



**Synthèse annuelle sur les
instruments « à long trajet optique »
LIDAR-DOAS**

RAPPORT FINAL

Laboratoire Central de Surveillance de la
Qualité de l'Air

Convention 115/2003

Emeric FREJAFON

Unité Qualité de l'Air – Direction des Risques Chroniques

Décembre 2003

SYNTHESE ANNUELLE SUR LES INSTRUMENTS « à long trajet optique » LIDAR-DOAS

RAPPORT FINAL

LABORATOIRE CENTRAL DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR

Convention 115/2003 financée par la Direction des Préventions des
Pollutions et des Risques (DPPR)

DECEMBRE 2003

personnes ayant participé à l'étude

Emeric FREJAFON, Amandine FIEVET

Ce document comporte 40 pages (hors couverture et annexes).

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Emeric FREJAFON	Rémi PERRET	Martine RAMEL
Qualité	Ingénieur Unité AIRE	Responsable Unité AIRE	Responsable LCSQA/INERIS
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

<u>TABLE DES MATIÈRES</u>		<u>2</u>
<u>RESUME GENERAL</u>		<u>4</u>
<u>CAMPAGNE DOAS SUR LA ZONE AEROPORTUAIRE DE LYON-SAINT-EXUPERY</u>		<u>7</u>
1. CADRE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS :		7
2. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE		7
3. SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS		8
3.1	RENDU OPERATIONNEL DES DOAS EN CAMPAGNES DE MESURES	8
3.2	COMPARAISON DES DONNEES DOAS AVEC LES MESURES PONCTUELLES	9
3.3	SPATIALISATION DES POLLUANTS GAZEUX ET CORRELATION AVEC L'ACTIVITE AEROPORTUAIRE	11
3.3.1	Spatialisation sur la zone de transfert de passagers	11
3.3.2	Influence de la dynamique météorologique et du régime moteur	12
3.3.3	Spatialisation des polluants BTEX	12
<u>CAMPAGNE DOAS D'ETUDE D'IMPACT D'UNE MODULATION DE TRAFIC – CHAMONIX 2002-2003</u>		<u>13</u>
4. CADRE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS :		13
5. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE DE MESURES :		13
6. SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS :		14
6.1	RENDU OPERATIONNEL DES DOAS EN CAMPAGNES DE MESURES	14
6.2	COUPLAGE DOAS-ANALYSEUR APPLIQUE A LA CARACTERISATION DE LA DISPERSION D'UNE EMISSION LINEIQUE	16
<u>CONTRAINTES D'INSTALLATION ET D'UTILISATION DES DOAS LORS DE CAMPAGNES DE MESURES</u>		<u>18</u>
1. CONTRAINTES D'INSTALLATION		18
1.1	MATERIEL NECESSAIRE A L'INSTALLATION D'UN DOAS.	18
1.2	SERVITUDES ELECTRIQUES SUR LES SITES EMETTEUR ET RECEPTEUR.	18
1.3	TRAJET OPTIQUE OPTIMISE EN FONCTION DU POLLUANT MESURE	19
1.4	STABILITE MECANIQUE DU SITE EMETTEUR	19
1.5	TAUX D'ABSORPTION DU TRAJET OPTIQUE	20
1.6	ACCES AUX SITES EMETTEUR ET RECEPTEUR	20
1.7	STABILITE DU SITE RECEPTEUR	20
1.8	ORIENTATION DU TRAJET OPTIQUE	20
2. CONTRAINTES LIEES A L'UTILISATION DE DOAS		21
2.1	INFLUENCE DES PARTICULES SUR LA MESURE DU NO ₂	21
2.2	CONFIGURATION INFORMATIQUE DU POSTE DE CONTROLE DU DOAS	21
2.3	CONTROLE QUALITE, ASSURANCE QUALITE DES MESURES DOAS	21
2.4	COUPLAGE DOAS – ANALYSEURS	22
2.4.1	Étude de trafic ou étude en zone urbaine ou péri-urbaine	22
2.4.2	Étude en zone rurale	22

<u>CAMPAGNE LIDAR INTERREG III_μ</u>	23
1. CADRE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS :	23
2. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE DE MESURES :	24
3. SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS :	25
3.1 MISE A DISPOSITION DE L'ENSEMBLE DES DONNEES	25
3.2 TAUX DE FONCTIONNEMENT, RENDU OPERATIONNEL	26
3.3 COUPLAGE LIDAR-ANALYSEURS POUR LA DESCRIPTION DES ECHANGES VERTICAUX	26
3.4 FAISABILITE D'UNE CARACTERISATION DES AEROSOLS	28
<u>SYNTHESE ANNUELLE SUR L'UTILISATION DES INSTRUMENTS « A LONG TRAJET OPTIQUE » DE TYPE LIDAR</u>	30
1. UTILISATION DES LIDAR EN FRANCE	30
1.1 CAMPAGNES REALISEES PAR L'INERIS	30
1.2 CAMPAGNES REALISEES PAR D'AUTRES LABORATOIRES DE RECHERCHE	30
1.3 BILAN D'UTILISATION DU LIDAR COPARLY, EXTRAIT DU RAPPORT COPARLY	31
2. VEILLE SCIENTIFIQUE/TECHNOLOGIQUE NATIONALE	31
2.1 ÉTUDES ENGAGEES PAR LE CEA/LSCE	31
2.2 ÉTUDES ENGAGEES PAR LE LASIM/UCB LYON1	32
2.3 ÉTUDES ENGAGEES PAR L'INERIS	33
2.4 ÉTUDES COMMUNES ENGAGEES PAR L'IPSL/SA ET LE LMD	33
2.5 ÉTUDES ENGAGEES PAR LE LPCA/ULCO	34
3. TRANSFERT DE PROCEDES ET COMMERCIALISATION	35
4. PROGRAMMES DE RECHERCHE INERIS	35
4.1 RESUME DES PROGRAMMES DE RECHERCHE LIDAR DE L'INERIS.	35
4.2 LIDAR APPLIQUE A LA CARACTERISATION DES AEROSOLS.	36
4.2.1 Synthèse générale.	37
4.2.2 Perspectives à court terme	39
<u>LISTE DES ANNEXES</u>	40
<u>ANNEXE A : CAMPAGNE DOAS SUR L'AEROPORT DE LYON-ST-EXUPERY</u>	41
<u>ANNEXE B : CAMPAGNE DOAS D'ETUDE D'IMPACT D'UNE MODULATION DE TRAFIC – CHAMONIX 2002-2003</u>	42
<u>ANNEXE C : CAMPAGNE LIDAR INTERREG III_μ STRASBOURG 2003</u>	43
<u>ANNEXE D : COMPTE RENDU D'ACTIVITE DU LMD, ANNEE 2003</u>	44
<u>ANNEXE E : BILAN GENERAL DU LIDAR COPARLY</u>	46

RESUME GENERAL

Dans le cadre de nos missions pour le compte du LCSQA, nous avons effectué des campagnes de mesures DOAS visant à démontrer leur caractère opérationnel lorsque les contraintes d'installation et d'utilisation sont respectées.

Pour ce faire, nous avons réalisé une campagne de mesures étalée sur deux années, lors de la réouverture du tunnel du Mont Blanc. Notre DOAS, qui était installé au niveau de la nationale N205 permettant d'accéder à Chamonix et au tunnel du Mont Blanc, a fonctionné de janvier à mai 2002 puis de janvier à mars 2003. Il était couplé à des analyseurs ponctuels installés en différents points le long de cette route. Les polluants suivis étaient l'Ozone, le NO, le NO₂, le SO₂ avec un trajet optique de 158 m, optimisé pour le suivi du polluant NO. Compte tenu de ce trajet optique très court et des limites de détection instrumentales dans cette configuration, les résultats obtenus sur les polluants Benzène et Toluène ont été associés à des incertitudes trop élevées pour être utilisables dans ce cadre de travail. Cette étude nous a permis de montrer qu'un respect scrupuleux des critères d'installation et d'utilisation, permet d'accéder à des mesures DOAS de très bonne qualité, avec des taux de fonctionnement optimisés. Nous avons ainsi pu mettre en évidence la très bonne qualité des mesures NO, NO₂ et Ozone du DOAS et notamment la corrélation entre ces données avec celles obtenues par des techniques de mesures ponctuelles.

Cette étude a permis de montrer que les DOAS et les analyseurs ponctuels sont des instruments complémentaires et non redondants et que leur association permet d'accéder à un niveau d'information supérieur. En effet, nous avons mis en évidence que le couplage entre un DOAS et un analyseur permettait de qualifier les facteurs de dispersions, paramètres fondamentaux dans la description de la dispersion atmosphérique. Par ailleurs, l'étude de ce couplage en fonction du positionnement des analyseurs, a montré que la localisation d'une analyse ponctuelle peut être critique et difficilement représentative de la qualité de l'air environnante, lorsqu'elle est située à proximité immédiate d'une voie de circulation à fort trafic présentant des effets turbulents locaux. Afin de quantifier ceci, nous avons développé un programme spécifique de dispersion d'une émission ponctuelle ou linéique (MODELIS), utilisant les données du DOAS et des analyseurs afin d'évaluer l'influence du trafic PL sur la qualité de l'air. Cela nous a permis de mettre en évidence que le trafic PL avait une influence supérieure à 50% en semaine et de l'ordre de 20% le week-end, sur la concentration en polluant NO mesurée durant ces campagnes de mesures. Néanmoins, compte tenu des limitations de ce modèle gaussien et des approximations qui ont été effectuées, il est nécessaire de valider ces premiers résultats par une analyse plus spécifique, telle que celle qui est en cours dans le cadre du programme POVA coordonné par le réseaux de surveillance AIR'APS et le LGGE de Grenoble.

De même, nous avons réalisé durant l'hiver 2003, dans le cadre de l'étude globale entreprise par COPARLY, une campagne de mesures DOAS et BTEX sur la zone aéroportuaire de Lyon-Saint Exupéry. La mise en comparaison des données du DOAS SANOA et des mesures ponctuelles, a permis de confirmer la validité des mesures du DOAS, notamment pour les polluants Ozone, NO₂ et NO. En revanche, aucune corrélation n'a pu être établie entre les analyses BTX effectuées par tubes passifs et les mesures DOAS concernant le Benzène, Toluène et Xylène, car les concentrations présentes étaient très proches des limites de détection instrumentales du DOAS.

Il semble que les polluants BTEX soient de faibles indicateurs du trafic des avions lors des phases de décollage/atterrissage (LTO) ou de stationnement (APU). Ces résultats ont été renforcés par la similitude des résultats obtenus par les tubes passifs intégrant les phases d'activités et d'inactivité et les canisters documentant l'activité diurne en zones APU et LTO. De même, l'étude du rapport entre les concentrations en Toluène et Benzène, proche de 1 pour l'ensemble des sites de prélèvements, semble montrer que l'activité du parc automobile roulant a peu d'influence sur les concentrations en BTEX mesurées sur la zone aéroportuaire lors de cette étude hivernale. Il s'agit néanmoins de résultats préliminaires qui n'intègrent pas les phases de roulage des aéronefs (taxi-way) où le régime moteur favorisent les émissions de composés organiques légers. Par ailleurs, ces résultats préliminaires seront étudiés plus en détail dans le cadre de l'étude globale entreprise par COPARLY sur cet aéroport.

Enfin, nous avons observé des fluctuations importantes des concentrations en NO, qui sont corrélées à l'activité des avions au niveau du Hall central. En revanche, une corrélation moins nette a été constatée pour le NO₂, avec des niveaux de concentration qui sont restés largement inférieurs aux valeurs seuils environnementales. La période hivernale n'étant pas favorable à l'oxydation du NO en NO₂ par manque d'Ozone, il serait donc souhaitable d'effectuer cette même étude en période estivale où les teneurs en ozone favorisent l'oxydation du monoxyde d'azote. Par ailleurs, il serait important d'effectuer la caractérisation des teneurs en polluants gazeux à l'intérieur du terminal et notamment au niveau de la salle d'attente d'embarquement car les caractéristiques intrinsèques du bâtiment peuvent favoriser les échanges intérieur / extérieur (absence d'étanchéité des parois et des portes d'accès, ventilation proche des émissions compte tenue de la faible hauteur du bâtiment).

Ces deux études DOAS ont permis de définir précisément quelles étaient les principales contraintes liées à l'installation et à l'utilisation d'instruments à long trajet optique de type DOAS dans le cadre de campagnes de mesures. Il s'agit de la stabilité mécanique des points émetteur et récepteur, mais également de la nécessité de configurer le trajet optique en fonction des polluants à détecter. Par ailleurs, d'autres contraintes ont été mises en évidence telle que la stabilité de l'alimentation électrique et la configuration logiciel du poste de contrôle informatique. Enfin, une optimisation de la qualité de ces données doit être réalisée par des calibrages successifs de l'appareil et notamment un essai de linéarité sur site en cours de campagne. Néanmoins, cette recommandation qui est opérationnelle pour le polluant O₃, nécessite d'être optimisée pour les autres polluants et devrait être notamment facilitée par l'utilisation de cellules scellées.

Nos missions pour le compte du LCSQA concernent également les instruments à long trajet optiques de type LIDAR. Dans ce cadre, nous avons, d'une part, participé à la campagne de mesures INTERREG IIIμ coordonnée par l'ASPA et, d'autre part, effectué une veille technologique et scientifique annuelle sur ce type d'instrument.

La campagne INTERREG IIIµ s'est déroulée du 12 mai au 15 juin 2003 sur la région de Strasbourg, où l'INERIS a mis à disposition un LIDAR profiler d'ozone vertical. Outre la fourniture de données en continu durant l'ensemble de la période de mesure, cette campagne a permis de confirmer le caractère opérationnel de ces nouveaux LIDAR qui autorisent des mesures autonomes sur de longues périodes. En effet, cet instrument a fonctionné en automatique avec une excellente disponibilité des mesures durant 3 semaines, fournissant des profils verticaux du sol à la troposphère libre de concentration en ozone et d'extinction atmosphérique, avec une intégration spatiale d'environ 50 m et une intégration temporelle de 10 minutes.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'influence des échanges verticaux atmosphériques dans l'apparition d'un épisode de pollution à l'ozone mais également l'effet d'un panache urbain dans une zone rurale sous le vent.

La veille scientifique et technologique effectuée sur les instruments de type LIDAR a permis de mettre en évidence leur caractère opérationnel pour les polluants gazeux mais également la volonté de nombreuses équipes de recherche à développer des LIDAR « aérosols » à faible coût. Ce type d'instrument, ne permet pas une quantification des particules atmosphériques, mais utilise leurs propriétés de diffusion de la lumière afin d'obtenir la hauteur de la couche limite, la stratification atmosphérique ou bien encore la hauteur de la couverture nuageuse. De nombreuses applications pourraient alors être envisagées, telles que le paramétrage de modèles dynamiques ou physico-chimiques, la prise en compte du bilan énergétique et son incidence sur les changements climatiques, mais également la différenciation des émissions ayant un impact local, régional ou global.

Par ailleurs, si la caractérisation tridimensionnelle de la pollution par les gaz est de plus en plus aisée à effectuer, comme le montre les résultats obtenus par les dernières campagnes réalisées, un travail important reste à effectuer pour accéder à la caractérisation complète des aérosols atmosphériques. L'INERIS, en collaboration avec le LASIM, développe actuellement un LIDAR appliqué à la caractérisation des aérosols (en masse, taille et composition chimique) mais également au suivi d'autres composés plus spécifiques tels que les polluants gazeux industriels ou bien encore ceux d'origine biologique.

Enfin, l'apport essentiel de ces instruments dans la documentation de la stratification atmosphérique et sa dynamique spatio-temporelle a incité de nombreux laboratoires de recherche à développer des couplages entre la technologie LIDAR et les instruments de modélisation. Ainsi, plusieurs projets sont en cours, visant à utiliser les outils LIDAR comme instruments de paramétrage et de validation des modèles tridimensionnels multi-échelles. On citera par exemple les actions engagées dans la validation des sorties de modèles continentaux pour les polluants O₃, NO₂ et les particules ou bien encore la localisation des émissions diffuses qui vise à utiliser des données LIDAR pour le paramétrage d'un modèle inverse spécifique.

CAMPAGNE DOAS SUR LA ZONE AEROPORTUAIRE DE LYON-SAINTE-EXUPERY

1. CADRE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS :

L'INERIS, dans le cadre de sa mission d'assistance auprès des AASQA, avait programmé la réalisation d'une campagne DOAS sur zone aéroportuaire, avec pour objectif principal, de démontrer la faisabilité d'une surveillance intégrée et son utilité dans la quantification de l'impact environnemental d'un émetteur hétérogène ayant une large extension spatiale.

Par ailleurs, dans le cadre de la mise en place de l'ISO 14000 relative à la prise en compte de l'impact environnemental, l'Aéroport Lyon-Saint Exupéry adhère à l'association de surveillance de la qualité de l'air COPARLY. Dans ce cadre, l'Aéroport Lyon-Saint Exupéry a souhaité engager en partenariat avec COPARLY une vaste étude sur la qualité de l'air en 2001-2002, qui concerne à la fois le recensement des émissions et la surveillance de la qualité de l'air ambiant. Ce projet devrait permettre à l'aéroport de quantifier les impacts directs et indirects des émissions liées à l'activité aérienne. COPARLY, qui a fait récemment l'acquisition d'un DOAS 2000 TEI MEGATEC, souhaitait par ailleurs inclure cet appareil dans cette campagne.

L'INERIS, après avis du MEDD, a participé à cette étude, dans le cadre de sa mission d'assistance aux AASQA, en prenant plus particulièrement à sa charge l'instrumentation de 3 DOAS (ENVIRONNEMENT SA, OPSIS et TEI), répartis sur la zone étudiée, avec comme principal objectif de préciser les conditions d'utilisation des DOAS en sites de proximité industrielle ainsi que la qualité des informations fournies. De ce fait, l'INERIS, en concertation avec COPARLY, a réalisé les actions suivantes, avec comme finalité un retour d'expérience utile à l'ensemble des AASQA :

- Fournir une assistance sur l'implantation d'un DOAS au sein des AASQA et plus particulièrement dans le cadre de leurs études spécifiques : contraintes d'implantation, mise en route et maintenance, fonctionnement.
- Démontrer l'apport de la technique DOAS dans l'évaluation de l'impact environnemental d'une source diffuse, notamment dans son couplage avec des instruments de mesures ponctuels.
- Effectuer un couplage entre différentes techniques de mesurage, afin d'accéder à des informations complémentaires, telles que la spatialisation des émissions ou leurs réactivités chimiques.

2. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE

Cette campagne, qui s'est déroulée du 13 décembre 2002 au 13 janvier 2003 en association avec l'étude engagée par COPARLY, a impliqué l'ensemble des moyens suivants :

- 3 DOAS : le DOAS SANOA de l'INERIS installé sur la zone de transfert des passagers, le DOAS OPSIS d'AMPASEL installé en fin de piste B Sud (atterrissage) et enfin le DOAS 2000 TEI de COPARLY installé en fin de piste A Sud (décollage).

- 3 stations de mesures multigaz : la station INERIS installé sur le toit de l'hôtel principal, la station COPARLY installé en fin de piste A et enfin le laboratoire mobile d'ASCOPARG installé au Nord de l'aéroport.
- Étude BTX par tubes passifs et canisters : deux campagnes, de une semaine chacune, associant 10 tubes passifs répartis sur 10 sites. Cette étude a été financée pour partie par COPARLY.



Instrumentation de la zone aéroportuaire : sites des 3 DOAS, Tubes passifs, stations

3. SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS

3.1 RENDU OPERATIONNEL DES DOAS EN CAMPAGNES DE MESURES

Tous les moyens impliqués dans cette campagne, et notamment les 3 DOAS, ont été en fonctionnement optimal, fournissant des données en continu du 13 décembre 2002 au 13 janvier 2003. Ainsi, nous avons obtenu les taux de fonctionnement suivants :

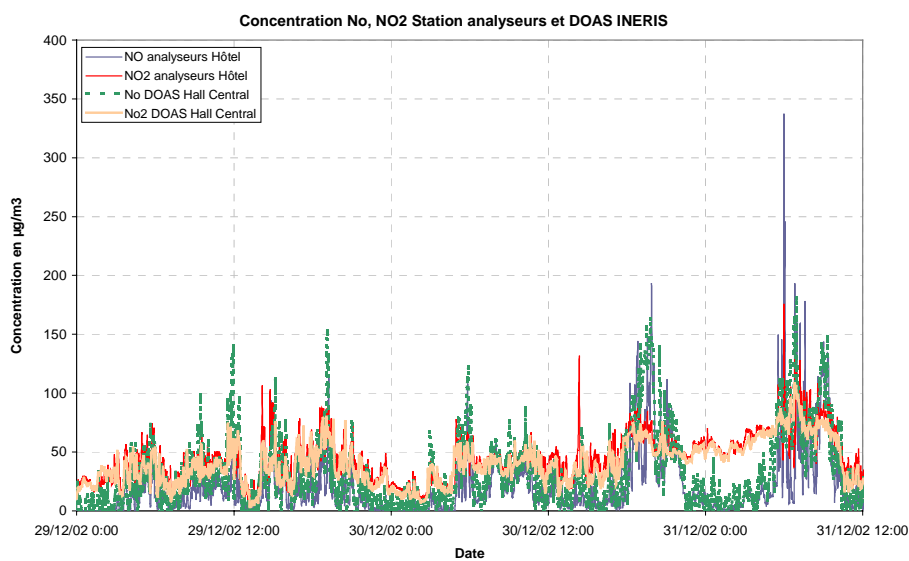
- DOAS SANOA INERIS : Taux de fonctionnement de 94 % (perte d'intensité lumineuse en situation neigeuse) et taux de données validées de 93 %, pour les polluants NO, NO₂, SO₂, O₃. Les résultats obtenus pour les BTX n'ont pas été validés, le calibrage de l'appareil pour ces polluants n'ayant pu être réalisé compte tenu de contraintes de sécurité. Nous attendons ainsi beaucoup de l'apport du calibrage par cellules scellées concernant ces polluants, notamment sur des sites où les contraintes de sécurité ou de sûreté sont importantes. Néanmoins, malgré cette absence de calibrage, les résultats obtenus pour le benzène semblent acceptables, comme le montre la comparaison avec les tubes passifs et les canisters décrites dans les paragraphes suivants.

- DOAS OPSIS AMPASEL : Taux de fonctionnement proche de 90% pour le polluant NO₂. En revanche, un dysfonctionnement sur cet appareil, détaillé dans les rapports INERIS-DRC-03-45795-AIRE-652-EFR et INERIS-DRC-03-45795-AIRE-655-EFR, ne nous a pas permis d'effectuer la mesure des polluants SO₂ et O₃ : spectromètre d'analyse endommagé par l'humidité (stockage durant plusieurs trimestres hors tension), entraînant un span supérieur à 2 et un offset d'environ 300 ppb sur les polluants SO₂ et O₃.
- DOAS 2000 COPARLY : Taux de fonctionnement de 73%, pour les polluants NO₂, SO₂, O₃. Par ailleurs, un suivi des BTX fut effectué afin de permettre au constructeur TEI d'accéder à un retour d'expérience sur la faisabilité d'une surveillance des polluants BTX. Aucun retour ne nous est parvenu à l'heure actuelle.
- Station INERIS d'analyseurs ponctuels : Taux de fonctionnement de 100 % et taux de données validées de 100 %, pour les polluants NO, NO₂, SO₂, O₃. Par ailleurs, un suivi des BTX (PID/FID) a été effectué du 6 au 13 janvier 2003. La récupération des données a été réalisée par COPARLY.

Cette campagne a permis de démontrer les performances des DOAS, lorsque leur installation respecte certaines contraintes de fonctionnement et qu'un contrôle qualité rigoureux est effectué préalablement à toute campagne de mesures.

Ainsi, par exemple, nous avons effectué préalablement à la campagne, un contrôle qualité du DOAS SANOA INERIS et du DOAS OPSIS AMPASEL. Pour ce faire, nous avons réalisé des tests de réception dans la galerie de l'INERIS et notamment mis en parallèle ces deux DOAS avec des analyseurs puis réalisé des courbes de linéarité successives. Nous n'avons pas constaté de dysfonctionnement concernant le DOAS SANOA, tant sur les linéarités que sur sa comparaison avec des analyseurs ponctuels. En revanche, nous avons eu de très gros soucis avec le DOAS OPSIS d'AMPASEL qui nous ont conduit à invalider toutes les données O₃ et SO₂ ainsi qu'à émettre des doutes sur la qualité des données NO₂.

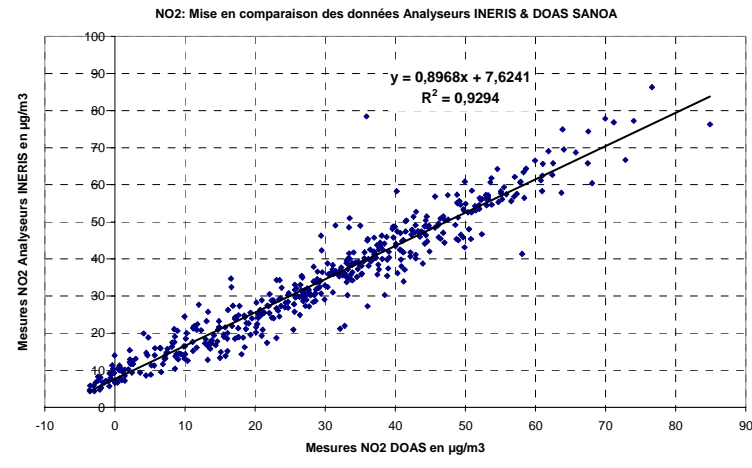
3.2 COMPARAISON DES DONNEES DOAS AVEC LES MESURES PONCTUELLES



exemple de données NO et NO₂, obtenues par l'analyseur NO_x installé sur le toit de l'hôtel Sofitel au centre de l'aérogare et par le DOAS installé sur le toit du hall central (à proximité des avions lors de leurs phases de chargement/déchargement des passagers)

Nous avons ensuite évalué la cohérence des données DOAS avec les mesures obtenues par les analyseurs ponctuels. Ainsi, sur la base des deux exemples ci-avant et ci-après, qui mettent en correspondance les données du DOAS SANOA avec des analyseurs ponctuels installés à proximité, nous avons obtenu des concentrations moyennes très peu différentes la nuit (en situation d'homogénéité atmosphérique et en absence de trafic).

La mise en comparaison des mesures DOAS avec des résultats obtenus par des analyseurs ponctuels a permis également de confirmer la validité des données du DOAS SANOA, notamment pour les polluants Ozone, NO₂, NO où nous avons obtenu les coefficients de corrélations supérieurs à 0,9 (en données horaires) sur l'ensemble de la campagne de mesures.



Corrélation Analyseurs INERIS / DOAS SANOA pour le polluant NO₂, réalisée sur l'ensemble de la campagne de mesures et converties en données horaires.

Aucune corrélation nette n'a pu être établie entre les analyses BTX par tubes passifs et les mesures du DOAS SANOA concernant les polluants Benzène, Toluène et Xylène car les concentrations présentes étaient trop proches des seuils de détection de l'appareil. Néanmoins, la comparaison entre les mesures obtenues par canisters, par tubes passifs et par le DOAS SANOA, montre des similitudes concernant le polluant benzène, bien que cette comparaison fut effectuée à un niveau de concentration faible (3 µg.m⁻³) et donc proche de la limite de quantification du DOAS considéré.

De même, nous avons mis en évidence une bonne corrélation lors de la mise en comparaison des données du DOAS 2000 TEI et des analyseurs ponctuels installés à proximité. Néanmoins, cela a également montré un défaut de calibrage du DOAS 2000 qui surestime fortement les mesures et possède des biais importants. Or cet instrument n'a pas été calibré en début de campagne compte tenu des difficultés à utiliser des cylindres hautes teneurs sur la zone aéroportuaire. Cela renforce la nécessité de poursuivre et de finaliser le développement d'outils de calibrage sur site basés sur des cellules scellées. Nous espérons pouvoir finaliser ces outils de calibrage durant l'année 2004. En effet, une première cellule scellée ayant été effectuée, nous sommes actuellement en cours d'évaluation de la stabilité des gaz présents : stabilité temporelle, réactivité du gaz avec les matériaux de la cellule et influence de rayonnements lumineux UV. En revanche, nous avons obtenu un taux de données validées de 50% et un taux de fonctionnement de 75% concernant le DOAS 2000 TEI. Ces résultats sont décevants et traduisent une instabilité de l'instrument (alignement et système d'exploitation) que le constructeur devra veiller à supprimer.

Nous souhaitons également attirer l'attention sur l'instabilité des calibrages effectués pour les DOAS OPSIS et TEI-MEGATEC. En effet, les différents essais de calibrage effectués sur le DOAS OPSIS de AMPASEL, ont mis en évidence une absence de reproductibilité des différentes linéarités effectuées et des coefficients de calibrage proches de 2. Détaillée dans un rapport spécifique transmis à AMPASEL, ces essais ont permis de mettre en évidence la possible dégradation du spectromètre d'analyse (condensation d'humidité sur le réseau). De même, la corrélation obtenue entre le DOAS 2000 TEI et les analyseurs a montré que le calibrage effectué lors des essais de réception du DOAS 2000 TEI ne correspondent plus à la configuration actuelle de l'appareil. Or, les coefficients de linéarité qu'il faudrait appliquer à ces deux instruments sont élevés, ce qui nous semble très excessif et pourrait traduire un dysfonctionnement interne. Nous conseillons donc aux deux constructeurs respectifs d'engager une étude visant à confirmer la stabilité de leurs appareils ainsi qu'à étudier l'origine de telles courbes de linéarité.

3.3 SPATIALISATION DES POLLUANTS GAZEUX ET CORRELATION AVEC L'ACTIVITE AEROPORTUAIRE

3.3.1 Spatialisation sur la zone de transfert de passagers

A la suite de ce contrôle qualité des données, nous avons dans un premier temps mis en comparaison les données de trafic en zone de chargement - déchargement avec le DOAS installé sur le hall central. Ce DOAS intégrait en effet 6 postes d'accès (3 portes) auxquels venaient se relier les avions, lors des opérations de chargement ou déchargement des passagers. Les mesures DOAS obtenues pour le polluant NO étaient très fortement corrélées à l'activité aéroportuaire sur cette zone, caractérisée par de rapides et importantes fluctuations diurnes (d'une amplitude de l'ordre de 300 % vis-à-vis du niveau de fond), notamment dans les tranches horaires (5h-9h) et (16h-19h).

De même, nous avons montré que les concentrations en NO₂ présentes au niveau du hall central pouvaient être corrélées avec l'activité aéroportuaire sur cette zone, mais de manière moins nette, compte tenu des teneurs en O₃ présentes en période hivernale : en absence d'O₃, l'oxydation du NO est très lente et s'appuie sur O₂ et H₂O₂. De ce fait, la durée de vie du NO peut alors être de plusieurs heures à un ou deux jours.

Cela nous a néanmoins permis de montrer que les concentrations en NO_x présentes sur cette zone, notamment au niveau des zones de transfert des passagers, pouvaient être proches des valeurs limites lorsqu'elles étaient exprimées en équivalent NO₂. La période hivernale n'étant pas favorable à l'oxydation du NO en NO₂ par manque d'Ozone, il serait donc souhaitable d'effectuer cette même étude en période estivale lorsque les teneurs en ozone favorisent l'oxydation du monoxyde d'azote, pour apprécier les maxima de NO₂ susceptibles d'être atteints.

Par ailleurs, il serait important d'effectuer cette caractérisation des teneurs en polluants gazeux à l'intérieur du terminal et notamment au niveau de la salle d'attente d'embarquement car les caractéristiques intrinsèques du bâtiment peuvent favoriser les échanges intérieur / extérieur (absence d'étanchéité des parois et des portes d'accès, ventilation proche des émissions compte tenue de la faible hauteur du bâtiment).

3.3.2 Influence de la dynamique météorologique et du régime moteur

Cette étude au niveau du hall central nous a également permis de montrer que la topographie de cette zone pourrait avoir une forte incidence sur la spatialisation des polluants, notamment lorsque le vent est établi en régime de Sud, et donc qu'il serait souhaitable d'entreprendre des études complémentaires visant à documenter la dynamique locale en fonction de conditions météorologiques. Cela pourrait en effet permettre à terme de définir des sites de mesures qui soient représentatif de la qualité de l'air sur cette zone et ce, pour différents régimes de vents.

Nous avons également étudié la dynamique du polluant NO₂ sur le hall central ainsi que sur les pistes. On observe une dynamique beaucoup plus importante au niveau des pistes et notamment sur la piste A correspondant au décollage des avions caractérisée par de fortes émissions de NO_x. Ainsi, il semble que lors des phases de décollage, le rapport NO₂/NO est supérieur à celui au niveau du hall central, expliquant ainsi les fumées rouges généralement associées. Il serait intéressant de confirmer cette hypothèse, mais surtout de la quantifier en étudiant par exemple la dérivée temporelle de ce rapport en associant des mesures DOAS à des instruments d'évaluation des flux émis.

3.3.3 Spatialisation des polluants BTEX

Enfin, nous avons effectué un re-traitement spécifique des données météorologiques (Température, Pression, Humidité, Direction et Vitesse du vent au sol) afin d'optimiser l'analyse des COV légers (Benzène, Toluène, Xylène) par tubes passifs et canisters. Les résultats obtenus sont très faibles et semblent dé-corrélés des mouvements des aéronefs sur les sites de mesures considérés. En effet, les mesures enregistrées à proximité immédiate des pistes ont une répartition Toluène/Benzène proche de 1 (caractéristique d'une zone non influencé par des émissions) pour des concentrations inférieures à la limite de 5 µg/m³. Néanmoins, on a constaté que les tubes passifs installés sur le toit de l'hôtel ont montré des concentrations légèrement supérieures sans pour autant dépasser le seuil, soulignant une très légère influence du parking automobile situé à proximité ou bien des émissions des APU (moteur auxiliaire arrière) des aéronefs lors des phases de stationnement.

Enfin, l'analyse des canisters ayant effectués un prélèvement diurne sur le toit de l'hôtel ainsi qu'à proximité des pistes a permis de montrer que les concentrations obtenues en cours de journée, donc lorsque l'activité aéroportuaire est forte, sont très proches de celles obtenues par les tubes passifs en moyenne hebdomadaires. Ainsi, l'ensemble de cette étude a permis de montré que les polluants BTEX semblent être de faibles indicateurs du trafic des aéronefs lors des phases de décollage/atterrissage et que l'activité du parc des véhicules roulants a une influence très faible sur les concentrations présentes sur la zone aéroportuaire. Il est à noter que les phases de roulage (dite taxi-way) n'ont pu être documentées. Or, il semble que cette phase pourrait induire des émissions de BTX supérieures aux phases LTO (décollage, atterrissage) ou APU (stationnement). Il serait donc souhaitable d'effectuer une campagne d'analyse orientée sur les phases de roulage, mais surtout sur des composés plus lourds et notamment les COSV, qui sont, sans aucun doute, de meilleurs indicateurs de l'activité aéroportuaire. Néanmoins, ces analyses des composés organiques semi-volatils sont pour l'instant difficiles à mettre en place, bien que des résultats prometteurs ont été obtenus à l'INERIS (développement de mousses dédiées à l'extraction de ces composés). De même, les résultats obtenus lors de cette étude BTEX sont préliminaires et devraient être étudiés plus en détail dans le cadre de l'étude globale entreprise par COPARLY.

CAMPAGNE DOAS D'ETUDE D'IMPACT D'UNE MODULATION DE TRAFIC – CHAMONIX 2002-2003

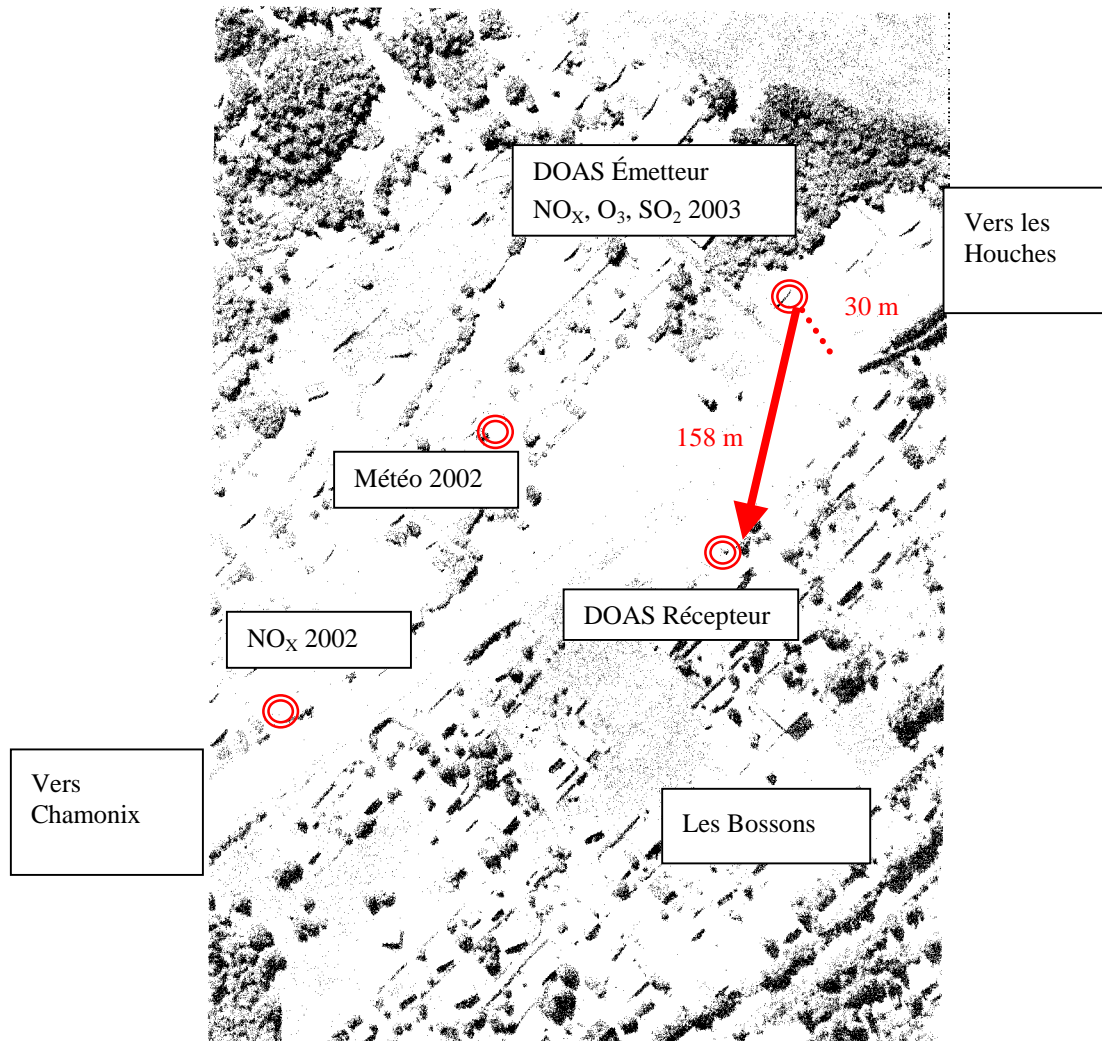
4. CADRE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS :

Dans le cadre de nos missions LCSQA relatives aux instruments DOAS, nous avons convenu d'effectuer une campagne DOAS orientée sur une étude de modulation de trafic. Pour ce faire, nous avons réalisé une campagne de mesures étalée sur deux années, lors de la réouverture du tunnel du Mont Blanc. En effet, la vallée de Chamonix possède une configuration optimale de modulation de trafic. La fermeture du tunnel du Mont Blanc a entraîné une chute très importante du flux de véhicules circulant dans la vallée. Par exemple, le trafic quotidien des poids lourds était de 2 500 PL par jour avant sa fermeture. Par ailleurs, sa réouverture a été effectuée en plusieurs étapes : uniquement les VP/VL, puis également les PL ayant un faible tonnage, puis l'ensemble des PL en alternance et enfin les PL sans politique d'alternance. Néanmoins, cette réouverture en plusieurs étapes ne nous a pas permis de remplir nos objectifs en 2002. Nous avons donc réalisé une seconde campagne, dans le cadre du programme LCSQA, en collaboration avec l'étude POVA, qui visait à quantifier l'action d'une modulation de trafic sur la qualité de l'air dans les vallées de Chamonix et de la Maurienne.

5. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE DE MESURES :

Notre DOAS, qui était installé au-dessus de la nationale N205 permettant d'accéder à Chamonix et au tunnel du Mont Blanc, a fonctionné de janvier à mai 2002 puis de janvier à mars 2003. Il était couplé à des analyseurs ponctuels installés en différents points le long de cette route. Les polluants suivis étaient l'Ozone, le NO, le NO₂, le SO₂ avec un trajet optique de 158 m, optimisé pour le suivi du polluant NO. Compte tenu de ce trajet optique très court et des limites de détection instrumentales dans cette configuration, les résultats obtenus sur les polluants Benzène et Toluène ont été associés à des incertitudes trop élevées pour être utilisables dans le cadre de cette étude.

Les conditions météorologiques très rudes propres à la vallée de Chamonix, ont engendré de très nombreuses contraintes d'installation et d'utilisation de notre DOAS. Mises en évidence durant l'hiver 2002, elles nous ont permis d'obtenir un retour d'expérience important sur l'installation d'un DOAS et nous ont permis d'accéder à une très bonne qualité des données lors de la seconde campagne DOAS réalisée durant l'hiver 2003, mais également lors de la campagne DOAS réalisée sur l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry durant l'hiver 2003, décrite précédemment.

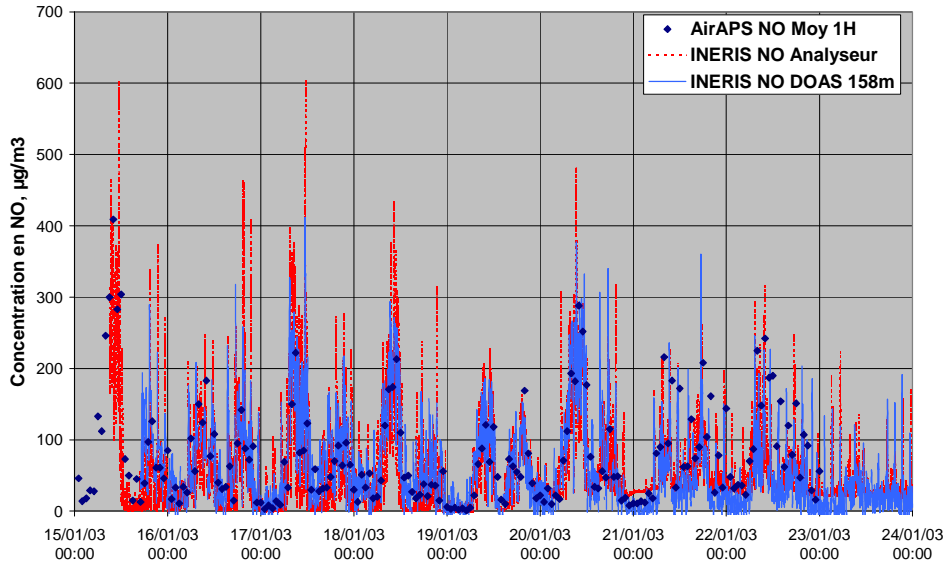


Vue générale du site de mesures, Chamonix

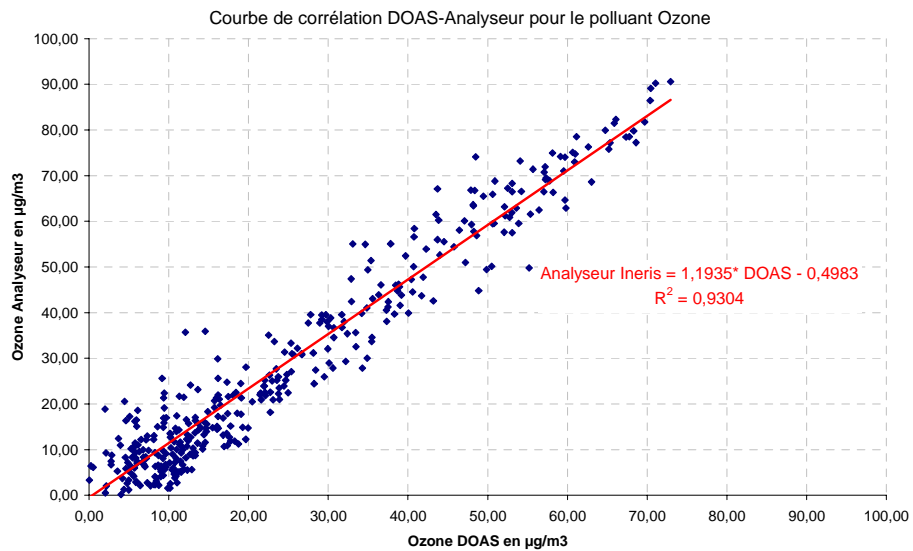
6. SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS :

6.1 RENDU OPERATIONNEL DES DOAS EN CAMPAGNES DE MESURES

Après nous avoir permis de mettre en évidence les principales contraintes liées à l'installation et à l'exploitation d'instruments de type DOAS dans le cadre de campagnes de mesures, cette étude a permis de montrer qu'un respect scrupuleux de ces contraintes permet d'accéder à des mesures DOAS de très bonne qualité, avec des taux de fonctionnement optimisés. Nous avons ainsi pu mettre en évidence la très bonne qualité des mesures NO , NO_2 et Ozone du DOAS et notamment la corrélation entre ces données et d'autres obtenues par des techniques de mesures ponctuelles, comme le montre les deux figures ci-après.



Concentrations en NO obtenues par le DOAS et les deux analyseurs durant la campagne intensive hiver 2003 du programme de recherche POVA.



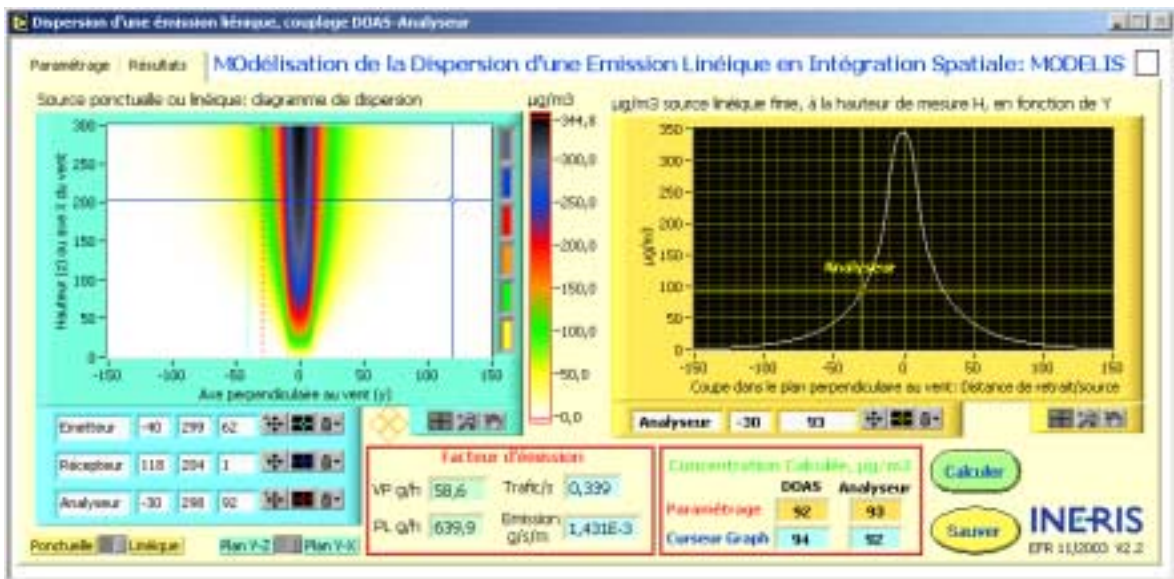
Corrélation DOAS-Analyseur pour le polluant Ozone, en données horaires

Cette campagne a par ailleurs permis de montrer qu'il était concevable de réaliser des calibrages sur site, mais que cette technique nécessite d'être optimisée et que son caractère opérationnel doit encore être amélioré. En effet, opérationnel pour l'O₃ en utilisant un calibrateur haute teneur, elle devient délicate pour les autres polluants car elle nécessite des cylindres haute teneur et haute pression.

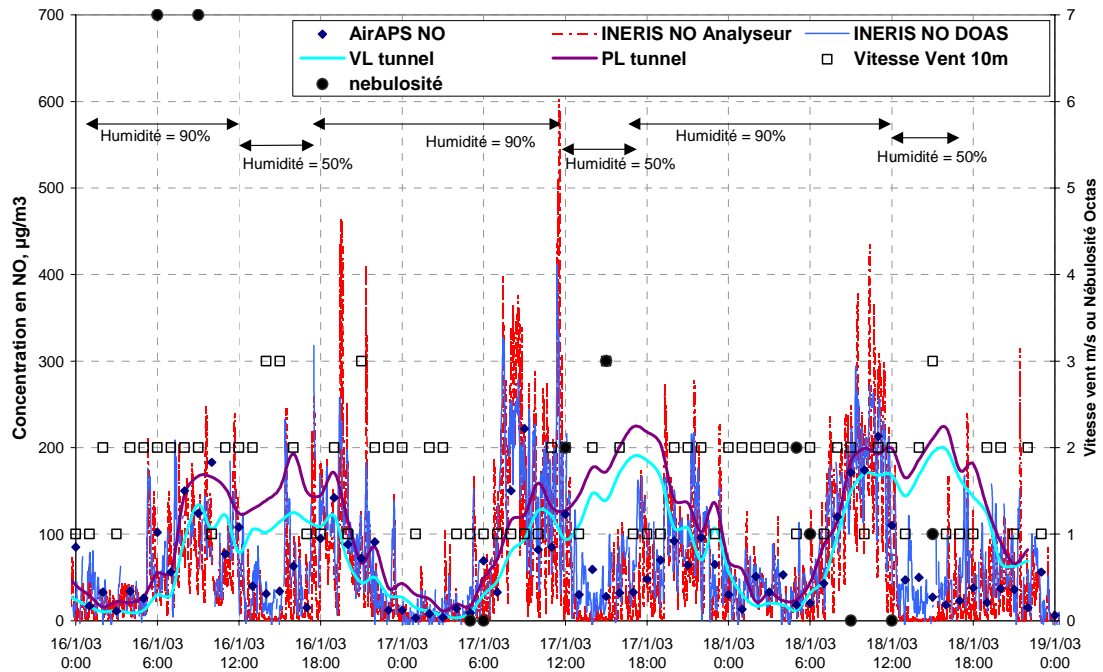
6.2 COUPLAGE DOAS-ANALYSEUR APPLIQUE A LA CARACTERISATION DE LA DISPERSION D'UNE EMISSION LINEIQUE

Une fois démontrée la qualité des données DOAS, nous avons évalué la complémentarité des instruments DOAS avec des analyseurs ponctuels. Nous avons ainsi mis en évidence que le couplage entre un DOAS et un analyseur permettait de quantifier les facteurs de dispersion d'une émission ponctuelle ou linéique et donc la stabilité atmosphérique, paramètre fondamental dans la description de la dispersion atmosphérique et de l'impact local des émetteurs. Nous avons également démontré que si cette complémentarité est fondamentale pour les polluants NO et NO₂ qui possèdent une forte hétérogénéité atmosphérique, elle n'est pas nécessairement utile pour le polluant Ozone où les valeurs mesurées par les deux instruments sont généralement équivalentes.

En étudiant plus en détail cette complémentarité DOAS-Analyseur pour le polluant NO, nous avons ainsi pu quantifier l'apport de ce couplage dans la compréhension de la stabilité atmosphérique et l'effet d'une émission sur la qualité de l'air environnante. Ainsi, par le développement d'un programme spécifique de dispersion d'une émission linéique (MODELIS) utilisant les données DOAS et analyseur, nous avons pu fournir une première évaluation de l'influence du trafic PL sur la qualité de l'air environnante. Cela nous a permis de montrer que le trafic lié au tunnel peut présenter une influence supérieure à 50 % en semaine et de l'ordre de 20 % le week-end, sur la concentration en NO mesurée.



Exemple de résultats obtenus par MODELIS, dans le cas d'une faible stabilité atmosphérique (classe A) et d'un trafic égal à celui présent sur le site le 16 janvier 2003.



Graphique générale de concentration, trafic et conditions météorologiques du 16 au 18 mars 2003, Chamonix.

Ainsi, utiliser le couplage DOAS-Analyseur comme outil de paramétrage et de validation de MODELIS, a permis de quantifier l'influence du trafic issu du Tunnel du Mont Blanc sur la qualité de l'air. Néanmoins, compte tenu des nombreuses limitations de ce programme et des approximations qui ont été effectuées, il est nécessaire de valider ces premiers résultats par une analyse plus spécifique, telle que celle en cours dans le cadre du programme POVA (Pollution en Vallée Alpine) coordonné par le réseau AIR'APS et le laboratoire de recherche LGGE de Grenoble.

Par ailleurs, la mise en comparaison de MODELIS avec d'autres outils disponibles (CAL3QCH et ADMS) a permis de souligner l'influence des coefficients de dispersion horizontaux et verticaux sur les concentrations calculées et donc la nécessité de les connaître aussi précisément que possible. Cela a permis de démontrer l'apport du couplage DOAS-Analyseur dans la qualification de la stabilité atmosphérique et plus généralement l'importance d'outils tridimensionnels dans la quantification des effets turbulents locaux et des coefficients de dispersion horizontaux et verticaux.

Finalement, ces deux campagnes de mesures DOAS, réalisées en 2002 et 2003 sur Chamonix, ont permis, d'une part, de quantifier les contraintes d'installation de ce type d'instrument et, d'autre part, de démontrer leur apport essentiel dans la compréhension de l'influence d'une modulation de trafic sur la qualité de l'air.

CONTRAINTES D'INSTALLATION ET D'UTILISATION DES DOAS LORS DE CAMPAGNES DE MESURES

Le retour d'expérience obtenu lors des trois campagnes DOAS réalisées sur l'aéroport de Lyon-Saint Exupéry (2003) et Chamonix (2002, 2003), a permis de mettre en évidence les contraintes à respecter lors de l'installation ou de l'utilisation d'instruments de types DOAS.

1. CONTRAINTES D'INSTALLATION

Le retour d'expérience de ces deux campagnes de mesures a permis de définir les principales contraintes liées à l'installation et à l'exploitation des DOAS.

1.1 MATERIEL NECESSAIRE A L'INSTALLATION D'UN DOAS.

Afin que l'installation d'un DOAS s'effectue dans des conditions optimales, il est nécessaire de veiller à posséder le matériel suivant :

- équerres de fixation de la lampe et du récepteur. Elles seront en métal, d'une épaisseur de l'ordre de 1 cm afin d'accéder à une bonne stabilité mécanique et thermique. A défaut, des cabines d'analyseurs pourront être utilisées comme support, lorsque le trajet optique restera inférieur à 200 m. La fixation de la lampe ou du récepteur sur la ou les cabines devra alors être réalisée au moyen de joints en caoutchouc (silentbloc) afin que les éventuelles vibrations de la cabine ne modifient pas l'alignement du DOAS.
- le cas échéant, une cabine permettant de protéger l'ordinateur des intempéries. Il n'est pas nécessaire que cette cabine soit climatisée. En revanche, elle devra se situer à une distance inférieure à 50 m du site du récepteur.
- télémètre laser permettant la détermination précise du trajet optique. Son utilisation reste néanmoins très épisodique. L'INERIS, qui possède un instrument de ce type, peut le mettre à disposition des AASQA pour des besoins occasionnels. A titre d'information le coût de cet instrument est de l'ordre de 1000 euros.
- système de communication de type Talky-Walky lors de l'alignement du DOAS. Son utilisation reste également épisodique. L'INERIS, qui possède un instrument de ce type, peut le mettre à disposition des AASQA pour des besoins occasionnels. A titre d'information le coût de cet instrument est de l'ordre de 1500 euros.
- une lampe de rechange et des gants en latex lors du changement éventuel de la lampe.

1.2 SERVITUDES ELECTRIQUES SUR LES SITES EMETTEUR ET RECEPTEUR.

Ces servitudes électriques sont standards (16A, 220V) et doivent être présentes sur les sites émetteur et récepteur. Néanmoins, elles devront être munies d'onduleurs d'isolement standards (750 W, 15 minutes).

Il est en effet important d'utiliser un onduleur sur les sites émetteur et récepteur pour plusieurs raisons :

- il permet d'éviter la mise en défaut de la lampe en cas de microcoupure et donc la nécessité d'une intervention humaine pour sa remise en service.
- il permet de protéger l'alimentation et la lampe d'arrêts intempestifs, pouvant entraîner l'apparition d'humidité et donc leur détérioration lors de la remise en service.
- il permet d'éviter tout arrêt brutal de l'ordinateur de contrôle, qui nécessite, dans certaines configurations logiciels, une intervention humaine pour sa remise en service.
- il permet enfin d'éviter une perte de contrôle du récepteur et donc la nécessité d'effectuer un réalignement général de l'appareil.

Le coût d'un onduleur standard, qui est de l'ordre de 150 euros, est très largement inférieur au coût d'une lampe ou d'une alimentation

1.3 TRAJET OPTIQUE OPTIMISE EN FONCTION DU POLLUANT MESURE

On privilégiera un trajet optique de 150 à 250 m pour la surveillance des polluants NO, NO₂, Ozone, SO₂. En revanche, on choisira un trajet optique de 300 à 400 m pour la surveillance des polluants NO₂, SO₂, Ozone, Benzène et Toluène.

D'une manière générale on retiendra que la mesure du NO₂, du SO₂ et de l'Ozone, peut être effectuée pour des trajets optiques courts (150 m) ou long (400 m). Néanmoins, l'incertitude associée est d'autant plus faible que le trajet est long.

De même, la mesure du NO nécessite un trajet court (forte atténuation du signal car l'analyse est effectuée sur un domaine spectral très atténué car situé vers 210 nm). A contrario la mesure du benzène ou du toluène nécessite des trajets longs (grande intégration spatiale compte tenu de leur faible absorption des rayonnements issus de la lampe).

On constate donc l'impossibilité d'une surveillance en simultané des polluants NO et BTEX car ils nécessitent des trajets optiques très différents. Cette contrainte peut néanmoins être contournée en utilisant deux sites émetteurs car la plupart des DOAS motorisés autorisent la mesure successive sur plusieurs trajets optiques.

1.4 STABILITE MECANIQUE DU SITE EMETTEUR

Il est crucial de veiller à garantir une stabilité complète de l'émetteur. En effet, toute variation thermique ou mécanique entraînant une déformation du support de l'ordre de 1 mm se traduit par une déviation du faisceau lumineux de plusieurs dizaines de cm à 300 m, induisant une perte totale du signal. Ainsi, par exemple, des installations au sommet de pylônes électriques ou d'éclairage ou sur des bâtiments ayant une armature métallique sont à proscrire. On devra également veiller à ce que les fondations soient en zone hors-gel, à savoir à une profondeur de 80 à 150 cm, suivant les régions.

En effet, le premier site émetteur, retenu à Chamonix, était une dalle de 2 tonnes installée à une profondeur de 80 cm. Or cette dalle a subi des variations mécaniques de plus de 5 cm au cours des périodes de gel/dégel, entraînant de ce fait une perte totale de l'alignement.

1.5 TAUX D'ABSORPTION DU TRAJET OPTIQUE

Il convient de s'assurer de l'absence de feuillage ou branchage le long du faisceau, car ils détériorent fortement le rapport signal/bruit et donc la qualité des mesures. En effet, lors du printemps, nous avons eu une détérioration de la qualité des mesures NO car des feuillages masquaient épisodiquement le trajet du faisceau. Dans ce cas, le taux de lumière collectée devient réduit et peut entraîner une perte partielle de données.

1.6 ACCES AUX SITES EMETTEUR ET RECEPTEUR

Il est important de pouvoir accéder occasionnellement à l'émetteur pour des actions de réglage (focalisation, alignement) ou de maintenance (changement de la lampe).

A titre d'exemple, durant les trois campagnes DOAS réalisées, nous sommes intervenus sur le site émetteur durant la première semaine de mesure, puis occasionnellement 4 fois durant la campagne (à raison d'une fois par mois). Ces interventions ont été effectuées principalement la nuit afin de vérifier l'alignement.

De même, un accès très occasionnel est à prévoir au niveau du récepteur, notamment pour le calibrage sur site de l'instrument ou la vérification de son fonctionnement. En revanche un accès régulier est nécessaire au poste de contrôle du DOAS, qui peut être déporté de 50 m vis-à-vis du site récepteur dans le cas du DOAS SANOA et de 10 m dans le cas du DOAS OPSIS. Pour le DOAS SANOA, on conseillera également de prévoir une mini-cabine permettant l'installation de l'ordinateur de contrôle, sans pour autant qu'elle soit climatisée. En revanche, le DOAS OPSIS nécessite une cabine climatisée.

On retiendra qu'il reste nécessaire d'accéder aux sites, notamment en période nocturne.

1.7 STABILITE DU SITE RECEPTEUR

La stabilité mécanique et thermique du récepteur du DOAS SANOA est moins importante car il possède un système de réalignement automatique. Néanmoins, plus grande sera la stabilité du récepteur, meilleur sera le taux de données validées. Par ailleurs, le réalignement automatique, qui doit être configuré préalablement, entraîne une perte de données occasionnelle. Il ne devra donc être configuré que si la stabilité du récepteur n'a pu être optimisée.

A titre d'information le récepteur a été installé à Chamonix sur un balcon en bois, donc avec une stabilité non optimisée. Par ailleurs, nous n'avons pas programmé de réalignement automatique. Néanmoins, aucun désalignement du récepteur n'a été constaté.

1.8 ORIENTATION DU TRAJET OPTIQUE

Quelque soit le DOAS considéré, il convient d'orienter, si possible, le trajet optique de manière à éviter que le récepteur « regarde » le soleil. Le rayonnement solaire induit de fortes perturbations sur la mesure du NO₂ car l'analyse de ce polluant est effectuée sur une gamme spectrale proche du domaine visible. On retiendra que l'on doit s'attendre à une absence de données NO₂ lorsque le soleil est dans l'axe du trajet optique à $\pm 15^\circ$ car il entraîne une augmentation du bruit de fond et donc une baisse du rapport signal/bruit de la mesure.

2. CONTRAINTES LIEES A L'UTILISATION DE DOAS

2.1 INFLUENCE DES PARTICULES SUR LA MESURE DU NO₂

Il est important de rappeler que de fortes concentrations en aérosols (brouillard, émissions, smog) peuvent induire un biais sur la mesure du polluant NO₂. Supprimer ce biais est néanmoins possible, mais nécessite un post-traitement manuel important des données, non décrit dans le manuel d'utilisation. Il est donc conseillé de s'éloigner des sources d'émission (latéralement ou en altitude) afin de limiter cette contrainte. Typiquement, pour un trafic normal 10 000 à 20 000 véhicules/jour on conseillera un éloignement latéral d'environ 10 m et une hauteur entre 5 et 15 m. De même, on recommande, si possible, d'éviter la proximité immédiate de parois le long du faisceau compte tenu des émissions de particules qu'elles génèrent (érosion, ré envol).

2.2 CONFIGURATION INFORMATIQUE DU POSTE DE CONTROLE DU DOAS

Il est important de veiller à ce que le logiciel de pilotage du DOAS SANOA soit toujours en tâche principale et qu'en aucun cas un autre programme ne demande une validation utilisateur. Ainsi il est nécessaire de veiller à se placer en configuration horaire TU et d'annuler la prise en charge informatique du changement d'heure été/hiver. D'une manière générale, il est préférable qu'aucun autre programme ne fonctionne en tâche de fond, lorsque le logiciel de contrôle du DOAS est en cours d'exécution.

2.3 CONTROLE QUALITE, ASSURANCE QUALITE DES MESURES DOAS

Il est important de réaliser un contrôle qualité rigoureux de l'instrument en début et fin de campagne, mais également de mettre en place un processus d'assurance qualité en cours de campagne, notamment si celle-ci s'effectue sur une longue période. Afin d'optimiser le rendu des mesures DOAS, nous proposons donc de réaliser les actions suivantes :

- En début et fin de campagne : réaliser un calibrage de l'appareil en 5 points, pour tous les polluants considérés. Aisée à réalisée pour le polluant O₃ à l'aide du nouveau générateur d'O₃ haute teneur du LCSQA, cette tâche peut s'avérer très délicate pour les autres polluants car elle nécessite l'utilisation de cylindres hautes teneurs et hautes pressions.
 - Ozone : un calibrateur d'ozone (200-2500 ppm) a été mis en circulation pour l'ensemble des AASQA. Il permet un calibrage précis multi-points des instruments DOAS pour ce polluant et son utilisation ne requière aucune contrainte particulière.
 - NO, NO₂, SO₂ : l'INERIS développe actuellement des cellules scellées basses pressions, qui devraient très prochainement faciliter ce calibrage sur site. Elles permettront de remplacer l'utilisation de cylindres hautes pressions, mais n'autoriseront, dans un premier temps, qu'un calibrage en 1 point de l'instrument. Une fois leur rendu opérationnel optimisé, elles pourraient ensuite être réalisées en plusieurs exemplaires afin d'accéder à un calibrage multi-points des DOAS.
 - BTEX : dans l'attente d'une solution aisée à mettre en place, un calibrage sur site par cylindres « haute teneur et haute pression », devra être réalisé.

- Dans l'hypothèse où ce calibrage sur site ne peut être réalisé, il est important d'instrumenter le site avec des analyseurs ponctuels afin que puissent être comparées les données obtenues en période d'homogénéité atmosphérique.

➤ Durant la campagne :

- Effectuer une surveillance du taux de lumière de l'instrument afin de vérifier l'alignement général du système et le vieillissement de la lampe. En effet, une chute importante du taux de lumière peut affecter la qualité des données pour les polluants NO₂, NO et BTEX, notamment lorsque l'intensité reçue devient inférieure à 20 %.
- Dans l'hypothèse où cette campagne est réalisée sur plusieurs mois, il est conseillé de réaliser un calibrage sur site en 1 point en cours de campagne.

2.4 COUPLAGE DOAS – ANALYSEURS

Nous avons constaté que le couplage des mesures du DOAS avec les analyseurs permettait d'augmenter le degré d'information d'une grandeur physique tel que par exemple le facteur de dispersion d'une émission linéique ou ponctuelle en fonction des conditions météorologiques. Néanmoins on a également montré que la mesure d'ozone était identique sur les deux appareils et que, si elle permettait de confirmer la qualité des données DOAS, elle était redondante avec la mesure ponctuelle, notamment en période hivernale. Ce retour d'expérience nous permet donc de définir le degré de complémentarité qui existe entre des mesures DOAS et des mesures ponctuelles, en fonction du type d'étude effectué.

2.4.1 Étude de trafic ou étude en zone urbaine ou péri-urbaine

Nous avons constaté une correspondance exacte des mesures O₃ et SO₂, soulignant ainsi la qualité des données DOAS, mais également la redondance de ces instruments. Néanmoins, il est à souligner que les études sur Chamonix ou l'Aéroport de Lyon-St-Exupéry ont été réalisées en période hivernale donc en absence de fortes concentrations en O₃. Par ailleurs, nous avons constaté des dynamiques très différentes entre les instruments pour les polluants NO et NO₂, soulignant ainsi la complémentarité de ces mesures. En effet, nous avons mis en évidence que de tels couplages DOAS-analyseurs permettaient alors de mettre en évidence l'influence d'une émission sur son environnement. Ainsi, on retiendra que le couplage DOAS-Analyseurs permet notamment de mieux caractériser les émissions linéiques et leur dispersion et que le DOAS fournit une information plus pertinente de la qualité de l'air à l'échelle des populations riveraines.

2.4.2 Étude en zone rurale

En absence de trafic au niveau du site de mesures, les niveaux rencontrés étaient proches des niveaux de fond. On a alors constaté que la mise en comparaison de données montrait une correspondance exacte entre les instruments pour les polluants O₃ et SO₂, confirmant ainsi la redondance de ces mesures. En revanche, la mise en comparaison des données NO_x et notamment NO a montré que les limites de détection instrumentales du DOAS étaient généralement supérieures aux niveaux rencontrés. Dans le cadre d'une étude multi-polluants en zone rurale, on privilégiera donc des mesures ponctuelles car elles sont représentatives puisque l'homogénéité atmosphérique est grande, mais également parce qu'elles sont d'une précision plus importante, notamment pour le polluant NO.

CAMPAGNE LIDAR INTERREG III μ

1. CADRE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS :

L'INERIS, dans le cadre de sa mission d'assistance auprès des AASQA, avait programmé la réalisation d'une campagne LIDAR en partenariat avec un réseau agréé de surveillance de la qualité de l'air, avec pour objectif principal, d'appréhender la faisabilité d'une surveillance à long terme de la concentration en ozone du sol à la troposphère libre comme outil de paramétrage et instrument de validation de modèles tridimensionnels.

Après enquête auprès des AASQA et en concertation avec le MEDD et l'ADEME, il a été décidé de participer à la campagne INTERREG III μ coordonnée par l'ASPA

Le projet INTERREG III est la poursuite d'un programme engagé depuis plusieurs années sur la connaissance des effets trans-frontières et leur modélisation. Dans ce cadre, il s'agissait de construire une base de données tridimensionnelle devant servir d'outils de paramétrage et d'instrument de validation d'un modèle photochimique spécifique du domaine d'étude. En effet, l'utilisation de données de pollution et de météo issues de campagnes réalisées dans d'autres zones géographiques n'aurait pas répondu au contexte local car elles doivent permettre :

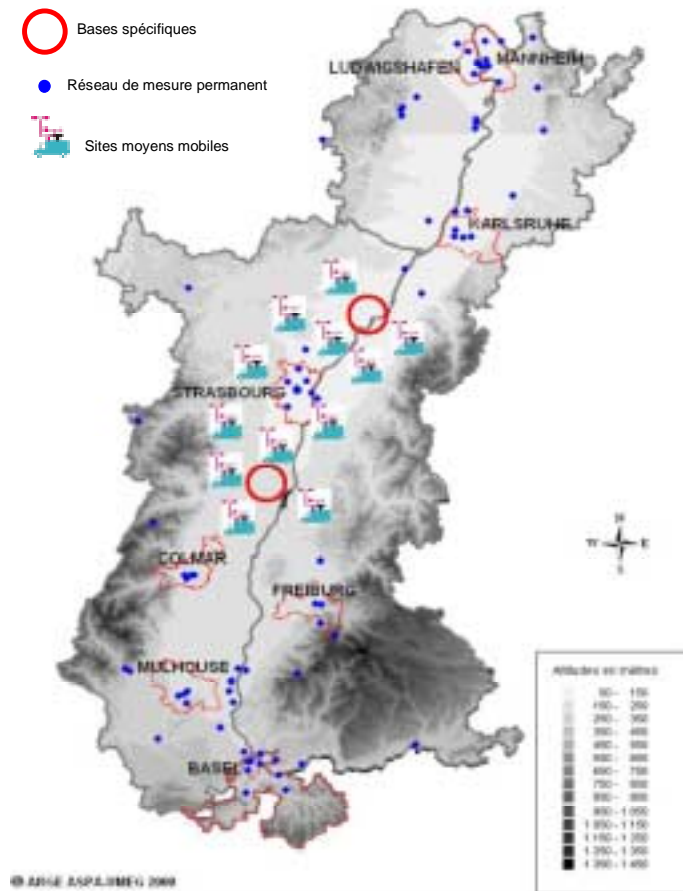
- de vérifier le comportement des modèles appliqués lors de la campagne,
- de valider, après optimisation des modèles, les résultats obtenus pendant la POI (Période d'Observation Intensive),
- de concevoir des scénarios alternatifs (réduction des émissions...).

La campagne INTERREG III μ , intitulée « Système commun d'évaluation et d'information sur la qualité de l'air dans l'espace du Rhin supérieur », a été organisée par l'ASPA (Association pour la Surveillance et l'étude de la Pollution Atmosphérique en Alsace).

Réalisée du 19 mai au 16 juin 2003, elle a regroupé 30 équipes (annexe 1) et a permis de constituer une base de données pour la zone du Rhin supérieur. Ce projet a été le fruit d'une collaboration technique entre les structures de surveillance de Bade Wurtemberg (UMEG), de Bâle (LHA) et d'Alsace (ASPA). Les financements ont été assurés par ces trois structures de surveillance, avec le concours de l'Union Européenne, de l'ADEME et enfin de la Région Alsace.

L'INERIS est intervenu, dans le cadre de sa mission d'assistance aux AASQA, en instrumentant un des différents sites de mesures d'un LIDAR Ozone fonctionnant en continu durant la période d'étude. L'intervention effectuée et les résultats obtenus lors de cette campagne devaient fournir également un retour d'expérience important sur la qualité des données escomptées et sur la faisabilité d'une surveillance automatique de la structure atmosphérique et sa dynamique.

2. DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE DE MESURES :



Instrumentation du domaine d'étude, campagne été 2003, source ASPA

Les moyens utilisés lors de cette campagne ont été les suivants :

- les réseaux de mesure des polluants atmosphériques français, allemand et suisse du Rhin supérieur.
- des camions laboratoires ou remorques, répartis sur les deux bases, en provenance des différentes AASQA nationales (Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air)
- l'UMEG (homologue allemand de l'ASPA) équipé d'analyseurs en continu du SO₂, du CO, de O₃, du NO/NO₂, et des particules (PM₁₀).
- des instruments de suivi des paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité relative, ainsi que la vitesse et la direction du vent.
- 2 LIDAR (INERIS, EPFL), 1 DOAS (EPFL), 1 photomètre, 1 scintillomètre (LOA)
- 1 labo mobile d'analyse des HAP, des COV et des radicaux RO₂
- des équipements spécifiques de caractérisation des aérosols (LAMP, ISPRA)
- 1 RADAR et 1 SODAR profileurs de vent, 1 ballon captif

N'ayant pu terminer le nouveau LIDAR de l'INERIS dans les temps, le constructeur ELIGHT LASER SYSTEM a fourni un PROFILER vertical d'Ozone pour les besoins de cette campagne. Il s'agit d'un LIDAR vertical centré sur la mesure de l'O₃ à trois longueurs d'onde, qui fournit également une information qualitative des aérosols présents au travers de l'extinction atmosphérique. Cet appareil devait initialement fonctionner en continu durant les différentes POI, mais nous avons néanmoins évalué son fonctionnement sur l'ensemble de la campagne de mesure, à savoir du 19 mai au 16 juin 2003.



LIDAR Profiler d'Ozone vertical mis à disposition de l'INERIS pour la campagne INTERREG

Ce LIDAR a été livré le 12 mai 2003 dans les locaux de l'ASPA, pour une installation qui s'est effectuée le 15 mai sur le site des moyens lourds de « Rossfeld » au Sud de Strasbourg. Il a été renvoyé le 19 juin 2003 chez ELIGHT LASER SYSTEM.

3. SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS :

3.1 MISE A DISPOSITION DE L'ENSEMBLE DES DONNEES

Tous les résultats obtenus durant cette campagne ont été incérés dans la base de données INTERREG. Ainsi, pour chaque journée, sont disponibles les profils verticaux quotidiens suivants :

- concentration en ozone brute. Il s'agit des profils verticaux bruts, donc sans aucune interpolation verticale ou temporelle.
- concentration en ozone avec des interpolations verticale de 100 m et temporelle de 10 minutes.
- écarts-types instrumentaux associés à la concentration en ozone ci-dessus, exprimés en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réels.
- extinction atmosphérique à 284 ou 304 nm, exprimés en km^{-1} .
- rétro-diffusion atmosphérique, exprimée en mV et traduisant l'écho renvoyé par les différentes couches atmosphériques.

Ainsi, pour chaque journée, nous disposons des 5 fichiers textes décrits ci-dessus ainsi que des 5 images correspondantes, au format image (PNJ).

3.2 TAUX DE FONCTIONNEMENT, RENDU OPERATIONNEL

S'agissant du tout premier PROFILER d'Ozone de cette technologie, nous avons constaté quelques dysfonctionnements, comme c'est généralement le cas sur un appareil de technologie innovante. Néanmoins, nous avons pu obtenir un taux de données utilisables d'environ 80 % sur l'ensemble de la campagne de mesure (environ 1 mois).

3.2.1.1 Dysfonctionnements rencontrés

Nous avons constaté très rapidement des effets de condensation sur les parties optiques (donc froides), notamment en début de matinée. Nous étions en effet situés sur une zone présentant un taux d'humidité relative très souvent proche de 100 % car située à proximité du Rhin, en zone inondable, avec une nappe phréatique très peu profonde. Or, pour un tel taux d'humidité, un phénomène de condensation se crée sur toutes les parties froides de l'instrument et notamment l'optique du laser. Cela a entraîné une perte de données occasionnelle le matin et en soirée. Pour y remédier, nous avons dû utiliser une grosse quantité de déshumidificateurs ainsi qu'un système de chauffage. Sans pour autant parvenir à supprimer tout effet de condensation, cela a permis de limiter le taux de perte de données. Ce problème a été responsable d'environ 80-90% des pertes de données constatées sur l'ensemble de cette campagne.

Par ailleurs, nous avons dû effectuer le traitement de données à deux reprises, suite à un dysfonctionnement du logiciel de traitement, résolu par la suite. Ce double traitement, a permis d'améliorer la qualité des données obtenues en supprimant les incertitudes à haute altitude.

Enfin, lors de son installation sur site et compte tenu de la configuration du site (absence de route carrossable jusqu'au point de mesure), il a été nécessaire d'utiliser un véhicule peu adapté au transport de ce type d'appareil. Cela a entraîné un léger désalignement de l'optique du système qui a nécessité une intervention du constructeur. La perte de données a été faible et ne concernait que les mesures pour des altitudes inférieures à 600 m.

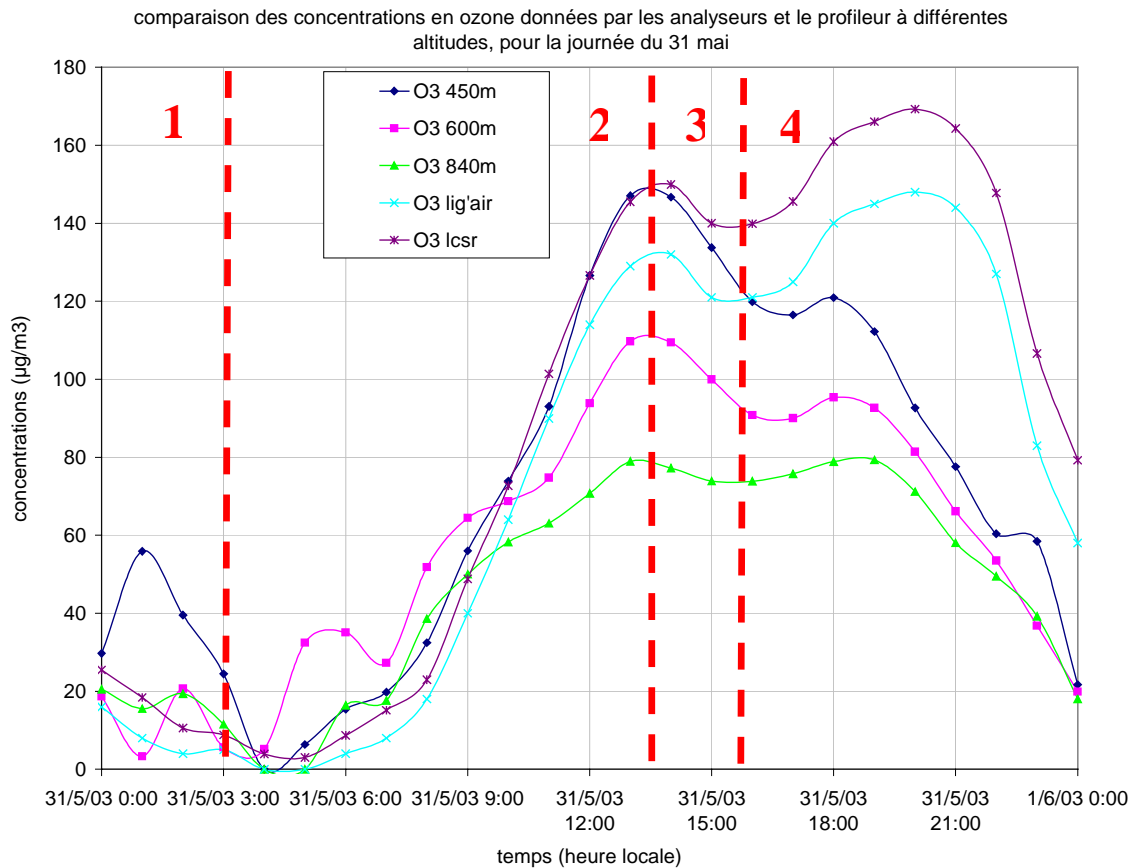
3.2.1.2 Rendu opérationnel général

Le taux de fonctionnement du LIDAR a permis de définir un taux de données pour l'ensemble de la campagne. Il correspond au taux de mesures exploitables, c'est à dire celles fournissant un profil vertical de concentration et son incertitude. Il a été d'environ 80 % pour la période du 29 mai au 15 juin, incluant les deux périodes intensives de mesures programmées par l'ASPA.

D'une manière générale, nous avons confirmé le caractère autonome de cet instrument, une fois résolus les quelques dysfonctionnements initiaux. En revanche, la portée de cet instrument, dans sa configuration initiale, n'a pas permis des mesures au-dessous de 300 m d'altitude dans sa configuration sans balayage angulaire ainsi qu'au-dessus de 2000 m d'altitude en raison de la faible puissance laser émise.

3.3 COUPLAGE LIDAR-ANALYSEURS POUR LA DESCRIPTION DES ECHANGES VERTICAUX

Nous avons comparé les données LIDAR avec des analyseurs d'Ozone ponctuels installés sur le site de mesures. Nous avons ainsi confirmé la qualité des données LIDAR, bien que cette comparaison reste délicate à réaliser du fait de la non colocalisation des mesures en atmosphère fortement stratifiée.



Couplage LIDAR-Analyseur, pour la journée du 31 mai 2003, INTERREG, site de Rossfeld

L'exemple ci-dessus permet de mettre en évidence la complémentarité entre des mesures LIDAR et des mesures au sol, dans la compréhension de la dynamique de l'ozone :

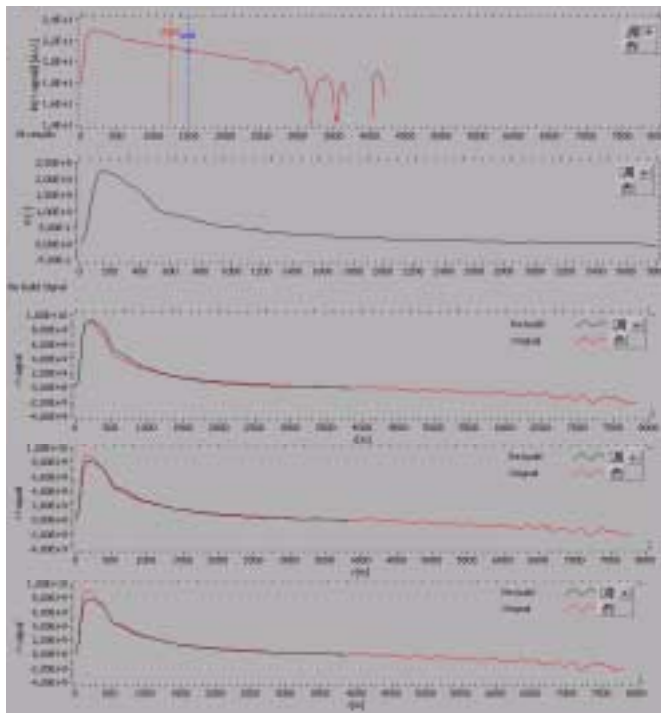
- Zone 1 : On observe une relative homogénéité verticale de l'atmosphère en période nocturne, avec des concentrations au sol identiques à celles obtenues à 800 m d'altitude. Ce résultat obtenu en zone rurale, donc sans émission locale de NO, permet de définir les niveaux de fonds présents ce jour sur le domaine.
- Zone 2 : On observe également une très bonne adéquation entre les données au sol et celles en altitude lorsque les phénomènes convectifs se mettent en place et engendre une relative homogénéité verticale de la concentration, pour des altitudes à l'intérieure la couche limite atmosphérique. L'étude des écarts entre les données au sol et celles obtenues en altitude permet également de quantifier la stratification verticale présente et l'étendue spatiale de ces échanges verticaux. En effet, on observe une diminution constante de la concentration avec l'altitude, qui permet alors de quantifier l'impact vertical des mouvements convectifs présents durant cette période.
- Zone 3 : On observe l'apparition d'un écart entre les concentrations au sol et celles obtenues en altitude et notamment à basse altitude (450 m), consécutif à un passage nuageux limitant les effets convectifs.
- Zone 4 : on a une stabilisation de la stratification atmosphérique avec la persistance d'une photo-chimie au sol durant quelques heures, qui ne peut être réalisée en altitude faute de précurseurs portés par ces effets convectifs.

Ainsi, cet exemple, choisi compte tenu de la complexité des phénomènes présents durant cette journée, permet de confirmer l'apport essentiel du couplage LIDAR-Analyseur dans la compréhension de la dynamique de l'ozone et des échanges verticaux.

3.4 FAISABILITE D'UNE CARACTERISATION DES AEROSOLS

Enfin, nous avons effectué un essai de caractérisation des aérosols par LIDAR, en utilisant les algorithmes développés dans nos programmes de recherches. L'objectif était de montrer que cet instrument permettait également de fournir une première évaluation de la répartition verticale du paramètre micro-physique des aérosols présents et notamment de tenter de fournir un ou des éléments de réponse à la question suivante : la répartition verticale des aérosols est-elle homogène en masse, en taille et en composition physique ?

L'instrument utilisé ne permettait pas de répondre à cette question, mais devait permettre de préciser les éventuelles variations avec l'altitude de $G(z)$, paramètre traduisant les propriétés micro-physiques des particules où toute variation de $G(z)$ pouvait traduire une variation en taille ou en composition chimique, sans pour autant qu'une différenciation entre ces deux caractéristiques soit réalisable.



Signal LIDAR initial le 31 mai à 0H

Profil vertical de charge en aérosols

Recouvrement du sol à 200 m

$$g(z_0) = 19 \quad R_0 = 1.03$$

Recouvrement de 200 m à 400 m

$$g(z_0) = 16.5 \quad R_0 = 1.01$$

Recouvrement de 400 m à 500 m

$$g(z_0) = 16 \quad R_0 = 1.04$$

Exemple de caractérisation des aérosols, le 31 mai à 0H

L'exemple ci-dessus utilise un algorithme spécifique permettant de calculer l'évolution verticale du paramètre micro-physique des particules présentes ainsi qu'une évaluation de la concentration en fonction de l'altitude (charge en aérosols). L'idée consiste à définir un paramètre micro-physique $G(z_0)$ de manière à reproduire très exactement le signal LIDAR initial. Pour cela, on suppose que l'atmosphère est homogène et que $G(z_0)$ ne dépend pas de l'altitude. De même, une évaluation de la concentration en particules est fournie par $R(z)$ qui correspond au rapport de rétro-diffusion globale (moléculaire et particulaire).

L'utilisation de cet algorithme sur les signaux LIDAR enregistrés durant la nuit du 31 mai, a permis de tirer les premières constatations suivantes :

- il n'existe pas un unique paramètre micro-physique $G(z_0)$ permettant de reproduire l'ensemble du signal, mais il en existe plusieurs (1 différent pour chaque couche atmosphérique), qui permettent une reconstruction par morceaux de ce signal LIDAR.
- l'atmosphère libre est très peu chargée en particules car Le rapport $R(z_0)$ en atmosphère libre est de l'ordre de 1.01 à 1.04 : 1 % à 4 % de la rétro-diffusion atmosphérique est due aux particules en atmosphère libre.
- à proximité immédiate du sol, l'action des particules est aussi importante que celle des molécules car le rapport de rétro-diffusion $R(z)$ devient proche de 2.

Ainsi, on observe durant cette nuit du 31 mai des couches atmosphériques caractérisées par des paramètres micro-physiques différents et notamment une diminution avec l'altitude de ce paramètre. Or, un paramètre micro-physique de l'ordre de 15-16 est caractéristique de d'un aérosol urbain, tandis qu'un paramètre de l'ordre de 19 peut être associé des particules plus grosses ou plus humides. Cet exemple permet alors de montrer qu'il existe une stratification verticale des aérosols, avec des particules très vraisemblablement humides en dessous de 200 m et des particules de types urbaines au-dessus de 400-500 m.

Il s'agit, là encore, de résultats préliminaires qui devront être couplés avec d'autres instruments et notamment l'avion METAIR, dans le cadre de ce programme INTERREG. Néanmoins, cette campagne de mesures a permis de démontrer le rendu opérationnel des LIDAR gaz et leur apport essentiel dans la documentation de la basse troposphère lorsqu'ils sont couplés à des analyseurs ponctuels.

SYNTHESE ANNUELLE SUR L'UTILISATION DES INSTRUMENTS « A LONG TRAJET OPTIQUE » DE TYPE LIDAR

1. UTILISATION DES LIDAR EN FRANCE

1.1 CAMPAGNES REALISEES PAR L'INERIS

Deux campagnes de mesures LIDAR ont été réalisées par l'INERIS au cours de l'année 2003, en collaboration avec les AASQA :

- la campagne INTERREG III μ coordonnée par l'APSA et décrite précédemment où l'INERIS a fourni des mesures lidar de manière automatique sur l'ensemble de la période de mesure, à savoir du 19 mai au 15 juin 2003. Cette campagne a été réalisée dans le cadre des missions de l'INERIS pour le compte du LCSQA et visait à démontrer l'apport de mesures LIDAR automatiques sur de longues périodes, dans la compréhension de la stratification atmosphérique et sa dynamique. Résumé dans le paragraphe précédent, elle est décrite en détail dans un Tiré à Part référencé en annexe de ce document.
- la campagne POVA coordonnée par AIR APS et le LGGE où l'INERIS a fourni des mesures lidar durant 3 semaines, du 25 juin au 15 juillet 2003. Cette campagne a été réalisée dans le cadre du programme de recherche POVA et financée en partie par le ministère des transports et l'ADEME. En cours de traitement, elle a donné lieu à des résultats préliminaires très intéressants sur la spatialisation des polluants gazeux et particulaires dans une topographie de type vallée. Cette étude est décrite dans le paragraphe ci-après traitant des programmes de recherche engagés par l'INERIS.

1.2 CAMPAGNES REALISEES PAR D'AUTRES LABORATOIRES DE RECHERCHE

Quelques autres campagnes de courtes périodes ont été réalisées au cours de l'année 2003, principalement orientées sur la comparaison de sorties de modèles dynamiques avec les mesures LIDAR de hauteur de couche limite. Ainsi, le LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) a réalisé un essai de comparaison du profil vertical d'extinction atmosphérique entre les résultats obtenus par son mini-LIDAR et les résultats issus du modèle CHIMERE.

Pour ce faire, les concentrations en aérosols fournies par le modèle ont été converties en grandeurs optiques (coefficient d'extinction ou de rétrodiffusion) par un code de diffusion de Mie. Les premiers résultats sont satisfaisants et soulignent les limites de chacun : limitation intrinsèque de la visée Lidar verticale au voisinage de la surface (existence d'une zone aveugle et d'un facteur géométrique) ; non prise en compte de couches d'aérosols transportées sur de grandes distances pour CHIMERE. Cette première comparaison a été effectuée sur quelques cas pour montrer que les informations étaient concordantes avec les limitations évoquées précédemment. Cet essai de couplage LIDAR-Modèle a donc permis de montrer l'apport essentiel du LIDAR dans la modélisation de la dynamique atmosphérique et du bilan radiatif global.

1.3 BILAN D'UTILISATION DU LIDAR COPARLY, EXTRAIT DU RAPPORT COPARLY

COPARLY est sur le point de finaliser un document de synthèse visant à effectuer un bilan général de l'utilisation de son LIDAR depuis son acquisition en 1999. Il devrait notamment mettre en évidence la difficulté d'utilisation de leur appareil compte tenu de la nécessaire présence de moyens humains qualifiés lors de campagnes de mesures. En effet, les caractéristiques technologiques de l'instrument et notamment la technique laser utilisée, impose la présence d'une personne qualifiée pour son utilisation, mais également un planning de maintenance important, comme décrit dans le rapport LCSQA INERIS de décembre 2002 (INERIS-DRC-02-39199-AIRE-803-EFr-V3) disponible sur le site du LCSQA.

Le LCSQA n'ayant pas eu connaissance du contenu de ce document à l'heure actuelle, toute demande d'information doit donc être formulée directement à COPARLY. En revanche, une synthèse sera effectuée par le LCSQA dans le cadre de ses missions programmées pour l'année 2004.

2. VEILLE SCIENTIFIQUE/TECHNOLOGIQUE NATIONALE

Les principaux développements scientifiques sur les LIDAR au plan national, sont principalement orientés sur la caractérisation des aérosols et l'analyse simultanée de plusieurs polluants gazeux atmosphériques. En effet, les 5 principaux laboratoires travaillant sur la technologie LIDAR, ont engagé les actions dans ce sens, détaillées ci-après.

2.1 ÉTUDES ENGAGÉES PAR LE CEA/LSCE

Ce groupe, et notamment l'équipe PEGASE coordonnée par Patrick Chazette, s'intéresse notamment à l'étude des aérosols par LIDAR, qu'ils soient au sol ou embarqués dans des avions ou des satellites¹.

Ainsi, cette équipe développe actuellement un LIDAR « aérosols » mobile qui puisse être au sol ou embarqué dans un avion et qui puisse être couplé aux LIDAR instrumentant les satellites. En effet, de nombreux satellites utilisent la technologie LIDAR afin d'évaluer la transmission atmosphérique et donc la charge en aérosols présents. Si la qualité des données obtenues est très bonne en haute altitude, elle se dégrade fortement en basse troposphère. Le CEA souhaite donc réaliser un LIDAR aérosols, identique à ceux instrumentant les satellites, permettant de documenter la basse troposphère et obtenir ainsi, par couplage, une information complète de la charge en aérosols et de sa stratification verticale sur toute la colonne atmosphérique.

¹ Chazette et al, « 3D survey of pollution during winter in Chamonix from an ULA », NAI IPSL (2003)

Ce développement, qui devrait s'effectuer en collaboration avec l'INERIS, permettra la conception d'un LIDAR opérationnel commun, permettant le suivi en continu de la stratification de la basse troposphère.

Par ailleurs, une collaboration a été réalisée avec l'INERIS lors de la campagne POVA, visant à obtenir, par un couplage entre les deux LIDAR présents, une information quantitative sur les aérosols atmosphériques dans les vallées de la Maurienne et de Chamonix. En effet, un couplage entre le LIDAR INERIS fonctionnant dans le domaine UV et le LIDAR de Patrick Chazette (CEA) fonctionnant dans l'IR pourrait permettre d'accéder à une information quantitative sur la spatialisation des aérosols, à savoir la granulométrie et la masse résolue dans l'espace et le temps. Les longueurs d'ondes utilisées dans l'UV (266-280-310-390 nm), dans le visible (532 nm) et dans l'IR (1064 nm) permettraient ainsi de différencier les particules sub-microniques, qui sont les plus importantes sur la vallée de la Maurienne. Il est donc apparu judicieux lors de la campagne POVA, de placer les deux LIDAR en un même point ce qui permettrait d'obtenir ainsi en simultané une information tridimensionnelle des gaz et des particules présentes, sous réserve que les algorithmes le permettent. Un tel couplage devrait alors permettre d'apporter des informations de toute première importance sur la répartition spatiale du rapport gaz/particules, comme support de compréhension de sa spatialisation en présence d'un fort trafic et d'une dynamique de vallée mais aussi comme instrument de paramétrage d'outils de modélisation. Les données obtenues lors de cette campagne sont en cours de traitement, mais des résultats prometteurs ont dore et déjà été obtenu. Ils sont détaillés dans les paragraphes spécifiques traitant du programme de recherche INERIS sur le LIDAR aérosols.

2.2 *ÉTUDES ENGAGÉES PAR LE LASIM/UCB LYON1*

Ce groupe est spécialisé dans la caractérisation tridimensionnelle de l'atmosphère. Les résultats obtenus au cours de ces dix dernières années, ont ainsi permis d'accéder à des outils opérationnels, fournissant des informations de toutes premières importances sur la spatialisation des polluants gazeux et particulaires.

Ce groupe, dirigé par les professeurs J.P. Wolf et P. Rairoux, développe par exemple actuellement un LIDAR haute puissance appliqué à la caractérisation de tous les polluants gazeux atmosphériques (gazeux et particulaires) en simultané. Ce projet très ambitieux est effectué en collaboration avec THOMSON, l'université de Berlin et l'École Polytechnique de Palaiseau. Il repose sur le développement d'un laser femtoseconde Terra-watt qui permet de générer une lumière blanche « large bande » à une distance donnée. Une analyse spectrale permet ensuite d'obtenir la concentration résolue dans le temps et l'espace, de tous les polluants gazeux présents dans l'atmosphère. Un premier prototype a été réalisé, qui a permis d'en démontrer la faisabilité².

² Kasparian et al, « White-light filaments for atmospheric analysis », Science N° 301 (2003)

Par ailleurs, elle réalise des études en collaboration avec l'INERIS, visant à effectuer une caractérisation fine des aérosols atmosphériques, à savoir en masse, taille et composition chimique³. Une technique innovante a d'ailleurs été développée, qui a fournit des résultats prometteurs sur la détection des particules atmosphériques, tant de manière ponctuelle que résolue dans l'espace, qui doit donner lieu très prochainement (janvier 2004) à une campagne spécifique permettant d'en définir les caractéristiques métrologiques et le caractère opérationnel.

Enfin, ce groupe développe depuis plusieurs années des techniques laser innovantes appliquées à la caractérisation ponctuelle et par LIDAR de composés spécifiques tels que les polluants gazeux industriels ou bien encore les particules biologiques. Pour ce faire, des collaborations ont été engagées avec de grands laboratoires de recherche internationaux (YALE, ARL, ...), des groupes français (INERIS, CEA) mais également dans le cadre de programmes de recherche à l'échelle européenne (ESA, CNRS,...).

2.3 *ÉTUDES ENGAGÉES PAR L'INERIS*

Les études LIDAR engagées par l'INERIS, qui sont détaillées ci-après dans un paragraphe spécifique, visent à développer un LIDAR multi-longueur d'onde UV-IR appliqué à la caractérisation en simultané des gaz et des particules. Cet instrument repose sur le système LIDAR UV11 multi-gaz autonome reçu en juin 2003. Nous souhaitons en étendre le domaine d'application à des polluants gazeux spécifiques ainsi qu'à la caractérisation quantitative des particules atmosphérique. Pour ce faire, nous sommes en collaboration avec des partenaires français et étrangers. Il serait ensuite couplé à des outils de modélisation multi-échelles. Dans ce cadre plusieurs actions ont été engagées ou doivent être entreprises en 2004.

On citera notamment le développement d'un LIDAR aérosols, l'extension de la mesure des gaz à des polluants spécifiques des émissions industrielles ou bien encore le couplage LIDAR-modèles pour la compréhension des échanges atmosphérique ou la localisation des émissions diffuses urbaines ou industrielles. Ces projets sont réalisés en collaboration avec des organismes de recherche travaillant sur la technologie LIDAR (CEA, LASIM) ou sur le développement d'outils de modélisation (ECL, ENPT, EDF).

2.4 *ÉTUDES COMMUNES ENGAGÉES PAR L'IPSL/SA ET LE LMD*

Les deux groupes de l'IPSL conduits par P. H. Flamant et C. Loth au LMD et J. Pelon et D. Bruneau au (SA) développent en étroite collaboration des recherches expérimentales s'appuyant sur de LIDAR « Météorologiques ».

Dans ce cadre, différents types de LIDAR ont été développés avec le soutien du CNES et de l'INSU. Ainsi, trois Lidar aéroportés ont été conçus au cours des dix dernières années : LEANDRE-1 (nuages-aérosols) en 1990, LEANDRE-2 (vapeur d'eau) en 1997 et enfin WIND (vent) en 1999, développé en coopération franco-allemande avec le DLR. Ces trois Lidar aéroportés sont toujours opérationnels et certains ont été conçus à partir de LIDAR

³ Geffroy et al, « Urban Aerosol Survey with Lidar and Numerical Model », EAC Madrid (2003)

opérant au sol ; c'est le cas pour le Lidar nuages-aérosols du SIRTÀ et le Lidar Vent Transportable mis en œuvre avec WIND durant ESCOMPTE 2002.

Ces deux groupes sont par ailleurs impliqués dans les programmes de LIDAR satellites du CNES et de l'Agence Spatiale Européenne : CALIPSO, charge utile « nuages-aérosols », développé conjointement par le CNES et la NASA pour être lancé en 2005, Lidar Vent ÆOLUS-ADM de l'ASE pour être lancé en 2007. Plus récemment, ils viennent de remporter l'Appel d'Offre ASE pour l'étude d'un Lidar DIAL pour la mesure du CO₂ atmosphérique. Ce Lidar pourrait être embarqué sur satellite, pour effectuer des observations en complément des mesures passives déjà réalisées ou futures.

Plus récemment, le Lidar Doppler hétérodyne qui a été développé par le SA est en cours d'adaptation pour effectuer des mesures simultanées de vitesse et de gaz CO₂ par la méthode DIAL. Ce prototype émet sur la bande spectrale centrée à 2µm. Il est aussi envisagé de développer un prototype émettant à 1,5 µm qui utiliserait les composants développés dans le cadre des télécommunications optiques. Les développements instrumentaux conduits en laboratoire sont très complémentaires de l'étude conduite pour l'ASE en vue d'application à partir de l'espace.

Enfin, parmi les réalisations récentes, on peut aussi citer la « Station d'Observation Transportable Mini-Lidar et radiomètres » développée par le LMD. Cette station est conçue pour être très mobile. De même, on peut citer le Lidar à Haute Résolution Spectrale qui est en cours de réalisation à l'INSU avec le soutien du groupe du SA pour remplacer à terme le Lidar aéroporté LEANDRE-1.

Pour ce qui concerne les activités en cours et futures, il est envisagé, si des moyens financiers sont dégagés : (1) d'avancer la réalisation et les tests atmosphériques du Lidar DIAL/Doppler CO₂ présenté ci-dessus ; (2) de développer un Lidar aérosols dédié à la couche limite urbaine (CLU) dont la capacité de mesure couvrirait la gamme 10 m – 3 km ; (3) de développer un Lidar vent conçu autour des technologies télécommunications pour les applications CLA et CLU, d'une part, et la mesure de courant de surface des cours d'eau pour les applications hydrologiques, d'autre part.

2.5 ÉTUDES ENGAGÉES PAR LE LPCA/ULCO

Ce groupe, coordonné par le professeur R. Bocquet a fait l'acquisition en 2001 d'un LIDAR DIAL 510M, commercialisé par la société ELIGHT LASER SYSTEM GmbH, qui permet la caractérisation tridimensionnelle des polluants atmosphériques O₃, NO₂, SO₂ et BTEX. Cet instrument a notamment participé à la campagne ESCOMPTE, en remplacement du LIDAR INERIS. Les activités de ce groupe ne concernent pas spécifiquement la technique LIDAR, mais s'intéressent plus globalement au développement d'outils de mesures de polluants gazeux atmosphériques.

Dans le cadre des activités LIDAR, des études ont été engagées en collaboration avec le LA-Toulouse, l'INERIS et l'IPSL-SA sur l'apport de ces instruments dans la compréhension de la dynamique atmosphérique et notamment de l'influence des effets de brises en zone côtière. Ce groupe participe donc au projet PRIMEQUAL-ESCOMPTE concernant le volet dynamique sur la quantification des échanges verticaux et leur action sur la pollution atmosphérique.

3. TRANSFERT DE PROCEDES ET COMMERCIALISATION

En parallèle de ces axes de recherche, plusieurs équipes citées ci-dessus ont engagé des programmes spécifiques, visant à construire des LIDAR « aérosols » opérationnels, pouvant être commercialisés à moindre coût. En effet, une demande de plus en plus forte semble apparaître concernant des outils successibles de fournir une information en temps réel sur la stratification atmosphérique, la hauteur de couche limite ou bien encore la hauteur du plafond nuageux. On les qualifie de LIDAR « aérosols » dans la mesure où ils utilisent les propriétés optiques des aérosols afin d'obtenir une information sur la visibilité, la stratification atmosphérique ou la hauteur de la couverture nuageuse, sans pour autant effectuer une quantification des particules atmosphériques.

Ce type instrument, qui doit nécessairement être autonome, sans maintenance particulière et à faible coût, permettrait alors par exemple :

- d'alimenter des modèles dynamiques, comme le souhaitent des départements de prévision météorologique.
- de quantifier les émissions ayant un impact régional en permettant de fournir instantanément la hauteur de la couche limite atmosphérique, comme le souhaitent des aéroports français ou étrangers.
- de fournir un outil de paramétrage en temps réel des modèles tridimensionnels photo-chimiques régionaux ou continentaux, comme le souhaitent quelques départements de surveillance de la qualité de l'air.

Ces demandes, marginales au niveau national, sont néanmoins très fortes sur le plan européen (Allemagne, Espagne, Italie) ou international (Canada, USA, Japon).

De ce fait, plusieurs entreprises françaises ou étrangères qui commercialisent des instruments de mesures, ont engagé, de manière autonome ou en collaboration avec des organismes de recherche, le développement de LIDAR « aérosols » commerciaux.

Certains instruments sont déjà commercialisés, d'autres devraient l'être d'ici fin 2004.

4. PROGRAMMES DE RECHERCHE INERIS

4.1 RESUME DES PROGRAMMES DE RECHERCHE LIDAR DE L'INERIS.

L'INERIS a engagé en 2003 un programme de recherche visant à développer un LIDAR aérosols opérationnel. Pour ce faire, plusieurs voies sont explorées :

- Développement d'un LIDAR multi-longueurs d'ondes UV-IR permettant la caractérisation en simultané des gaz et des particules. Cet instrument serait ensuite couplé avec des outils de modélisation inverses afin de réaliser une caractérisation des émissions diffuses, à savoir localiser les sources et évaluer la dispersion.
- Développement d'un LIDAR aérosols opérationnel à très faible coût, permettant l'évaluation de la stratification atmosphérique et sa dynamique. Cet instrument, qui fournirait notamment une évaluation de la hauteur de la couche limite et de la couverture nuageuse, pourrait fournir une information en temps réel aux outils de modélisations dynamiques.

- Développement d'un instrument de caractérisation des suies et notamment du spectre dimensionnel et de la concentration associée. Cet instrument de technologie innovante, pourrait ainsi fournir une caractérisation tridimensionnelle complète ciblée sur les particules carbonées.

Par ailleurs, L'INERIS doit engager début 2004 deux programmes de recherche en partenariat avec le département de modélisation, visant à effectuer un couplage LIDAR-Modèle appliqué aux échelles régionales et locales :

- Développement d'un couplage LIDAR-Modèle appliqué à l'évaluation, pour la région Picardie, des résultats d'un modèle continental gaz-particules.
- Développement d'un outil associant LIDAR et modèle inverse, appliqué à l'évaluation des émissions diffuses de gaz ou de particules, en site industriel ou urbain.

D'autre part, une étude de faisabilité devrait être réalisée courant 2004, visant à effectuer une caractérisation tridimensionnelle de particules atmosphériques plus spécifiques (gaz, aérosols biologiques). Dans ce cadre, l'INERIS interviendrait avec son nouveau LIDAR UV11, en collaboration avec des laboratoires de recherche français ou étrangers. Les résultats obtenus permettraient alors d'engager une recherche plus approfondie dans ce domaine, en association avec d'autres partenaires, industriels ou gouvernementaux.

Enfin, l'INERIS est impliqué dans le programme de recherche PRIMEQUAL-ESCOMPTE visant à quantifier l'influence des échanges verticaux sur la pollution régionale. Dans ce cadre, nous effectuons un couplage entre les données LIDAR, les avions et les RADAR vents afin de caractériser l'effet de la brise sur la stratification atmosphérique. Ces informations serviront ensuite à paramétrer et valider un modèle tridimensionnel régional. Ce projet, coordonné par le Laboratoire d'Aérodologie de Toulouse, associe les équipes françaises de l'INERIS, de l'IPSL/SA et du MREID/ULCO. De premiers résultats ont été obtenus permettant notamment de montrer que les effets convectifs diurnes, généralement forts en été, peuvent être totalement bloqués par les effets dynamiques engendrés par la brise de mer. Ainsi, la couche limite atmosphérique se trouve alors bloquée à faible altitude, favorisant l'accumulation des précurseurs à proximité immédiate du sol et générant ainsi une vitesse de production d'ozone très importante.

Ci-dessous figure une synthèse plus détaillée du programme de recherche sur le développement d'un LIDAR appliqué à la caractérisation des aérosols atmosphériques, dans la mesure où de premiers résultats ont été obtenus, qui pourraient avoir un intérêt direct dans les missions des réseaux agréés de surveillance de la qualité de l'air.

4.2 LIDAR APPLIQUE A LA CARACTERISATION DES AEROSOLS.

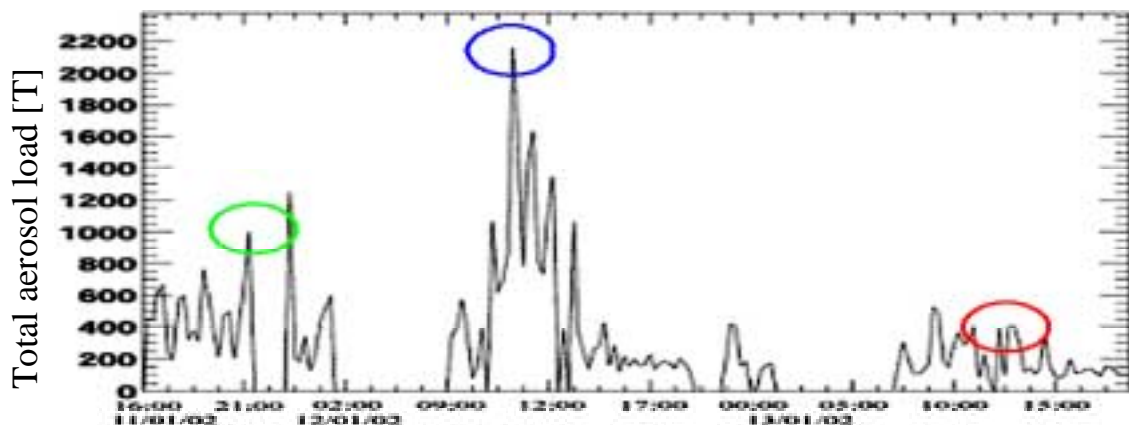
Ce programme de recherche de 3 ans a débuté fin 2002. Durant cette première année de recherche, nous avons effectué une étude bibliographique minutieuse, suivie d'une première étude de caractérisation massive des aérosols, puis mis en place une méthodologie de caractérisation de leur distribution en taille par LIDAR reposant sur une technique multispectrale couplée à un algorithme génétique et enfin effectué une première campagne de validation. Les résultats obtenus sont très prometteurs et nous ont permis de préciser les actions à engager pour les deux prochaines années de ce programme de recherche.

4.2.1 Synthèse générale.

Une synthèse bibliographique a été réalisée, tant sur les méthodologies de caractérisation tridimensionnelle des aérosols atmosphériques, que sur les développements technologiques en cours. Cela nous a permis de montrer que, si la caractérisation des polluants gazeux est de nos jours opérationnelle, peu d'outils tridimensionnels permettent actuellement une quantification réelle des aérosols ou utilisent pour ce faire d'importantes approximations.

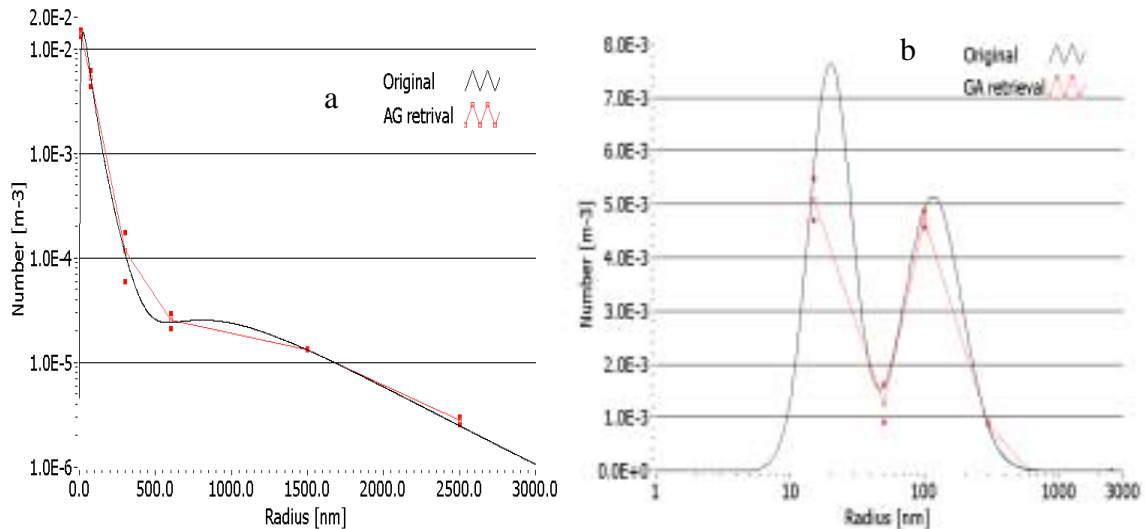
Une première campagne a notamment été réalisée à Lyon qui visait à utiliser l'état de l'art actuel des LIDAR « aérosols » afin de montrer leur apport essentiel pour la caractérisation massive des aérosols atmosphériques. L'étude consacrée à l'estimation de la charge en aérosols de l'atmosphère de la ville de Lyon dans une situation de « smog hivernal » a été menée en collaboration avec le groupe de modélisation de R. Perkins de l'Ecole Centrale de Lyon et le groupe LIDAR de P. Rairoux de l'Université Claude Bernard Lyon1.

Cette étude a notamment permis, pour la première fois, d'estimer l'impact sur Lyon et sa région des émissions de pollution par les aérosols dont le flux mesuré par LIDAR atteignait des valeurs records de 2000 T/heure sur l'agglomération lyonnaise. Néanmoins, cette étude, qui reposait sur l'utilisation d'outils existants, n'a pas permis d'obtenir d'informations précises sur le spectre dimensionnel associé.



Charge totale en aérosols présente au-dessus de Lyon lors d'un épisode de « smog hivernal ». Résultats obtenus à partir de profils LIDAR, en utilisant une distribution de taille tabulée

Pour pallier cette limitation, nous avons alors développé une méthodologie de caractérisation des aérosols par technique LIDAR multispectrale associée à des « algorithmes génétiques » spécifiques. Outre la mise en place de l'algorithme et sa justification mathématique, une étude de faisabilité a notamment été menée sur des distributions de taille tabulées. On a notamment évalué la réponse de cet algorithme pour deux distributions de taille caractéristiques, en utilisant pour ce faire des signaux LIDAR théoriques. Les résultats obtenus pour ces deux types de distribution sont présentés sur les deux figures ci-dessous. On a ainsi montré qu'en utilisant un LIDAR multispectral fondé sur 4 longueurs d'onde, on pouvait alors recouvrer des distributions de taille très proches de celles tabulées, où « AG Retrieval » correspond à la solution fournie par l'algorithme génétique.



Résultats de l’algorithme génétique sur : a) distribution de taille réelle mesurée à Lyon. B) distribution tabulée type « Remote Continental ».

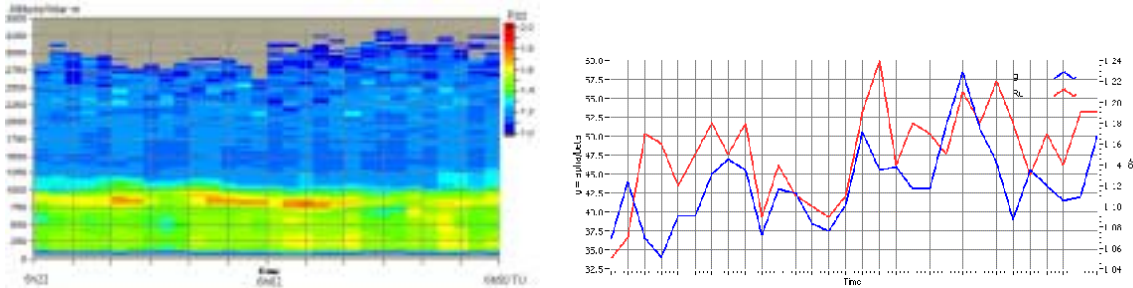
Néanmoins ce premier test de faisabilité de recouvrement de la distribution de taille utilisait des données LIDAR théoriques. Afin de confirmer son caractère opérationnel et d’en définir ses limitations principales, nous avons souhaité effectuer une campagne de validation utilisant comme données d’entrée des signaux LIDAR réels. Mais, avant d’engager le développement coûteux d’un tel LIDAR multi-longueurs d’ondes UV-IR, nous avons décidé de coupler deux LIDAR fonctionnant respectivement dans les domaines UV et visible-IR.

Pour ce faire, nous avons participé durant l’été 2003 à la campagne POVA (Pollution des Vallées Alpines) coordonnée par le réseau de surveillance AIRAPS et le Laboratoire de Glaciologie de Grenoble (LGGE). Nous avons choisi de colocaliser notre LIDAR UV11 fonctionnant dans le domaine UV, avec le LIDAR du LSCE-CEA fonctionnant dans le domaine visible et IR. Cette colocalisation doit alors nous permettre de coupler les mesures et d’obtenir une première évaluation du LIDAR multi-longueurs d’onde et permettre d’alimenter ainsi « l’algorithme génétique » de caractérisation de la distribution de taille des aérosols.

Bien que cette campagne soit en cours de traitement, le rendu opérationnel de certains modules de l’algorithme génétique nous a permis d’obtenir quelques résultats préliminaires, comme le montre l’exemple ci-après. La figure de gauche présente le profil vertical de charge en aérosols, à savoir la variation relative de la quantité d’aérosols avec l’altitude et le temps. Ce profil, correspond ici, non pas à l’extinction atmosphérique produite par les gaz et les particules, mais à la quantité réelle d’aérosols présents : on observe ainsi deux fois plus d’aérosols dans cette couche qu’au niveau du sol. Par ailleurs le paramétrage de l’algorithme indique qu’en haute altitude, on observe une très faible charge en aérosols, situation typique d’une masse d’air en troposphère libre. Il s’agit d’une première approche quantitative car elle fournit la variation relative verticale du taux d’aérosols :

- Au-dessus de 2300 m asl, troposphère libre où 1% de l’extinction laser est due aux aérosols (R=1,15). La charge en aérosols est donc couramment rencontrée en troposphère libre.

- Entre 1700 et 2300 m, couche fortement chargée en aérosols où l'extinction est autant due aux aérosols qu'aux molécules ($R=2$). On a 5 fois plus d'aérosols dans cette couche qu'en troposphère libre.
- Au-dessous de 1700 m asl, couche deux fois moins chargée en aérosols ($R=1,5$) que la couche 1700-2300m. La charge en aérosols est caractéristique d'un site de fond urbain.



Premiers résultats de quantification des aérosols par LIDAR le 10 juillet entre 5h et 7h TU : à gauche profil vertical de la charge en aérosols ; à droite l'évolution des paramètres micro-physiques des aérosols

La figure de droite, qui montre la dynamique du paramétrage de l'algorithme, réalisé de 5h22 TU à 6h50 TU, souligne que le paramètre micro-physique (g , courbe en bleu) des aérosols a changé à partir de 6h TU, ce qui pourrait très vraisemblablement correspondre à un accroissement de la taille de l'aérosol qui la compose et traduire ainsi une modification de cette masse d'air ou bien une origine différente.

4.2.2 Perspectives à court terme

Ces résultats préliminaires ont été obtenus en utilisant les mesures de notre LIDAR UV11. Nous allons maintenant tirer partie de la colocalisation de notre LIDAR, fonctionnant uniquement sur le domaine spectral UV et du LIDAR LSCE fonctionnant dans le visible et l'IR. En couplant ces mesures et en les utilisant comme données d'entrées de l'algorithme génétique, mais également en utilisant les mesures au sol comme conditions aux limites, nous devrions pouvoir accéder, pour la première fois, à une quantification complète de l'aérosol atmosphérique ainsi qu'à sa dynamique et démontrer ainsi la faisabilité de notre méthodologie. Ces conclusions, qui devraient aboutir d'ici quelques mois, permettront alors d'orienter le développement technologique à engager sur le LIDAR UV11 INERIS afin qu'il devienne un outil opérationnel de caractérisation tridimensionnelle des aérosols atmosphériques, comme défini dans les objectifs initiaux de notre programme de recherche.

Par ailleurs, nous explorons d'autres voies visant à quantifier simultanément par LIDAR la distribution de taille et la composition chimique des particules sub-microniques. Il s'agit d'une méthodologie très novatrice où des résultats préliminaires très encourageants ont été obtenus qui doivent donner lieu à une campagne de mesures spécifique au début de l'année 2004.

Enfin, un accord de partenariat entre l'INERIS et le CEA est en cours de finalisation, visant développer un LIDAR aérosols commun, qui soit opérationnel et autonome et dont la finalité est la surveillance en continue de la stratification atmosphérique de la basse troposphère ainsi que le suivi en temps réel de la hauteur de la couche limite atmosphérique et du plafond nuageux.

LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation précise	Nb/N°pages
A	Campagne DOAS sur l'Aéroport de Lyon-St-Exupéry	Tiré à part
B	Campagne DOAS d'étude d'impact d'une modulation de trafic – Chamonix 2002-2003	Tiré à part
C	Campagne LIDAR INTERREG IIIμ Strasbourg 2003	Tiré à part
D	Compte rendu d'activité du LMD, année 2003 Auteur : Pierre Henri FLAMANT / LMD	2
E	Bilan d'utilisation du LIDAR COPARLY Auteur : Frédéric BOUVIER / COPARLY	À paraître en février 2004

ANNEXE A : CAMPAGNE DOAS SUR L'AEROPORT DE LYON-ST-EXUPERY

Tiré à Part et disponible sur le site LCSQA

Référence : INERIS-DRC-03-45795-652-EFr

**ANNEXE B : CAMPAGNE DOAS D'ETUDE D'IMPACT D'UNE
MODULATION DE TRAFIC – CHAMONIX 2002-2003**

Tiré à Part et disponible sur le site LCSQA

Référence : INERIS-DRC-03-45795-762-EFr

**ANNEXE C : CAMPAGNE LIDAR INTERREG III μ STRASBOURG
2003**

Tiré à Part et disponible sur le site LCSQA

Référence : INERIS-DRC-03-45795-923-EFr

ANNEXE D : COMPTE RENDU D'ACTIVITE DU LMD, ANNEE 2003

Auteur : Pierre-Henri FLAMANT / LMD

Les deux groupes de l'IPSL conduits par P. H. Flamant et C. Loth au LMD et J. Pelon et D. Bruneau au (SA) développent en étroite collaboration des recherches expérimentales s'appuyant sur de nouveaux instruments de télédétection optique active : les Lidars Météorologiques.

Différents types de Lidar Météorologiques ont été développés avec le soutien du CNES et de l'INSU CNRS : (1) Lidar aérosols nuages dont le principe de mesure utilise la diffusion élastique par les molécules et les particules en suspension dans l'air, (2) Lidar DIAL utilisant l'absorption différentielle à deux longueurs d'onde par les gaz ou vapeurs à étudier, (3) Lidar Vent utilisant le changement de fréquence par effet Doppler de la lumière diffusée par les diffuseurs en mouvement. Les techniques de détection et les Lasers sont fonction des applications. Les deux groupes de l'IPSL ont la capacité de concevoir des instruments répondant au mieux aux besoins suivant les cahiers des charges spécifiques aux applications dédiées à la pollution et plus généralement à l'environnement.

Les deux groupes sont impliqués dans les programmes de Lidar spatiales du CNES et de l'Agence Spatiale Européenne : CALIPSO, charge utile « nuages-aérosols », développé conjointement par le CNES et la NASA pour être lancé en 2005, Lidar Vent ÆOLUS-ADM de l'ASE pour être lancé en 2007. Plus récemment, ils viennent de remporter l'Appel d'Offre ASE pour l'étude d'un Lidar DIAL pour la mesure du CO₂ atmosphérique. Ce Lidar pourrait être embarqué sur satellite, pour effectuer des observations en complément des mesures passives déjà réalisées ou futures.

Trois Lidar aéroportés ont été conçus, développés et mis en œuvre avec succès par ces deux groupes au cours des dix dernières années : LEANDRE-1 (nuages-aérosols) en 1990, LEANDRE-2 (vapeur d'eau) en 1997, WIND (vent) en 1999. WIND a été développé en coopération franco-allemande avec le DLR. Ces trois Lidar aéroportés sont toujours opérationnels. Des modifications ont été rendues nécessaires pour qu'ils soient intégrés dans différents porteurs, y compris un avion US à la demande de scientifiques américains. Différents Lidars opérant à partir du sol ont été développés comme précurseurs des Lidar aéroportés mentionnés ci-dessus ; c'est le cas pour le Lidar nuages-aérosols du SIRTa et le Lidar Vent Transportable mis en œuvre avec WIND pendant la campagne ESCOMPTE en 2002.

Plus récemment, le Lidar Doppler hétérodyne qui a été développé par le SA est en cours d'adaptation pour effectuer des mesures simultanées de vitesse et de gaz CO₂ par la méthode DIAL. Ce prototype émet sur la bande spectrale centrée à 2µm. Il est aussi envisagé de développer un prototype émettant à 1,5 µm qui utiliserait les composants développés dans le cadre des télécommunications optiques. Les développements instrumentaux conduits en laboratoire sont très complémentaires de l'étude conduite pour l'ASE en vue d'application à partir de l'espace. Ces Lidars permettrait de fournir une information de tout premier ordre dans l'étude de la dynamique à grande échelle et des changements climatiques.

Parmi les réalisations récentes, on peut aussi citer la « Station d'Observation Transportable Mini-Lidar et radiomètres » développée par le LMD. Cette station est conçue pour être transportée dans un véhicule de location ordinaire sans qu'il soit nécessaire de mobiliser un véhicule spécialisé. De même, on peut citer le Lidar à Haute

Résolution Spectrale qui est en cours de réalisation à l'INSU avec le soutien du groupe du SA pour remplacer à terme le Lidar aéroporté LEANDRE-1.

À titre d'exemple, les données fournies par le Mini-Lidar ont été comparées avec les sorties du modèle CHIMÈRE. Les concentrations en aérosols fournies par le modèle sont converties en grandeurs optiques (coefficient d'extinction ou de rétrodiffusion) par un code de diffusion de Mie. Les premiers résultats sont satisfaisants et soulignent les limites de chacun : limitation intrinsèque de la visée Lidar au voisinage de la surface (existence d'une zone aveugle et d'un facteur géométrique) ; non prise en compte de couches d'aérosols transportées sur de grandes distances pour CHIMERE. Cette première comparaison a été effectuée sur quelques cas pour montrer que les informations étaient concordantes avec les limitations évoquées précédemment.

Pour ce qui concerne les activités en cours et futures, il est envisagé, si les moyens financiers sont dégagés : (1) d'avancer la réalisation et les test atmosphériques du Lidar DIAL/Doppler CO₂ présenté ci-dessus ; (2) de développer un Lidar aérosols dédié à la couche limite urbaine (CLU) dont la capacité de mesure couvrirait la gamme 10 m – 3 km ; (3) de développer un Lidar vent conçu autour des technologies télécommunications pour les applications CLA et CLU, d'une part, et la mesure de courant de surface des cours d'eau pour les applications hydrologiques, d'autre part.

ANNEXE E : BILAN GENERAL DU LIDAR COPARLY

Auteur : Frédéric BOUVIER / COPARLY

Document disponible auprès de COPARLY
Finalisation du document prévue pour mars 2004