, par les agglomérations azuréennes (conurbation niçoise) et marseillaise, ainsi que par les industries du pourtour de l'étang de Berre.

Toutes ces régions sont régulièrement affectées au cours de la saison photochimique, d'avril à septembre, par de fortes concentrations d'ozone troposphérique.

La détection fréquente par le réseau d'Atmo PACA de concentrations d'O<sub>3</sub> souvent élevées en montagne (52 dépassements du seuil d'information de 180 µg/m<sup>3</sup> à l'Adréchas-La Colmiane, station rurale, contre 28 dépassements à Nice Botanique, station périurbaine, entre 2001 et 2005 – Fig. 1), ainsi que les dégâts avérés sur la forêt subalpine [5], nous ont motivés pour une campagne de mesures à échelle spatiale fine dans la région d'Isola 2000, au nord de Nice (Fig. 1), avec deux objectifs majeurs :

- D'une part, étudier la variabilité spatiale de l'ozone en relief complexe, c'est-à-dire vérifier si, au même moment, les concentrations de l'ozone sont plutôt uniformes ou si, au contraire, ces concentrations sont disparates sur une surface donnée, et s'intéresser de près aux éventuels contrastes locaux. Par exemple, la station de mesures du Cians (station rurale – fig. 1) n'a enregistré que 23 dépassements du seuil d'information entre 2001 et 2005 contre 52 pour la station de l'Adréchas.
- D'autre part, essayer de déterminer la provenance de ce polluant qui est peut-être pour partie, produit sur place à partir des COV biogéniques émis par les conifères (pins sylvestres, pins cembro, et mélèzes) dans les étages végétaux montagnard et subalpin. Mais l'ozone et ses précurseurs sont probablement advectés pour l'essentiel par les brises thermiques

d'aval remontant les vallées pendant la journée, après avoir survolé les grandes agglomérations, à plusieurs dizaines de kilomètres en aval.

Or, lorsque l'on se situe près d'une crête frontière, il est clair que, selon le flux dominant, la provenance bascule facilement, et il sera tentant d'attribuer une origine italienne, padane (surtout Turinoise), à des concentrations associées à un flux provenant du secteur nord à est, ou une origine azurée à un flux remontant les vallées françaises (de sud à nord-ouest, selon la topographie). Notre préoccupation n'est évidemment pas de déterminer des responsabilités politiques, mais de vérifier scientifiquement par la mesure la provenance des écoulements d'air pollué, et de s'assurer qu'une modélisation météorologique méso-échelle habituellement utilisée pour la prévision est effectivement capable de produire une information fiable et détaillée dans les parages d'une ligne majeure de crêtes élevées (plus de 2 500 m d'altitude), lieu privilégié pour la convergence des brises thermiques provenant de l'aval, en journée. Précisons que les modèles de dispersion ne sont pas envisagés dans ces lignes.

Nous avons donc choisi une journée, le 10 août 2006, en cours d'après-midi, durant laquelle il a été simultanément procédé à des mesures itinérantes (véhicule en déplacement) et fixes des concentrations en ozone dans l'arrière-pays niçois (région d'Isola 2000 en particulier), et à des mesures d'écoulement de l'air en altitude dans la même région frontalière, à l'aide de ballons à niveau de pression constant. Ce surcroît de mesures fines doit être à la fois considéré comme un complément de celles existant de manière institutionnelle (par le réseau), et aussi comme une approche de l'hétérogénéité de la distribution spatiale de l'ozone. Enfin, dans le même esprit, nous avons modélisé *a posteriori* la situation météorologique locale à l'aide d'un modèle méso-échelle connu et performant, RAMS, pour tenter de reconstituer le champ de vent, de vérifier le bon accord modèle/mesures et de s'assurer que les sorties de modèle ne sont pas trop différentes de celles retenues par le modèle MM5 de la plate-forme AIREM-Méditerranée.

## 1. Les Alpes-Maritimes : un laboratoire d'étude de la pollution de l'air accidenté

Les teneurs parfois élevées en ozone constatées dans les montagnes niçoises sont liées à des conditions météorologiques anticycloniques, propices à l'apparition, à la survie, et au déplacement de ce polluant au sein de ce territoire à la topographie très variée. Cette configuration induit un régime de vent qui ne permet pas de diluer correctement les polluants atmosphériques. En effet les brises thermiques sont caractérisées par des écoulements globalement lents, et à extension limitée, offrant un faible brassage des oxydes d'azotes (NO<sub>x</sub>) et des composés organiques volatils (COVs) à l'origine de la production d'ozone.

Dans la région, un réseau de surveillance de la qualité de l'air (Atmo PACA) permet de suivre l'évolution des niveaux de pollution d'ozone dont la compréhension est facilitée par l'existence d'informations météorologiques d'origines diverses, mesurées ou simulées.

### 1.1. Le relief prononcé de l'arrière-pays des Alpes-Maritimes

Les Alpes-Maritimes, territoire où mer et montagnes se juxtaposent, offrent un relief très marqué avec des sommets à plus de 3 000 m à seulement 40 km du littoral (Fig. 1). L'arrière-pays est organisé selon trois vallées majeures à orientation dominante sud-nord, faisant communiquer la ligne de crête frontière avec le littoral : les vallées du Var, de la Tinée et de la Vésubie. C'est la partie nord du département et plus

particulièrement la vallée de la Tinée et un espace transfrontalier proche d'Isola 2000 qui focaliseront notre attention. Isola 2000 se localise à moins de 5 km de l'Italie qui est accessible par le col de la Lombarde (2 350 m).

### 1.2. Observations et/ou simulations permanentes des conditions météorologiques et de la pollution de l'air

#### 1.2.1. Les mesures

Pour mettre en relation certaines variables météorologiques avec la pollution de l'air par l'ozone, nous avons d'abord établi l'inventaire des données disponibles. Elles sont de deux types : mesurées ou modélisées, dans le domaine météorologique et dans celui de la pollution.

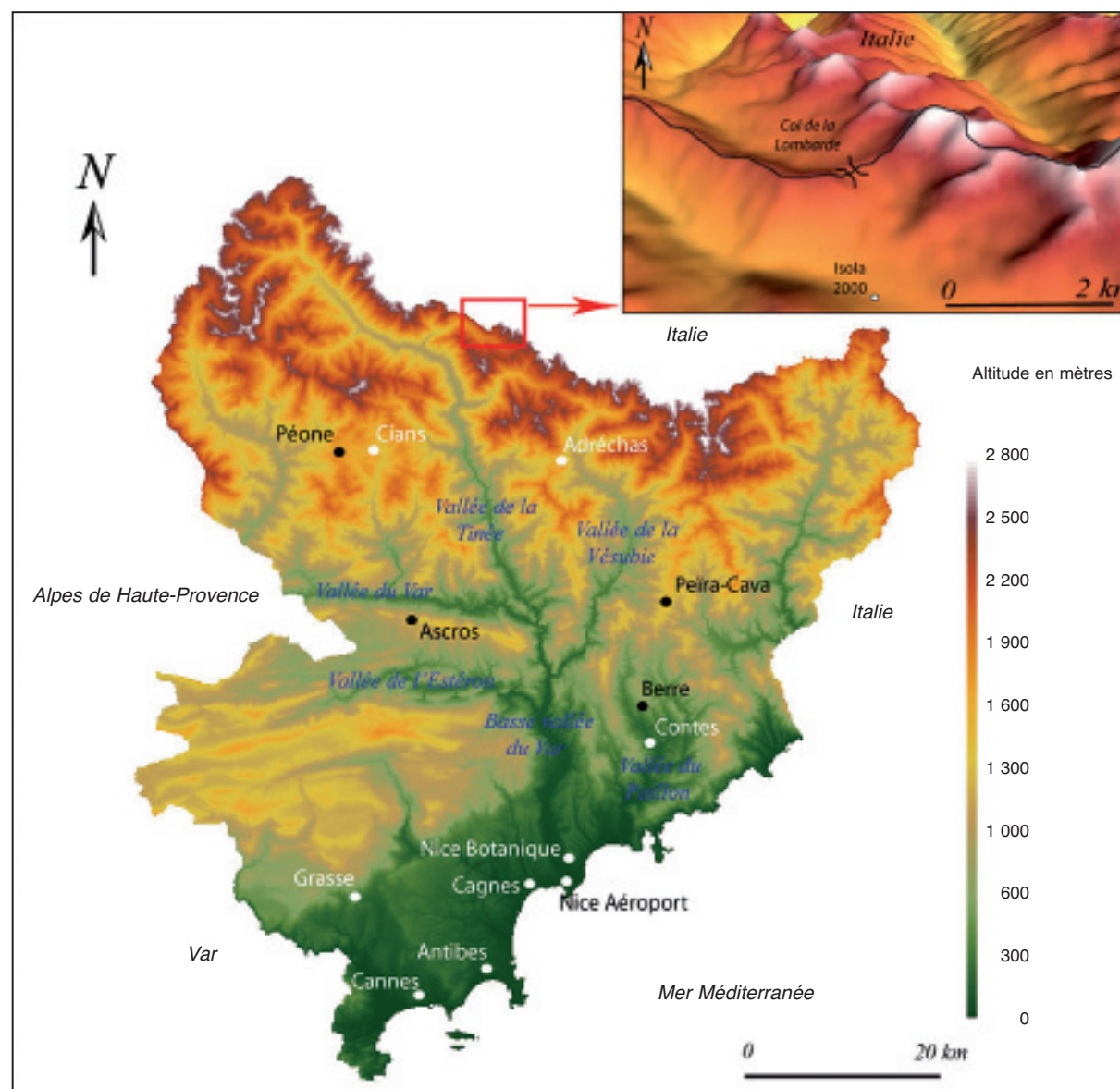


Figure 1.

Localisation des sites de mesures météorologiques (en noir, gérés par Météo-France) et de pollution de l'air (en blanc, gérés par Atmo PACA) dans les Alpes-Maritimes.

Pour les données observées en continu le constat est rapide à établir : deux stations du réseau de surveillance Atmo PACA sont implantées dans l'arrière-pays montagneux (le poste de l'Adrèchas et celui du Cians, Fig.1). Quant aux stations de Météo-France disposant d'un anémomètre, elles ne sont guère plus nombreuses : Péone (1 748 m), Ascros (1 200 m) et Peira-Cava (1 400 m), et relativement lointaines. De plus, ces trois stations sont implantées sur des sites de crête, et donc non représentatives des écoulements de fond de vallée. Ainsi la partie nord du département ne bénéficie pas d'une forte densité de suivi mesuré des phénomènes atmosphériques. Par ailleurs des données relatives au vent sont également délivrées par le profileur de vent de Météo-France implanté à l'aéroport de Nice. Cet instrument procure une description verticale du vent à fine résolution dans les basses couches de la troposphère (coupe sur les 2 000-4 000 premiers mètres).

### 1.2.2. La modélisation

Outre les données mesurées, il existe des « sorties » de modèles météorologiques et chimiques couvrant la région et d'accès heureusement « libre » à tout un chacun.

En météorologie, on citera la modélisation de la plateforme AIREs (modèle MM5), ou encore divers sites professionnels comme Meteoliguria (modèle Bolam) [6], ou « amateurs » tels que Meteosudest (modèles MM5, NMM du WRF) [7], etc.

Ces types de modèles météorologiques serviront d'entrée à un modèle chimique capable de prédire des concentrations horaires moyennes ou maximale journalière d'ozone (modèle CHIMERE), dont les résultats sont disponibles sur les plates-formes Aires et Prev'Air à différentes échelles spatiales [8, 9]. Prev'Air a été développé en 2003 à la demande du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable pour proposer au public des cartographies de la pollution atmosphérique sur la France et l'Europe mais également sur l'ensemble du globe. Les contributeurs au fonctionnement de ce modèle sont l'INERIS (Institut National de l'Environnement et des RISques), l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), Météo-France et l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie). Des cadastres d'émissions et des prévisions météorologiques (ARPEGE) alimentent le système. Les modèles de chimie-transport MOCAGE et CHIMERE sont ensuite chargés d'établir la prévision des concentrations des divers polluants. Ces simulations sont établies pour trois domaines, le globe, l'Europe et la France. Les modélisations effectuées sur ce pays ont une résolution spatiale de  $0,15^\circ \times 0,1^\circ$ .

La plate-forme AIREs est imbriquée dans Prev'Air, et permet d'affiner les simulations à méso-échelle (modèle météo MM5), avec un fort investissement d'Atmo PACA.

### 1.3 Le traçage des masses d'air

Pour ajouter de l'information mesurée à celle délivrée par Météo-France et Atmo PACA, et dans le but de travailler à plus fine échelle spatiale, des campagnes de mesures ponctuelles dans le temps ont été effectuées au cours d'une situation estivale type, afin d'étayer des hypothèses explicatives sur la variabilité spatiale de l'ozone et du vent, du fait du lien important entre les deux.

Dans le but de documenter précisément les écoulements d'air dans la nature et en altitude, ce qui exclut les stations météorologiques traditionnelles mesurant le vent à + 10 m sur sol, il existe plusieurs familles de techniques :

- Les sondeurs de type lidar ou autres profileurs de vent, qui analysent le retour d'un signal, sur des fréquences diverses, selon l'appareil. Ces appareils sont d'un emploi onéreux, et peu mobiles.
- La mesure à une hauteur donnée au-dessus du sol à partir d'un anémomètre embarqué sur un ballon porteur captif, donc attaché au sol. Le ballon est encombrant et ne peut être utilisé que par vent faible (environ 3 m/s) sous peine d'être vite rabattu vers le sol. De plus, il ne mesure qu'en un point et à un seul niveau (ou sur une couche peu épaisse), à l'inverse des profileurs qui mesurent sur une colonne d'air.
- La mesure du vent par poursuite instrumentale d'un ballon de radiosondage très léger, s'élevant rapidement au-dessus du sol.

Ces trois familles de techniques ne mesurent le vent qu'en un lieu donné et ne permettent pas de savoir le trajet que suit réellement une masse d'air, d'autant qu'en relief complexe, l'écoulement ne suit pas durablement une ligne droite !

La mesure du trajet que suit une « bulle » d'air peut être réalisée en suivant une autre logique, celle de la poursuite instrumentée d'un traceur visible, considéré comme partie intégrante de la masse d'air étudiée.

La fumée est déjà un bon indicateur de la trajectoire de l'air, mais sa dilution et l'impossibilité de connaître la distance réelle d'une particule empêchent son utilisation à d'autres fins que « qualitatives ».

Une autre technique permet d'enregistrer assez précisément le parcours d'une masse d'air, quantitativement, cette fois : c'est l'analyse en 3 dimensions de la trajectoire d'un C.L.B. (*Constant Level Balloon*). Il s'agit d'un ballon à niveau de pression constant, donc en équilibre avec son environnement, qui se comporte comme une bulle d'air que l'on aurait rendu visible, et qui peut donc être suivie à l'œil, ou mieux, aux instruments. Les ballons sont remplis d'un gaz plus léger que l'air, un mélange d'air et d'hélium, dont le dosage déterminera le niveau de pression et indirectement l'altitude d'équilibre, avec éventuellement adjonction d'un poids pour parfaire l'équilibre souhaité. Les ballons sont obligatoirement indéformables (en mylar), de manière à ce que leur volume ne puisse changer (et en particulier ne puisse augmenter avec l'altitude,

ce que font les ballons en latex) afin de garantir l'équilibre de pression. Leur suivi est assuré par un télémètre optique ou laser pour la mesure de la distance, ainsi que par un théodolite pour la mesure de l'angle d'azimut (par rapport au nord) et de l'élévation – ou « site » (par rapport à l'horizontale).

La connaissance de ces trois variables (distance, azimut, élévation) mesurées à intervalles réguliers (ici toutes les 30 secondes) permet de reconstituer *a posteriori* la trajectoire d'un ballon, selon les lois de la trigonométrie (Figure 3).



Figure 2.

CLB prêt à être lâché sur le terrain (col de la Lombarde, 2 300 m d'altitude). À gauche, le télémètre optique, à droite, le théodolite.

#### 1.4 Les mesures itinérantes d'ozone

Grâce aux progrès technologiques, il existe aujourd'hui des analyseurs de polluants atmosphériques (ozone, dioxyde d'azote, monoxyde d'azote etc.) aux dimensions de plus en plus réduites, donc portables (modèle 205 Dual Beam de 2BTech) [10]. Ces appareils offrent ainsi des possibilités de mesures plus larges que celles proposées par les appareils traditionnels utilisés par les associations agréées à la surveillance de la qualité de l'air françaises. Pour l'ozone la méthode de mesure se fait par absorption d'UV. Du fait de leur faible poids et de leur faible encombrement (20 × 30 × 9 cm et 2 kg), ces appareils sont aisément transportables. Leur mode d'alimentation sur batterie renforce également les libertés de mesures. Leur sensibilité et leur fiabilité ont été évaluées lors d'une période de comparaison d'un mois avec un analyseur d'Atmo PACA ; les résultats se sont avérés très satisfaisants [11]. Ainsi le recours à ces appareils offre la possibilité de mesurer l'ozone en continu dans le temps, mais aussi dans l'espace afin de cartographier ce polluant à fine échelle : il suffit d'embarquer l'appareil sur un véhicule et de faire entrer de l'air « frais » dans le tuyau menant au capteur. L'air est prélevé à l'aide d'un tuyau en téflon (pour ne pas détruire l'ozone prélevé) maintenu à 50 cm à l'extérieur de la voiture, bien en avant du pot d'échappement pour éviter toute contamination. Le véhicule se déplace à une allure faible (20-30 km/h) et la plus constante possible. Le véhicule circule la plupart du temps face au vent (brise remontant la vallée). De plus, pendant que se déroulent la mesure et l'enregistrement, les conditions extérieures (présence éventuelle d'autres véhicules, formes du relief, description de la bordure de la route (talus, paroi, etc), en fait tout ce qui est susceptible d'agir sur les teneurs en ozone, sont verbalement enregistrées à l'aide d'un magnétophone.

Une contrainte majeure est d'effectuer ces mesures itinérantes pendant une période de stabilité temporelle

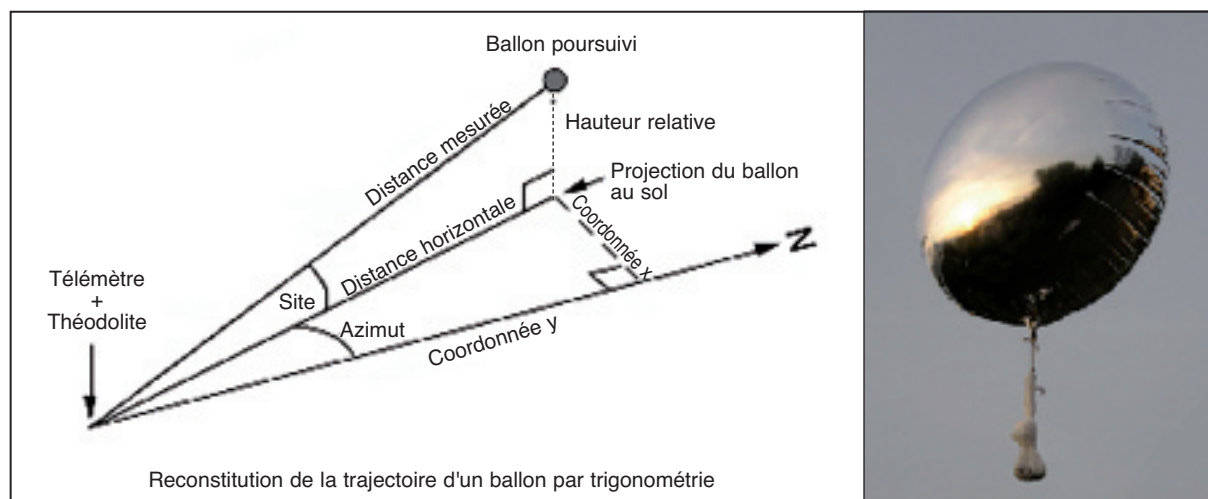


Figure 3.

Schéma du calcul de la trajectoire des ballons équilibrés.

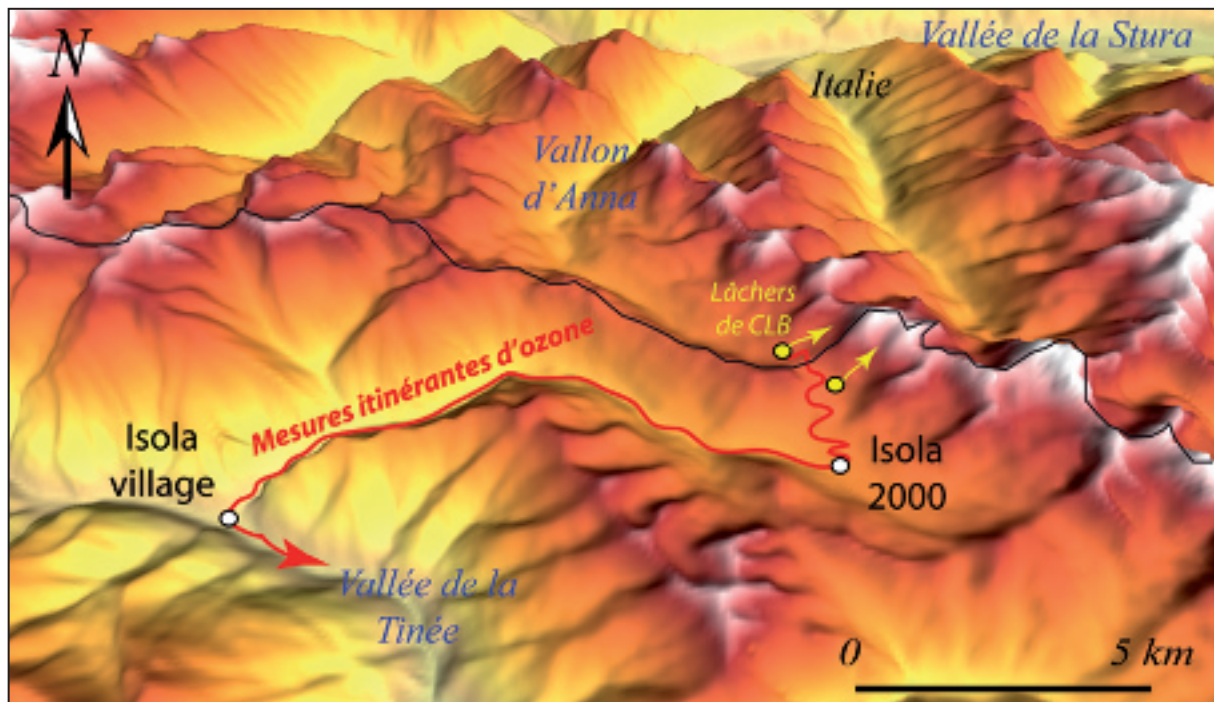


Figure 4.

Carte indiquant la localisation précise (en jaune – point fixe) des mesures d'écoulement de l'air par CLB et des concentrations d'ozone, et du trajet (en rouge - itinérant) suivi pour les mesures itinérantes d'ozone depuis le col de la Lombarde jusqu'à la vallée de la Tinée.

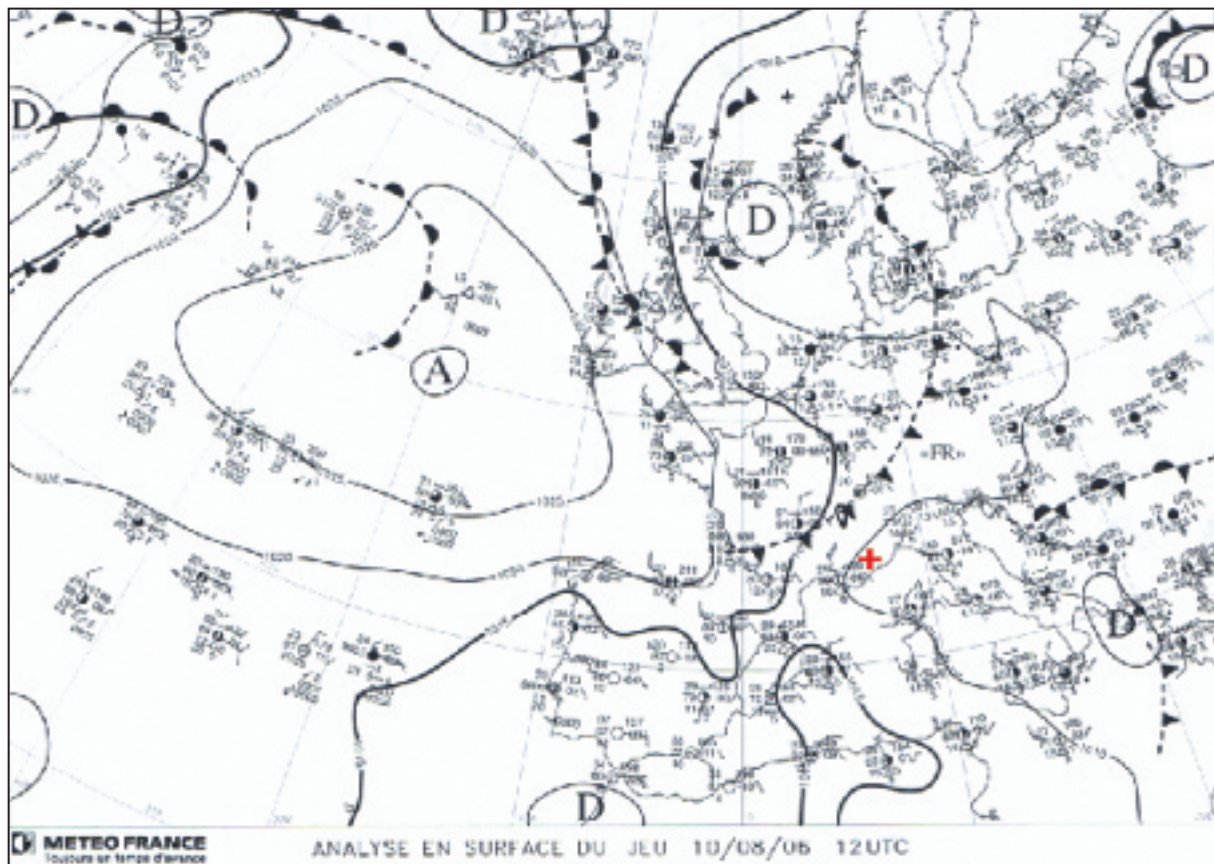


Figure 5.

Situation générale du jeudi 10 août 2006 à 12 h TU en surface. Météo-Hebdo.

du polluant, au cours de l'après-midi notamment [12], afin de ne pas attribuer à l'espace une variation de concentration qui serait d'origine temporelle. Le pas de temps de mesure minimum est de 2 secondes, les données sont enregistrées dans une mémoire interne sur une plus ou moins longue période en fonction du pas de temps de mesure choisi. Un GPS équipe les analyseurs afin de faciliter le traitement des données par la suite.

Nous avons donc, dans un premier temps, enregistré en continu, et de manière stationnaire, les variations temporelles de la teneur de l'air en ozone pendant que nous mesurons les écoulements d'air à l'aide de CLB, sur le flanc sud, puis sur le flanc nord du col de la Lombarde. Dans un deuxième temps, la concentration d'ozone a été mesurée dans l'espace, en déplacement, à partir du col de la Lombarde jusqu'à la vallée de la Tinée, 2 000m plus bas (Figure 4).

## 2. Mesure et modélisation disponibles des concentrations d'ozone et des flux d'air à l'échelle régionale

Notre démarche consiste ici à utiliser les données météorologiques et chimiques disponibles au moment des mesures (août 2006), et susceptibles de fournir un corpus d'informations de base pour caractériser la situation.

### 2.1 La situation météorologique générale du 10 août 2006

Divers documents disponibles comme la revue hebdomadaire française Météo-Hebdo, ou les modèles américain et anglais (GFS et Bracknell) permettent de reconstituer aisément la situation de cette journée. En altitude (géopotential 500 hPa), vers 5 700 m, la pression est élevée sur la région, avec un flux de nord-ouest généralisé sur la France, s'écoulant entre une puissante dorsale centrée sur le proche Atlantique et un talweg axé du sud de la Norvège à la mer Ionienne. Le vent est de l'ordre de 25 nœuds sur la région.

En basses couches (850 hPa puisque l'on est en montagne), le talweg est nettement moins marqué ce qui limite la vigueur du flux méridien : très peu marqué à Cuneo (radiosondage), il est plus rapide en vallée du Rhône, car canalisé sous forme de Mistral. Enfin, l'on observe un creusement dynamique en surface sur le golfe de Gênes, à l'avant d'un front froid situé sur les Alpes du Nord à 12 h TU (Figure 5). L'instabilité thermique verticale source de convection est très faible sur la région en matinée malgré l'humidité, mais se renforce l'après-midi, ce qui génère quelques cumulus qui provoqueront des précipitations convectives en soirée plus au nord du domaine.

### 2.2. La modélisation disponible de la situation à l'échelle régionale

Plusieurs sorties de modèles sont librement disponibles sur internet à échelle régionale, avec une

maille minimale de 6,5 km (Bolam) en 2006, contre 2 à 4 km aujourd'hui (NMM, MM5).

Le Bolam 6,5, est un modèle « méso-échelle » (régional) initialisé à partir des sorties du modèle global « européen » (ECMWF) élaboré à Reading.

On constate sur la Figure 6, que vers 1 500-1 600 m d'altitude (850 hPa) un flux de nord-ouest, bien visible dans le quart nord-ouest de la figure (nord-est de la France), vient buter sur les Alpes (ici laissées en blanc car d'altitude supérieure à celle du géopotential). Ces dernières dévient vers l'est la majeure partie du flux qui contourne le relief, et revient par l'Adriatique vers la plaine du Pô et l'Italie centrale. L'autre partie plus occidentale du flux part directement vers le sud et s'accélère entre Alpes et Massif Central avant de pénétrer en Méditerranée. À cette échelle, les Alpes-Maritimes sont sous un flux de sud-ouest, tandis que de l'autre côté de la ligne de crête, en Italie, aucun flux organisé n'apparaît.

Une analyse plus fine, à l'échelle des Alpes-Maritimes est possible avec le modèle MM5 (configuré avec une résolution de 3 km) disponible sur la plateforme AIRES (Figure 7). La modélisation interrompt malheureusement sa cartographie au sud immédiat d'Isola 2000. On note néanmoins que sur le versant méditerranéen, le flux est bien de secteur sud-ouest, localement canalisé par le relief en secteur sud ou en secteur ouest selon les cas, et même en nord-ouest dans l'angle nord-ouest de la carte. Sur le versant padan, le flux est bien parallèle à la pente du massif de l'Argentera-Mercantour, donc de nord à nord-est de l'autre côté de la ligne de crête près d'Isola 2000.

On déduit donc de ces documents que la haute Tinée est donc soumise à un flux de sud au fond de la vallée. Ce flux est une brise thermique (brise de mer relayée par une brise de vallée venant donc de l'aval). À plus haute altitude, on s'attend, côté italien, à un vent de nord à nord-est, et côté français (Isola 2000) à un flux de nord-ouest, d'origine synoptique (guidé par le gradient de pression régional), et influencé par la topographie.

### 2.3. Les concentrations en ozone mesurées par le réseau d'Atmo PACA

Nous avons là aussi utilisé les informations librement disponibles sur Internet à l'époque où ont été réalisées les mesures (août 2006), informations qui constituent une bonne base de comparaison. Le poste permanent d'Atmo PACA le plus proche d'Isola 2000 est celui de Adréchas, au col de la Colmiane, à 1 400 m d'altitude. Ce poste est qualifié de « site perché » et comme tous les postes en site perché, il se caractérise par une faible destruction de l'ozone au cours de la nuit où les concentrations ne descendent pas en dessous de 105  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . On note par ailleurs que le maximum atteint, 154  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , débute à 15 h et se prolonge après 19 h TU (Figure. 8). Ces données sont à comparer par exemple avec celles de Nice-Botanique, station périurbaine, au nord-ouest de Nice, où le maximum atteint est de

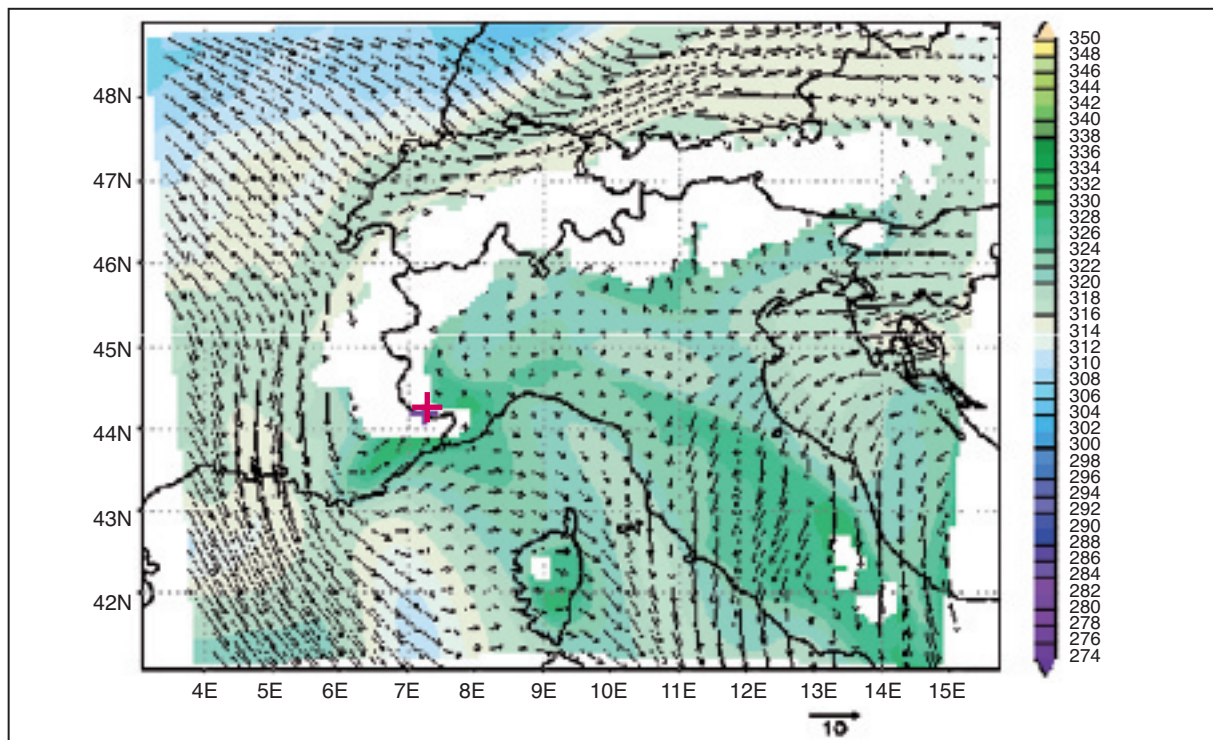


Figure 6.

Champ de vent et température modélisés du géopotentiel 850 hPa. Échéance 0 (initialisation). 10 août 2006. Modèle Bolam 6,5. La croix représente Isola 2000. (Source : [www.meteoliguria.it](http://www.meteoliguria.it))

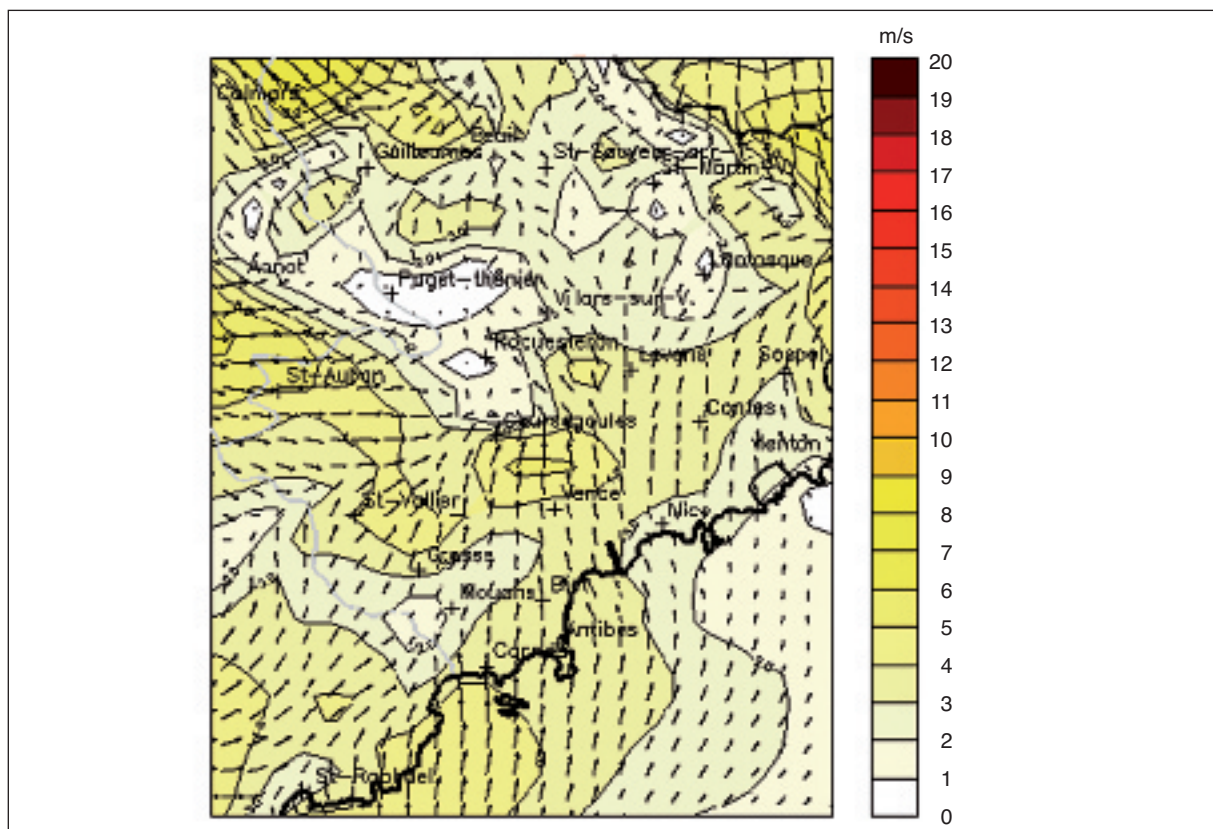


Figure 7.

Champ de vent modélisé à 10 m sur sol. Modèle MM5 à 3 km de résolution. 10 août 2006. La croix rouge représente Isola 2000. (Source : [www.aires-mediterranee.org/](http://www.aires-mediterranee.org/))

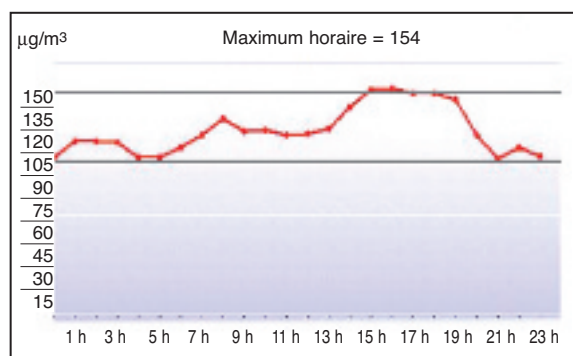


Figure 8.  
Concentrations moyennes horaires de l'air en ozone  
à L'Adrèchas. Heures T.U. 10 août.  
(Ancienne source : [www.qualitair06.org/](http://www.qualitair06.org/))

144  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  alors que le minimum passe sous 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ce dernier poste est situé dans la vallée inférieure du Var, site favorable à une destruction nocturne d'ozone par dépôt sec et à une titration de ce polluant en tout début de matinée par les émissions de NO issues du trafic routier.

La pollution par l'ozone fait donc l'objet de mesures, mais aussi de modélisations, à plusieurs échelles spatiales. Ainsi, le modèle Prev'Air [9] donne pour la France, à la fois une prévision d'ozone 24 h à l'avance, et une analyse *a posteriori*.

La figure 9 permet de localiser les pics observés, dont les plus élevés concernent principalement la plaine du Pô et la Méditerranée entre Corse et continent, ainsi que les Alpes-Maritimes.

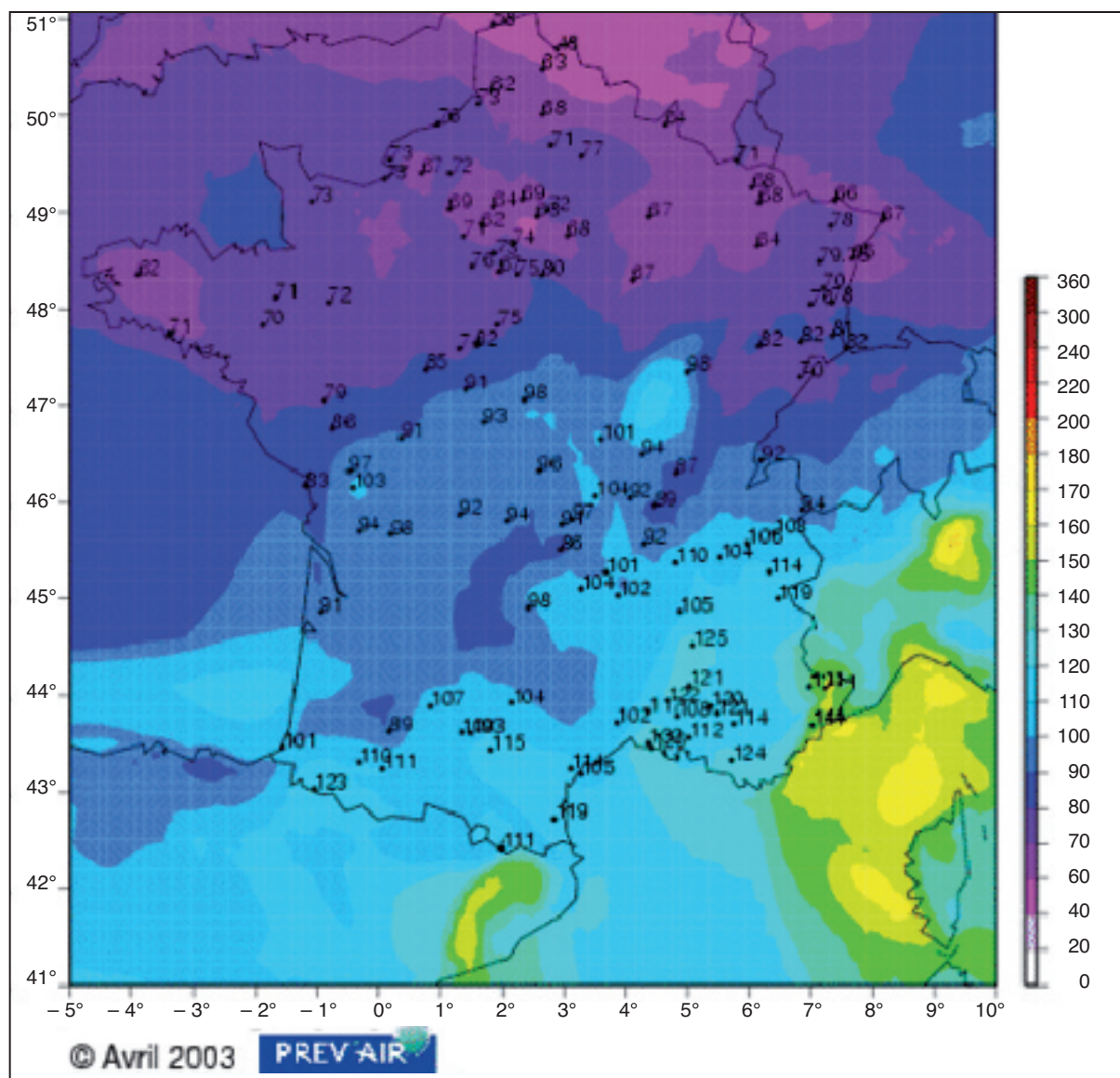


Figure 9.  
Carte analysée des concentrations d'ozone par le modèle Prev'Air, pour le 10 août 2006.  
(Source : [http://www.prevair.org/fr/prevision\\_o3.php](http://www.prevair.org/fr/prevision_o3.php))

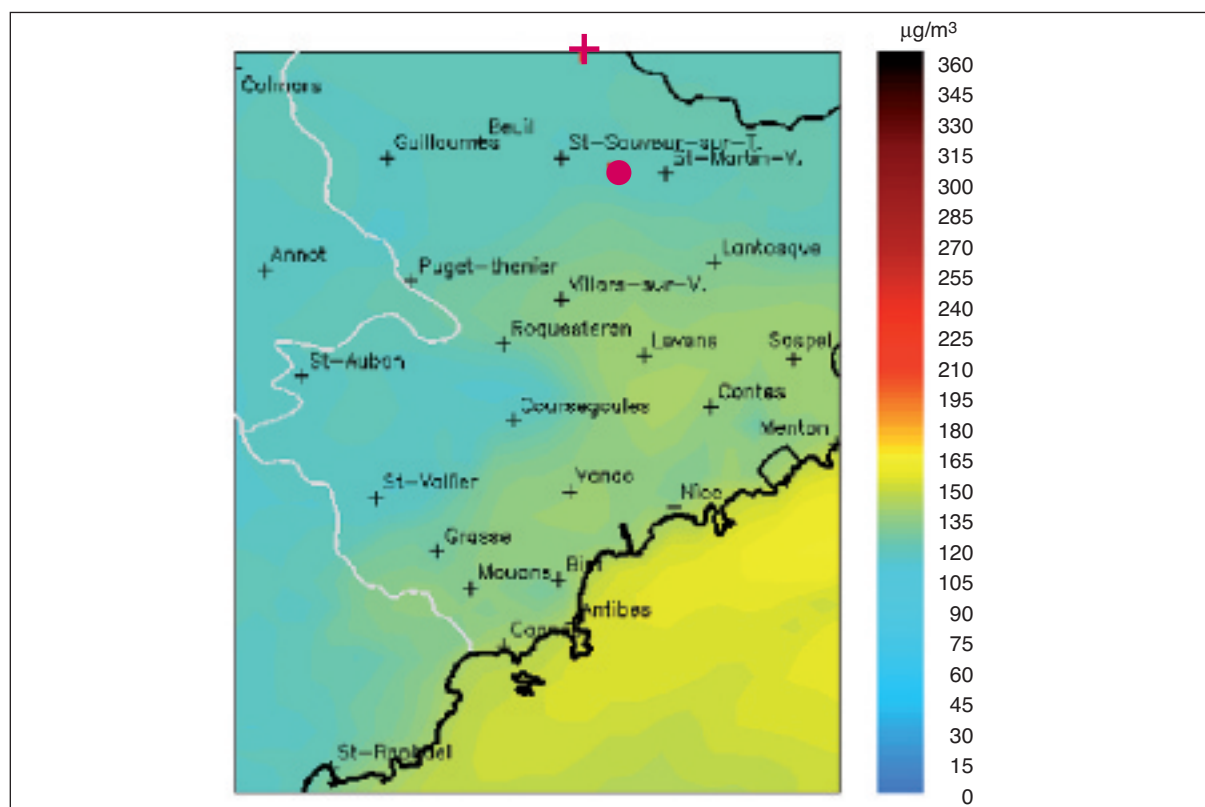


Figure 10.

Prévisions de concentrations en ozone pour le 10 août 2006 par le modèle Chimère. La croix localise Isola 2000, et le point, la station de L'Adrèchas. Source : Qualitair 06.

La modélisation du maximum horaire du jour est également disponible avec le même modèle Chimère, mais à une échelle beaucoup plus fine (Figure 10). La modélisation confirme dans l'ensemble la distribution spatiale de l'ozone vue par Prev'Air, avec un maximum net sur la mer d'environ 155  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , un second maximum moins fort (135  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sur les premiers reliefs entre Grasse et Sospel. Entre les deux, une zone un peu moins polluée (125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), correspond à la conurbation littorale, où l'on peut supposer que l'ozone est en partie consommé par le NO émis principalement par la circulation automobile. Par contre les teneurs sont un peu plus basses, environ 120-125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  vers L'Adrèchas (donc sous-estimées par rapport à la mesure) et en haute montagne, dans la région d'Isola 2000.

Au total, les informations disponibles soit sous forme de mesure, soit sous forme de modélisation, donnent la situation suivante :

D'un point de vue météorologique, on est dans un système un peu « mou », avec une dominante de nord-ouest côté français vers 1 500m d'altitude, mais sans flux synoptique bien organisé du côté italien, où le modèle donne cependant une prédominance de nord. Cette situation laisse la possibilité aux régimes de brise thermique de s'organiser et donc de remonter les vallées, là où le vent synoptique ne pénètre pas. À ce propos, le vent de nord modélisé par MM5 sur une partie du versant français, à l'est de Saint-Martin

Vésubie, ne peut être considéré comme une brise puisqu'il est « descendant » sous la ligne de crête frontière.

D'un point de vue pollution par l'ozone, on n'est pas dans un épisode remarquable et généralisé, puisque les valeurs sont faibles ou modérées sur la France, mais l'extrême sud-est baigne dans des concentrations bien marquées, surtout sur la mer d'après les modèles. Dans la région d'Isola 2000 on doit s'attendre à des valeurs horaires de l'ordre de 120-125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , un peu plus élevées au sud (130-135  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

### 3. Campagne de mesures et modélisation à échelle locale très fine : les difficultés du terrain et les contradictions

Ici nos mesures constituent un complément d'information, à une échelle spatiale fine.

#### 3.1 Les concentrations mesurées par l'analyseur portable

Les mesures de concentration d'ozone (à 1,50 m sur sol) se sont déroulées en trois phases :

- mesures fixes de 9 h 20 jusqu'à 11 h 05 TU, un peu en contrebas du col de la Lombarde, côté français, à 2 235 m d'altitude ;

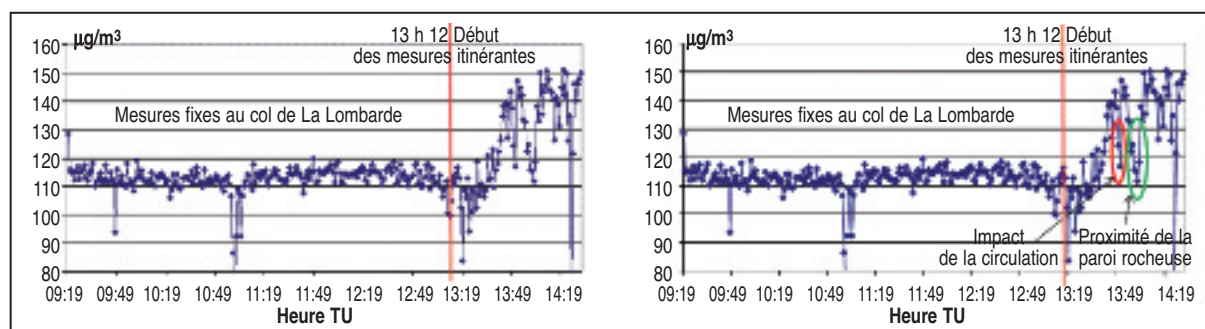


Figure 11.

Graphe des concentrations d'ozone mesurées le 10 août 2006, entre le col de la Lombarde et Plan-du-Var (heures légales). La forte baisse constatée entre 11 h 05 et 11 h 10, correspond au déplacement d'un versant du col à l'autre (en situation de non-mesure).

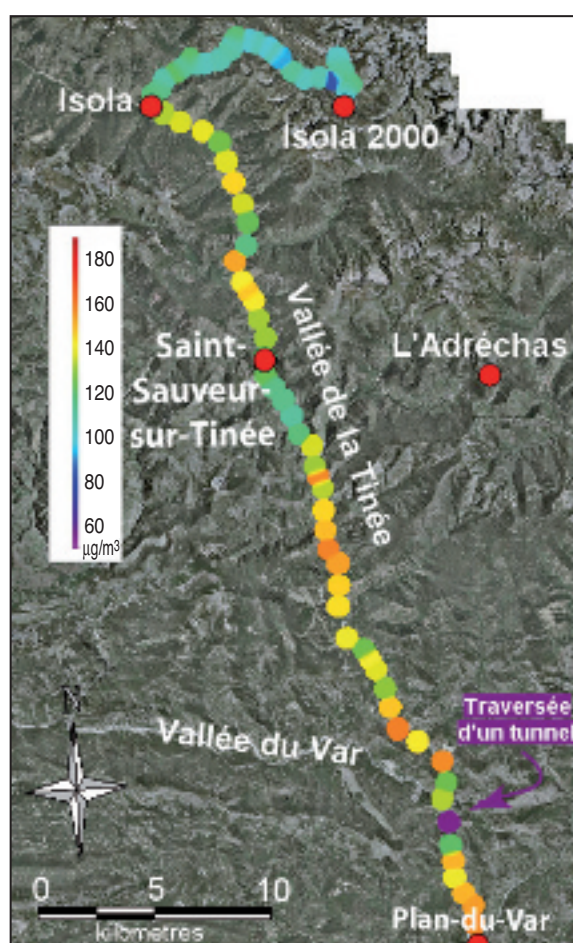


Figure 12.

Représentation spatialisée des concentrations d'ozone mesurées entre Isola 2000 et Plan-du-Var.

- mesures fixes de 11 h 10 TU jusqu'à 13 h 12 TU, de l'autre côté du col, côté italien, à 2 312 m d'altitude ;
- mesures itinérantes à partir de 13 h 12, en descendant la route du col jusqu'à Isola 2000, puis Isola village (870 m) dans la vallée de la Tinée, puis vers le sud jusqu'à Plan-du-Var (180 m), à la confluence de la Vésubie (Figures 11 et 12).

La stabilité temporelle des concentrations entre 110 et 116  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  environ, durant près de quatre heures

d'affilée, est assez remarquable, et les teneurs sont somme toute identiques sur les deux versants du col. On remarque une concentration inférieure d'environ 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à celle de L'Adrèchas qui présente toutefois le même comportement stable (Figure 8). Les quelques valeurs très faibles sont en situation de non-mesure et donc non-représentatives (changement de position de l'analyseur, etc).

Par contre, à partir de 13 h 12 TU, heure du départ, les concentrations vont d'abord diminuer immédiatement en dessous d'Isola 2000, donc en fond de vallon, entre 2 000 m et 1 300 m d'altitude environ, avec des valeurs de 100 à 110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , puis vont remonter graduellement jusque vers 140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  à la confluence du vallon avec la Tinée à Isola Village.

Les taux vont se maintenir aux alentours de 140-150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en descendant la vallée de la Tinée vers le sud, et sont donc supérieurs à ceux mesurés au-dessus de 2 000 m d'altitude, une heure auparavant il est vrai. Ils baissent nettement jusqu'à 110-120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dans une portion de vallée plus étroite au sud de Saint-Sauveur-sur-Tinée, là où la route est davantage flanquée de parois rocheuses dont elle est forcée de se rapprocher. Nous avons maintes fois observé que les valeurs s'effondrent à l'approche d'une paroi rocheuse ou d'une maison, et encore plus dans un tunnel où les gaz d'échappement sont conservés, ou même simplement lorsque l'on suit un véhicule (consommation d' $\text{O}_3$  par NO), comme le montre la figure 11, après 13 h 12 TU.

En plus de la variabilité spatiale sur de courtes distances, on notera aussi une franche tendance à la hausse des concentrations pendant la descente du col vers la vallée de la Tinée, et en descendant cette vallée elle-même sans qu'il soit possible d'attribuer au temps ou à l'espace ce comportement. En effet, la station de L'Adrèchas montre un accroissement d'ozone à partir de 13 h.

En résumé, lors de ces mesures, les taux ont varié en fonction inverse de l'altitude, mais aussi beaucoup en fonction du détail de la topographie, et de l'intensité du trafic routier, mais sont en moyenne supérieurs d'environ 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , à ceux annoncés par les modèles.



Figure 13.

Trajectoire du CLB lâché à 9 h 54 TU, entre Isola 2000 et le col de la Lombarde (2 235 m d'altitude), le 10 août 2006. Fond IGN 1/25000e.

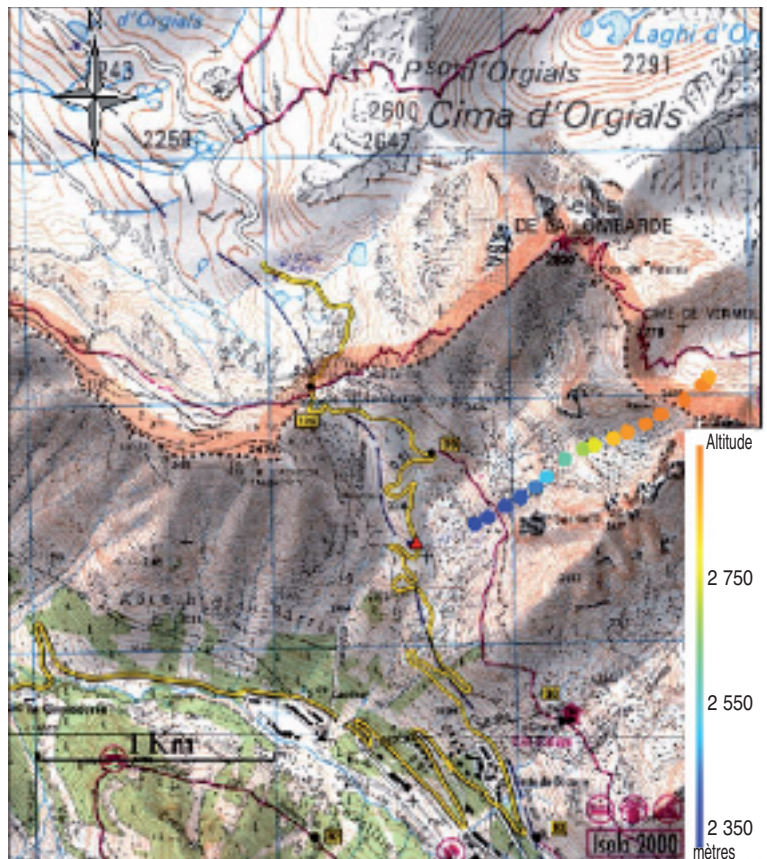


Figure 15.

Trajectoire du CLB lâché à 10 h 42 TU, entre Isola 2000 et le col de la Lombarde (2 235 m d'altitude), le 10 août 2006. Fond IGN 1/25000e.

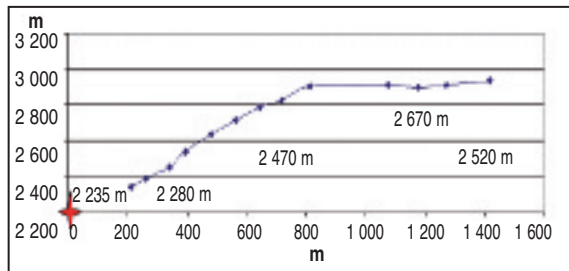


Figure 14.

Profil du CLB lâché à 9 h 54 TU, entre Isola 2000 et le col de la Lombarde (2 235 m d'altitude), le 10 août 2006. Les altitudes indiquées sous le graphe sont celles de la topographie sous le ballon.

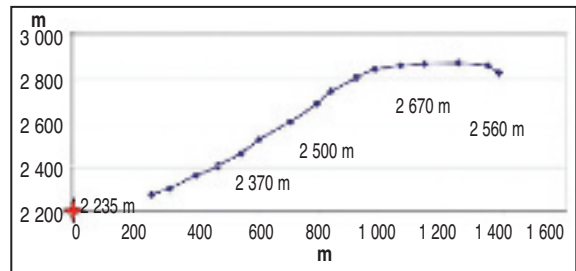


Figure 16.

Profil du CLB lâché à 10 h 42, entre Isola 2000 et le col de la Lombarde (2 235 m d'altitude), le 10 août 2006.

### 3.2 Les écoulements d'air révélés par les CLB au-dessus d'Isola 2000

Pour vérifier que les flux étaient conformes à ce qui était suggéré par les modèles de vent, en particulier le modèle MM5 de la plate-forme AIREs, à la résolution spatiale la plus fine, (mais encore assez grossière dans une telle topographie), nous avons cherché à mesurer précisément ces écoulements à l'aide de CLB. Successivement, du côté français, puis italien plusieurs ballons, dont 4 CLB ont été lâchés entre 9 h 45 TU et 12 h environ.

Les deux premiers, partis d'une altitude de 2 235 m sur le flanc sud du col atteignent leur niveau d'équilibre avec l'atmosphère vers 30 m sur sol. Pris dans un flux ascendant par effet orographique, ils montent rapidement jusque vers 2 900 m d'altitude, puis ne montent plus, survolant la topographie d'environ 300 à 500 m, en direction de l'est-nord-est, et dépassent la ligne de crête qui atteint à cet endroit 2 670 m. La vitesse moyenne de ce flux d'ouest-sud-ouest oscille entre 6 et 7 m/s (Figures 13 à 16).

Au nord du col, du côté italien, sur un relief moins pentu, deux autres CLB sont suivis aux environs de

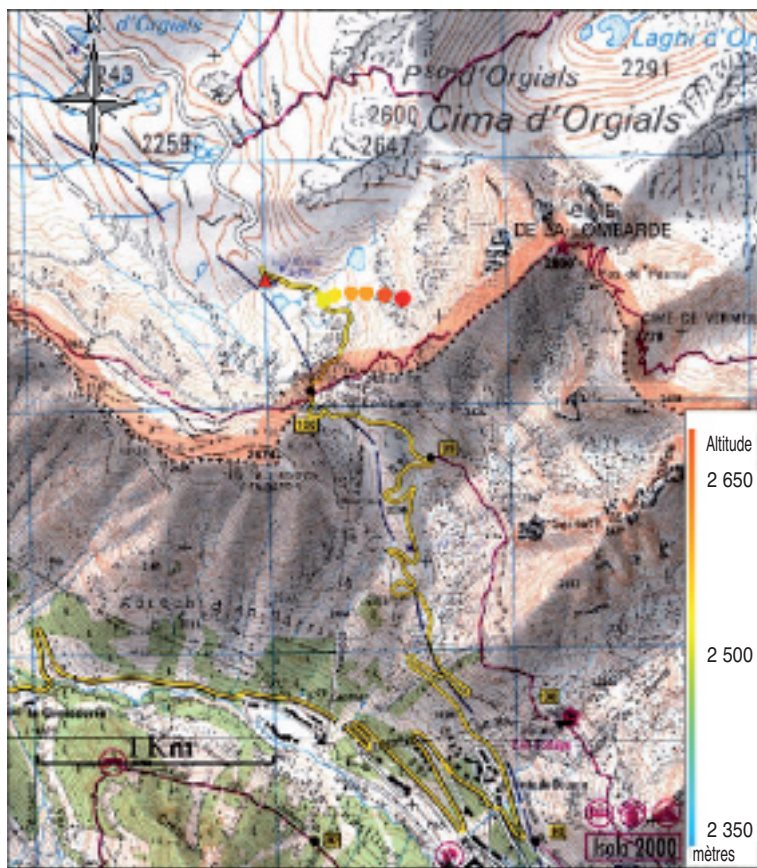


Figure 17.

Trajectoire du CLB lâché à 11 h 48 TU, au nord du col de la Lombarde (2 312 m d'altitude), le 10 août 2006. Fond IGN 1/25000e.



Figure 19.

Trajectoire du CLB lâché à 12 h 05 TU, au nord du col de la Lombarde (2 312 m d'altitude), le 10 août 2006. Fond IGN 1/25000e.

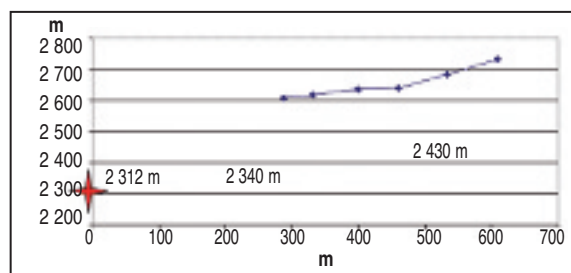


Figure 18.

Trajectoire du CLB lâché à 11 h 48 TU, au nord du col de la Lombarde (2 312 m d'altitude), le 10 août 2006. Fond IGN 1/25000e.

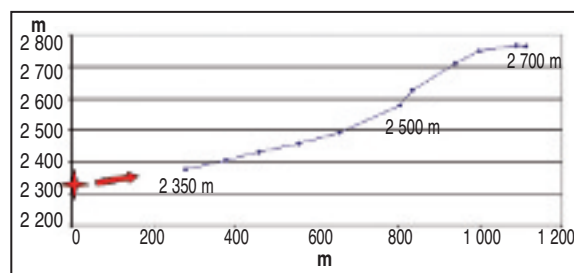


Figure 20.

Trajectoire du CLB lâché à 12 h 05 TU, au nord du col de la Lombarde (2 312 m d'altitude), le 10 août 2006. Fond IGN 1/25000e.

14 h, avec une altitude de départ de 2 312 m. Le premier, après de longues hésitations montrant que le vent est plus fort sur 30-40 m d'épaisseur au-dessus du sol, finit par partir dans un flux d'ouest, et sera vite perdu derrière un cumulus, à plus de 2 700 m d'altitude et 200 m au-dessus du sol. Sa vitesse moyenne mesurée est de 2 m/s (Figures 17 et 18).

Le second ballon offre une trajectoire assez semblable, un peu plus redressée vers l'ENE (vent d'WSW), et bien que s'élevant peu au-dessus du sol, il franchit la face nord de la cime de la Lombarde (Figures 19 et 20).

En résumé, les quatre ballons poursuivis aux instruments, sans compter différents ballons simplement suivis visuellement, ont montré l'existence d'un flux à composante synoptique probable de secteur ouest ou nord-ouest, mais étant majoritairement une brise thermique d'aval. Cette composante thermique est attestée par le continuum d'écoulement qui remonte la vallée du Var inférieur, puis de la Tinée, d'aval vers l'amont, donc du sud vers le nord en basses couches, et qui oblique d'ouest dans le vallon d'Isola 2000 à partir d'Isola. Cette remontée diurne des vallées est typique et quasiment constante,

surtout en été, et c'est par ce mécanisme que l'ozone ou les polluants primaires produits essentiellement sur le littoral, remontent jusqu'à la crête frontrière.

L'apport important de ces mesures aérologiques est de prouver, ou plutôt de confirmer après d'autres travaux [5, 13, 14, 15] que :

- le flux mesuré par les CLB du côté italien provient très probablement de la plaine du Pô en remontant la vallée de la Stura di Demonte puis le vallon d'Anna, du côté français.
- la brise méditerranéenne remonte bien jusqu'à la ligne de crête, vers 2 500-3 000 m d'altitude, et peut la dépasser, drainant ainsi de l'air azuréen jusque sur le versant padan du massif. Et cela, même si les modèles météorologiques d'échelle régionale ne l'indiquent pas toujours ainsi.

### 3.3 La modélisation à fine échelle spatiale avec RAMS dans le secteur d'Isola 2000.

#### 3.3.1 Mode opératoire et configuration

Nous avons essayé de modéliser (*a posteriori*) à fine échelle spatiale (maille de 500 m de côté) les écoulements sur le secteur d'Isola 2000 et du col de la Lombarde. En partant des analyses du NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) reconstituant l'état de l'atmosphère sur le globe, à 1 degré de résolution (un point tous les 110 km environ à notre latitude), on initialise le modèle RAMS (*Regional Atmospheric Modelling System*).

Ce modèle numérique prévisionnel méso-échelle a été utilisé avec la configuration suivante :

Le modèle numérique de terrain a une résolution de 90 m, la grille finale de calcul météorologique a

une maille de 500 m de côté, et l'on travaille en « nesting » (emboîtement de deux grilles de calcul) : une première maille de calcul centrée sur la région, de résolution horizontale  $1.5 \times 1.5$  km sur 150 km en longitude, et 110 en latitude, et une résolution verticale de 30 niveaux plus denses dans les basses couches.

La seconde grille a une résolution horizontale de  $500 \times 500$  m (sur 19 km en longitude et 14 km en latitude) et toujours une résolution verticale de 30 niveaux (des essais de modélisation avec trois grilles ont été effectués sans succès).

Ensuite nous avons adapté les schémas physiques et de calculs à la configuration de la grille et du terrain étudié, et l'on calcule les variables atmosphériques en chaque point des deux grilles.

Ce type de modèle est non-hydrostatique, ce qui permet à la fois de simuler des phénomènes locaux telle que la convection et les circulations locales (les brises), et d'affiner l'information synoptique (celle relative aux centres d'action anticycloniques et dépressionnaires) [16, 17].

La figure 21 représente les lignes de courant calculées sur les environs d'Isola 2000 à une cinquantaine de mètres au-dessus du sol. La figure 21 indique ainsi, conformément à l'observation, un flux remontant la vallée de la Tinée du sud au nord, diffusant vers les vallons secondaires, en particulier le vallon d'Isola 2000, au centre duquel le flux est de nord-ouest (axe topographique). Par contre, sur la ligne de crête du col de la Lombarde, le flux apparaît clairement en provenance du nord, donc de la plaine du Pô, flux qui déborde ainsi au sud des reliefs formant la frontière.

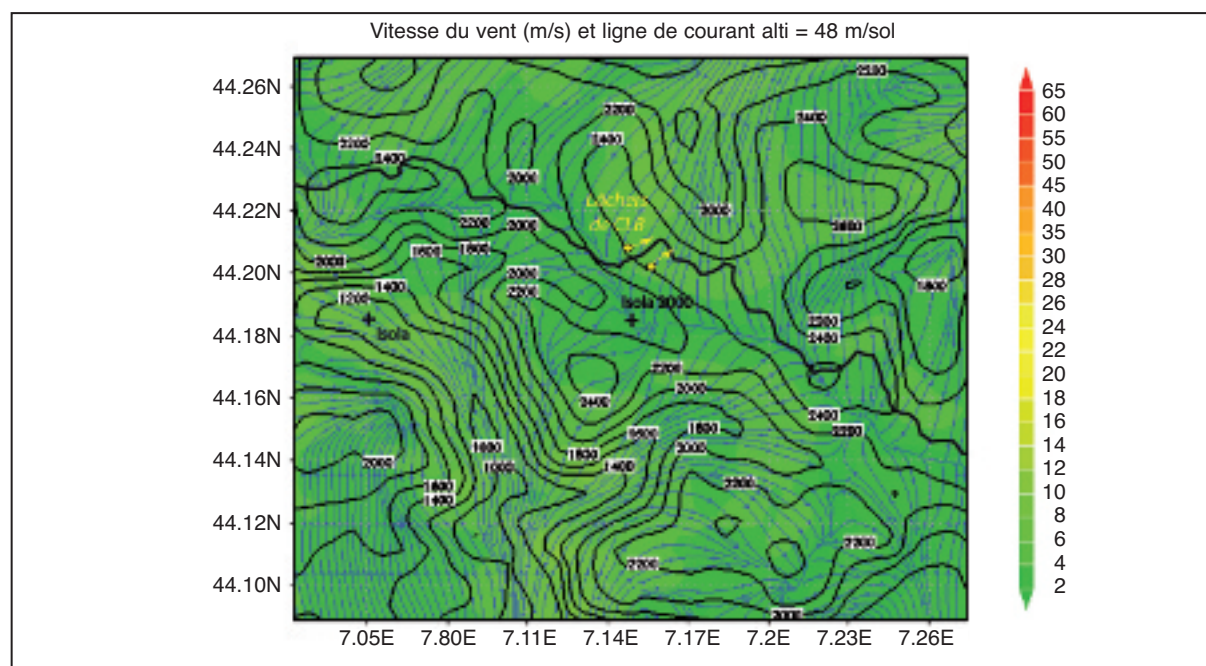


Figure 21.

Lignes de flux calculées à une hauteur de 48 m sur sol, pour le 10 août 2006 à 11 h TU (13 h locales). Topographie simplifiée par le modèle (RAMS).

Il y a là une contradiction avec les écoulements observés, ce qui a motivé l'utilisation de différents réglages, en particulier une diminution du lissage de la topographie, la prise en compte de la turbulence en basses couches, une augmentation de la résolution

verticale en basses couches, etc., modifications qui ont permis d'aboutir aux cartes des figures 22 à 24, qui zooment sur le secteur, et représentent à la fois les trajectoires des CLB, et le flux modélisé à différentes altitudes.

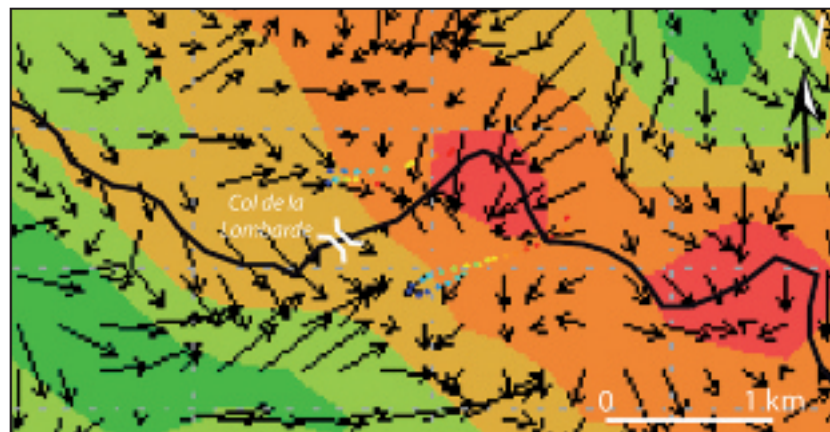


Figure 22.

Comparaison des mesures d'écoulement d'air et de la simulation du vent à 20 m au-dessus du sol par le modèle RAMS dans les environs du col de la Lombarde.

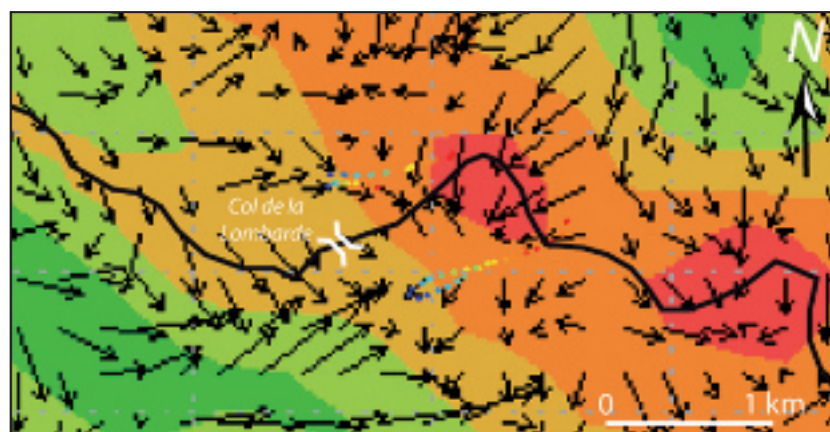


Figure 23.

Comparaison des mesures d'écoulement d'air et de la simulation du vent à 77 m au-dessus du sol par le modèle RAMS dans les environs du col de la Lombarde.

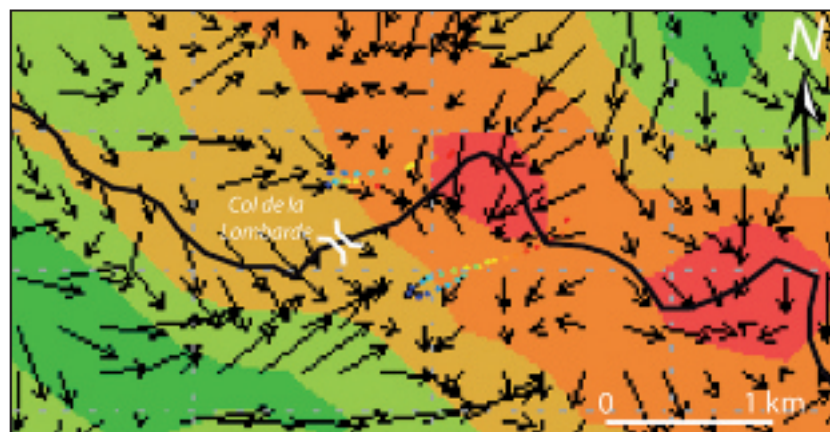


Figure 24.

Comparaison des mesures d'écoulement d'air et de la simulation du vent à 385 m au-dessus du sol par le modèle RAMS dans les environs du col de la Lombarde.

Le résultat est que, dans les basses couches de l'atmosphère, juste au-dessus du sol (à plus de 2 000 m d'altitude cependant), les flux réels sont relativement bien reproduits, au moins sur le début du parcours des ballons, car manifestement le modèle est capable de prendre en compte les brises thermiques. Mais au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol, l'écart entre flux réel et flux modélisé s'accroît : la composante ouest observée disparaît au profit d'un flux de nord à nord-est qui n'a pas été rencontré dans nos mesures.

On note que ce flux méridien calculé est conforme aux résultats du modèle MM5 de la plate-forme AIRE (Figure 7), et que la modélisation à beaucoup plus fine échelle spatiale n'a pas permis de corriger cette composante nord (qui est plus probablement d'origine synoptique que thermique) même si, par contre, elle est capable d'améliorer sensiblement les flux de basses couches.

La différence partielle entre modèles et réalité observée pourrait s'expliquer de plusieurs manières :

- La mesure et le modèle ne sont pas élaborés à des échelles réellement comparables.
- En terrain complexe, la turbulence joue un rôle non négligeable qui n'est pas très bien prise en compte dans les modèles du fait de la complexité physique. De ce fait, nous sommes obligés d'apporter une paramétrisation trop simplifiée de la couche limite atmosphérique (siège de la turbulence et de l'influence du sol sur l'écoulement atmosphérique) afin de pouvoir simuler l'écoulement au contact du sol.
- Enfin l'absence de données en région montagneuse et une hétérogénéité importante dans les substrats géographiques, non intégrée dans le modèle, pourraient expliquer ces écarts.

Finalement tout se passe comme si les modèles, soit, exagéraient la portée de la brise ascendante

issue de la plaine du Pô, et sous-estimaient la force et la portée de la brise provenant du littoral azuréen, soit, plus probablement, ne parvenaient pas à imposer une brise thermique à un flux synoptique (de nord) pourtant bien modéré. Dans le contexte de ce 10 août 2006, la brise azurée est manifestement capable d'opérer une large intrusion sur le versant italien.

## Conclusion

L'ambition majeure de cette étude était double : avoir un aperçu objectif, par la mesure, de la variabilité spatiale des concentrations d'ozone en milieu rural et montagnard, et croiser cette information avec des mesures et une modélisation fine des écoulements d'air dans le secteur concerné.

Il a bien été établi que l'on peut étudier localement la distribution spatiale des concentrations d'ozone à deux échelles bien distinctes : la micro-échelle, celle de la proximité des éléments perturbateurs (les parois, les murs, les gaz d'échappement, etc., font chuter sur quelques mètres les concentrations) ; et l'échelle topo-climatique, celle de la vallée, des pentes, etc. À cette dernière échelle, les teneurs sont plus fortes en dessous de 800 m d'altitude, mais augmentent près de la ligne de crête, par rapport au fond du vallon en altitude.

Les mesures d'écoulement d'air ont montré que l'air méditerranéen pollué au moins partiellement par l'agglomération littorale parvient bien jusqu'à la ligne de crête frontalière à haute altitude, et peut même la dépasser. Ces champs de vent peuvent être reproduits avec une fidélité décroissante quand on monte en altitude, le modèle sous-estimant l'influence de la brise thermique bien au-dessus du niveau du sol.

## Références

Les données de pollution en ozone des stations de  
L'Adrèchas et Nice-botanique  
proviennent du site internet de Qualitair, aujourd'hui remplacé par [www.atmopaca.org](http://www.atmopaca.org)

1. Académie des Sciences. Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère. Rapport n° 30. *Ed. Technique et Documentation-Lavoisier*, octobre 1993 Paris 262 p.
2. Gheusi F, Chevalier A, Delbarre H, Delmas R. Ozone et pollution atmosphérique à grande échelle, le réseau de surveillance PAES. *La Météorologie* 2007 ; 58 : 30-5.
3. Gheusi F, Chevalier A, Ravetta F, Delbarre H, Campistron B, Delmas R. Ozone et pollution atmosphérique à grande échelle, la campagne de mesures Pic 2005. *La Météorologie* 2007 ; 59 : 31-8.
4. Guicherit R, Roemer M. Tropospheric ozone trend. *Chemosphere-Global Change Science* 2000 ; 2 : 167-83.
5. Dalstein L, Gueguen C, Carrega P, Vas N, Sanchez O, Theodore B. Condition des forêts d'altitude en relation avec l'état de pollution à l'ozone dans la région niçoise. *Revue Pollution atmosphérique*, Paris, n° 188, Octobre-Décembre 2005, pp 503-20.
6. <http://www.meteoliguria.it/>
7. <http://www.meteosudest.org/>
8. <http://www.aires-mediterranee.org/>
9. <http://www.prevoir.org/fr/index.php>
10. Bogner JA, Birks JW. Miniaturized ultraviolet ozonesonde for atmospheric measurements. *Analytical chemistry* 1996 ; 68 : 3059-62.
11. Martin N. La pollution par l'ozone et la climatologie dans un espace méditerranéen : les Alpes-Maritimes Thèse de doctorat 2008 ; 281 p.
12. Martin N, Carrega P. La variabilité spatiale de l'ozone en milieu urbain et périurbain : le cas de Nice, *Pollution Atmosphérique*, 2009 ; 204 ; 461-74.
13. Martin N, Carrega P. La pollution par l'ozone dans les Alpes-Maritimes : premiers résultats. *Actes du XIX<sup>e</sup> colloque international de l'AIC*, Epernay. 2006 ; 409-14.
14. Carrega P. Topoclimatologie et habitat. *Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée*, 1994 ; 35 et 36 : 408 p.
15. Carrega P, Berolo W, Martin N. Tropospheric ozone and air circulation in the mountains of South-East France. *EGU congress*, 2005, Vienne.
16. Mitchell SJ, Lanquaye-Opoku N, Modzelewski H, Shen Y, Stull R, Jackson P, Murphy B, Ruel JC. Comparison of wind speed obtained using numerical weather prediction models and topographic exposure indices for predicting windthrow in mountainous terrain. *Forest Ecology and Management* 2008 ; 254 : 193-204.
17. Pirovano G, Coll I, Bedogni M, Alessandrini S, Costa MP, Gabusi V, Lasry F, Menut L, Vautard R. On the influence of meteorological input on photochemical modelling of a severe episode over coastal area.

