ETUDE LIDAR
DANS LE CADRE DU PROGRAMME POVA
(POLLUTION DES VALLEES ALPINES - JANVIER 2001)

Comité pour le contrôle de la Pollution Atmosphérique dans le Rhône et la région LYonnaise
Rue des Frères Lumière– Parc d'Affaires Roosevelt - 69120 VAULX-EN-VELIN - Tél. : 04 72 14 54 20 - Fax : 04 72 14 54 21
E_mail : coparly@atmo-rhonealpes.org – Internet : www.atmo-rhonealpes.org
N° SIRET :318 162 971 000 36 – Code APE : 913 E - Association loi du 1er juillet 1901

ÉTUDE LIDAR DANS LE CADRE DU PROGRAMME POVA

INTRODUCTION **2**

1 RAPPELS SUR LE DIOXYDE D'AZOTE **3**
1.1 EFFETS SUR LA SANTE ET SUR L'ENVIRONNEMENT 3
1.2 REGLEMENTATION 4

2 PRESENTATION DES MOYENS DE MESURE **6**
2.1 PRESENTATION GENERALE DU SYSTEME MOBILE 6
2.2 L'UNITE LIDAR 6
2.3 L'UNITE SODAR 7
2.4 AUTRES PARAMETRES METEOROLOGIQUES 8

3 CONTEXTE GENERAL ET METHODOLOGIES ADOPTEES **9**
3.1 VALLEE DE CHAMONIX 10
3.2 VALLEE DE LA MAURIENNE 14

4 RESULTATS DANS LA VALLEE DE CHAMONIX (18-19 JANVIER) **16**
4.1 CONDITIONS METEOROLOGIQUES 16
4.2 RESULTATS LIDAR 18

5 RESULTATS DANS LA VALLEE DE LA MAURIENNE (29-31 JANVIER) **30**
5.1 CONDITIONS METEOROLOGIQUES 30
5.2 RESULTATS LIDAR 32

CONCLUSION GENERALE **42**

INTRODUCTION

Le trafic routier entre la France et l'Italie a été profondément modifié par la fermeture du tunnel du Mont Blanc, suite à l'accident du 24 mars 1999, induisant un transfert important des flux automobiles de la vallée de l'Arve et de Chamonix vers la vallée de la Maurienne.

Afin de caractériser et mieux comprendre les phénomènes atmosphériques pouvant être liés à ces modifications, l'Air des 2 Savoie[1] a mis en œuvre le programme POVA (étude de la Pollution des Vallées Alpines) avec l'objectif de réaliser des campagnes de mesures intensives de la qualité de l'air dans ces vallées, avant et après la réouverture du tunnel.

Dans le cadre de cette étude, COPARLY [1] (Comité pour le Contrôle de la Pollution Atmosphérique dans le Rhône et la Région Lyonnaise) a été sollicité pour effectuer des mesures LIDAR[2], et permettre ainsi de suivre l'évolution spatio-temporelle de la pollution.

Après une étude de faisabilité sur la mesure de l'ozone en mars 2000, le LIDAR de COPARLY a participé à deux campagnes de mesures intensives, en janvier 2001, pour évaluer dans les deux vallées alpines les concentrations en dioxyde d'azote (NO_2), polluant majoritairement émis par le trafic.

Le présent rapport détaille les résultats obtenus lors de ces différentes campagnes de mesure qui pourront être intégrés aux autres volets de l'étude POVA.

[1] Associations Agrées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air
[2] Light Detection And Ranging : mesure de la pollution atmosphérique par technique laser

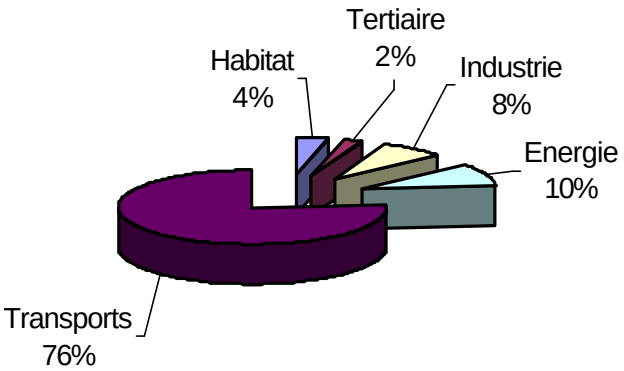
1 RAPPELS SUR LE DIOXYDE D'AZOTE

1.1 Effets sur la santé et sur l'environnement

Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2) sont formés par oxydation de l'azote atmosphérique (N_2) lors des combustions de carburants (essentiellement à haute température) et combustibles fossiles.
Ces oxydes d'azote (NO et NO_2), avec les composés organiques volatils, interviennent dans les processus de formation de la pollution photo-oxydante et notamment de l'ozone (O_3) dans la basse atmosphère (troposphère).

En France, les transports représentent environ ¾ des émissions d'oxydes d'azote[1]. Les sources fixes (installations de combustion, industries, procédés industriels…) sont responsables de 18% des émissions. Bien que l'équipement des automobiles par des pots catalytiques favorise une diminution unitaire des émissions d'oxydes d'azote, les concentrations dans l'air ne diminuent guère compte tenu de l'âge du parc automobile et de l'augmentation constante du trafic.
Le monoxyde d'azote, gaz incolore et inodore, est principalement émis par les véhicules à moteur thermique et se transforme rapidement par oxydation en dioxyde d'azote, gaz roux et odorant à forte concentration. La réaction est favorisée par le rayonnement ultra-violet (UV) du Soleil.

Emissions de NOx par secteurs d'activités en 1997



1.1.1 Santé

Le dioxyde d'azote pénètre dans les fines ramifications de l'appareil respiratoire et peut, à concentrations élevées, entraîner une altération de la fonction respiratoire et une hyper réactivité bronchique chez les asthmatiques. Chez les enfants, il augmente la sensibilité des bronches aux infections microbiennes.

1.1.2 Environnement

En plus d'intervenir dans le cycle de formation de l'ozone troposphérique, les oxydes d'azote contribuent également au phénomène du dépérissement forestier.

[1] Inventaire d'émission de l'année 1997 – CITEPA

1.2 Réglementation

Les réglementations française et européenne ont beaucoup évolué depuis 1996 avec notamment la parution des décrets d'application de la loi sur l'air de décembre 1996 (décret du 6 mai 1998) et la sortie, le 22 avril 1999, d'une directive européenne fixant les valeurs limites pour le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, les particules et le plomb.

1.2.1 La loi sur l'air

La **loi 96-1236 sur « l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie »** du 30 décembre 1996, qui s'appuie sur le **« droit reconnu à chacun de respirer un air qui ne nuise pas à sa santé »,** définit des **objectifs de qualité de l'air**, **des valeurs limites** et des **seuils d'alerte,** dont les valeurs sont résumée dans le tableau suivant pour le dioxyde d'azote :

OBJECTIFS DE QUALITE DE L'AIR		
niveaux de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances pour la santé humaine ou pour l'environnement.		
Polluant	Valeur (µg.m^{-3})	Base statistique
NO_2	**< 50** **< 135**	**Percentile 50** **Percentile 98**

VALEURS LIMITES			
niveau maximal de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, dans une période donnée, fixé sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances pour la santé humaine ou pour l'environnement.			
Polluant	Valeur (µg.m^{-3})	Base statistique	Période
NO_2	**< 200**	**Percentile 98**	**Année civile**

SEUILS D'ALERTE		
niveaux de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou de dégradation de l'environnement à partir duquel des mesures d'urgence doivent être prises.		
NIVEAU D'INFORMATION ET DE RECOMMANDATION		
Polluant	Valeur (µg.m^{-3})	Base statistique
NO_2	**200**	**Moyenne horaire**
NIVEAU D'ALERTE		
Polluants	Valeurs (µg.m^{-3})	Base statistique
NO_2	**400**	**Moyenne horaire**

Année civile : du 1er janvier au 31 décembre

1.2.2 Les directives européennes

La directive 96/62/CE du 27 septembre 1996 de l'Union Européenne, concernant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant, fournit le cadre à la législation communautaire sur la qualité de l'air.

Les quatre principaux objectifs de cette directive sont les suivants :

- Définir et fixer les objectifs concernant la pollution de l'air ambiant en Europe, afin d'éviter, de prévenir et de réduire les effets nocifs pour la santé humaine ou pour l'environnement dans son ensemble.
- Evaluer, sur la base de méthodes et de critères communs, la qualité de l'air ambiant dans les Etats membres.
- Disposer d'informations adéquates sur la qualité de l'air ambiant et faire en sorte que le public soit informé, entre autres par des seuils d'alerte.
- Maintenir la qualité de l'air ambiant lorsqu'elle est bonne et l'améliorer dans les autres cas.

L'annexe I de cette directive cite le **dioxyde de soufre**, le **dioxyde d'azote**, les **particules en suspension** et le **plomb** comme les polluants devant être en priorité pris en considération.

Les polluants mesurés dans le cadre de cette campagne de mesures font l'objet de valeurs limites selon les **directives filles** :

- **Directive 1999/30/CE** du 22 avril 1999 relative à la fixation de valeurs limites pour le SO_2, NO_2 et NOx, particules et plomb dans l'air ambiant.
- **Directive 2000/69/CE** du 16 novembre 2000 concernant les valeurs limites pour le benzène et le CO dans l'air ambiant.

VALEUR LIMITE HORAIRE POUR LA PROTECTION DE LA SANTE HUMAINE			
Polluants	Valeurs ($\mu g.m^{-3}$)	Période / Base	Date à laquelle la valeur doit être respectée
NO_2	**< 200**	**A ne pas dépasser plus de 18 fois par année civile**	**1er janvier 2010**
VALEUR LIMITE ANNUELLE POUR LA PROTECTION DES ECOSYSTEMES			
Polluants	Valeurs ($\mu g.m^{-3}$)	Période / Base	Date à laquelle la valeur doit être respectée
NOx	**< 30 (NO + NO2)**		**19 juillet 2001**

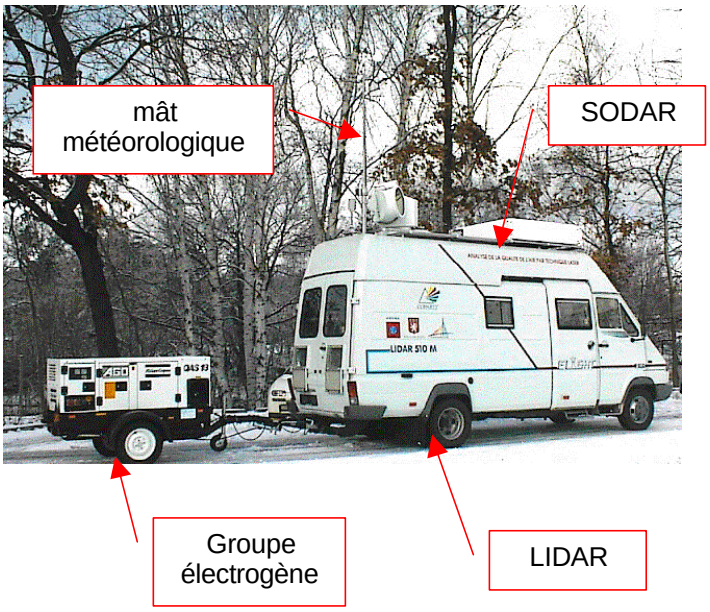
SEUILS D'ALERTE			
Polluants	Valeurs ($\mu g.m^{-3}$)	Période / Base	Date à laquelle la valeur doit être respectée
NO_2	**< 400**	**Sur 3 heures consécutives**	**19 juillet 2001**

2 PRESENTATION DES MOYENS DE MESURE

Pour cette étude, COPARLY a utilisé son camion laboratoire LIDAR d'analyse de la qualité de l'air par technique laser, équipé de moyens de mesures complémentaires permettant de déterminer les principaux paramètres météorologiques. Compte tenu de la spécificité des mesures par technique LIDAR, en fonction de la distance et de l'altitude, ces données sont primordiales pour l'analyse des signaux et l'interprétation des résultats.

2.1 Présentation générale du système mobile

Ce laboratoire mobile, est entièrement contrôlé par informatique (PC), au moyen d'un poste de commande installé dans le véhicule, utilisant un logiciel de programmation (LabVIEW). Par ailleurs, un système GPS ainsi qu'un compas enregistrent en permanence le positionnement du laboratoire mobile afin de permettre le géo-référencement de toutes les mesures et leur utilisation aisée en exploitation avec un SIG. Enfin, un groupe électrogène tracté, permet d'une part d'alimenter le laboratoire mobile (puissance de 18KVA), mais également le cas échéant une station complémentaire de capteurs fixes.



2.2 L'unité LIDAR

2.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe repose sur la diffusion et l'absorption de la lumière par la matière : lorsqu'une impulsion laser est envoyée dans l'atmosphère, en plus d'être absorbée, elle est diffusée dans toutes les directions par les molécules et particules présentes sur le trajet optique. Une faible partie de cette lumière est donc réémise vers l'arrière et l'atmosphère se comporte alors comme un miroir naturel. Un télescope permet de collecter le signal "rétrodiffusé" et de le focaliser vers une unité de détection pour l'analyser. La conversion en distance est obtenue à partir du temps mis par la lumière pour effectuer l'aller-retour jusqu'à la particule ou la molécule diffusante.

Pour mesurer spécifiquement la concentration d'un polluant gazeux, on utilise la technique DIAL[1] : chaque molécule possédant son propre spectre d'absorption en fonction de la longueur d'onde envoyée, il est souvent possible de choisir un couple de longueurs d'onde dont la différence d'absorption est très marquée pour le polluant mesuré, et très faible pour les autres polluants et le reste de l'atmosphère. L'analyse de la différence d'absorption entre les deux signaux rétrodiffusés permet donc de mesurer la concentration du polluant en fonction de la distance (typiquement sur 2-3 km).

Dans le LIDAR de COPARLY, le faisceau laser est envoyé via un périscope, permettant de balayer l'atmosphère dans plusieurs directions et d'obtenir ainsi des cartographies du polluant en deux dimensions (2D), en fonction de la distance et de l'altitude ou de l'altitude et du temps, accédant ainsi à sa dynamique spatio-temporelle.

[1] Differential Absorption LIDAR

2.2.2 Spécifications du LIDAR de COPARLY

Polluants mesurés et sensibilité :

Polluant	l_{ON} (nm)	l_{OFF} (nm)	Ds (*)	Energie	Sensibilité VDI-DIN (**)	Sensibilité INERIS (***)	Portée moyenne	Portée maxi
SO_2	286.9	286.3	4.05	5 mJ	8 µg.m^{-3}	2-8 µg.m^{-3}	2.5 km	4 km
O_3	282.4	286.3	10.1	5 mJ	2 µg.m^{-3}	4-6 µg.m^{-3}	2 km	4 km
NO_2	398.3	397.2	1.1	25 mJ	20 µg.m^{-3}	12-16 µg.m^{-3}	3 km	5 km
Toluène	266.9	266.1	11.9	7 mJ	10 µg.m^{-3}	4-5 µg.m^{-3}	2 km	4 km
Benzène	259.2	257.9	15.1	7 Mj	10 µg.m^{-3}	3-4 µg.m^{-3}	1.5 km	4 km
Aérosols	397.5	397.5	-	25 mJ	0.05 Km^{-1}	-	2 km	5 km

(*) : section efficace d'absorption, exprimée en 10^{-19}.cm^2
(**) : la sensibilité exprime la limite de détection, conformément à la norme VDI DIN 4210 (intégration spatiale sur 1000 mètres et intégration temporelle sur 15 minutes).
(***) : Déterminées lors des évaluations LIDAR, suivant la norme X20-300 appliquée aux instruments à long trajet optiques.
λ_{ON} , λ_{OFF} : longueurs d'onde utilisées pour les mesures DIAL (ON = forte absorption ; OFF = faible absorption)

Résolution spatiale optimale : 7,5 m

Point opératoire de début de mesure : environ 250 m

Résolution temporelle : limitée par la précision désirée sur la mesure et par la limite de détection (plus le temps de mesure est long, plus la limite de détection est faible). Une mesure dans une direction nécessite généralement 1 à 3 minutes selon les conditions climatiques.

Directions de tir : le télescope du LIDAR peut se mouvoir de 340° en azimut (angles horizontaux) et 180° en élévation (angles verticaux), couvrant ainsi toutes les directions situées au dessus de l'horizon. Cette gestion angulaire est entièrement pilotée par informatique.

Format des données : Un logiciel intégré d'interpolation permet de visualiser les concentrations mesurées sous forme de cartographie 2D (distance et altitude ou altitude et temps), avec un code de couleurs pour l'échelle des concentrations. Ces cartographies LIDAR sont exportables sous forme de matrices ASCII, compatibles avec les principaux utilisateurs de données LIDAR, permettant de traiter ensuite les résultats en utilisant un tableur standard (type Excel). Chaque mesure est complétée par sa précision (également sous la forme d'une matrice ASCII).

2.3 L'unité SODAR

2.3.1 Principe de fonctionnement

Le SODAR (Sound Detection And Ranging) permet, tel un radar acoustique, de mesurer à distance la direction et les vitesses horizontale et verticale des champs de vent. Le principe consiste à envoyer dans l'atmosphère de brèves impulsions acoustiques, et d'observer les signaux ré-émis vers la source, en fonction du temps. Une fois émise dans l'atmosphère, une partie de cette impulsion acoustique va se réfléchir en chaque point de son trajet, entraînant ainsi un décalage doppler, fonction de la vitesse du champ de vent en ce point. En analysant ce décalage en fréquence en fonction du temps, les vitesses horizontale et verticale du vent peuvent être déduites, en fonction de l'altitude. Les

champs de vents sont alors caractérisés sur une altitude[1] allant de 50 jusqu'à 1000 mètres (lorsque le bruit de fond environnant est inférieur à 40 dB et que les conditions météorologiques le permettent), avec une résolution de 50 mètres. Ces mesures permettent également d'obtenir une information sur la stabilité atmosphérique (effets de cisaillement,…).

2.3.2 Spécificités du SODAR de COPARLY

Portée maximale : 1000 m d'altitude (en situation optimale, i.e. bruit de fond inférieur à 40 dB et site très dégagé).

Résolution spatiale : 50 m

Résolution temporelle : limitée par la précision désirée sur la mesure et par la limite de détection (plus le temps de mesure est long, plus la limite de détection est faible). La résolution temporelle généralement choisie est de 30 ou 60 min.

Direction de tir : la mesure effectuée est un profil vertical (Zénith), à l'aplomb du SODAR.

Etude optimale : Profil vertical intégré sur 60 min. Il n'existe aucune limite temporelle et son fonctionnement ne nécessite aucun moyen humain. Des mesures peuvent donc être faites durant plusieurs jours, voire quelques semaines. Néanmoins, il est nécessaire de placer le SODAR sur un site suffisamment éloigné des habitations, compte tenu des ondes acoustiques envoyées dans l'atmosphère et dont certaines sont émises dans le domaine audible, pouvant parfois provoquer certains problèmes avec le proche voisinage.

Format des données : Le SODAR, construit par la société REMTECH SA, fournit des données ayant un format semblable à celui de EDF ou encore à celui de Météo France. Un module d'export a été développé en interne, afin d'obtenir des résultats sous la forme de fichiers textes de type ASCII, utilisables avec un tableur standard.

2.4 Autres paramètres météorologiques

D'autres mesures peuvent être réalisées avec un mât météorologique, dont l'extension maximum est de 5m (en plus des 3,80m du toit du LIDAR où il est installé). Les paramètres mesurés sont les suivants : température, pression, humidité relative, rayonnement global, luminosité, vitesse et direction du vent.

Un logiciel permet de récupérer les données sur le poste central et de les exporter sous forme de fichiers de type ASCII, pouvant être très simplement traités avec un tableur standard.

[1] Hauteur relative à l'altitude du SODAR.

3 CONTEXTE GENERAL ET METHODOLOGIES ADOPTEES

En janvier 2001, le LIDAR de COPARLY a participé à deux campagnes de mesures intensives du programme POVA, organisées par l'Air des 2 Savoie, en collaboration avec l'équipe de J.L.Jaffrezo du Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (Université J.Fourier de Grenoble) : l'une dans la Vallée de Chamonix, avec des mesures LIDAR effectuées les 18 et 19 janvier ; l'autre dans la vallée de la Maurienne, du 29 au 31 janvier.

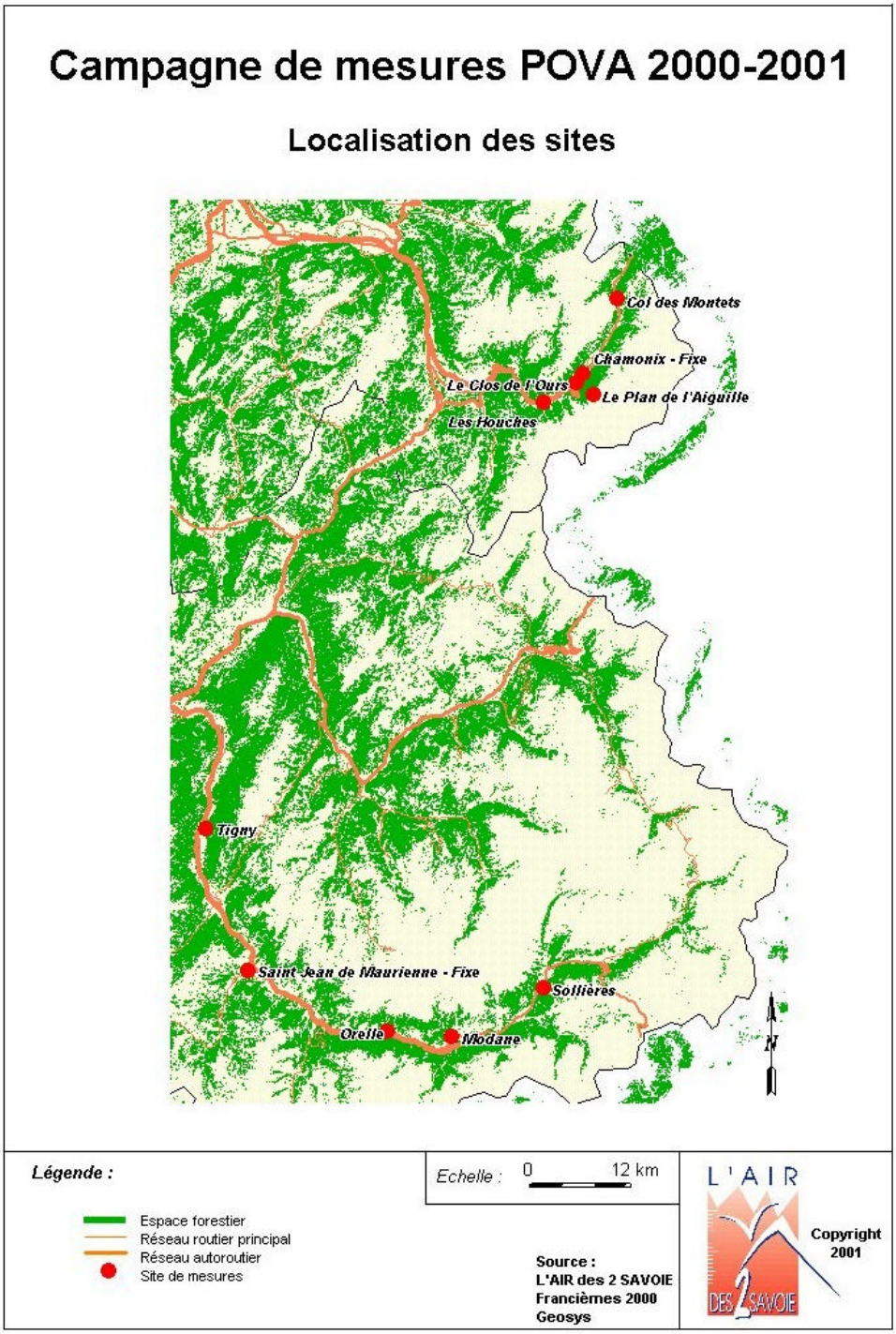


Figure 1: Visualisation des 2 vallées alpines et des sites de mesure de l'Air des 2 Savoie

3.1 Vallée de Chamonix

3.1.1 Présentation du site (Chamonix - Les Houches)

La vallée de Chamonix se situe entre la chaîne du Mont-Blanc et celle des Aiguilles Rouges et du Brévent, à une vingtaine de kilomètres de la frontière italienne. Elle est orientée nord-est/sud-ouest entre Argentière et Chamonix, et prend une forme de "U" à partir des Houches vers St-Gervais-les-Bains, avec une orientation nord-ouest/sud-est (cf. *Figure 1*). L'altitude moyenne au fond de la vallée est d'environ 1000-1050m. L'accès au tunnel du Mont-Blanc se situe à environ 2km du centre ville de Chamonix, et s'effectue par la route national N205 en venant des Houches (voie rapide E25), ou par la nationale N506 à partir de Chamonix.

3.1.2 Campagne préliminaire (ozone – mars 2000)

COPARLY a été sollicité une première fois en mars 2000 pour étudier la faisabilité d'effectuer des mesures LIDAR dans la vallée. Le site retenu se trouvait sur une aire dégagée le long de la nationale N506, à l'aplomb du tunnel du Mont Blanc, à environ 1,5km du centre ville de Chamonix. Cette campagne d'essai a duré deux jours et le polluant mesuré était l'ozone.

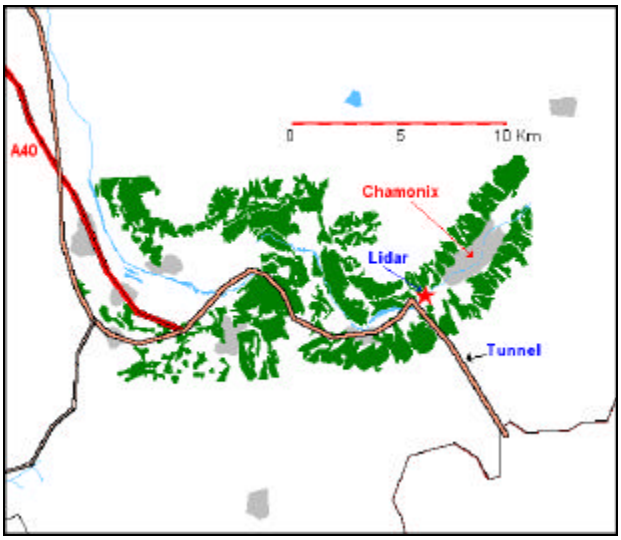


Figure 2 : Emplacement du LIDAR pour la campagne d'essai dans la vallée de Chamonix

Les coordonnées du site relevées par le GPS du camion LIDAR sont :
Longitude Est : 6° 51,014'
Latitude Nord : 45° 54,571'

Durant ces deux jours (les 9 et 10 mars), des profils angulaires LIDAR ont été effectués dans l'axe de la vallée et perpendiculairement à cet axe, pour caractériser la répartition spatiale et la dynamique des concentrations d'ozone. Un exemple parmi les cartes de concentrations obtenues lors de cette campagne est présenté *Figure 3* et *Figure 4*.

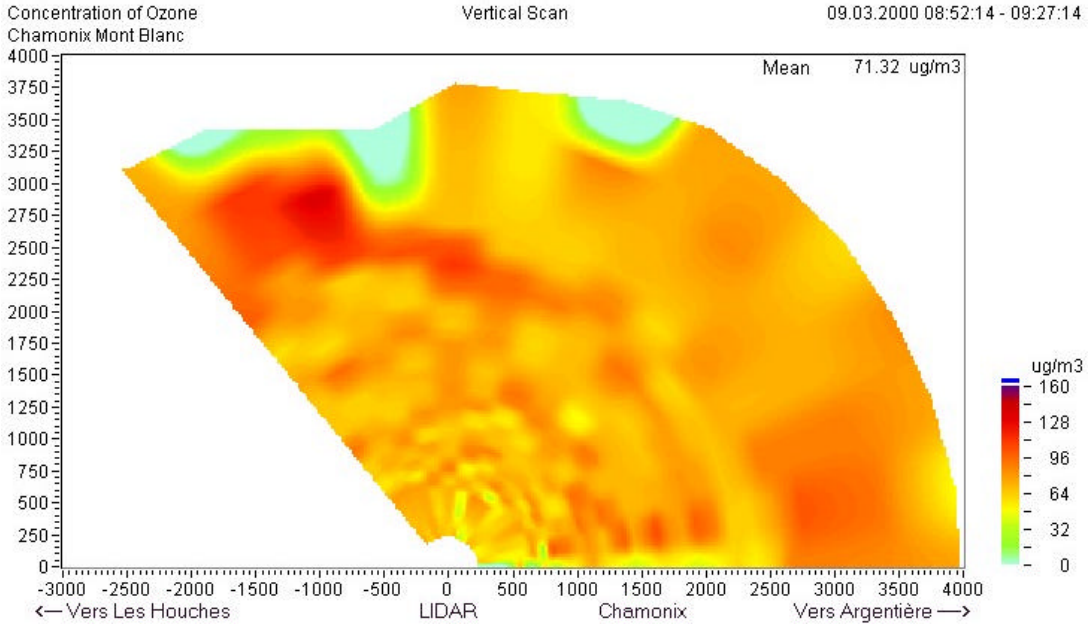


Figure 3 : Profil angulaire d'ozone, effectué le 9 mars 2000 entre 8h50 et 9h30 (heure locale) dans l'axe de la vallée de Chamonix

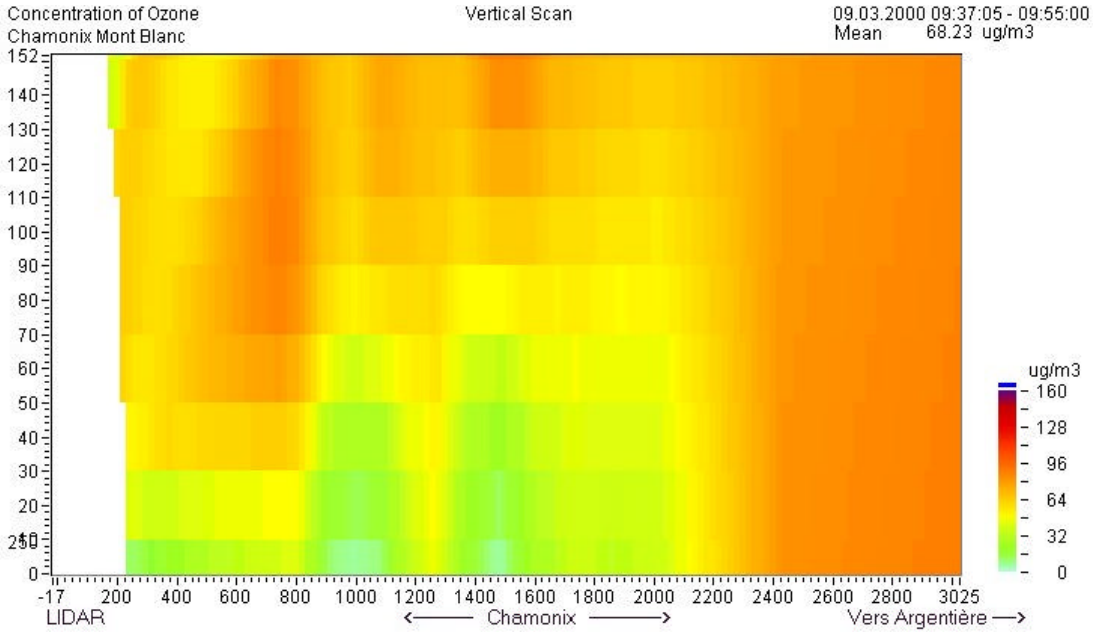


Figure 4 : Profil angulaire d'ozone, effectué le 9 mars 2000 vers 09h45 (heure locale) Résultats sur le centre ville de Chamonix

Outre le fait de valider la possibilité d'effectuer des mesures LIDAR dans la vallée, cette pré-étude a permis de mettre en évidence les inhomogénéités horizontales et verticales de l'ozone au cours de la journée et l'impact des masses d'air en altitude. Les résultats ont notamment souligné l'apparente influence locale du trafic routier sur la dynamique de l'ozone à proximité de Chamonix, en comparaison des concentrations mesurées dans le reste de la vallée. D'autre part, les mesures effectuées en altitude ont montré la probable influence de la vallée vis-à-vis de la dispersion de l'ozone (effet de réservoir), à corréler avec les conditions météorologiques du moment.
L'utilisation du LIDAR semblait donc intéressante à poursuivre, notamment pour étudier plus précisément l'influence du trafic automobile avec des mesures de concentrations en dioxyde d'azote.

3.1.3 Méthodologie adoptée

A la suite de cette pré-étude, et afin de visualiser au mieux le trafic dans les deux parties de la vallée, le site a été déplacé d'environ 1km au sud-ouest : Le LIDAR était situé à quelques centaines de mètres de la route d'accès au tunnel, toujours sur une aire dégagée bordant la nationale (N205), à environ 2,5 km du centre ville de Chamonix et environ 5 km du centre ville des Houches (cf. *Figure 5*).

Les coordonnées du site relevées par le GPS du camion LIDAR sont :
Longitude Est : 6° 51,024'
Latitude Nord : 45° 54,525'

Les tirs ont été de nouveau réalisés dans des plans verticaux selon plusieurs angles d'élévation zénithale, alternativement en direction de Chamonix et des Houches, mais avec un changement d'azimut entre les deux parties de la vallée :

- pour la direction de Chamonix : 40° vs nord (⇒ nord/est)
- pour la direction des Houches : 252° vs nord (⇒ ouest/sud-ouest)

Figure 5: Positionnement du LIDAR et direction des tirs (projection des plans verticaux) dans la vallée de Chamonix

Les mesures LIDAR présentées dans la 4ème partie ont été réalisées en continu du 18/01/01 15h20 au 19/01/01 08h00 (heures locales).

Les angles et les pas entre les élévations angulaires ont été modifiés selon la situation météorologique (nuages,…), mais ils se situaient toujours dans le même plan vertical et avec un angle minimum le plus proche possible de l'horizontal (± 85°). Les balayages angulaires effectués sont schématisés sur les figures présentées ci-après ; la durée d'acquisition pour chaque tir LIDAR se situait entre 1 et 2 minutes.

L'unité SODAR était située sur le toit du camion LIDAR. Les mesures ont été réalisées avec une intégration temporelle d'une demi-heure, mais toutes les données n'ont pu être exploitées, en raison de certains dysfonctionnements (voir paragraphe suivant).

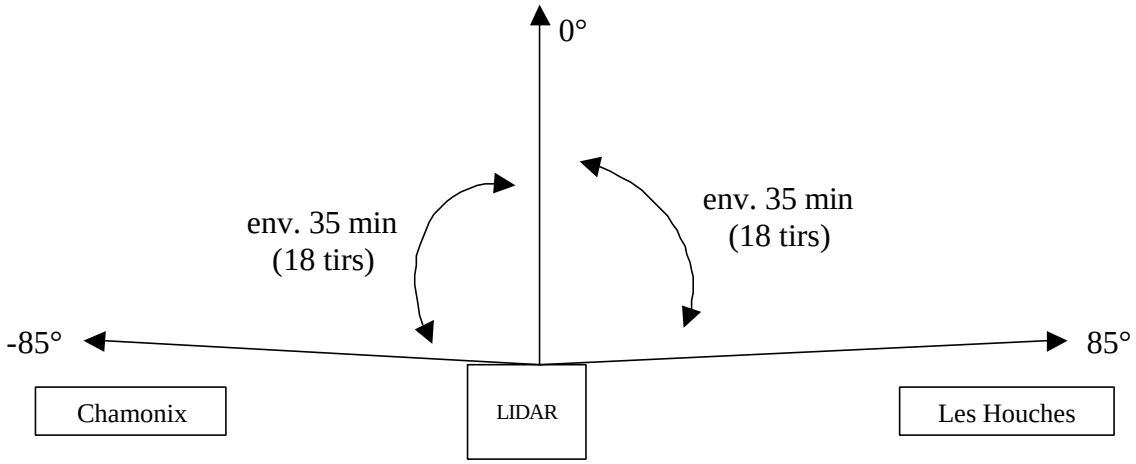


Figure 6 : Balayages verticaux réalisés avec le LIDAR dans la vallée de Chamonix par temps dégagé

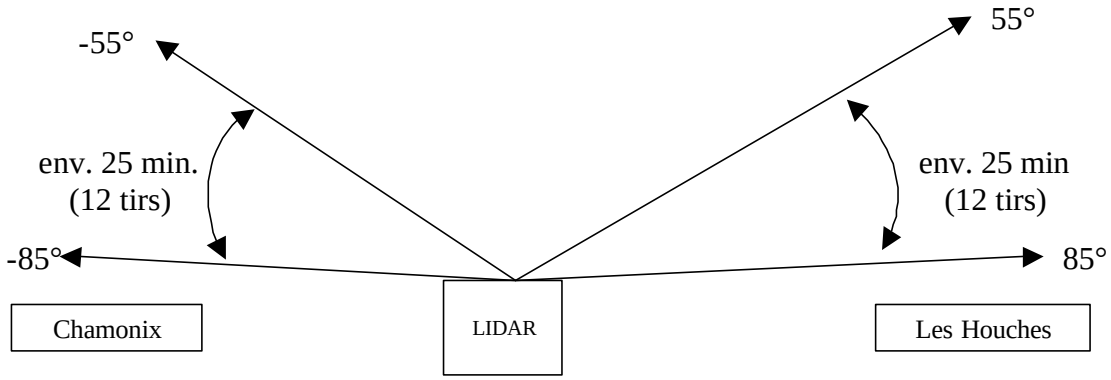


Figure 7 : Balayages verticaux réalisés avec le LIDAR dans la vallée de Chamonix par temps nuageux

3.1.4 Périodes de dysfonctionnement

Pour le LIDAR, aucun dysfonctionnement du système n'est à signaler, mais les conditions climatiques se sont dégradées au fur et à mesure de la campagne, avec même de la pluie et de la neige vers 02h00 le 19 janvier. Malgré l'augmentation de la durée d'acquisition des signaux, la précision des mesures LIDAR s'en est trouvée fortement affectée : elle varie alors entre 10 et 30 $\mu g.m^{-3}$.

Le SODAR n'a fonctionné que de 14h00 à 20h00 le 18/01 et de 22h00 le 18 à 00h30 le 19/01 (heures locales) suite à des dysfonctionnements répétés du système informatique. Le dépouillement des résultats a donné sept mesures demi-horaires valides.

3.2 Vallée de la Maurienne

3.2.1 Présentation du site (St-Jean de Maurienne – St-Julien Mont Denis)

La vallée de la Maurienne se situe le long du massif de la Vanoise, entre 1000m et 1100m d'altitude, à une quinzaine de kilomètres de l'Italie. L'accès à la frontière s'effectue par le Tunnel du Fréjus à partir de Modane. Les principaux axes de circulation dans la vallée sont la route nationale N6 et l'autoroute A43-E70, suivants le cours de l'Arc. Les différentes orientations de la vallée et son escarpement dû à la proximité des montagnes ont rendu difficile le choix du positionnement du LIDAR.

3.2.2 Méthodologie adoptée

Après plusieurs repérages, le choix s'est porté sur un site suffisamment dégagé à l'entrée de la vallée, sur la commune de St-Julien Mont Denis, à 4-5km des deux centres urbains de St-Jean de Maurienne et St-Julien Mont Denis, et un peu surélevé par rapport aux axes de circulation (cf. *Figure 8* et photo page suivante).

Les coordonnées du site relevées par le GPS du camion LIDAR sont :
Longitude : 6° 23,862'
Latitude : 45° 15,227'

Les tirs ont été effectués dans un même plan vertical, alternativement vers St-Jean de Maurienne (304° vs nord) et vers St-Julien Mont Denis (124° vs nord).

Le contexte géographique et la position du LIDAR sont représentés sur la figure suivante :

Figure 8 : Positionnement du LIDAR et direction des tirs (projection des plans verticaux) dans la vallée de la Maurienne

Les mesures ont été réalisées en continu du 29/01/01 15h00 au 31/01/01 15h00 (heures locales).

Compte tenu des mauvaises conditions météorologiques durant la campagne (nuages bas, brume,…), la stratégie adoptée fut de choisir des angles peu élevés et une longue durée d'acquisition, soit environ 3'30" pour chaque mesure.

L'unité SODAR était de nouveau située sur le toit du camion LIDAR, et les mesures ont été effectuées avec une intégration temporelle d'une demi-heure.

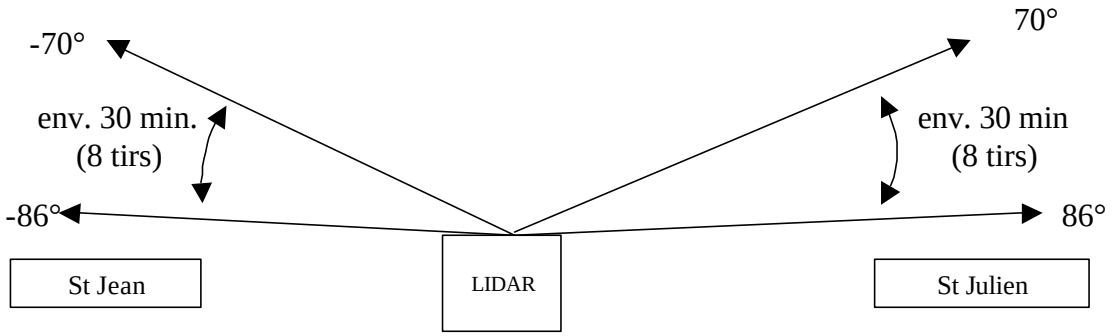


Figure 9 : Balayages verticaux réalisés avec le LIDAR dans la vallée de la Maurienne

3.2.3 Périodes de dysfonctionnement

Des problèmes sont survenus avec le LIDAR le 30/01 entre 18h40 et 19h15, et la nuit du 31/01 entre 02h50 et 03h20 (heures locales) : arrêts brusques du système laser suite à une trop forte hausse de la température dans le système de refroidissement. Une baisse conséquente de la puissance du laser a contraint les opérateurs du système à nettoyer toutes les optiques et redémarrer le système, le 31/01 de 05h00 à 07h20. Enfin, un défaut de calibration des longueurs d'onde a nécessité d'invalider les mesures du 31/01 de 07h30 à 11h15.

Les données météorologiques ont pu être exploitées pour les trois jours de mesure, excepté pour la vitesse horizontale du vent (défaillance du programme d'acquisition).

Les mesures du SODAR ont pu être exploitées du 30/01 09h00 au 31/01 06h30, avec une période d'arrêt, de 20h00 à 23h00.

Photo du camion laboratoire LIDAR dans la vallée de la Maurienne

4 RESULTATS DANS LA VALLEE DE CHAMONIX (18-19 janvier)

4.1 Conditions météorologiques

Les conditions climatiques ont été relativement perturbées durant la période de mesure : la couverture nuageuse formait un plafond s'abaissant au fur et à mesure de la nuit du 18 au 19, avec de la pluie et de la neige vers 02h00 du matin, puis un temps restant brumeux jusqu'à la fin de la campagne.

4.1.1 Données du mât météorologique

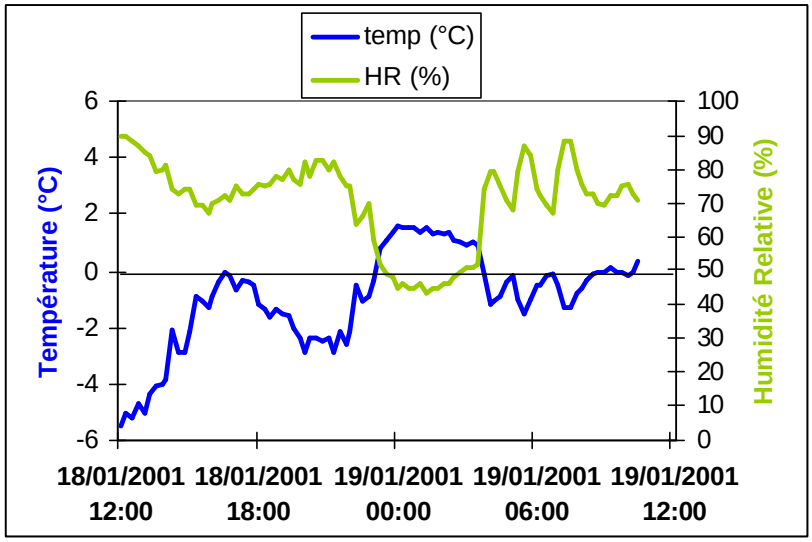


Figure 10 : Température et Humidité Relative sur le site du LIDAR du 18 au 19 janv. 2001

Les températures sont restées très basses (< 0) durant pratiquement toute la période de mesure. Une légère hausse a été observée durant la nuit du 18 au 19, corrélée avec une baisse de l'humidité relative et les précipitations observées.

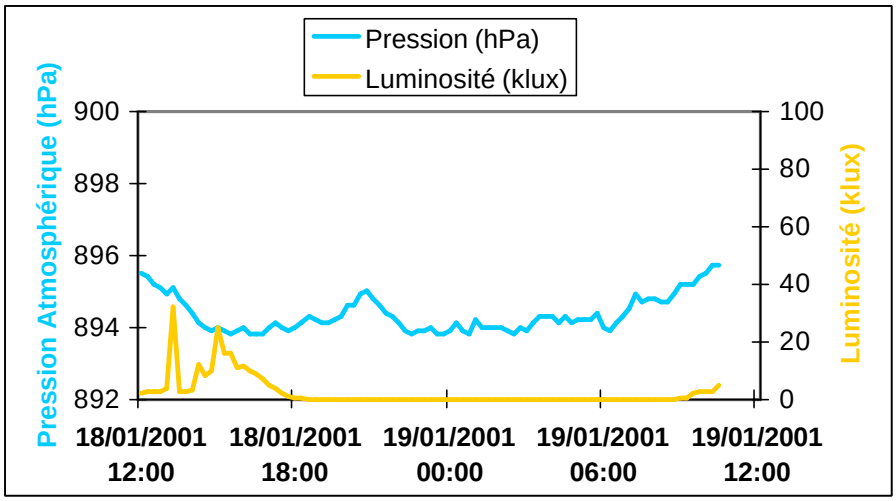


Figure 11 : Pression atmosphérique et luminosité sur le site du LIDAR du 18 au 19 janv. 2001

La pression atmosphérique était assez basse (situation dépressionnaire) et stable tout au long de la période. En cohérence avec les conditions évoquées plus haut, la luminosité enregistrée est très faible, limitant d'autant les réactions photochimiques.

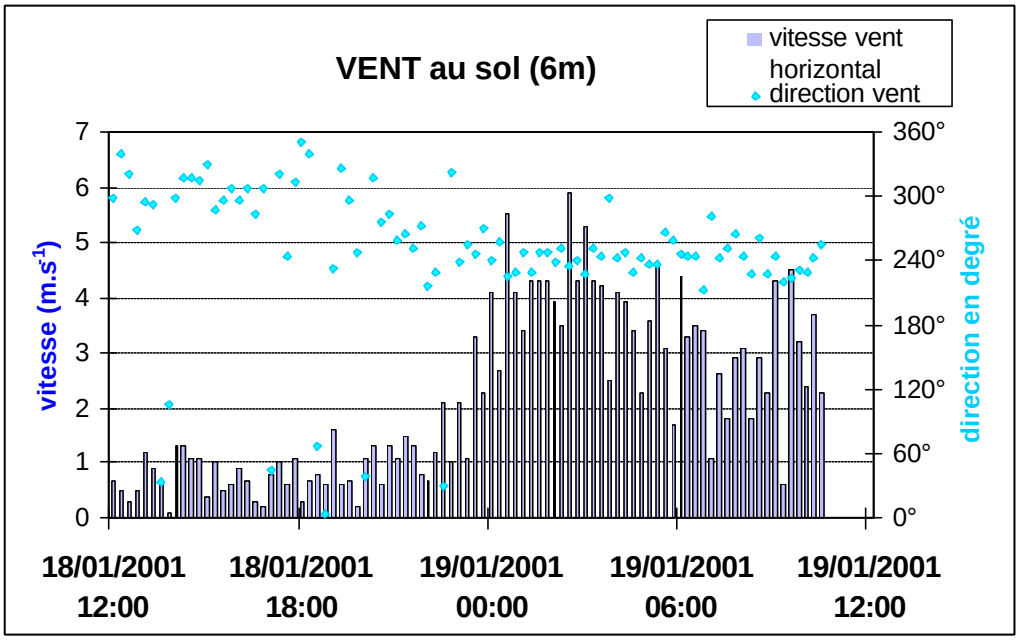


Figure 12 : Vitesse et direction du vent mesurées par le mât météorologique sur le camion LIDAR du 18 au 19 janvier 2001

Les données de vent sont cohérentes avec la topographie du site : le vent pénètre par la partie ouest de la vallée (Les Houches) durant toute la période de la campagne. Quant à la force du vent, elle est très faible en début de campagne puis s'intensifie à partir du 18 janvier 23h00.

4.1.2 Données SODAR

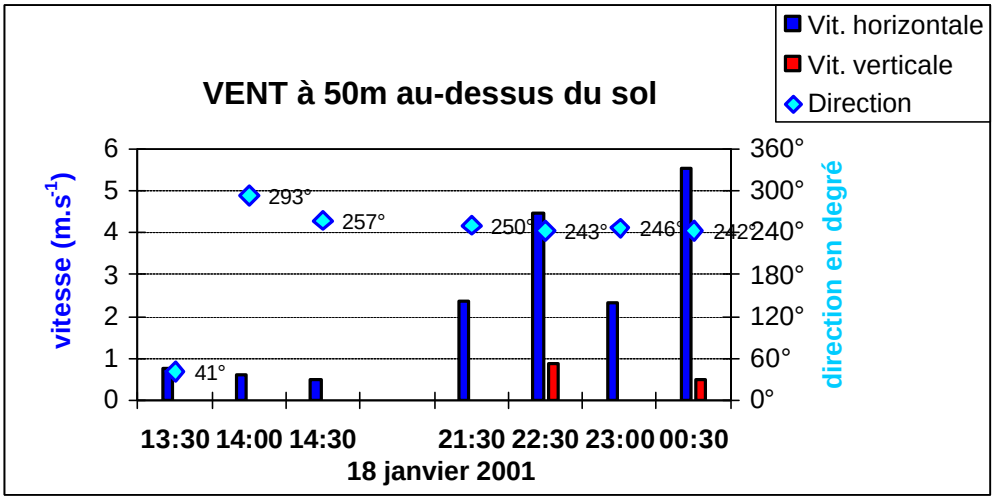


Figure 13 : Vitesse et direction du vent mesurées par le SODAR (à 50m) au-dessus du camion LIDAR du 18 au 19 janvier 2001

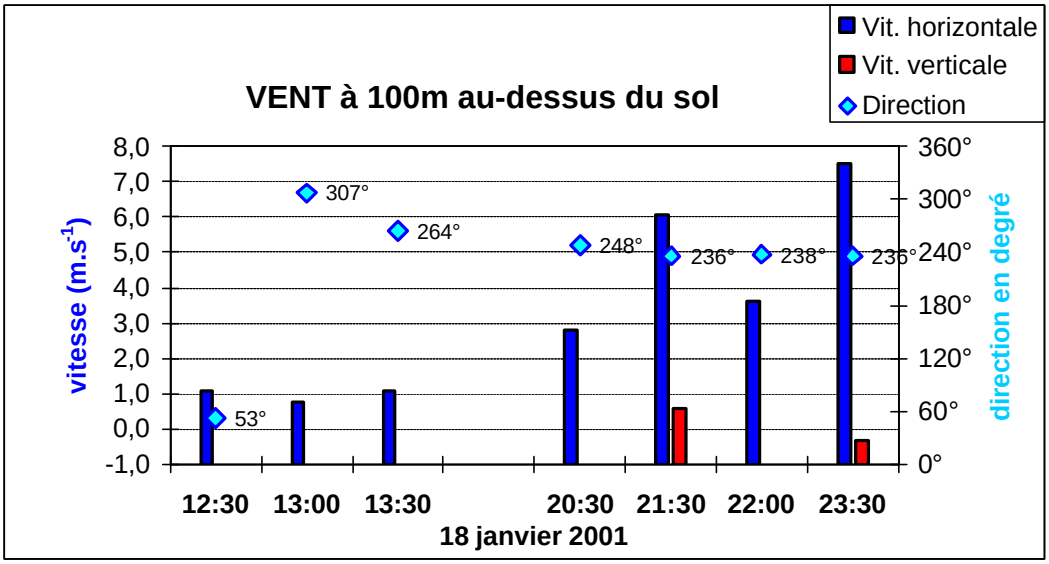


Figure 14 : Vitesse et direction du vent mesurées par le SODAR (à 100m) au-dessus du camion LIDAR du 18 au 19 janv. 2001

Compte tenu de la couverture nuageuse, seules les données à 50m et 100m sont exploitables, et les valeurs sont cohérentes avec les mesures du mât météorologique. A noter que les quelques valeurs qui ont pu être exploitées au-delà de 100m laissent présumer que la direction du vent était stable à toutes les altitudes (pas d'effet de cisaillement) et que la vitesse augmente progressivement avec l'altitude.

4.2 Résultats LIDAR

Selon la méthodologie décrite au chapitre précédent, les balayages angulaires ont été réalisés alternativement vers Chamonix et vers Les Houches et duraient approximativement une demi-heure chacun. L'exploitation des résultats a permis de traiter 11 profils angulaires en direction de Chamonix et 10 en direction des Houches.

Au vu des résultats, il a semblé intéressant d'observer plus précisément une partie du trajet optique correspondant aux mesures situées au-dessus des axes de circulation (N205 et N506). Les mesures ayant été réalisées sans trop de discontinuité, les résultats sont ensuite présentés sous forme de profils verticaux temporels, dont l'évolution aux basses altitudes peut être comparée aux résultats de mesure des analyseurs au sol.

Attention aux échelles : les échelles de concentrations ont été parfois adaptées pour visualiser les valeurs mesurées de manière contrastée. Le code des couleurs n'est donc pas toujours identique, notamment entre les profils angulaires et les graphes temporels.

4.2.1 Mesures en direction de Chamonix

4.2.1.1 Visualisation des profils 2D

Les signaux LIDAR ont pu être traités jusqu'à une distance d'environ 4000m et une altitude[1] d'environ 2000m, avec un pas d'intégration de 20m et une précision de mesure variant de 10 à 30 µg.m^{-3} en fonction des heures (dû aux conditions climatiques et aux durées d'acquisition des signaux).

Un exemple de profil angulaire 2D (concentration en fonction de la distance et de l'altitude), situant le LIDAR vis-à-vis de la vallée en direction de Chamonix, est présenté *Figure 15*. L'ensemble des profils réalisés du 18 au 19 janvier est présenté sur les *Figures 16 (a-k)* et permet de visualiser l'évolution spatiale et temporelle des concentrations en dioxyde d'azote dans la vallée.

[1] Altitude par rapport au sol

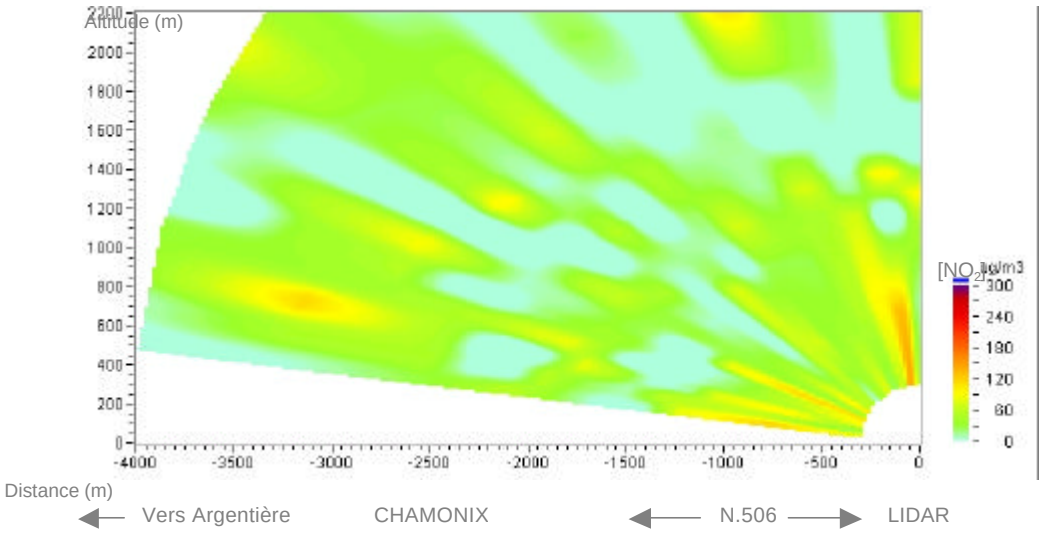
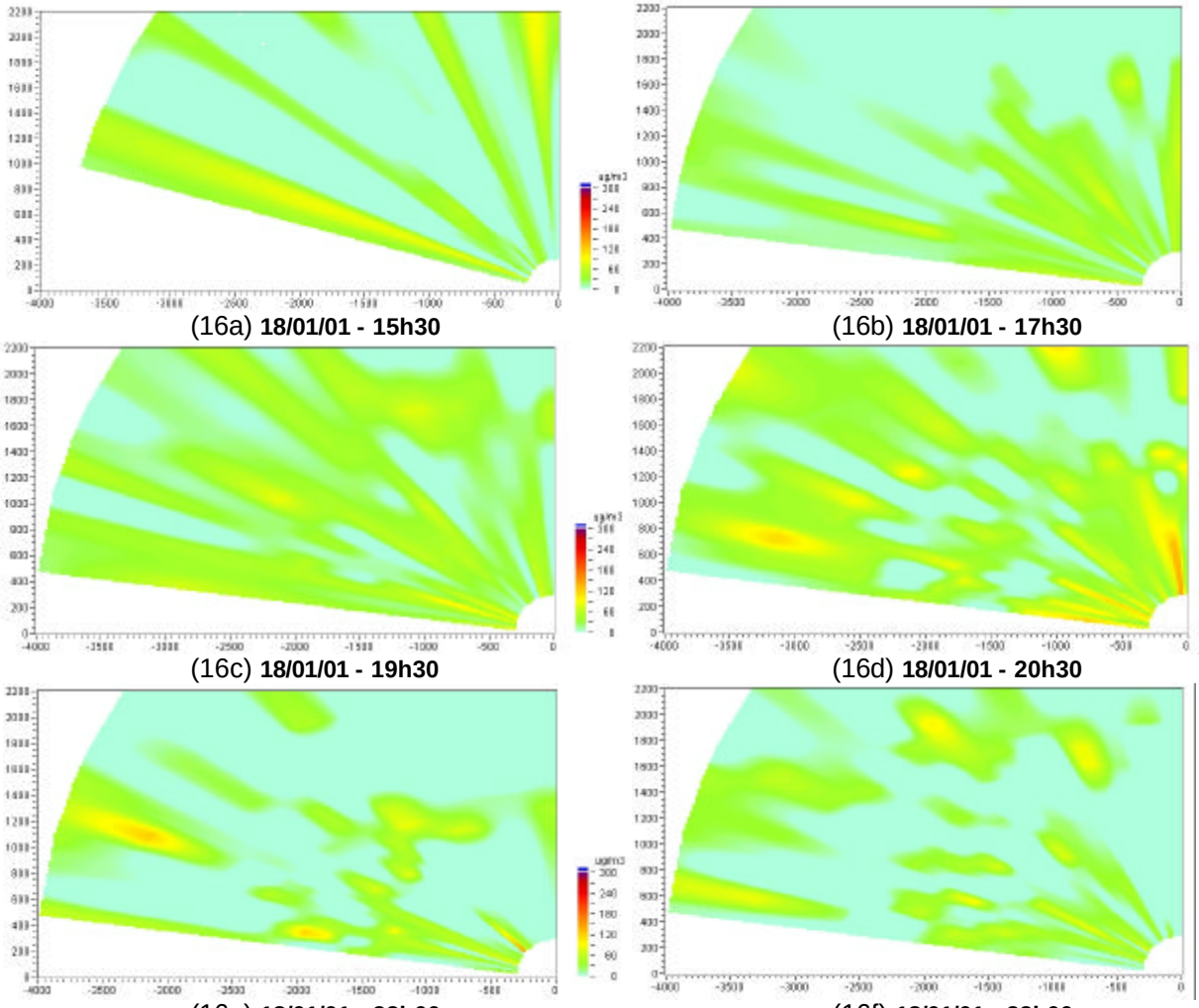


Figure 15 : Exemple de profil angulaire LIDAR réalisé en direction de Chamonix, concentrations en NO_2 le 18 janvier 2001 vers 20h30 (heure locale)



(16a) **18/01/01 - 15h30**

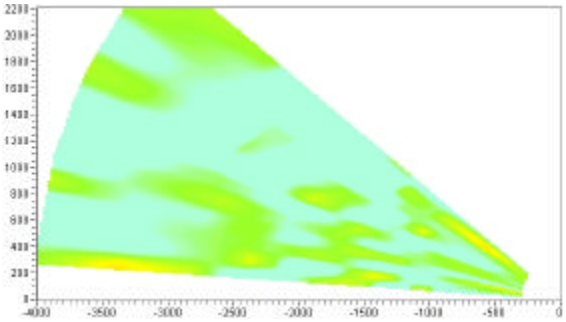
(16b) **18/01/01 - 17h30**

(16c) **18/01/01 - 19h30**

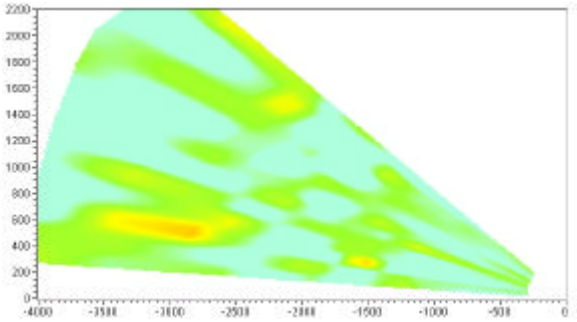
(16d) **18/01/01 - 20h30**

(16e) **18/01/01 - 22h00**

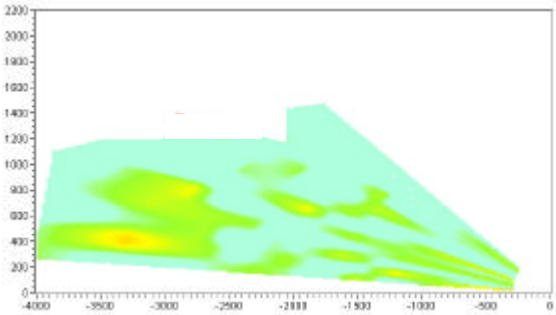
(16f) **18/01/01 - 23h00**



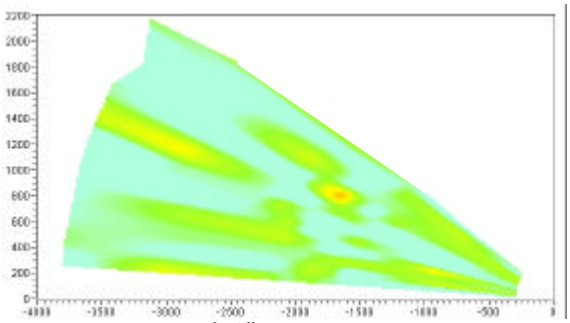
(16g) **19/01/01 - 00h30**



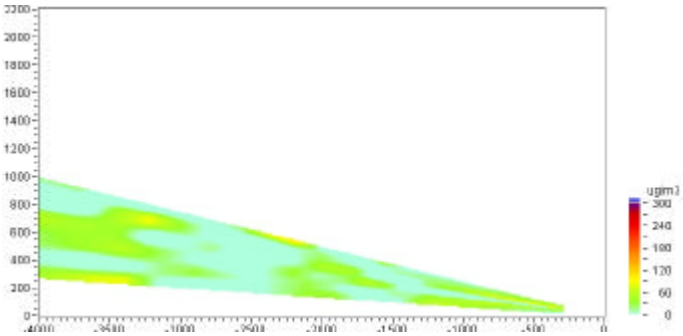
(16h) **19/01/01 - 01h30**



(16i) **19/01/01 - 02h30**



(16j) **19/01/01 - 04h30**



(16k) **19/01/01 - 07h30**

Figures 16 (a-k) : Profils angulaires LIDAR (concentration en NO_2) réalisées en continu dans la vallée de Chamonix du 18 janvier 15h00 au 19 janvier 07h30 (heures locales)

Le premier profil réalisé aux alentours de 15h30 (16a) paraît plus lissé que les autres, du fait que les 18 angles étaient balayés depuis l'horizontale jusqu'à la verticale de façon continue. Les balayages suivants ont été effectués en croisant les élévations afin d'optimiser l'intervalle de temps entre les mesures au sol et en altitude. D'autre part, la dégradation des mesures en altitude durant la nuit (16g-k), s'explique par la baisse progressive du plafond nuageux et l'arrivée de précipitations.

Néanmoins, ces profils 2D montrent bien la dynamique spatiale et temporelle du dioxyde d'azote dans la vallée : l'augmentation des concentrations est assez localisée au niveau des axes de circulation aux heures de trafic, entre 19h00 et 21h00 (16c,d), suivi d'une homogénéisation progressive des concentrations dans la vallée et en altitude ; la diminution rapide des concentrations vers 22h00, peut être corrélée avec l'augmentation du vent, favorisant la dispersion (cf. données SODAR).

Quelques "bulles" de NO_2 localisées sont également visibles au-delà du centre ville de Chamonix, entre 3000m et 3500m, donnant l'impression de suivre une certaine ascendance (pouvant être due au vent), et semblant se répéter durant la nuit (16d,e,g,h,i,j). Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées (combustion industrielle, chauffages d'habitations,…) mais la faible durée de la campagne ne permet d'en préciser la nature.

4.2.1.2 Visualisation temporelle

Grâce à la méthodologie adoptée, d'effectuer des balayages continus et suffisamment rapprochés dans le temps, il a été possible d'interpoler les résultats pour toute la période de la campagne. Le graphe d'évolution temporelle du profil vertical de la concentration en NO_2 en direction de Chamonix, moyennée sur l'ensemble de la vallée, est représenté sur la *Figure 17*.

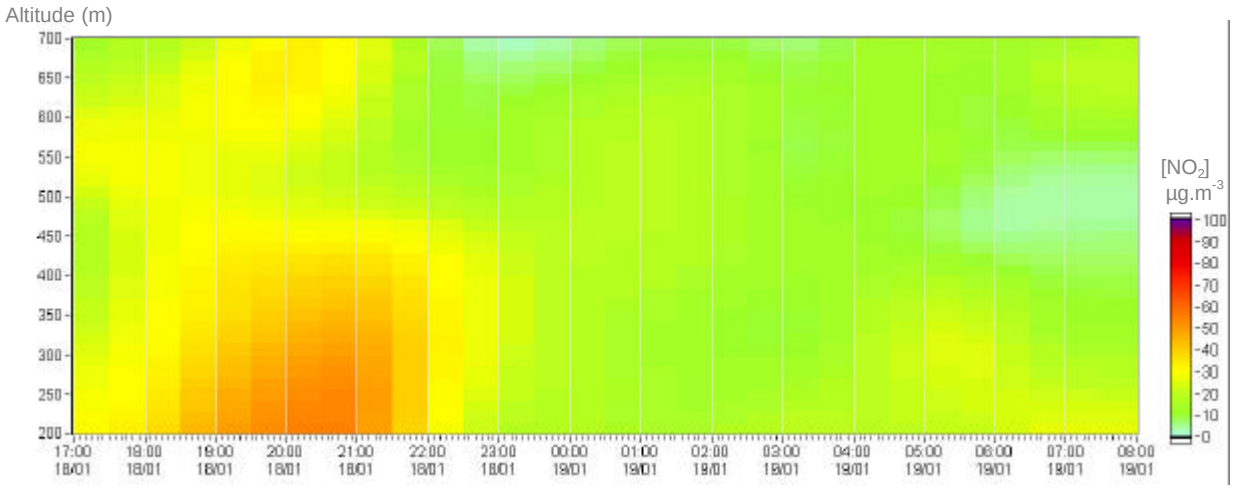


Figure 17 : Profil vertical temporel de la concentration en NO_2 dans la vallée de Chamonix, en direction de Chamonix, du 18 au 19 janvier 2001 (17h00-08h00)

Cette représentation temporelle globale facilite la visualisation de l'effet du trafic, en minimisant les effets des "bulles" localisées. Les concentrations les plus importantes se situent entre 50 et 60 µg.m^{-3} (vers 20h30), et les concentrations de fond entre 15 et 20 µg.m^{-3}. Les mesures avant 17h00 n'ont pas été prises en compte car la précision des résultats n'était pas satisfaisante. L'incertitude pour les mesures présentées varie entre 7 et 15 µg.m^{-3} comme le montre le graphe suivant :

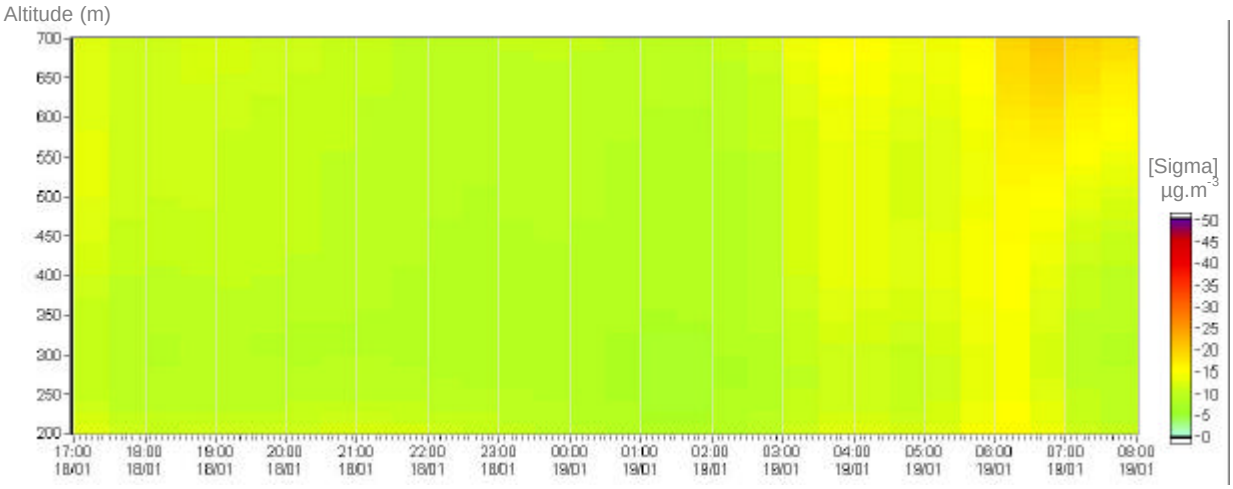


Figure 18 : Incertitudes sur les concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent (vallée en direction de Chamonix, du 18 au 19 janvier 2001)

Afin d'étudier plus précisément l'influence du trafic routier, nous avons réalisé une seconde analyse des données, en se focalisant sur une partie du trajet optique des tirs LIDAR, correspondant à la section située au-dessus de la route nationale N506. Un exemple de mesures obtenues dans la zone étudiée, située à une distance comprise entre 500m et 1500m du LIDAR, est présenté *Figure 19*.

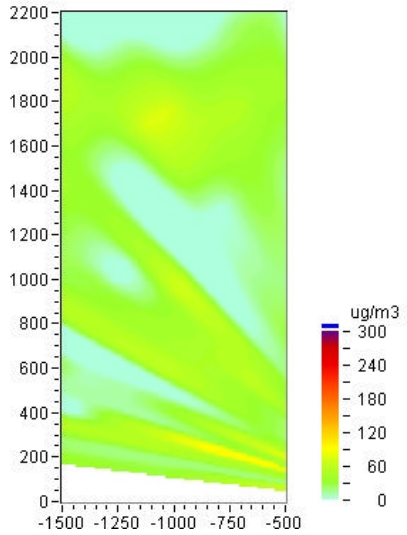


Figure 19 : Mesures LIDAR au-dessus de la nationale N506 (vers Chamonix), le 18 janvier 2001 vers 19h30

Une nouvelle interpolation des résultats sur l'ensemble de la période a été réalisée. Le graphe des concentrations obtenues et celui de leur précision sont présentés ci-dessous :

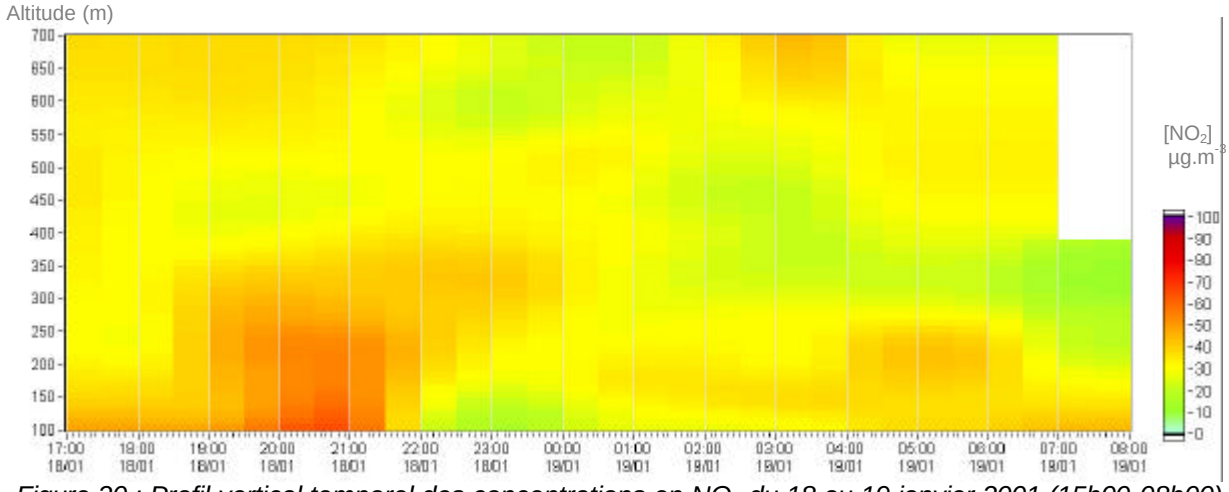


Figure 20 : Profil vertical temporel des concentrations en NO_2 du 18 au 19 janvier 2001 (15h00-08h00) au-dessus de la nationale N506 (vers Chamonix)

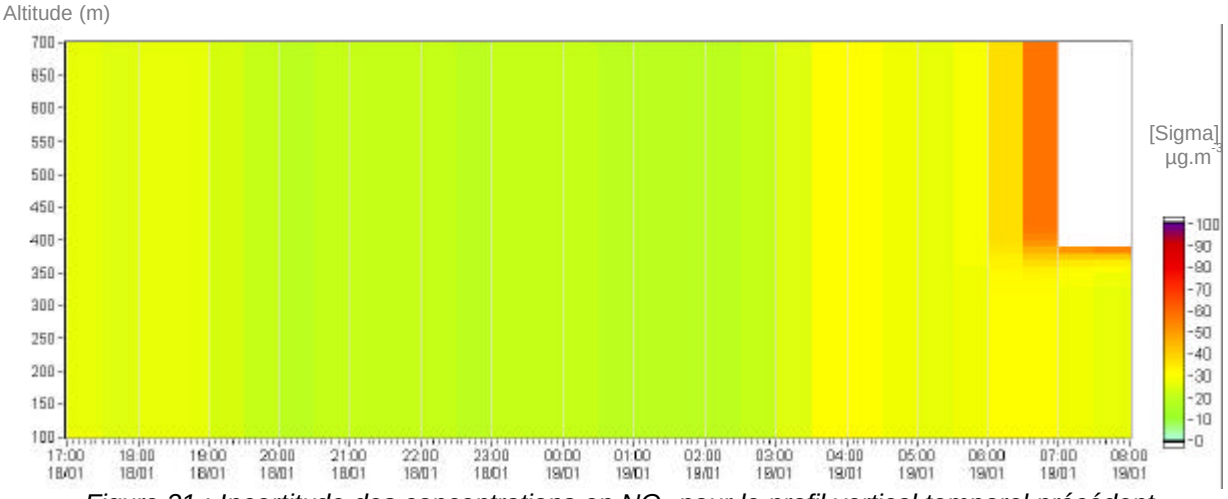


Figure 21 : Incertitude des concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent (au-dessus de la nationale N506, vers Chamonix)

Les concentrations sont plus importantes que sur l'ensemble de la vallée sur pratiquement toute la durée et à toutes les altitudes : les valeurs maximales se situent vers 70 µg.m^{-3} (vers 20h30), et une valeur moyenne d'environ 30 µg.m^{-3} se distingue de la concentration de fond (15 à 20 µg.m^{-3}). Sur ce trajet optique plus court, la précision des résultats augmente et varie entre 15 et 30 µg.m^{-3}.

4.2.1.3 Comparaison avec les mesures au sol

L'Air des 2 Savoie a transmis à COPARLY les données de qualité de l'air mesurées par la station de mesure située au centre Chamonix qui mesure les oxydes d'azote (NO et NO_2) et l'ozone.

L'angle d'élévation minimum qu'il a été possible d'utiliser pour les balayages LIDAR n'étant pas totalement horizontal (15° par rapport au sol), la comparaison avec les capteurs au sol est difficile. Néanmoins, une telle comparaison a été réalisée, entre le mesures NO_2 de la station "Chamonix centre" et les résultats de mesures LIDAR issus de l'interpolation temporelle (*Figure 17* et *Figure 20*), pour une altitude[1] de 200m (vallée) ou 100m (N506).

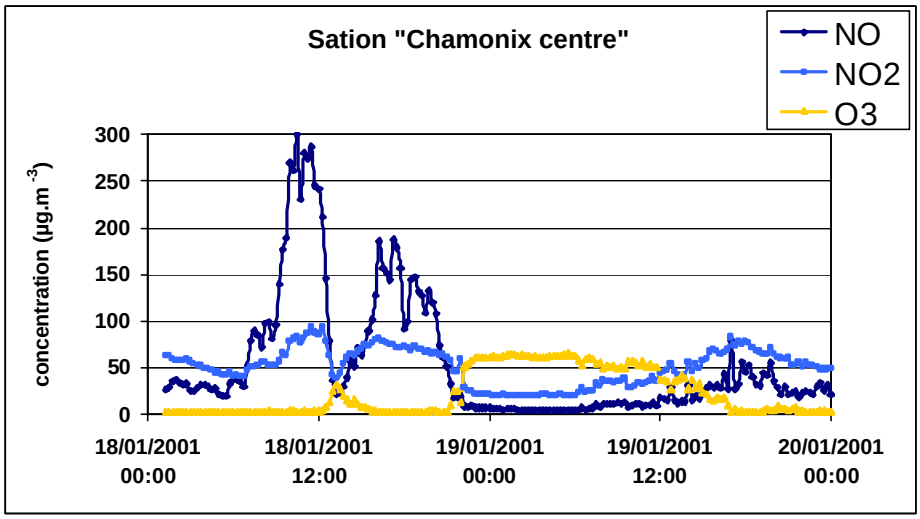


Figure 22 : Résultats de la station d'Air des 2 Savoie "Chamonix centre" les 18 et 19 janvier 2001 Concentrations en NO, NO_2 et ozone (heures locales)

La comparaison des mesures NO_2 est présentée ci-dessous :

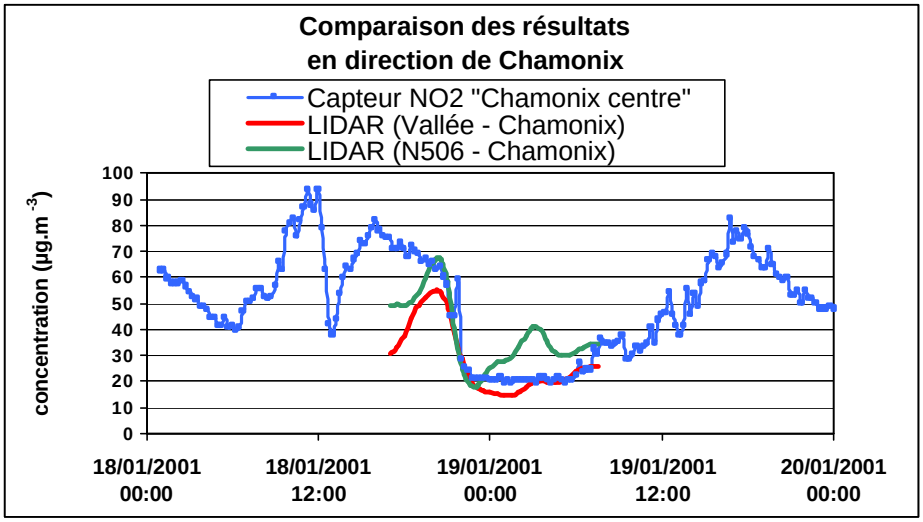


Figure 23 : Comparaison des résultats entre le capteur NO_2 de "Chamonix centre" et le LIDAR (18/01/01_17h00…19/01/01_07h30)

[1] Altitude par rapport au sol (au LIDAR)

Pour les mesures LIDAR en altitude sur l'ensemble de la vallée, les valeurs sont légèrement inférieures pendant les heures de trafic (19h30-21h00), et proches de la concentration de fond de la vallée durant la nuit. Concernant les mesures LIDAR au-dessus de la nationale N506, les valeurs sont très proches de celles mesurées par le capteur pendant les heures de trafic, supérieures durant la nuit, pour s'en rapprocher de nouveau en début de matinée (08h00). Le décalage observé le 18 janvier en début d'après-midi entre le LIDAR et la station fixe pourrait s'expliquer par la différence d'altitude des mesures (meilleure dispersion pour le LIDAR).

Les hausses des concentrations mesurées par le LIDAR au-dessus de la national N506 durant la nuit ne sont pas expliquées. Il n'est cependant pas exclus qu'elles proviennent d'une autre source d'émission que le trafic (combustion, chauffage,…) ou qu'il s'agisse d'un artefact de la mesure optique, dû à une interférence avec les gouttelettes d'eau (brumes, précipitions,…), vu la faible précision obtenue pour cette période.

4.2.2 Mesures en direction des Houches

4.2.2.1 Visualisation des profils 2D

Les signaux LIDAR ont été traités jusqu'à une distance d'environ 5000m et une altitude d'environ 2000m, avec un pas d'intégration de 20m et une précision de mesure variant de 10 à 30 µg.m^{-3}.
Un exemple de profil angulaire 2D, situant le LIDAR vis-à-vis de la vallée en direction des Houches, est présenté *Figure 24*. L'ensemble des profils réalisés du 18 au 19 janvier est présenté sur les *Figures 25* (a-j).

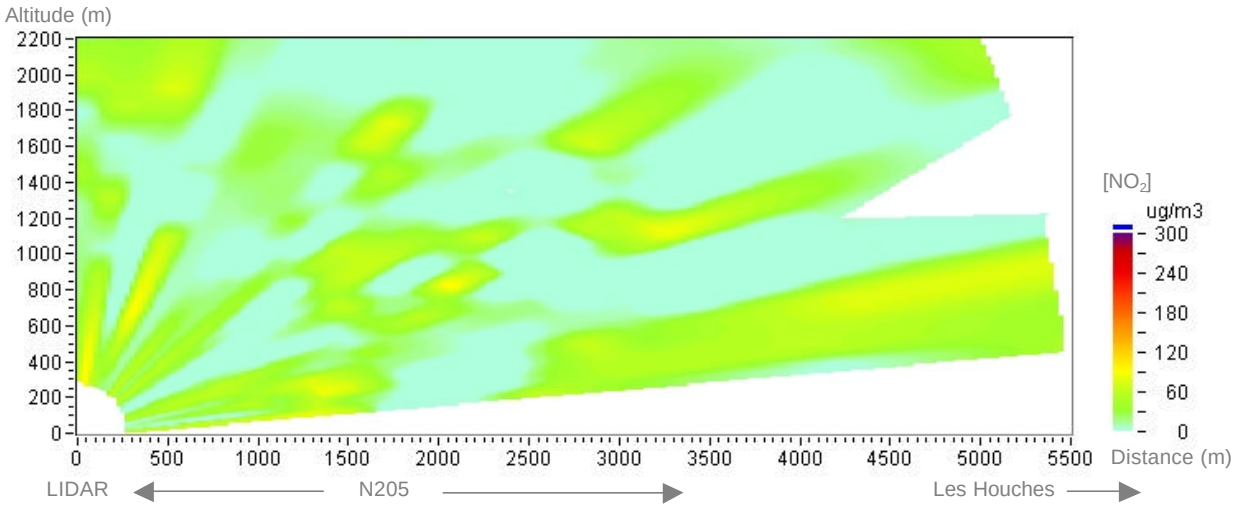
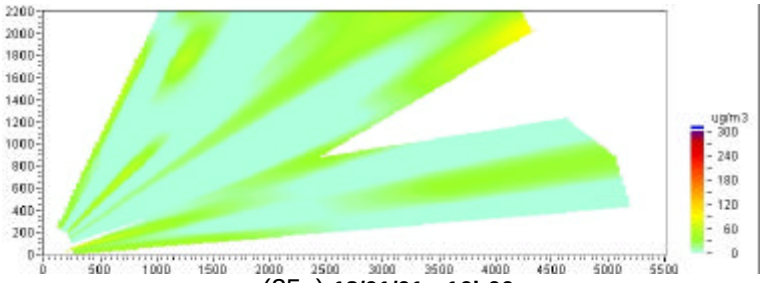
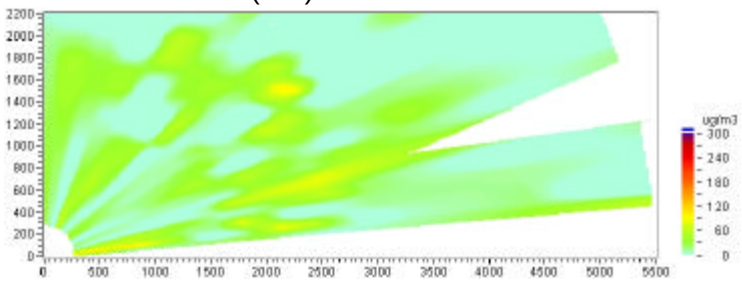


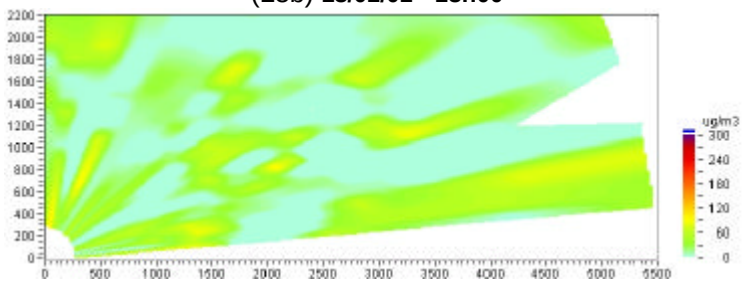
Figure 24 : Exemple de profil angulaire LIDAR réalisé en direction des Houches, concentrations en NO_2 le 18 janvier 2001 vers 20h00 (heure locale)



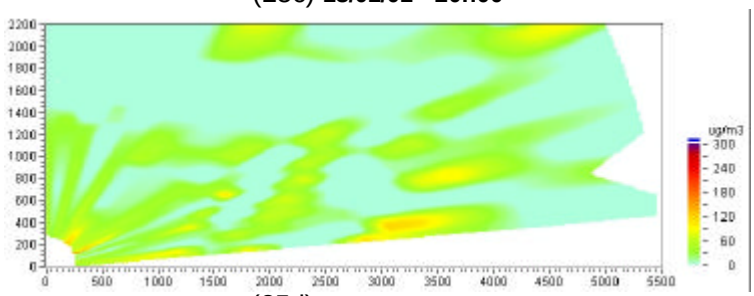
(25a) **18/01/01 - 16h00**



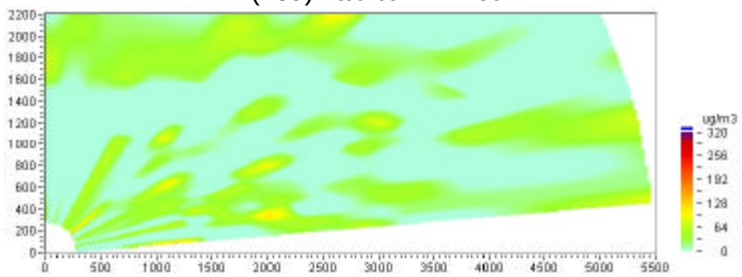
(25b) **18/01/01 - 18h00**



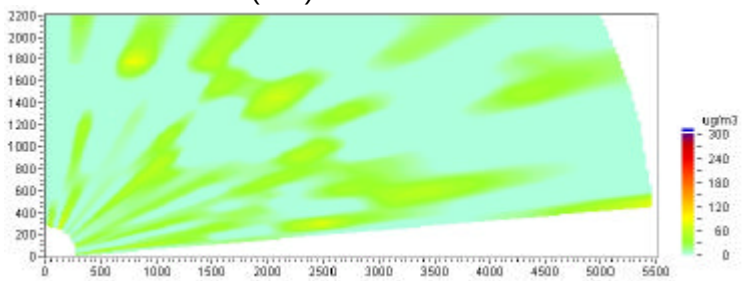
(25c) **18/01/01 - 20h00**



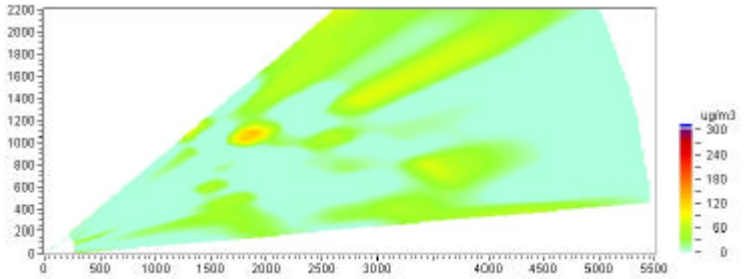
(25d) **18/01/01 - 21h30**



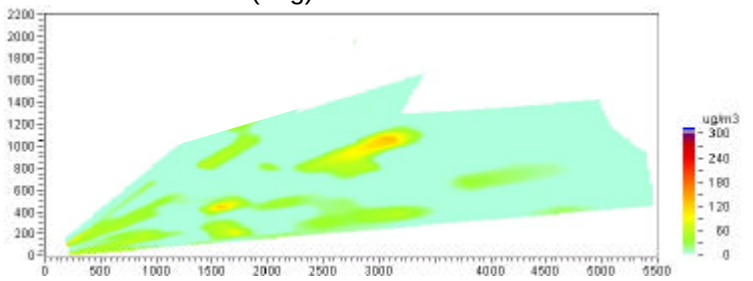
(25e) **18/01/01 - 22h30**



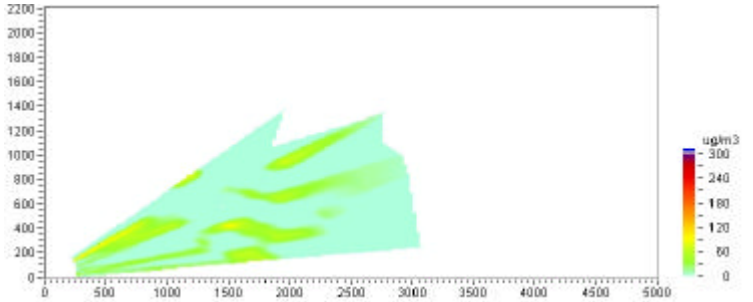
(25f) **18/01/01 - 23h30**



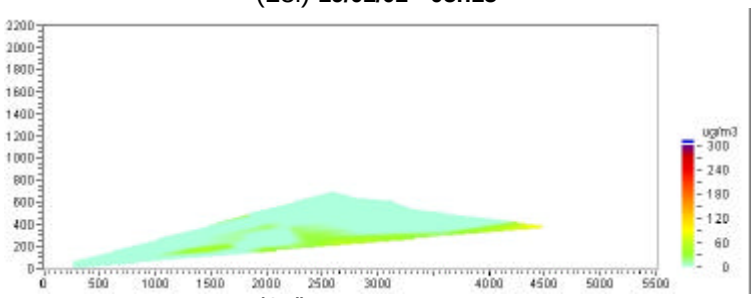
(25g) **19/01/01 - 01h00**



(25h) **19/01/01 - 02h00**



(25i) **19/01/01 - 05h15**



(25j) **19/01/01 - 07h45**

Figures 25 (a-j) : Profils angulaires LIDAR (concentration en NO_2) réalisées en continu en direction des Houches, du 18 janvier 16h00 au 19 janvier 08h00 (heures locales)

La dégradation des conditions météorologiques durant la nuit est de nouveau directement observable sur les profils LIDAR (25g-j). Comme pour les mesures en direction de Chamonix, les concentrations augmentent au niveau du sol entre 18h00 et 21h30 (25b,c,d), semblants provenir du trafic sur la nationale N205. Le faisceau LIDAR était effectivement au-dessus de la route jusqu'à environ 3000m de distance.

Certains profils permettent de visualiser des émissions qui, compte tenu des conditions météorologiques observées, pourraient provenir des Houches (25b,c,e,f), mais la localisation exacte des sources n'est pas visible, compte tenu de l'angle d'élévation et de la distance (presque 6km du LIDAR) affectant le rapport signal sur bruit.

Quelques "bulles" de NO_2 sont également visibles de ce côté de la vallée, et les valeurs diminuent en moyenne à partir de 23h30, en corrélation avec la levée du vent.

4.2.2.2 Visualisation temporelle

De même qu'en direction de Chamonix, une interpolation temporelle a été réalisée sur l'ensemble des résultats : la *Figure 26* présente l'évolution du profil vertical de la concentration en NO_2, moyennée sur l'ensemble de la vallée en direction des Houches.

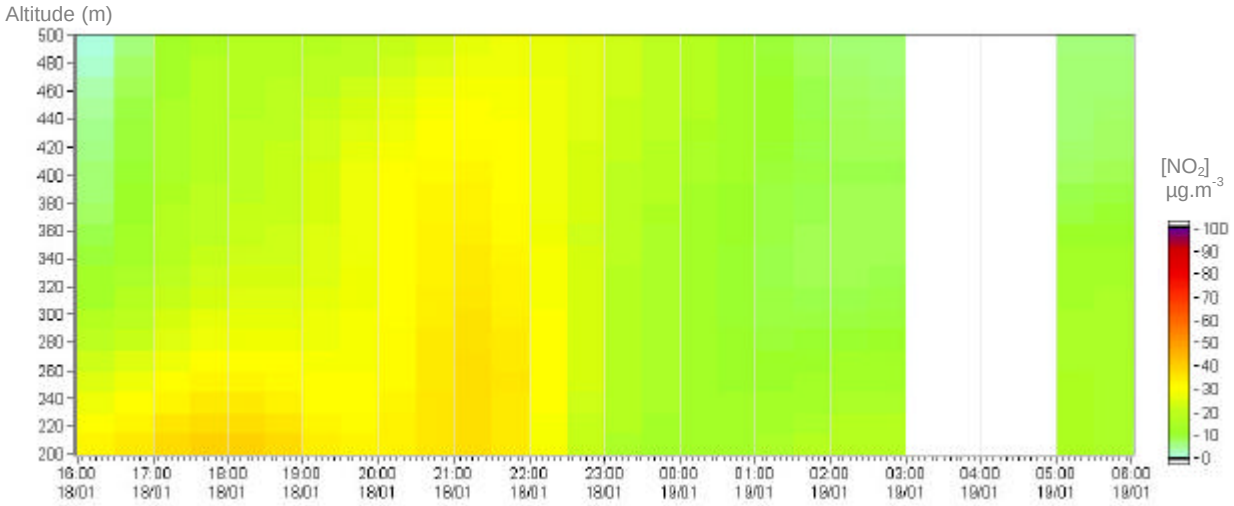


Figure 26 : Profil vertical temporel de la concentration en NO_2 dans la vallée de Chamonix, en direction des Houches, du 18 au 19 janvier 2001 (16h00-06h00)

Le programme d'interpolation ne donne pas de résultats entre 03h00 et 05h00, ni après 06h00, en raison des intempéries de la nuit et des brumes matinales, affectant la précision des mesures. Les émissions les plus importantes semblent encore une fois pouvoir être corrélées aux heures de trafic avec, dans cette partie de la vallée, deux périodes d'affluence plus visibles : aux alentours de 18h00 et de 21h00. Les valeurs maximales sont toutefois moins importantes que celles mesurées en direction de Chamonix : elles restent inférieures à 40 $\mu g.m^{-3}$. D'autre part, cette représentation spatiale et temporelle permet de mettre en évidence une dissipation verticale du NO_2. Après 23h00, les valeurs mesurées sur l'ensemble de la vallée s'homogénéisent vers la même concentration de fond que dans l'autre partie de la vallée (15 $\mu g.m^{-3}$ en moyenne).

La précision des mesures varie entre 6 et 18 $\mu g.m^{-3}$, comme le montre le graphe suivant d'incertitude des concentrations en NO_2 mesurées par LIDAR :

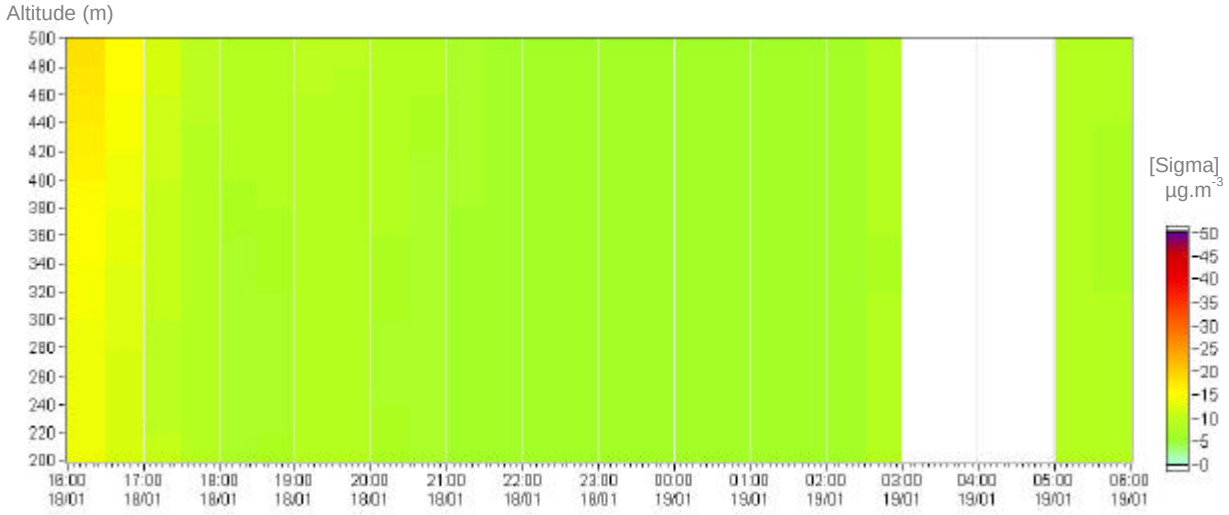


Figure 27 : Incertitude des concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent (vallée en direction des Houches, du 18 au 19 janvier 2001)

Comme pour les tirs effectués en direction de Chamonix, une seconde analyse des données a été réalisée sur une partie du trajet optique du LIDAR, correspondant à une section située au-dessus de la nationale N205. La *Figure 28* présente un exemple de mesures obtenues dans la zone étudiée, à une distance comprise entre 500m et 1500m du LIDAR :

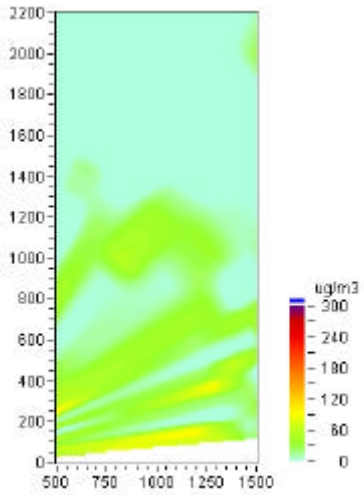


Figure 28 : Mesures LIDAR au-dessus de la nationale N205 (vers Les Houches), le 18/01/01 (21h30)

Le résultat de l'interpolation temporelle sur l'ensemble de la période et l'incertitude des mesures sont présentés sur les *Figure 29* et *Figure 30* :

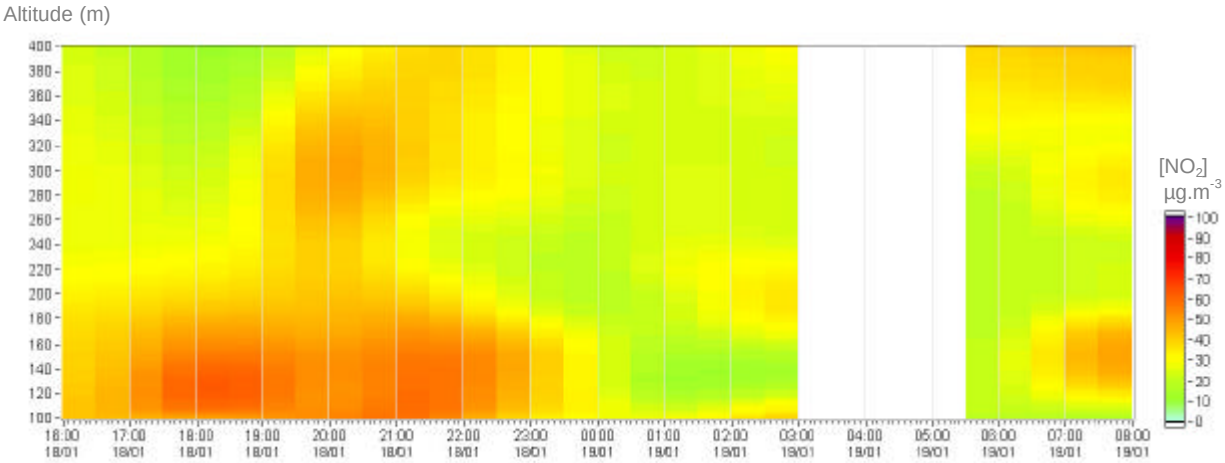


Figure 29 : Profil vertical temporel des concentrations en NO_2 du 18 au 19 janvier 2001 (16h00-08h00) au-dessus de la nationale N205 (vers Les Houches)

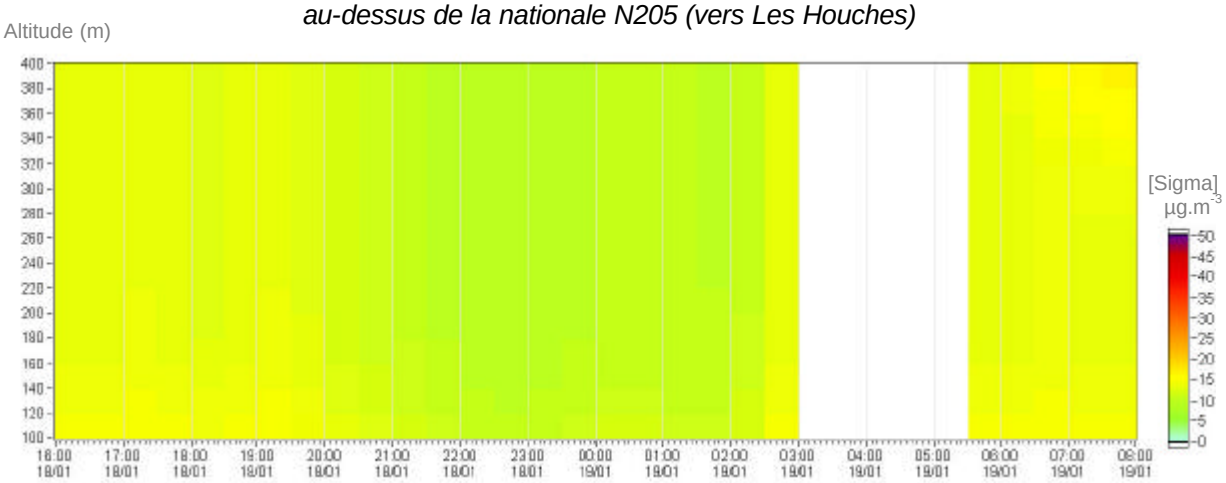


Figure 30: Incertitude des concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent (au-dessus de la nationale N205, vers Les Houches)

La distinction entre les deux périodes de trafic (18h00 et 21h00) est moins marquée et les concentrations sont maximales d'environ 60 µg.m^{-3}. Le mouvement d'ascension du NO_2 en altitude est également apparent, notamment entre 20h00 et 22h00. Comme pour de l'autre côté de la vallée, une valeur moyenne de 30 µg.m^{-3} se distingue des concentrations de fond, comprises entre 15 et 20 µg.m^{-3}. Enfin, l'incertitude des mesures se situe entre 10 et 15 µg.m^{-3}.

4.2.2.3 Comparaison avec les mesures au sol

L'Air des 2 Savoie a transmis à COPARLY les données de qualité de l'air mesurées par la station de mesure située aux Houches (cf. *Figure 5*). Les *Figure 31* et *Figure 32* présentent les mesures de tous les capteurs de cette station, puis la comparaison des mesures NO_2 avec les mesures LIDAR :

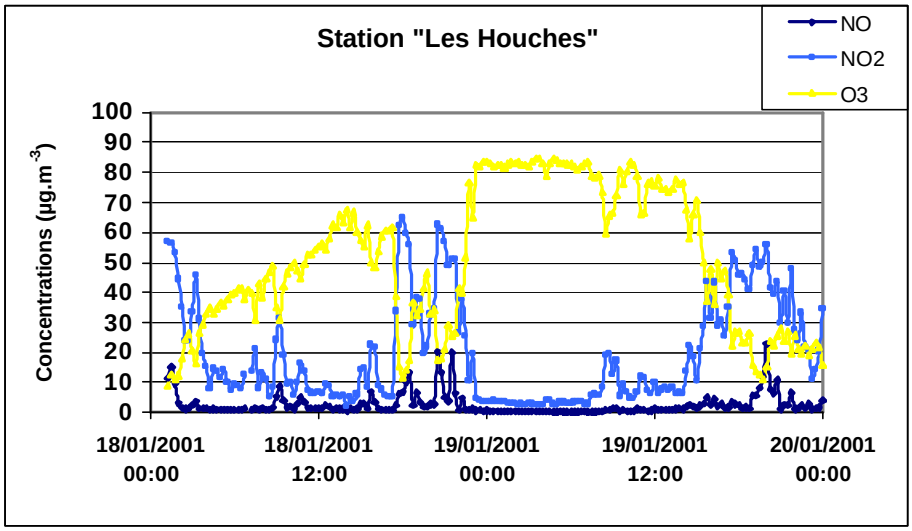


Figure 31 : Résultats de la station d'Air des 2 Savoie "Les Houches" les 18 et 19 janvier 2001 Concentrations en NO, NO_2 et ozone (heures locales)

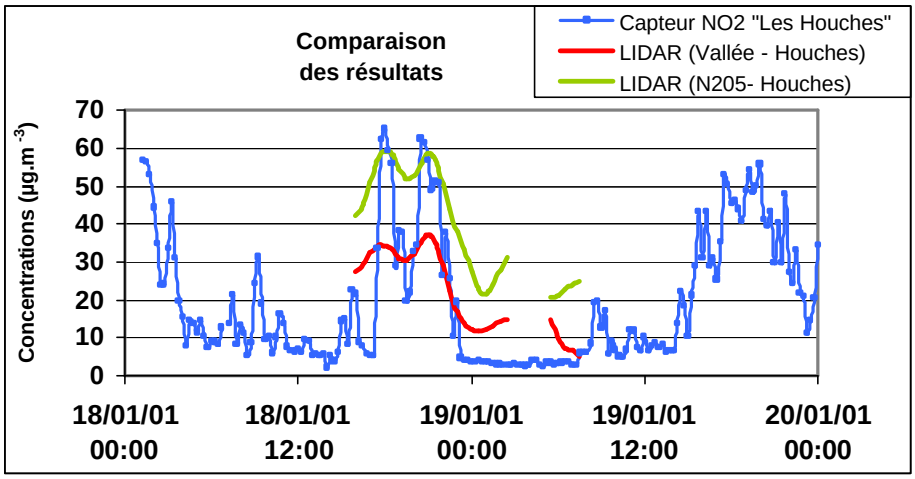


Figure 32: Comparaison des résultats entre le capteur NO_2 "Les Houches" et le LIDAR (18/01/01_16h00…19/01/01_08h00)

La station "Les Houches" a également mesuré une discontinuité entre 18h00 et 21h00, mais de façon plus marquée. De nouveau, les mesures LIDAR en altitude sur l'ensemble de la vallée sont inférieures aux valeurs mesurées par le capteur NO_2 durant les heures de trafic. Les concentrations de fond mesurées pendant la nuit sont légèrement supérieures, mais restent proches de celles mesurées par le LIDAR de l'autre côté de la vallée. Les mesures LIDAR localisées au-dessus de la nationale N205 sont proches des valeurs du capteur au sol durant les heures de trafic, supérieures durant la nuit, et s'en rapprochent en début de matinée. Une fois encore, il convient de tenir compte de la différence d'altitude entre les mesures comparées.

A titre de comparaison, les concentrations mesurées sur l'ensemble de la vallée au cours de cette campagne restent modérées et bien inférieures au seuil de recommandation des personnes sensibles (200 $\mu g.m^{-3}$) de la réglementation française.

5 RESULTATS DANS LA VALLEE DE LA MAURIENNE (29-31 janvier)

5.1 Conditions météorologiques

Le temps est resté couvert durant une grande partie de la campagne : le ciel s'est dégagé plus ou moins dans la nuit du 30 au 31 janvier, redevenant rapidement brumeux en fin de matinée. Néanmoins, aucune précipitation n'a été observée.

5.1.1 Données du mât météorologique

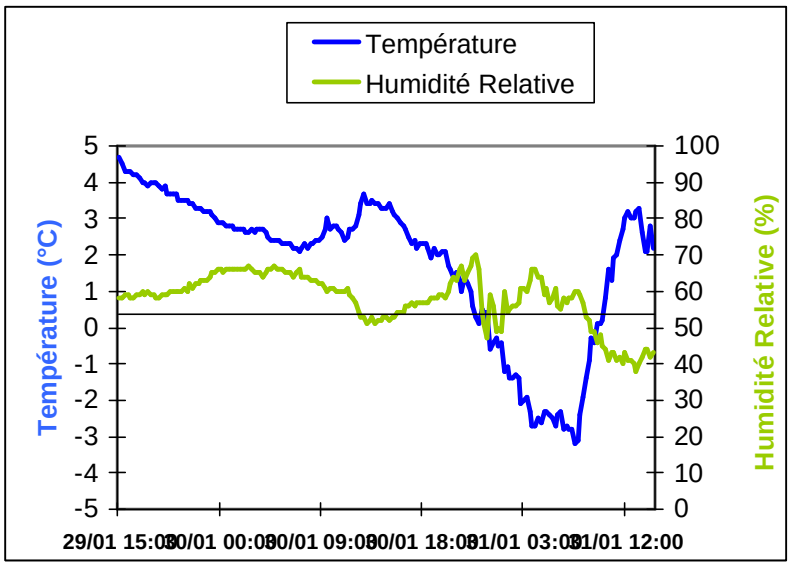


Figure 33 : Température et humidité relative sur le site du LIDAR du 29 au 31 janv. 2001

La température n'a pratiquement pas cessé de chuter durant la campagne, atteignant des valeurs négatives à partir du 31/01 minuit, et remontant vers des valeurs positives dans la matinée du même jour. L'humidité relative est restée à peu près constante, comprise entre 40% et 60%.

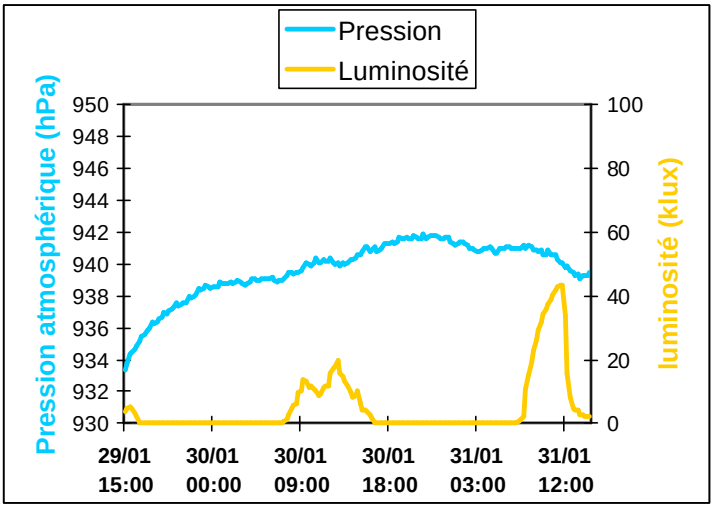


Figure 34: Pression atmosphérique et luminosité sur le site du LIDAR du 29 au 31 janv. 2001

La pression atmosphérique était stable et plutôt basse, en lien avec des conditions météorologiques dépressionnaires. La luminosité était très basse les 29 et 30 janvier ; des valeurs légèrement plus importantes ont été enregistrées dans la matinée du 31, mais sur une très courte durée, le ciel redevenant brumeux à partir de midi. L'activité photochimique a donc été très restreinte pendant toute la durée de la campagne.

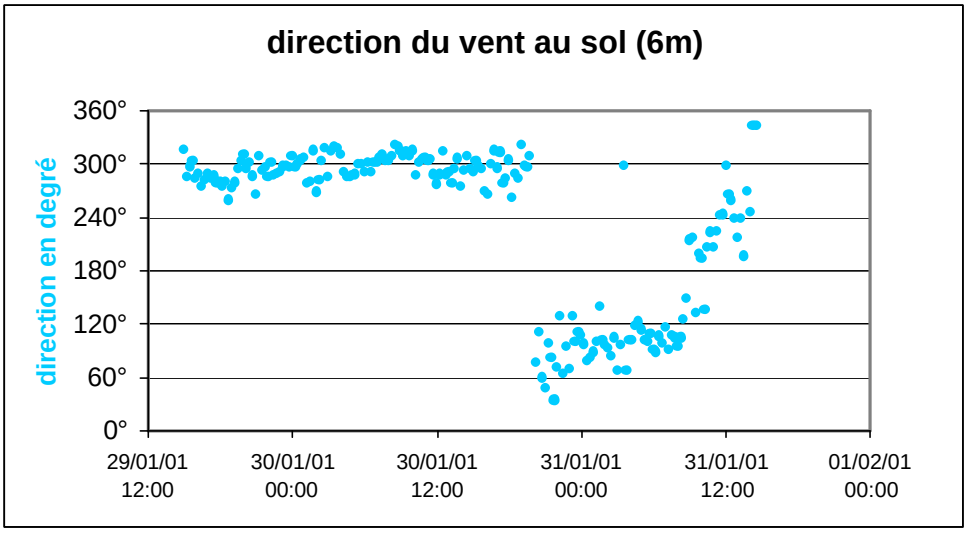


Figure 35 : Direction du vent mesurée par le mât météorologique sur le camion LIDAR du 29/01 15h00 au 31/01 15h00

Le vent s'engouffre dans la vallée par l'ouest (St-Jean de Maurienne) jusqu'au 30/01 au soir, puis tourne dans la nuit du 30 au 31, venant alors de la direction de St-Julien Mont Denis. Il reprend plus ou moins une direction ouest en fin de matinée le 31/01. Les valeurs de la vitesse du vent du mât météorologique n'ont pu être enregistrées, mais des mesures ont été obtenues avec le SODAR, pour la journée du 30 et la matinée du 31, à 50m et 100m d'altitude.

5.1.2 Données SODAR

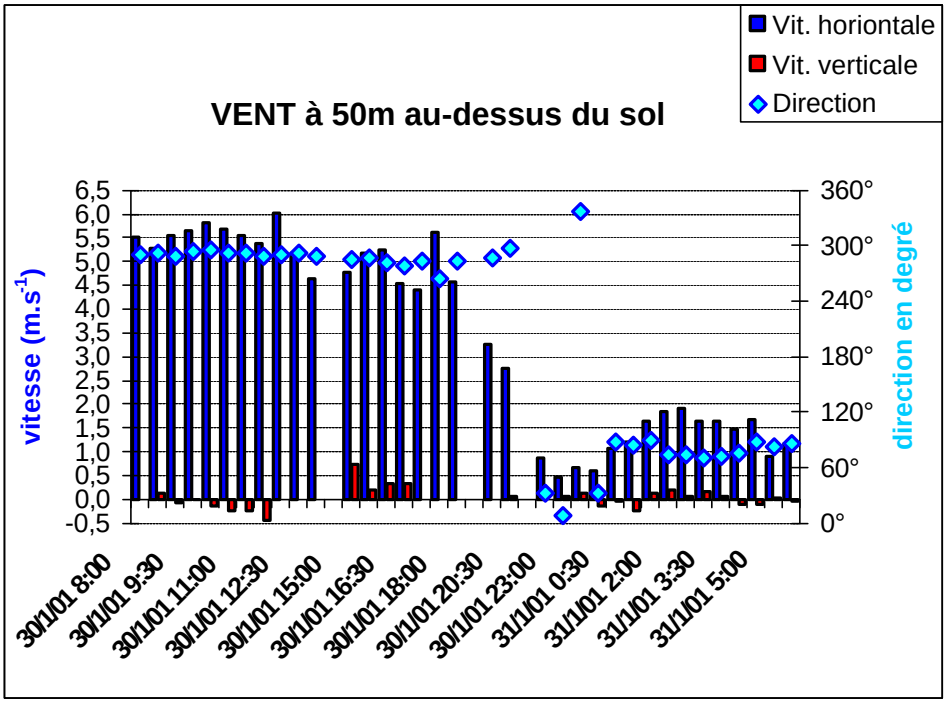


Figure 36 : Vitesse et direction du vent mesurées par le SODAR (à 50m) au-dessus du camion LIDAR du 30 au 31 janv. 2001

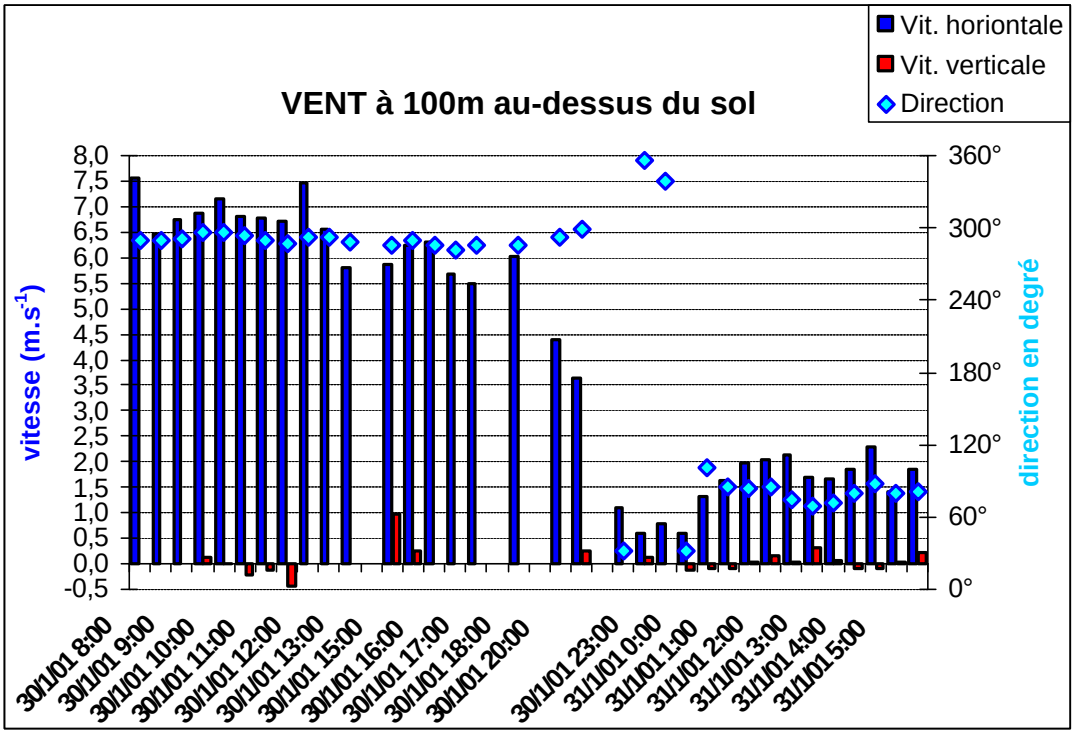


Figure 37: Vitesse et direction du vent mesurées par le SODAR (à 100m) au-dessus du camion LIDAR du 29 au 31 janv. 2001

Les directions du vent mesurées avec le SODAR sont en bon accord avec les données du mât météorologique : le vent d'ouest est bien établi jusque dans la soirée du 30/01 ; il s'affaiblit et change de direction par rapport à l'axe de la vallée dans la nuit du 31/01 ; l'intensité reste faible jusqu'à la fin des données recueillies avec le SODAR (06h30). Le vent vertical n'est pas stable (alternativement ascendant et descendant), et peu intense la plupart du temps (inférieur à 0,3 $m.s^{-1}$).

5.2 Résultats LIDAR

Les balayages angulaires ont été réalisés dans un même plan, alternativement en direction de St-Jean de Maurienne et de St-Julien Mont Denis, selon la méthodologie décrite au chapitre 3. L'exploitation des résultats a permis de traiter 34 profils angulaires en direction de St-Jean et 31 en direction de St-Julien. Pour ne pas surcharger le rapport, seuls certains de ces profils sont présentés (environ toutes les 6 heures).

Attention aux échelles : les échelles de concentrations ont été parfois adaptées pour visualiser les valeurs mesurées de manière contrastée. Le code des couleurs n'est donc pas toujours identique, notamment entre les profils angulaires et les graphes temporels, mais également vis-à-vis des résultats obtenus sur la vallée de Chamonix.

5.2.1 En direction de St-Jean de Maurienne

5.2.1.1 Visualisation des profils 2D

La plupart des signaux LIDAR ont été traités jusqu'à une distance d'environ 5000m et une altitude d'environ 1500m, avec un pas d'intégration de 20m. La précision des mesures varie de 10 à 25 $\mu g.m^{-3}$.

Un exemple de profil angulaire 2D est présenté *Figure 38* pour situer le LIDAR vis-à-vis de la vallée et de St-Jean de Maurienne.

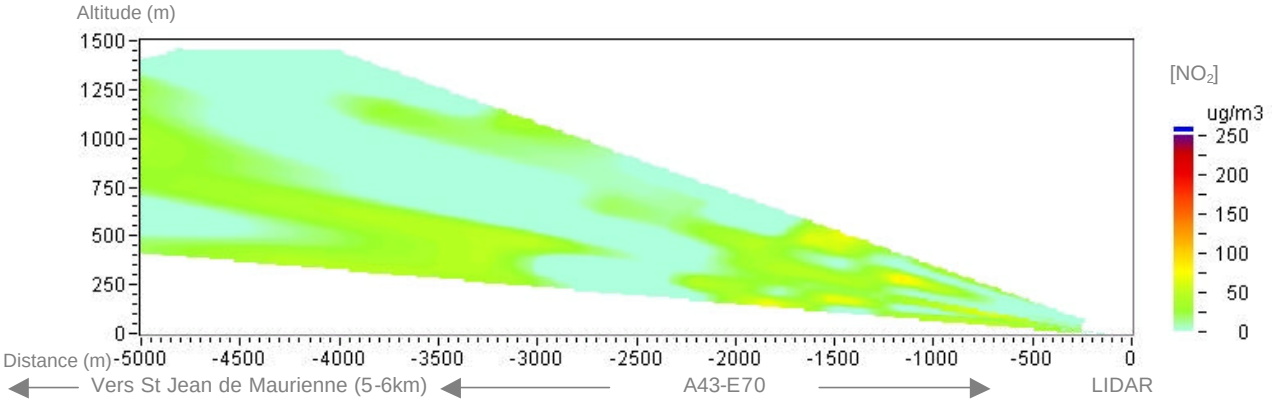
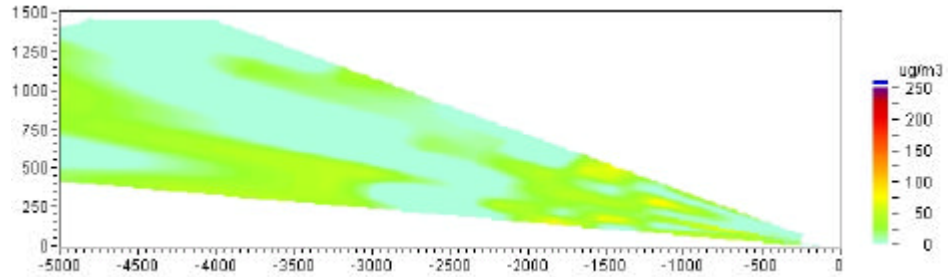
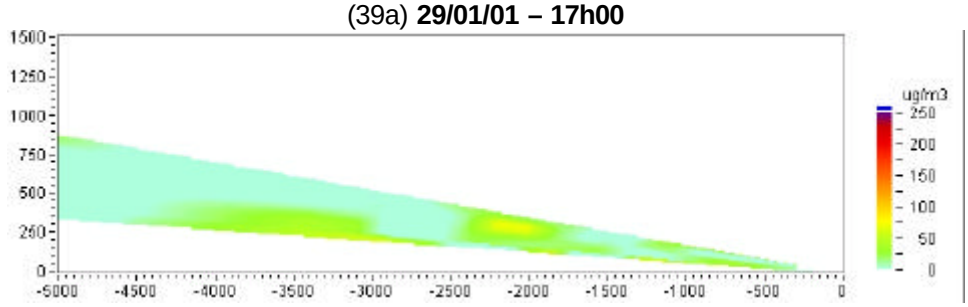


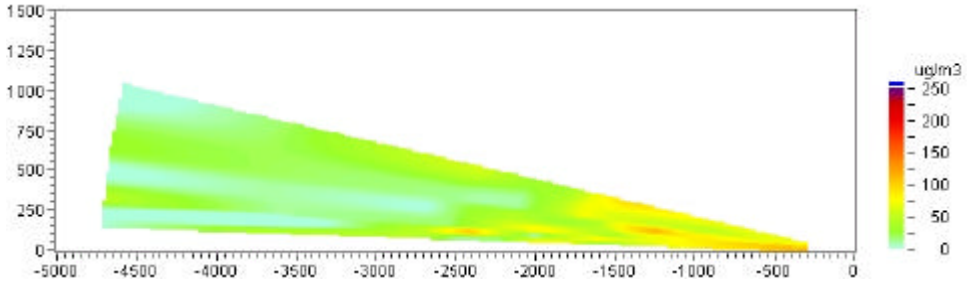
Figure 38: Exemple de profil LIDAR réalisé en direction de St-Jean de Maurienne (29/01- 17h)



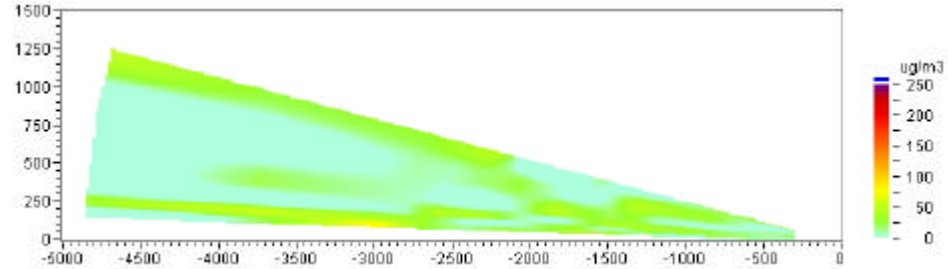
(39a) **29/01/01 – 17h00**



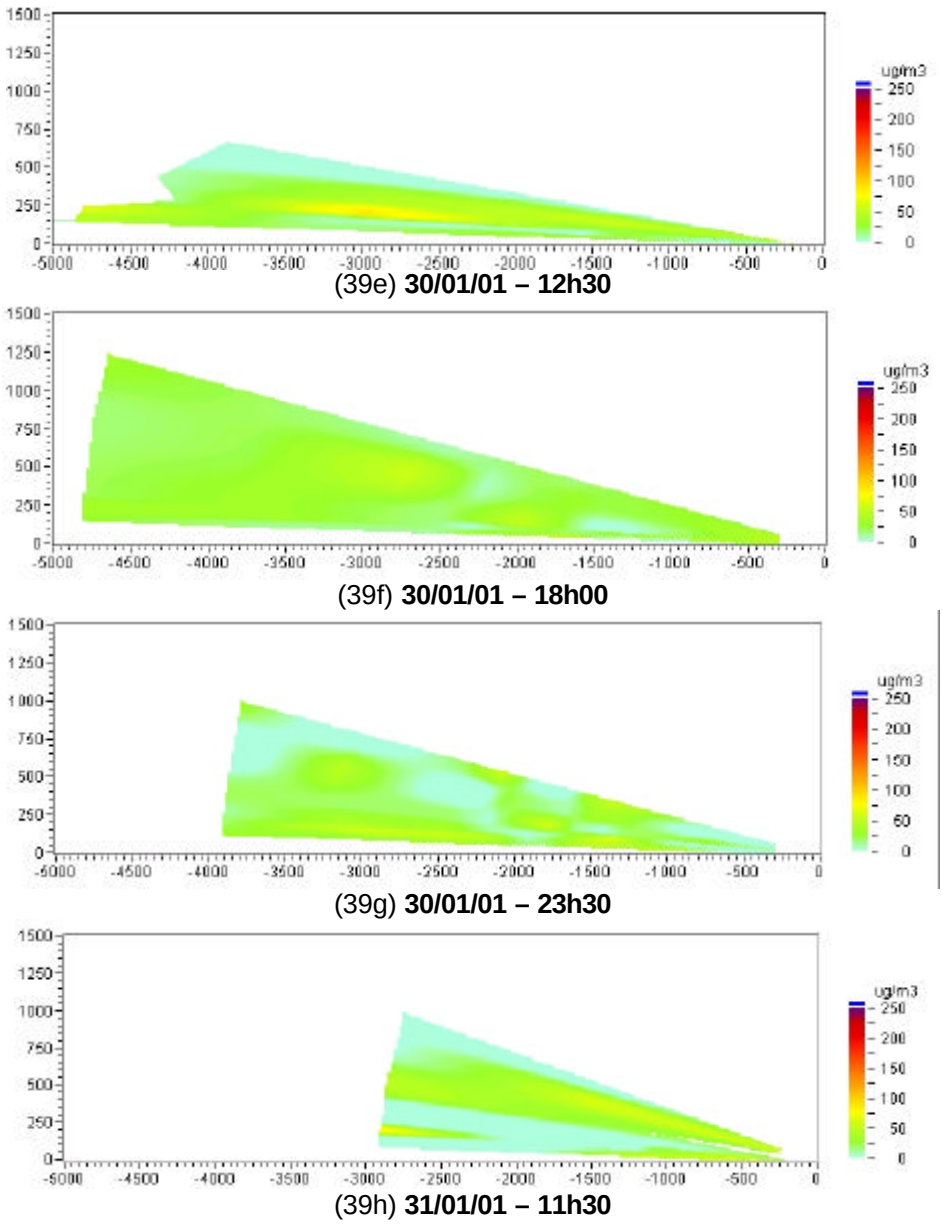
(39b) **29/01/01 – 23h30**



(39c) **30/01/01 – 0400**



(39d) **30/01/01 – 06h30**



(39e) **30/01/01 – 12h30**

(39f) **30/01/01 – 18h00**

(39g) **30/01/01 – 23h30**

(39h) **31/01/01 – 11h30**

Figure 39 (a-h) : Présentation de quelques profils angulaires LIDAR (NO_2) réalisées en direction de St-Jean de Maurienne, du 29 au 31 janvier.

Les cartographies LIDAR obtenues dans la vallée de la Maurienne présentent des profils de concentrations plus homogènes que dans la vallée de Chamonix : à part quelques "bulles" localisées, observées à certaines heures au dessus de la route (39a,b,g – 1000-2000m), les concentrations mesurées sont plus étalées et homogènes, en distance comme en altitude (39a,f,g – 3000-3500m).

La concentration de fond mesurée sur l'ensemble de la vallée se situe vers 20 $\mu g.m^{-3}$. A partir de 23h00 le 29 janvier, des valeurs plus importantes sont observées de façon localisée (39b), puis les concentrations augmentent entre 02h00 et 05h00, le matin du 30 (39c).

Après 06h00 le 30, et jusqu'à la fin de la campagne, les concentrations en NO_2 s'homogénéisent de nouveau dans l'atmosphère.

5.2.1.2 Visualisation temporelle

De même que pour les mesures effectuées dans la vallée de Chamonix, une interpolation temporelle a été réalisée sur l'ensemble de la campagne. Le graphe d'évolution du profil vertical de la concentration en NO_2, moyennée sur l'ensemble de la vallée en direction de St-Jean de Maurienne, et le graphe d'incertitude des résultats sont présentés ci-dessous.

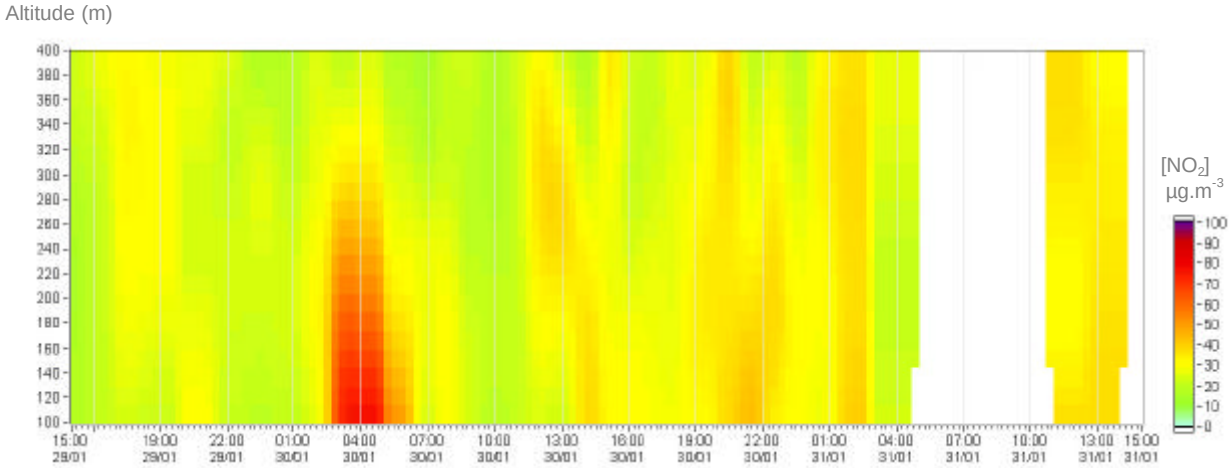


Figure 40 : Profil vertical temporel des concentrations en NO_2 du 29 au 31 janvier 2001 (15h00-15h00) au-dessus de la vallée de la Maurienne en direction de St-Jean de Maurienne

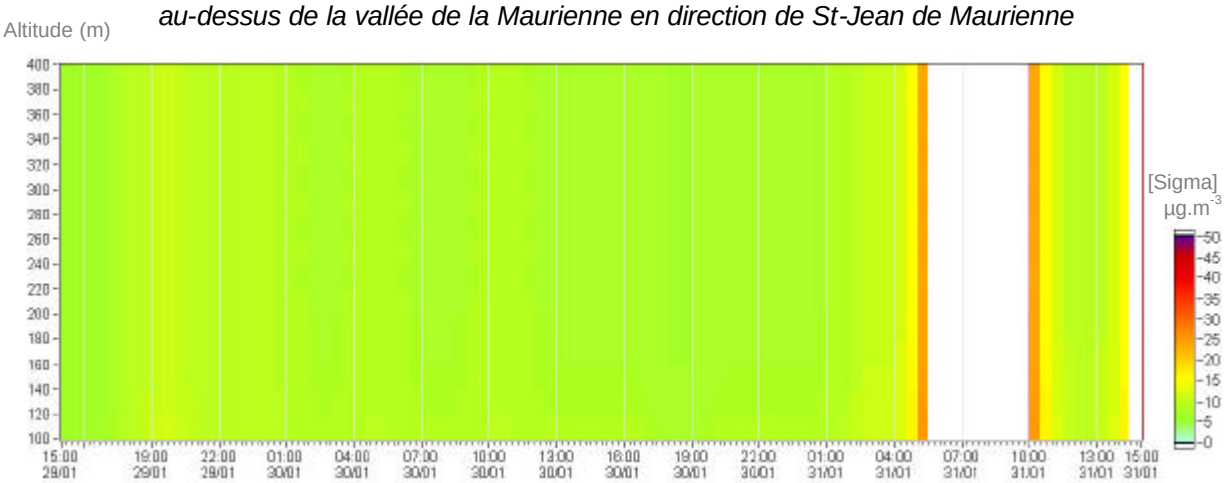


Figure 41 : Incertitude des concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent (vallée en direction de St-Jean de Maurienne, du 29 au 31 janvier 2001)

Pour la journée du 29, les concentrations sont plutôt proches de la valeur de fond (environ 20 µg.m^{-3}). Comme mentionné précédemment, une hausse des concentrations est observée le matin du 30, entre 03h00 et 05h00, avec des valeurs maximales de l'ordre de 75 µg.m^{-3}, et dont l'origine n'est pas déterminée.

Les concentrations diminuent rapidement vers des valeurs de fond dans la matinée du 30, puis oscillent entre 30 et 40 µg.m^{-3} dans l'après-midi et la soirée. Les valeurs les plus importantes sont observées entre 20h00 et 22h00, puis vers 02h00 du matin le 31. Ces résultats peuvent être mis en relation avec le changement de direction du vent, accompagné d'une baisse d'intensité, entraînant des conditions défavorables à la dispersion des polluants.

La précision des résultats est homogène sur toute la période de mesure, avec une incertitude variant entre 8 et 13 µg.m^{-3}, excepté pour la matinée du 31/01 de 06h00 à 11h00 où l'interpolation n'est pas valide en raison du manque de données.

5.2.1.3 Comparaison avec les mesures au sol

L'Air des 2 Savoie a transmis à COPARLY les données de qualité de l'air mesurées par la station de mesure située à St-Jean de Maurienne. La comparaison avec les mesures LIDAR est présentée ci-après. Il est à noter cependant que cette comparaison doit être considérée de façon plus qualitative que quantitative, compte tenu du positionnement du LIDAR : au centre de la vallée, légèrement en altitude vis-à-vis des axes routiers et relativement éloigné de la station fixe (5-6 km).

Les concentrations mesurées par la station "St-Jean de Maurienne" et la comparaison avec les mesures LIDAR sur l'ensemble de la durée de la campagne sont présentées ci-dessous :

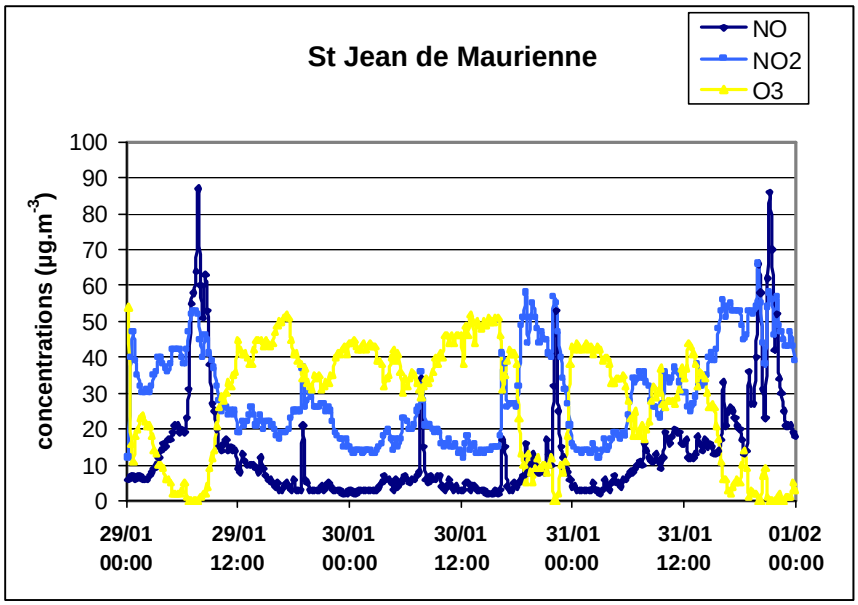


Figure 42 : Résultats de la station d'Air des 2 Savoie "St-Jean de Maurienne" du 29 au 31 janvier 2001 Concentrations en NO, NO_2 et ozone (heures locales)

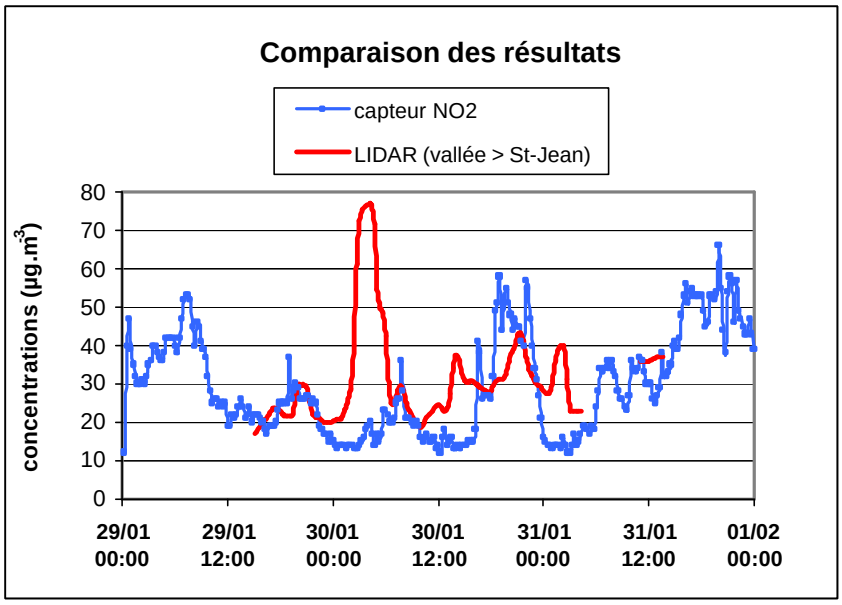


Figure 43 : Comparaison des résultats entre le capteur NO_2 "St-Jean" et le LIDAR (29/01/01_15h00…31/01/01_15h00)

Les concentrations moyennes mesurées sont du même ordre de grandeur (entre 20 et 40 µg.m^{-3}) et suivent une évolution relativement comparable, excepté la nuit du 29 au 30 vers 04h00 du matin, où le

LIDAR mesure une hausse de concentration, localisée sur les deux premiers kilomètres du trajet optique (*Figure 39*c). Nous verrons par la suite que ces masses d'air chargées en dioxyde d'azote se sont progressivement déplacé dans la vallée, en direction de St-Julien Mont Denis.

5.2.2 En direction de St-Julien Mont Denis

Les signaux LIDAR ont été traités de la même manière que pour les tirs effectués en direction de St-Jean de Maurienne. La précision obtenue varie également entre 10 et 25 µg.m^{-3}.

Un exemple de profil angulaire 2D est donné *Figure 44* pour situer le LIDAR vis-à-vis de la vallée et de St-Julien Mont Denis, puis quelques profils sont présentés sur les figures suivantes.

5.2.2.1 Visualisation des profils 2D

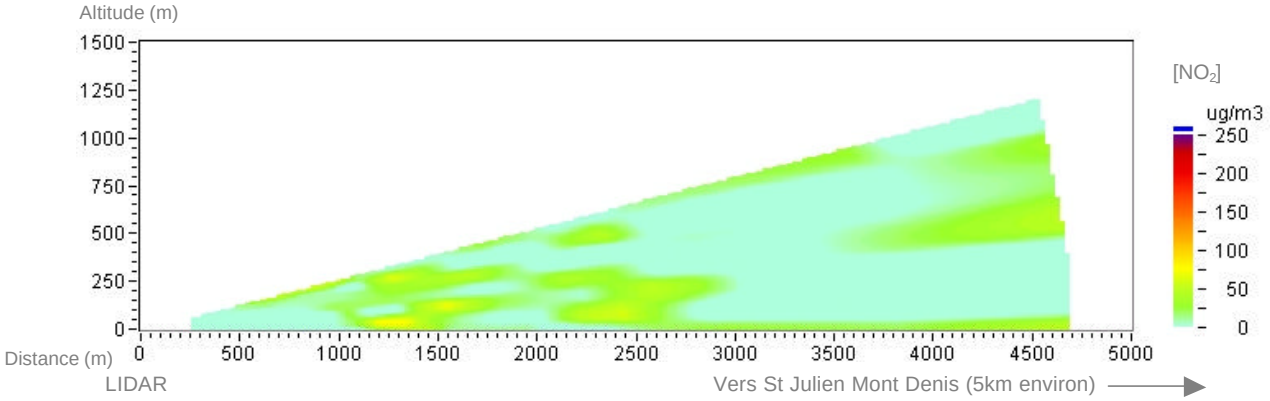
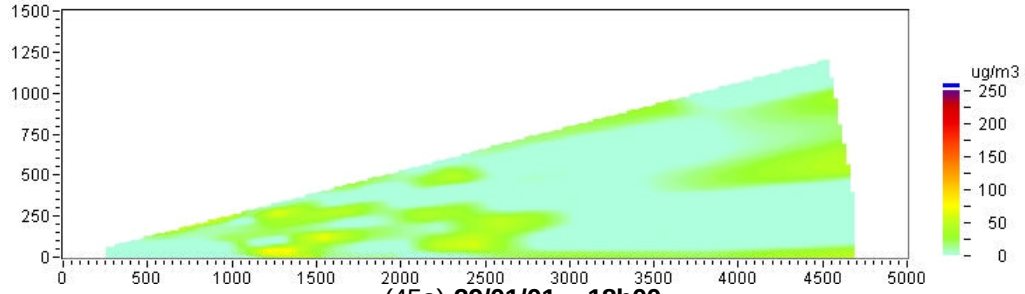
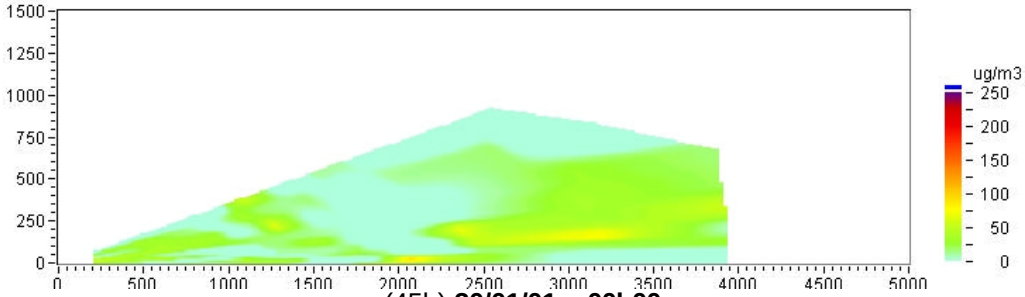


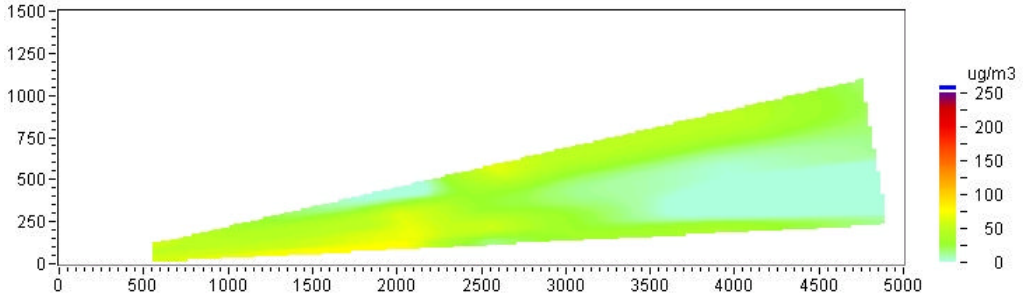
Figure 44 : Exemple de profil LIDAR réalisé en direction de St-Julien Mont Denis (29/01- 18h)



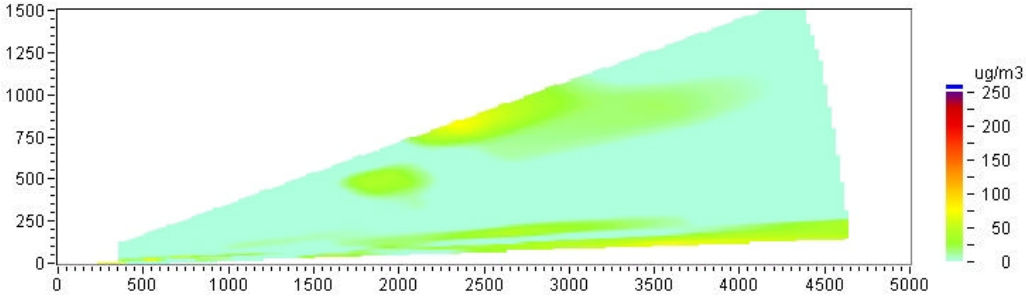
(45a) **29/01/01 – 18h00**



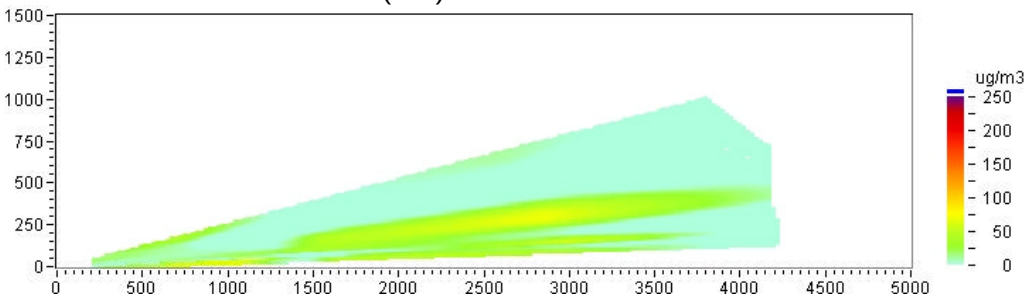
(45b) **30/01/01 – 00h00**



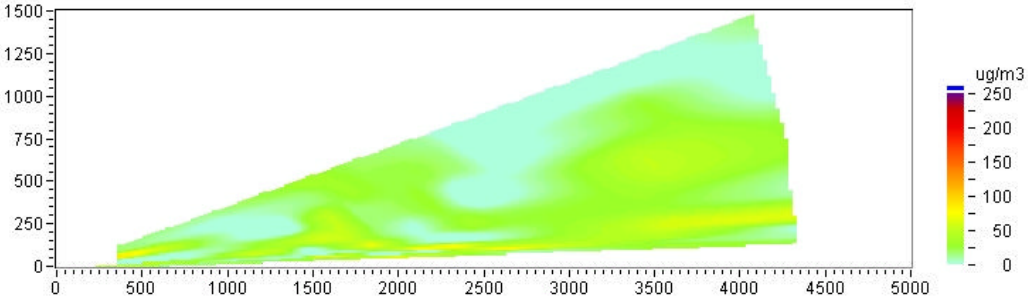
(45c) **30/01/01 – 04h30**



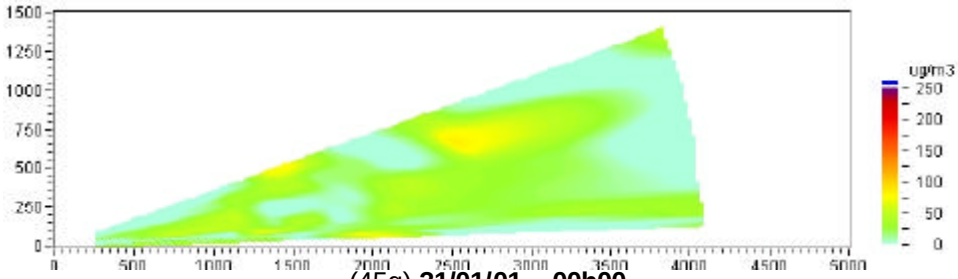
(45d) **30/01/01 – 06h00**



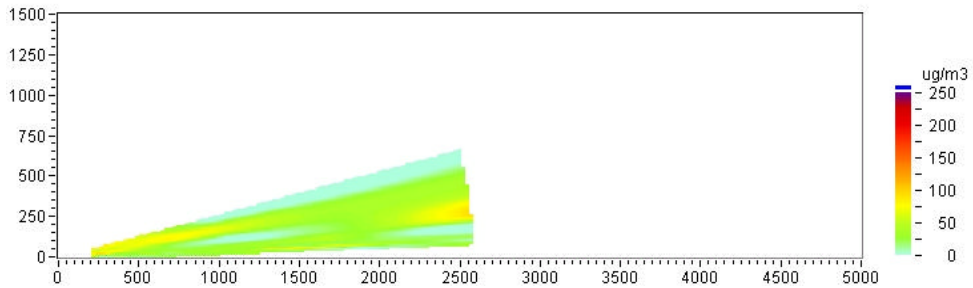
(45e) **30/01/01 – 11h30**



(45f) **30/01/01 – 18h30**



(45g) **31/01/01 – 00h00**



(45h) **31/01/01 – 13h00**

Figure 45 (a-h) : Présentation de quelques profils angulaires LIDAR (NO_2) réalisées en direction de St-Julien Mont Denis, du 29 au 31 janvier.

En direction de St-Julien Mont Denis, l'aspect homogène des concentrations est de nouveau prépondérant (45b,f,g). La concentration de fond mesurée sur l'ensemble de la vallée se situe entre 20 et 30 µg.m^{-3}.

Des concentrations plus importantes sont de nouveau observées le 30/01 vers 04h30 du matin (39c), avec des valeurs un peu moins élevées et un léger décalage temporel par rapport à celles mesurées en direction de St-Jean de Maurienne.

Les profils suivants (les 30 et 31) présentent des concentrations en NO_2 de nouveau relativement homogènes, avec des valeurs moyennes de l'ordre de 30 µg.m^{-3} et parfois quelques zones où les valeurs sont supérieures ou égales à 50 µg.m^{-3}.

5.2.2.2 Visualisation temporelle

Le graphe d'évolution du profil vertical de la concentration en NO_2, moyennée sur l'ensemble de la vallée en direction de St-Julien Mont Denis, et le graphe d'incertitude des résultats sont présentés ci-dessous.

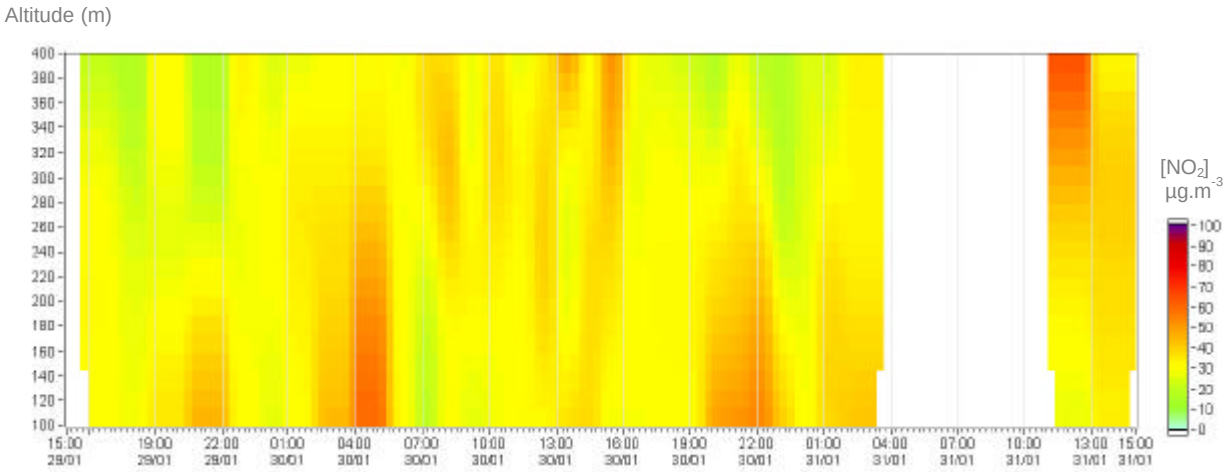


Figure 46 : Profil vertical temporel des concentrations en NO_2 du 29 au 31 janvier 2001 (heures locales) au-dessus de la vallée de la Maurienne en direction de St-Julien Mont Denis

Les concentrations de fond sont encore de l'ordre de 20 µg.m^{-3}, mais les valeurs observées en moyenne sur l'ensemble de cette partie de la vallée se situent plutôt vers 30 µg.m^{-3}.

Les valeurs plus élevées observées le matin du 30 janvier en direction de St-Jean de Maurienne, sont également visualisées en direction de St-Julien Mont Denis. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 60 µg.m^{-3} (contre 75 µg.m^{-3} vers St-Jean de Maurienne), et la hausse des concentrations est observée une demi-heure à une heure plus tard.

Pour le reste de la période des mesures LIDAR, les valeurs les plus importantes sont de nouveau enregistrées entre 20h00 et 23h00, puis vers 02h00 le 31, en corrélation avec le changement de direction du vent et sa baisse d'intensité.

La précision des mesures obtenues se situe entre 8 et 13 µg.m^{-3} comme le montre le graphe suivant (matinée du 31 de 04h00 à 11h00 exclue) :

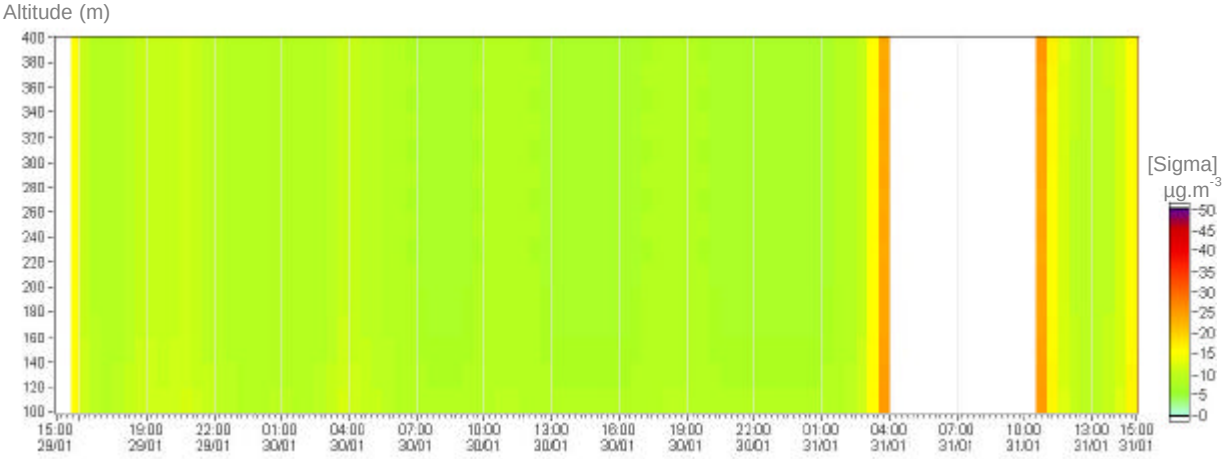


Figure 47 : Incertitude des concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent (vallée en direction de St-Julien Mont Denis, du 29 au 31 janvier 2001)

5.2.2.3 Comparaison avec les mesures au sol

L'Air des 2 Savoie a transmis à COPARLY les données de qualité de l'air mesurées par la station de mesure située à St-Julien Mont Denis. De même qu'en direction de St-Jean de Maurienne, une comparaison des mesures LIDAR avec la station a été réalisée. L'aspect qualitatif plutôt que quantitatif est discuté, pour les mêmes raisons évoquées plus haut (§ 5.2.1.3).

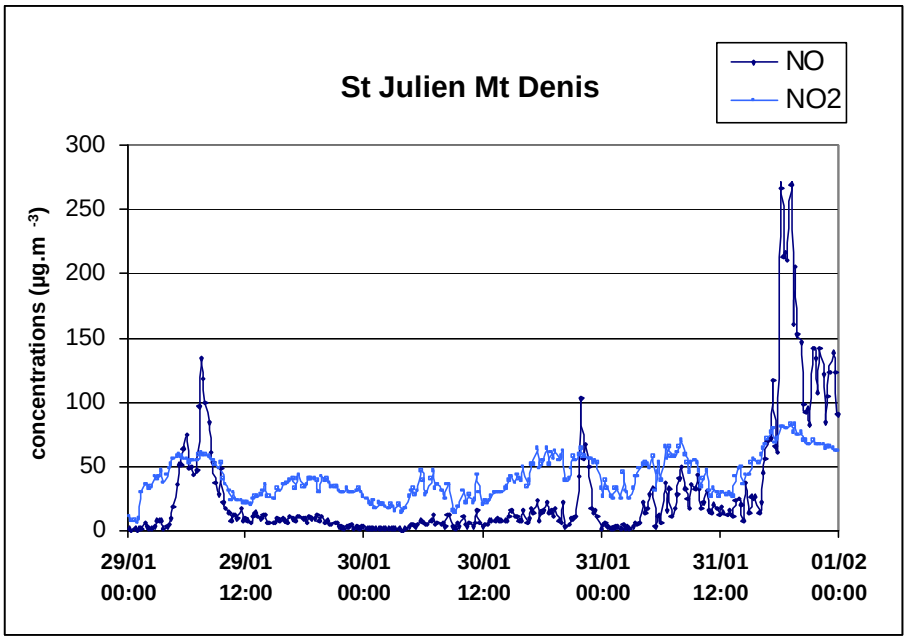


Figure 48 : Résultats de la station d'Air des 2 Savoie "St-Julien Mont Denis" du 29 au 31 janvier 2001 Concentrations en NO, NO_2 et ozone (heures locales)

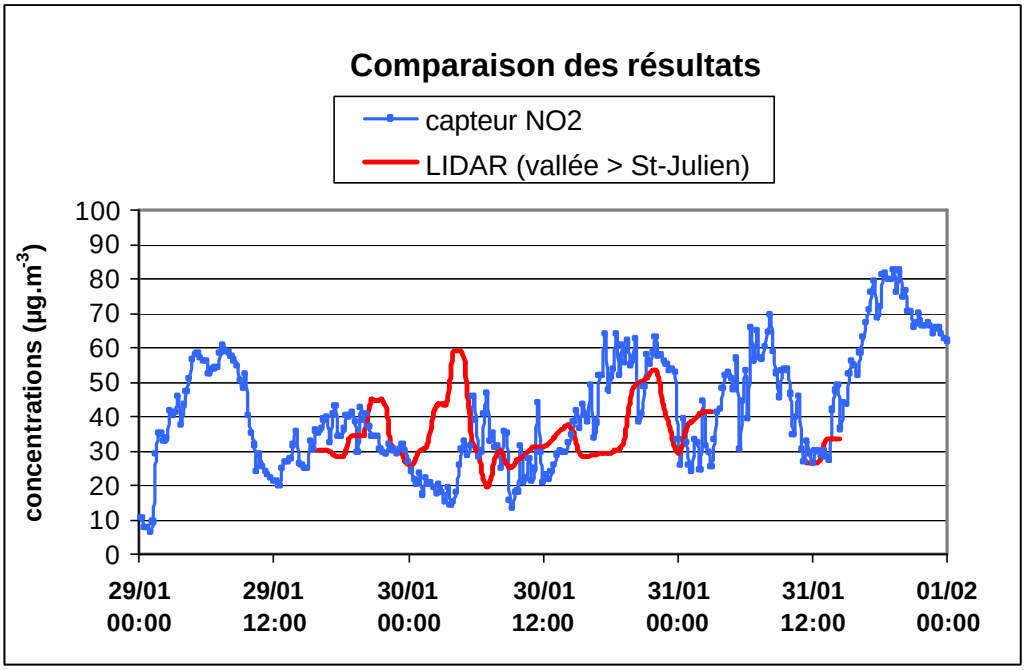


Figure 49: Comparaison des résultats entre le capteur NO_2 "St-Julien" et le LIDAR (29/01/01_15h00…31/01/01_15h00)

De même que pour les mesures LIDAR, les concentrations mesurées par le capteur de St-Julien Mont Denis sont légèrement plus élevées que de l'autre côté de la vallée : la valeur moyenne se situe aux alentours de 30 µg.m^{-3}, du 29 janvier 12h00 au 30 janvier 12h00. La journée du 31, les concentrations varient entre 30 et 60 µg.m^{-3} (maximum : 80 µg.m^{-3} en soirée).

L'évolution des concentrations LIDAR est qualitativement comparable à celle du capteur, compte tenu de la différence d'altitude et de distance entre les mesures.

Enfin, il est à noter que l'analyseur NO_2 enregistre également une hausse des concentrations le 30 janvier entre 06h00 et 08h00, un peu plus tard que l'augmentation observée avec le LIDAR, avec des concentrations légèrement plus faibles, entre 40 et 45 µg.m^{-3}. Il est alors intéressant de remarquer que le profil LIDAR de 06h00 du matin (*Figure 45*d) montre des concentrations de cet ordre de grandeur, proche du niveau du sol, à une distance de 4,5km (St-Julien Mont Denis se trouvant à environ 5km du LIDAR).

A noter que les concentrations mesurées au cours de ces 48h restent modérées et bien inférieures au seuil de recommandation des personnes sensibles (200 µg.m^{-3}) de la réglementation française.

Ces éléments permettent d'envisager que les masses d'air chargées en dioxyde d'azote ont été progressivement dissipées en évoluant dans la vallée, de St-Jean de Maurienne vers St-Julien Mont Denis. Ils sont cependant insuffisants pour déterminer l'origine des émissions observées.

CONCLUSION GENERALE

Les campagnes intensives de mesure LIDAR réalisées par COPARLY en janvier 2001 entraient dans le cadre du programme POVA, coordonné par l'Air des 2 Savoie, pour l'étude de la pollution dans les vallées alpines. Les profils LIDAR obtenus, ont notamment permis de visualiser la dynamique spatiale et temporelle du NO_2 dans les deux vallées principalement concernées par la fermeture du tunnel du Mont-Blanc : la vallée de Chamonix, et la vallée de la Maurienne.

Les résultats obtenus ont été détaillés dans ce rapport en tenant compte des conditions météorologiques observées durant la période de mesure. Les différentes spécificités de la technique LIDAR ont été utilisées pour analyser les mesures effectuées : profils angulaires et temporels 2D, traitement du signal sur une partie du faisceau pour obtenir des informations localisées, et comparaison des résultats avec des mesures au sol.

Dans la vallée de Chamonix, avec des conditions météorologiques dépressionnaires durant la campagne, les mesures ont montré une dispersion des polluants assez localisée géographiquement. Une analyse plus focalisée sur les axes routiers traversant la vallée a montré qu'avec de telles conditions, et aux heures de trafic, ils pouvaient exercer une certaine influence sur les zones de proximité (plusieurs centaines de mètres). Enfin, les montagnes élevées entourant la vallée (massif du Mont Blanc, …) pourraient également jouer un rôle défavorable à la dispersion (effet de réservoir en altitude pour l'ozone).

Du côté de la Maurienne, dans des conditions météorologiques également perturbées mais peut-être plus favorables au transport et à la dispersion des polluants, les mesures LIDAR ont visualisé une atmosphère plus homogène en concentrations. Le positionnement du LIDAR a permis une étude générale de l'atmosphère de la vallée sans mettre en évidence une influence marquée du trafic routier.

Pour ces deux campagnes de mesure, les concentrations de dioxyde d'azote mesurées par le LIDAR restent modérées et bien inférieures au seuil de recommandation des personnes sensibles (200 $\mu g.m^{-3}$) de la réglementation française.

Ces différentes analyses ont montré l'originalité et le potentiel de la technique LIDAR, permettant de suivre l'évolution des polluants dans l'atmosphère (NO_2, ozone,…), et de mettre en évidence certains phénomènes ou processus parfois difficiles à visualiser avec des analyseurs classiques. La durée des campagnes intensives et les conditions météorologiques ont néanmoins limité l'interprétation possible des résultats.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Visualisation des 2 vallées alpines et des sites de mesure de l'Air des 2 Savoie 9

Figure 2 : Emplacement du LIDAR pour la campagne d'essai dans la vallée de Chamonix.....10

Figure 3 : Profil angulaire d'ozone, effectué le 9 mars 2000 entre 8h50 et 9h30 (heure locale).....11

Figure 4 : Profil angulaire d'ozone, effectué le 9 mars 2000 vers 09h45 (heure locale).....11

Figure 5: Positionnement du LIDAR et direction des tirs (projection des plans verticaux) 12

Figure 6 : Balayages verticaux réalisés avec le LIDAR dans la vallée de Chamonix par temps dégagé.....13

Figure 7 : Balayages verticaux réalisés avec le LIDAR dans la vallée de Chamonix par temps nuageux.....13

Figure 8 : Positionnement du LIDAR et direction des tirs (projection des plans verticaux) 14

Figure 9 : Balayages verticaux réalisés avec le LIDAR dans la vallée de la Maurienne 15

Figure 10 : Température et Humidité Relative sur le site du LIDAR du 18 au 19 janv. 2001.....16

Figure 11 : Pression atmosphérique et luminosité sur le site du LIDAR du 18 au 19 janv. 2001 16

Figure 12 : Vitesse et direction du vent mesurées par le mât météorologique sur le camion LIDAR 17

Figure 13 : Vitesse et direction du vent mesurées par le SODAR (à 50m) au-dessus du camion LIDAR 17

Figure 14 : Vitesse et direction du vent mesurées par le SODAR (à 100m) au-dessus du camion LIDAR du 18 au 19 janv. 2001.....18

Figure 15 : Exemple de profil angulaire LIDAR réalisé en direction de Chamonix, ...19

Figures 16 (a-k) : Profils angulaires LIDAR (concentration en NO_2) réalisées en continu dans la vallée de Chamonix du 18 janvier 15h00 au 19 janvier 07h30 (heures locales).....20

Figure 17 : Profil vertical temporel de la concentration en NO_2 dans la vallée de Chamonix, en direction de Chamonix, du 18 au 19 janvier 2001 (17h00-08h00) 21

Figure 18 : Incertitudes sur les concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent 21

Figure 19 : Mesures LIDAR au-dessus de la nationale N506 (vers Chamonix), ...22

Figure 20 : Profil vertical temporel des concentrations en NO_2 du 18 au 19 janvier 2001 (15h00-08h00) au-dessus de la nationale N506 (vers Chamonix) 22

Figure 21 : Incertitude des concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent.....22

Figure 22 : Résultats de la station d'Air des 2 Savoie "Chamonix centre" les 18 et 19 janvier 2001 23

Figure 23 : Comparaison des résultats entre le capteur NO_2 de "Chamonix centre" et le LIDAR (18/01/01_17h00…19/01/01_07h30).....23

Figure 24 : Exemple de profil angulaire LIDAR réalisé en direction des Houches, ...24

Figures 25 (a-j) : Profils angulaires LIDAR (concentration en NO_2) réalisées en continu en direction des Houches, du 18 janvier 16h00 au 19 janvier 08h00 (heures locales).....26

Figure 26 : Profil vertical temporel de la concentration en NO_2 dans la vallée de Chamonix, en direction des Houches, du 18 au 19 janvier 2001 (16h00-06h00) 27

Figure 27 : Incertitude des concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent.....27

Figure 28 : Mesures LIDAR au-dessus de la nationale N205 (vers Les Houches), le 18/01/01 (21h30) 28

Figure 29 : Profil vertical temporel des concentrations en NO_2 du 18 au 19 janvier 2001 (16h00-08h00) au-dessus de la nationale N205 (vers Les Houches) 28

Figure 30: Incertitude des concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent 28

Figure 31 : Résultats de la station d'Air des 2 Savoie "Les Houches" les 18 et 19 janvier 2001.....29

Figure 32: Comparaison des résultats entre le capteur NO_2 "Les Houches" et le LIDAR (18/01/01_16h00…19/01/01_08h00).....29

Figure 33 : Température et humidité relative sur le site du LIDAR du 29 au 31 janv. 2001 30

Figure 34: Pression atmosphérique et luminosité sur le site du LIDAR du 29 au 31 janv. 2001 30

Figure 35 : Direction du vent mesurée par le mât météorologique sur le camion LIDAR 31

Figure 36 : Vitesse et direction du vent mesurées par le SODAR (à 50m) au-dessus du camion LIDAR du 30 au 31 janv. 2001.....31

Figure 37: Vitesse et direction du vent mesurées par le SODAR (à 100m) au-dessus du camion LIDAR du 29 au 31 janv. 2001.....32

Figure 38: Exemple de profil LIDAR réalisé en direction de St-Jean de Maurienne (29/01- 17h) 33

Figure 39 (a-h) : Présentation de quelques profils angulaires LIDAR (NO_2) réalisées en direction de St-Jean de Maurienne, du 29 au 31 janvier. 34

Figure 40 : Profil vertical temporel des concentrations en NO_2 du 29 au 31 janvier 2001 (15h00-15h00) au-dessus de la vallée de la Maurienne en direction de St-Jean de Maurienne.....35

Figure 41 : Incertitude des concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent 35

Figure 42 : Résultats de la station d'Air des 2 Savoie "St-Jean de Maurienne" du 29 au 31 janvier 2001.....36

Figure 43 : Comparaison des résultats entre le capteur NO_2 "St-Jean" et le LIDAR (29/01/01_15h00…31/01/01_15h00).....36

Figure 44 : Exemple de profil LIDAR réalisé en direction de St-Julien Mont Denis (29/01- 18h).....37

Figure 45 (a-h) : Présentation de quelques profils angulaires LIDAR (NO_2) réalisées en direction de St-Julien Mont Denis, du 29 au 31 janvier. 39

Figure 46 : Profil vertical temporel des concentrations en NO_2 du 29 au 31 janvier 2001 (heures locales) au-dessus de la vallée de la Maurienne en direction de St-Julien Mont Denis 39

Figure 47 : Incertitude des concentrations en NO_2 pour le profil vertical temporel précédent 40

Figure 48 : Résultats de la station d'Air des 2 Savoie "St-Julien Mont Denis" du 29 au 31 janvier 2001.....40

Figure 49: Comparaison des résultats entre le capteur NO_2 "St-Julien" et le LIDAR (29/01/01_15h00…31/01/01_15h00).....41