



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

Étude des instruments à long trajet optique « LIDAR »

Laboratoire Central de Surveillance de la
Qualité de l'Air

Convention 31/2001

Emeric FREJAFON - Amandine FIEVET

Unité Qualité de l'Air – Direction des Risques Chroniques

Décembre 2002

Étude des instruments à long trajet optique « LIDAR »

Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité
de l'Air

Convention 31/2001

DECEMBRE 2002

personnes ayant participé à l'étude
Emeric FREJAFON - Amandine FIEVET

Ce document comporte 44 pages (hors couverture).

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

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	2
RÉSUMÉ.....	3
RETOUR D'EXPERIENCE LIDAR EN FRANCE.....	5
1. Introduction.....	5
2. rappels des principaux moyens lidar disponibles ainsi que de leurs applications eventuelles	5
3. Synthèse des campagnes 2002 et Conclusion	9
PROJETS DE RECHERCHE LIDAR MIS EN PLACE À L'INERIS AYANT UNE FINALITÉ OPÉRATIONNELLE POUR LES AASQA.....	11
1. introduction.....	11
2. Strategie d'integration d'un lidar dans une aasqa.....	11
3. lidar aerosols	23
4. lidar uv/ir multi-polluants.....	31
5. Synthèse des applications lidar dans le cadre des programmes européens liés au 6 ^{ème} PCRD.....	33
6. conclusion	37
VEILLES SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE, NATIONALE ET INTERNATIONALE.....	38
1. Synthèse scientifique de la conférence ILRC 2002.....	38
2. Récents développements technologiques	42
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES AU REGARD DE L'UTILISATION DU LIDAR DANS LES AASQA.....	43

RESUME

Pour faire suite aux demandes du MEDD, puis de l'ADEME et des AASQA, l'INERIS a conduit de 1996 à 2001 un programme d'étude sur les appareils de mesure à long trajet optique de type LIDAR. Les principaux travaux réalisés au cours de ces cinq années sont les suivants :

- Évaluation du LIDAR 510M concernant les polluants gazeux SO₂, NO₂, O₃, Toluène
- Évaluation d'un nouveau type de LIDAR, dit profiler vertical d'ozone pouvant fonctionner de manière autonome, lors de la campagne ESCOMPTE 2001.
- Campagnes de mesures sur l'Ozone à Paris en juillet 1999 et Marseille en juin 2001.
- Inter comparaison entre des mesures LIDAR et des capteurs ponctuels lors de la campagne d'ozone à Paris en juillet 1999 ainsi que plus globalement entre différents instruments de mesures en altitude (LIDAR, avions, ballons) lors de la campagne ESCOMPTE 2001.

Les travaux réalisés durant l'année 2002 sont les suivants :

1. Retour d'expériences sur l'utilisation du LIDAR et de ses applications, à partir des différentes campagnes ponctuelles organisées par les AASQA. Ce retour est néanmoins limité en raison de l'ajournement de la campagne LIDAR sur zone aéroportuaire organisée par AIRPARIF (non obtention de l'autorisation de la DGAC quant à l'utilisation d'un LIDAR à proximité immédiate des pistes, compte tenu de l'arrêté préfectoral interdisant l'utilisation de laser classe 4 à proximité immédiate des aéronefs). Par ailleurs, l'INERIS n'ayant pas reçu le LIDAR venant en remplacement de celui incendié lors de la campagne ESCOMPTE, aucune campagne LIDAR organisée dans le cadre du LCSQA ne fut planifiée durant l'année 2002. Ainsi le retour d'expérience nationale sur l'utilisation LIDAR en 2002 se limite aux études effectuées par COPARLY. En revanche, de nombreuses campagnes lidar ont été réalisées sur le plan international, telles que les campagnes lidar de longues durées réalisées par l'université de Berlin ou bien encore le NOAA américain.
2. Synthèse annuelle des différents projets de recherche LIDAR mis en place à l'INERIS, en des termes opérationnels pour les AASQA. L'INERIS, dans le cadre de ses missions de recherche, mène actuellement ou devrait engager prochainement plusieurs programmes de recherche LIDAR :
 - Intégration d'un LIDAR dans une AASQA, lancée en 1999 et dont le rapport final fut réalisé fin 2002. Il nous a, d'une part, permis de déterminer précisément les caractéristiques métrologiques des LIDAR, mais également de mettre en comparaison ce type d'instrument avec d'autres techniques de mesurage et notamment des instruments dits de référence. Ce programme de recherche nous a, d'autre part, permis de montrer l'apport essentiel de la technique LIDAR, tant dans la compréhension de la stratification atmosphérique que dans son intégration dans des modèles physico-chimiques tridimensionnels.

- LIDAR aérosols appliqué aux émissions diffuses industrielles : ce programme de recherche, qui vient de débiter, s'intéresse à la conception d'un LIDAR permettant, par son couplage à des instruments de caractérisation ponctuelle, de fournir une localisation qualitative et quantitative d'émissions diffuses d'aérosols industriels (concentration et distribution de taille résolue dans l'espace et le temps).
 - LIDAR UV/IR multipolluants à faible limite de détection : nous devrions engager l'année prochaine un programme visant à développer un LIDAR UV/IR qui permettra, d'une part, une analyse multigaz de nouveaux polluants tels que les COV et les métaux lourds et d'autre part, une amélioration importante des limites de détection des LIDAR actuels. Ce programme de recherche constituerait alors une première étape vers la mise en place d'un LIDAR urbain appliqué à la compréhension d'effets à l'échelle de la rue.
 - Par ailleurs, la participation de l'INERIS en tant qu'expert européen sur les domaines liés à la caractérisation 3D de la physico-chimie de l'atmosphère, permettra d'accéder à un retour d'expérience et une veille scientifique de tout premier ordre sur les projets européens utilisant la technique lidar comme moyen de mesure, instrument de compréhension ou bien encore outil de validation.
 - De même, l'INERIS pourrait participer à plusieurs projets européens, présentés dans le cadre du 6^{ème} PCRD, visant à utiliser le LIDAR et l'inscrire dans un processus de mise en réseau.
3. veille scientifique et technique nationale et internationale. La participation de l'INERIS au congrès international des LIDAR (International Laser Radar Conference), a permis de recenser les principaux développements LIDAR et notamment :
- la caractérisation de la vapeur d'eau, permettant d'obtenir un support de paramétrage des modèles météorologiques 3D. Ces instruments, qui tendent à devenir opérationnels, souffrent encore de contraintes de fonctionnement importantes et nécessitent un personnel très qualifié,
 - la caractérisation des aérosols, trouvant des applications tant sur la surveillance de la qualité de l'air (analyse des polluants réglementés, compréhension de la stratification atmosphérique et de sa dynamique) ou bien encore dans des applications plus pragmatiques telles que la modélisation de la visibilité atmosphérique sur zone aéroportuaire,
 - la caractérisation de l'ozone par couplage LIDAR-Satellite, permettant d'étudier très précisément les inclusions stratosphériques et leur implication sur la qualité de l'air.

RETOUR D'EXPERIENCE LIDAR EN FRANCE

1. INTRODUCTION

Le LIDAR (Light Detection And Ranging), sorte de radar optique, est un système d'analyse de la qualité de l'air, qui repose sur une technologie Laser. Il permet de mesurer à distance la concentration de différents polluants présents dans l'atmosphère et ainsi de les localiser à une distance pouvant être de plusieurs kilomètres. Pour ce faire, il utilise une technique DIAL (Differential Absorption LIDAR) qui permet, en se fondant sur une réponse différentielle, d'obtenir la concentration d'un polluant gazeux donné. Les principaux polluants mesurés par LIDAR sont l'ozone, le NO₂, le SO₂, le benzène et le toluène. Certains LIDAR autorisent également la mesure à l'émission de polluants plus spécifiques tels que le styrène, le mercure gazeux ou bien encore certains COV et composés chlorés. Les différentes évaluations menées depuis 1996 par l'INERIS dans le cadre du LCSQA, ont permis d'en définir les principales caractéristiques, telles que la limite de détection, la portée ou bien encore la répétabilité. Par ailleurs, un retour d'expérience global fut réalisé par l'INERIS visant à recenser les différentes études réalisées ainsi que les principales applications d'un LIDAR au sein des AASQA (cf. rapport LCSQA Convention 41/2000, INERIS DRC-01-27090-AIRE-800a-EFr).

2. RAPPELS DES PRINCIPAUX MOYENS LIDAR DISPONIBLES AINSI QUE DE LEURS APPLICATIONS EVENTUELLES

Nous rappelons qu'il existe maintenant trois principales catégories de LIDAR, disponibles en version commerciale ou sous la forme d'un prototype de laboratoire.

2.1 LIDAR DIAL ANGULAIRE MULTIPOLLUANTS EN VERSION COMMERCIALE

2.1.1 Description technique du LIDAR 510M

Les LIDAR angulaires multipolluants permettent de réaliser une cartographie tridimensionnelle résolue dans le temps des principaux polluants gazeux NO₂, SO₂, O₃, benzène et toluène. Ils permettent également de fournir une information qualitative sur les particules en suspension au travers de la visibilité ou de l'extinction atmosphérique.

L'instrument repose sur l'utilisation d'un laser à impulsions de type Titane-Saphir de forte puissance, accordable de 750 nm à 900 nm. Ce LIDAR est installé dans un véhicule laboratoire de 5 tonnes intégrant également une station de mesure ponctuelle ainsi qu'une unité météorologique.

Un fonctionnement en mode autonome et une surveillance à distance peuvent être réalisés au moyen de connections de types RTC, Internet ou bien encore GSM. Néanmoins, les différentes campagnes réalisées ont montré que cet instrument nécessitait en permanence la présence de moyens humains spécialement formés sur le LIDAR.

2.1.2 Principales applications

Cet instrument, largement utilisé jusqu'à ce jour, correspond au LIDAR 510M du réseau de surveillance COPARLY. Il a participé à de nombreuses études et notamment :

- Études d'émissions industrielles. Il fut utilisé à plusieurs reprises afin d'effectuer une caractérisation 3D d'émissions industrielles. On citera notamment l'étude de spatialisation d'émissions de benzène et de toluène au-dessus d'un site de stockage de produits pétroliers (Chili), l'étude de la dispersion et de la sur-hauteur du panache d'une usine thermique (Ex-RDA, Pologne), d'une usine d'incinération d'ordures ménagères (France), d'une usine de raffinage (France, Grèce, Allemagne, Pologne). Les résultats obtenus ont permis, d'une part, de documenter la spatialisation d'émissions industrielles et, d'autre part, ont permis de servir d'outils de paramétrage et de validation de modèles dispersifs.
- Études d'épisodes de pollution à l'ozone. Il fut utilisé lors de campagnes de Paris, Lyon et Marseille, d'une part, afin de documenter la spatialisation de la concentration en ozone et sa dynamique et, d'autre part, afin de servir d'outil de validation des modèles 3D physico-chimiques. Les études ont porté sur la description d'un épisode de pollution, en effectuant des mesures en continu durant 48 à 72 heures. Cet instrument, qui nécessite la présence d'un personnel qualifié, ne permet pas de décrire l'apparition ou le devenir de tels épisodes de pollution, compte tenu de cette contrainte.

2.2 LIDAR DIAL PROFILER D'OZONE ELIGHT

2.2.1 Description technique

Il s'agit d'un système commercial, développé par la société ELIGHT Laser System. Cet appareil, tout premier modèle d'une nouvelle génération de LIDAR utilisant comme noyau un laser Nd-Yag, fut mis à la disposition de l'INERIS par le constructeur, pour la campagne ESCOMPTE. Cet instrument sera également mis en œuvre par l'INERIS lors de la campagne INTERREG III organisée par le réseau de surveillance ASPA.

Ce système repose sur l'utilisation d'un laser à impulsions Nd-Yag doublé et triplé en fréquence. Le signal doublé en fréquence est utilisé pour pomper un oscillateur paramétrique optique (OPO), générant alors deux longueurs d'ondes aux environs de 800nm et de 1500nm. Un mixage de fréquence est ensuite réalisé avec la troisième harmonique du laser Nd-Yag pour obtenir une longueur d'onde située entre 266nm et 320nm. La mise en rotation des différents cristaux permet alors d'obtenir les différentes longueurs d'ondes nécessaires à la mesure de l'ozone.

Cet appareil est totalement autonome et peut être piloté à distance. Un suivi quotidien peut être effectué à distance au moyen d'une ligne GSM ou RTC, afin d'optimiser la qualité des mesures ou d'en changer les réglages. Ainsi, une intervention minimale sur l'instrument d'environ 1 jour par semaine de mesure est suffisante, réduisant ainsi les coûts de campagne et la mise à disposition de moyens humains.

Un premier retour d'expérience fut obtenu par l'INERIS lors de la campagne ESCOMPTE, qui a permis de valider son fonctionnement autonome durant plusieurs semaines. De même, un contrôle qualité fut réalisé lors de cette même campagne, qui a montré un taux de données validées supérieur à 80% (cf. rapport LCSQA Convention 41/2000, INERIS DRC-01-27090-AIRE-800a-EFr).

2.2.2 Principales applications

Cet instrument, qui est adapté au suivi en continu de la dynamique atmosphérique du polluant gazeux ozone et de la hauteur de la couche limite, trouve son application principale dans le paramétrage et la validation de modèles météorologiques, d'une part, en fournissant une évaluation en continu de la hauteur de la couche limite atmosphérique et de modèles chimiques tridimensionnels, d'autre part, en fournissant un suivi en continu du profil vertical de concentration en ozone.

De ce fait, cet instrument a eu un rôle essentiel lors de la campagne ESCOMPTE, sera également présent lors de la campagne INTERREG III de Strasbourg du 12 mai au 19 juin 2003. Installé à proximité d'un RADAR profiler de vent, leur association permettra de fournir des profils verticaux du sol à 2 500 m d'altitude des paramètres chimiques (ozone, aérosols) ou dynamiques (hauteur de couche, stratification, vitesse et direction des vents), de manière continue sur plusieurs semaines.

2.3 LIDAR MULTI-DIAL, ANGULAIRE MULTI-POLLUANTS

2.3.1 Description technique du LIDAR UV11 M-DIAL

Il s'agit d'un système commercial, développé par la société ELIGHT Laser System. Cet appareil, tout premier modèle d'une nouvelle génération de LIDAR angulaire, serait la base de tous les prochains LIDAR commerciaux délivrés par le fournisseur. L'appareil commandé par l'INERIS et dont la livraison est prévue en mai 2003, est de ce type.

Il a été créé, sur la base d'un cahier des charges regroupant les caractéristiques des deux LIDAR décrits précédemment.

Associant les principaux avantages respectifs des deux types de LIDAR cités précédemment, il possédera les caractéristiques suivantes :

- Mode angulaire de mesures, permettant d'effectuer des cartographies angulaires pouvant ensuite être couplées à des logiciels de SIG.
- Suivi de plusieurs polluants gazeux et des aérosols en simultané, dite technique Multi-DIAL, fondée sur l'utilisation de 2 à 16 longueurs d'ondes différentes.
- Fonctionnement en mode autonome, ne nécessitant une maintenance et un suivi technique qu'à raison d'une journée par semaine de mesure. En effet, bien qu'une présence humaine puisse être recommandée compte tenu du caractère hautement technologique de cet instrument, elle sera essentiellement à de fins de traitement de données ou de sécurité, mais n'imposera pas la présence d'un personnel hautement qualifié, notamment durant les phases nocturnes de mesures.
- Suivi quotidien au moyen d'une ligne GSM ou RTC, afin d'optimiser la qualité des mesures ou d'en changer les réglages. Cet instrument doit être piloté et surveillé à distance, afin de pouvoir éventuellement changer certains réglages, sans pour autant avoir à se déplacer sur site.

Il ne s'agit pas, pour l'INERIS, d'accéder à un LIDAR qui soit aussi autonome qu'une station de mesure, mais d'avoir un outil de haute technicité ne nécessitant pas la présence constante d'une personne spécialisée pour son fonctionnement, et ce, notamment la nuit.

Les spécifications LIDAR attendues sont meilleures dans ce nouvel instrument et notamment :

- La portée sera plus importante, car la puissance émise sera 10 fois supérieure. 10 mJ contre 1 mJ, sur la gamme de longueur d'onde 266-300 nm.
- Les limites de détection devraient être améliorées, et notamment pour les polluants NO₂ et BTX pour plusieurs raisons :
 - Largeur spectrale plus fine des longueurs d'ondes émises et meilleure stabilisation, ce qui permet d'accéder à une plus grande précision sur les sections efficaces d'absorption, facteur déterminant de la limite de détection. En effet, comme pour tout instrument optique fonctionnant par absorption UV, la limite de détection est fonction de la résolution spectrale de l'appareil, dans le cas de polluants qui ont des spectres d'absorption à bandes étroites.
 - Technique multi-DIAL, qui permettra, une fois que sera implémenté le principe de corrélation spectrale (développé dans le cadre d'un programme de recherche spécifique), de réduire encore la limite de détection en compensant toute variation spectrale. En effet, l'imprécision sur la longueur d'onde émise contribue également à augmenter la limite de détection. En comparant non plus deux longueurs d'onde, mais un plus grand nombre, nous pourrions alors les corréler entre elles, au vu du spectre d'absorption théorique, et ainsi compenser les dérives ou fluctuations spectrales.
- La limite de détection de l'ozone restera en revanche identique car le spectre d'absorption étant continu sur la gamme 266-300 nm, l'amélioration de la largeur spectrale de l'instrument ne change que très faiblement la précision sur la mesure (amélioration attendue inférieure à 1%).

L'INERIS ne possédant pas encore cet instrument, ses caractéristiques ne peuvent pas être démontrées. Néanmoins, cet instrument utiliserait la même technologie que le profiler vertical d'ozone ELIGHT décrit dans le paragraphe précédent, qui a démontré sa fiabilité lors de la campagne ESCOMPTE ou lors des campagnes de longues durées effectuées en Allemagne et aux États-Unis, comme décrit dans le paragraphe suivant, traitant des campagnes réalisées en 2002.

2.3.2 Principales applications

Cet instrument, qui se veut une optimisation des deux précédents, comme le montre la description technique ci-dessus, a pour vocation d'accéder à un appareil ayant de multiples applications. Ainsi, on pourrait citer :

- L'étude d'épisodes de pollution, mais également de leur origine et de leur devenir. Une surveillance continue durant plusieurs semaines permet, d'une part, de mieux documenter la spatialisation de la qualité de l'air, sa dynamique et de fournir une information quantitative sur les phénomènes d'accumulation, d'inclusions ou de transport aboutissant à la mise en place d'un épisode de pollution. Sa faisabilité pourrait alors être évaluée par l'INERIS, dans le cadre d'une réception technique qui serait effectuée lors de la campagne INTERREG 3 μ C de Strasbourg, où cet instrument serait installé à proximité du profiler vertical d'ozone afin d'effectuer des mesures en parallèle durant 1 mois. Cette évaluation ne sera réalisée que dans la mesure où il nous aura été livré : le constructeur ELIGHT a évalué que ce nouveau LIDAR avait une chance d'environ 75 % d'être présent dès le début de la campagne et une chance proche de 100 % d'y être au 1^{er} juin 2003, donc pour la seconde partie de la campagne INTERREG.

- L'extension de l'étude d'épisodes de pollution à d'autres polluants que l'ozone et notamment le NO₂ et les BTX. En effet, cet instrument devrait pouvoir nous permettre d'effectuer une surveillance en continu de plusieurs polluants en simultané, permettant ainsi par exemple de suivre les polluants étroitement corrélés lors de l'apparition d'un épisode de pollution, tels que le NO₂ et O₃. Cela permettrait de fournir des éléments très importants dans la compréhension de phénomènes physico-chimiques puis dans leur modélisation.
- L'étude d'effets de transport à grande distance, d'inclusions stratosphériques, d'écoulement et plus généralement l'étude de la dynamique des polluants. Cette étude de la dynamique se situe d'une part à très petite échelle (effet de vallée, écoulement synoptique, effet de la topographie) par des coupes angulaires, mais également les effets d'inclusions et de transport en utilisant des profils verticaux.
- L'étude d'émissions (canalisées, linéaires ou diffuses) et notamment l'étude de leur spatialisation, permettant d'une part de les modéliser et d'autre part d'en évaluer l'impact sur la qualité de l'air à l'échelle locale : réalisation de profils angulaires pour plusieurs polluants gazeux tels que le NO₂, les BTX et le SO₂. Afin d'étendre ses capacités, deux programmes de recherche sont en cours (détaillé dans la synthèse scientifique), visant d'une part à obtenir la spatialisation quantitative des aérosols, d'autre part à étendre la mesure à d'autres polluants (COV, Mercure gazeux, Chlorés) spécifiques d'émissions diffuses ou canalisées et enfin d'en réduire les limites de détection et donc d'améliorer la résolution spatiale de cet instrument.

3. SYNTHÈSE DES CAMPAGNES 2002 ET CONCLUSION

Le LIDAR, instrument de spatialisation de la concentration en polluants gazeux, et à terme, en polluants particuliers, bénéficie d'un large retour d'expérience, tant au niveau national au travers des nombreuses études financées aux cours de ces dernières années, que plus globalement à l'échelle internationale, où plus d'une dizaine de campagne LIDAR sont réalisées chaque année.

L'expérience acquise permet de montrer l'utilité d'un tel instrument ainsi que ses limitations, tant sur le plan technique, que logistique ou financier. Ainsi, on a pu constater l'apport de cette technique en tant que support de validation ou instrument de validation de modèles photochimiques ou dispersifs, mais aussi, plus globalement, dans la compréhension de la spatialisation de la concentration, tels que notamment dans l'identification des inclusions stratosphériques d'ozone, responsable d'une plus ou moins large part de la pollution locale. En revanche, son utilisation ne doit être envisagée que dans des situations clairement définies, et reste confrontée à de nombreuses limitations, notamment en terme financier, mais également dans la définition de la campagne proprement dite. Ainsi, certaines études nécessitant la détection de polluants à des seuils inférieurs aux limites de détection de l'instrument, ne pourront pas être effectuées.

Néanmoins, de récentes avancées technologiques ont permis, d'une part, de réduire fortement les coûts d'utilisation de ces instruments et, d'autre part, d'en améliorer la fiabilité et les spécifications, permettant par exemple d'envisager la mesure des polluants gazeux benzène et toluène à l'air ambiant, auparavant très difficile. En effet, de récentes innovations technologiques ont permis de modifier le cœur des LIDAR. Une première évaluation de ce type d'instrument a été effectuée par l'INERIS durant la campagne ESCOMPTE, qui a permis d'en montrer le très bon fonctionnement en mode autonome, la qualité des données obtenues, et le faible coût de campagne. L'INERIS, suite à l'incendie survenu sur son appareil durant la campagne ESCOMPTE, va se doter de ce nouveau type d'instrument. Cette absence de LIDAR durant l'année 2002 a entraîné une absence quasi-

totale de campagnes de mesures à l'échelle nationale. En effet, seule l'association de surveillance COPARLY, possédant son propre LIDAR, a réalisé quelques campagnes de mesures LIDAR. Les résultats de ces dernières sont en cours de traitement et devraient être disponibles à la fin du premier trimestre 2003. On citera notamment une campagne de mesure LIDAR qui fut organisée sur la zone aéroportuaire de Lyon-Saint-Exupéry et qui visait à effectuer une spatialisation des émissions de NO₂ générées lors de phases de décollage. En effet, cette phase, qui impose l'utilisation des moteurs en régime maximal, est principalement génératrice d'oxydes d'azote, contrairement aux phases d'atterrissage qui, en utilisant les moteurs en sous-régime, génèrent principalement des COV. De même, quelques autres campagnes LIDAR ont été réalisées, tant au niveau national par l'université du Littoral, que sur le plan international. On citera notamment les travaux obtenus par l'université de Berlin et par le NOAA américain qui, en réalisant des campagnes de très longues durées (plusieurs mois de mesures lidar en fonctionnement continu), ont démontré le caractère opérationnel de ces nouveaux instruments autonomes et leur capacité à fournir une documentation de première importance sur la stratification atmosphérique et sa dynamique, support nécessaire à la compréhension de la qualité de l'air et sa modélisation.

PROJETS DE RECHERCHE LIDAR MIS EN PLACE A L'INERIS AYANT UNE FINALITE OPERATIONNELLE POUR LES AASQA

1. INTRODUCTION

L'INERIS, dans le cadre de ses missions de recherche, s'intéresse à plusieurs programmes de recherche utilisant la technique LIDAR. Ces programmes, axés sur le développement LIDAR pour des applications à l'air ambiant, sont réalisés en étroite collaboration avec des laboratoires universitaires, des constructeurs et enfin des utilisateurs et plus particulièrement des AASQA.

Ainsi, un programme de recherche visant à étudier les stratégies d'intégration d'un LIDAR dans des AASQA, lancé en 1999, vient de se terminer. Réalisé en étroite collaboration avec de très nombreux partenaires et notamment plusieurs AASQA (AIRPARIF, COPARLY, AIRMARAIX, AIRFOBEP), il a permis d'étudier l'intégration d'un outil LIDAR dans les activités d'une AASQA, en s'intéressant, d'une part, à l'aspect métrologique et, d'autre, part aux études qui en découleraient.

Par ailleurs, compte tenu de la demande croissante d'information sur les polluants particuliers, l'INERIS s'est engagé dans un programme de recherche visant à développer un LIDAR autorisant la spatialisation des aérosols et leur caractérisation physico-chimique et notamment sur la granulométrie tridimensionnelle des aérosols. Dans un premier temps orienté sur la spatialisation des émissions diffuses d'aérosols industriels, cet instrument pourra ensuite être utilisé en atmosphère urbaine.

Enfin, l'INERIS s'oriente, à moyen terme, vers un LIDAR urbain dont les principales caractéristiques sont, d'une part, la mesure de nombreux polluants quasi-simultanée, associée à de faibles limites de détection et, d'autre part, une résolution spatiale adaptée à l'échelle de la rue ou du quartier. En effet, comme nous le développons dans le chapitre suivant, l'utilisation d'un LIDAR comme outil de description de la qualité de l'air à l'échelle de la rue ou du quartier, nécessite qu'il puisse, d'une part, mesurer plusieurs polluants traceurs de trafic et ce, en simultané, et d'autre part, que ses limites de détection soient très inférieures aux niveaux de concentration attendus afin que la résolution spatiale soit suffisante. Ainsi, il est important que cet instrument puisse, par exemple, mesurer en simultané les polluants BTX et NO₂ et qu'il puisse posséder une résolution spatiale inférieure au kilomètre, voire même de l'ordre de quelques centaines de mètres. C'est donc aussi dans ce sens que vont s'orienter les prochaines actions de recherche de l'INERIS.

2. STRATEGIE D'INTEGRATION D'UN LIDAR DANS UNE AASQA

2.1 OBJECTIFS ET RESULTATS INITIAUX

Ce projet avait pour objectif initial la définition d'une méthodologie d'optimisation de l'intégration d'un système LIDAR multipolluant dans un ensemble de surveillance de la

qualité de l'air comprenant un réseau d'analyseurs au sol conventionnels, un système d'observation météorologique et un modèle prévisionnel de l'état de pollution d'un site. Ce programme devait s'orienter autour des axes suivants :

- Validation des mesures : mise en place et validation d'un protocole d'évaluation de caractéristiques des LIDAR. Il était également prévu de comparer les caractéristiques obtenues avec, d'une part, des études en tunnel ou en galerie (où l'on aurait pu reproduire des conditions de pollution et d'utilisation du LIDAR proches de la réalité) et, d'autre part, lors de campagnes d'inter comparaisons avec des méthodes de référence et notamment des analyseurs ponctuels. Compte tenu des difficultés techniques rencontrées et des coûts associés à des essais en tunnel, nous avons choisi d'orienter la validation des mesures sur des campagnes d'intercomparaisons avec des instruments de références.
- Campagne de mesures : réalisation d'explorations horizontales et verticales lors de campagnes de mesures de large envergure.

Validation de modèles : participation de l'INERIS à des campagnes de mesures avec pour objectif d'effectuer une validation de modèles 3D déterministes et notamment participer à la campagne ESCOMPTE.

Cela devrait permettre de donner à l'INERIS les moyens d'intégrer la technologie LIDAR dans les réseaux de surveillance de la qualité de l'air. Le dosage des divers polluants atmosphériques avec cet outil laser posant encore à l'époque des problèmes de cadrage avec les données au sol, le MATE avait également souhaité que l'on effectue dans le cadre de ce programme de recherche une harmonisation des mesures obtenues par différents instruments.

Nous avons pu remplir nos engagements initiaux, en orientant ce programme de recherche, d'une part, sur la définition des caractéristiques instrumentales et, d'autre part, sur la mise en comparaison de résultats LIDAR avec des techniques de référence. Nous avons participé également à différentes campagnes de mesures ayant pour objectifs la compréhension de la dynamique atmosphérique et sa modélisation

2.2 SYNTHÈSE GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES ATTENDUES

Une partie de ce programme a été orientée vers la mise en place de différents protocoles d'évaluations, d'une part des caractéristiques de cet instrument à long trajet optique, mais également de la cohérence de ses mesures vis-à-vis d'autres techniques de mesurage. En effet, l'intégration d'un instrument de type LIDAR dans un réseau comme support de paramétrage de modèle ou comme instrument de compréhension des phénomènes atmosphériques, nécessite une connaissance précise de ses performances et de sa réponse vis-à-vis de méthodes de référence.

Ainsi, après avoir défini une méthodologie d'évaluation des instruments de type LIDAR, nous avons déterminé ses performances pour les polluants gazeux tels que SO₂, O₃, NO₂, Benzène et Toluène, et pu ainsi démontrer sa capacité à effectuer un suivi de ces polluants à l'émission ou à l'immission.

Au vu de ces résultats et afin d'étudier sa cohérence lors d'un couplage avec des analyseurs d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air, nous avons ensuite réalisé une campagne de mesure à Paris en 1999 dont l'objectif principal était d'effectuer un premier essai de mise en comparaison de résultats LIDAR vis-à-vis d'analyseurs ponctuels. Ces études, qui ont montré la cohérence entre ces deux techniques de mesures pour de faibles intégrations spatiales (200 m) et temporelles (15 minutes) compte tenu de la variabilité

atmosphérique, ont été exposées dans les deux premiers rapports intermédiaires de ce programme de recherche.

Dans la continuité de cette campagne de Paris, nous avons également participé, au travers de la thèse d'Alexandre Thomasson, à une campagne d'étude de l'ozone à Lyon durant l'été 1999. L'objectif principal de cette campagne était d'effectuer un paramétrage et une validation d'un modèle physico-chimique tridimensionnel, ce dernier devant ensuite être installé dans un réseau de surveillance de la qualité de l'air. Cette campagne a permis de mettre en évidence la nécessaire complémentarité entre un LIDAR et un réseau de capteurs ponctuels, afin d'accéder à une meilleure compréhension des phénomènes physico-chimiques à l'échelle urbaine et péri-urbaine, intervenant dans les processus de formation et destruction de l'ozone. Cette étude, détaillée dans la thèse d'Alexandre Thomasson, fait également l'objet d'une publication dans la revue « Atmospheric Environment » (en cours de publication). Cette étude a, d'autre part, montré la nécessité de construire une base de données des principaux acteurs de cette pollution à l'ozone. En effet, les processus impliqués dans ces problèmes de pollution sont hautement non-linéaires et la modélisation couplée chimie-transport est une étape indispensable dans la compréhension des relations de cause à effet. Mais cette dernière nécessite une phase de paramétrage et de validation, reposant sur une base de données qui soit la plus large possible.

Le programme ESCOMPTE, auquel nous avons participé, s'inscrivait très largement dans ce contexte. Nous sommes en cours de traitement des données, mais nous avons néanmoins obtenu quelques résultats préliminaires. Ainsi, nous avons quantifié un degré de cohérence de 15 % entre toutes les techniques de mesurage de l'ozone participant à la construction de la base de données tridimensionnelle ESCOMPTE. Nous avons également mis en évidence que ce degré de cohérence évolue avec l'altitude et qu'il est directement lié à l'influence des variations rapides de l'humidité sur les analyseurs d'ozone embarqués dans les avions. Parallèlement à ceci, nous avons effectué un couplage entre des données LIDAR, RADAR, SODAR et des stations de mesures au sol, qui nous a permis de calculer la vitesse de dépôt nocturne de l'ozone en zone rurale, donnée essentielle au paramétrage des modèles 3D physico-chimiques. Plusieurs publications à caractère scientifique ont été effectuées ou sont en cours de finalisation.

Enfin, les conclusions de ce programme de recherche ainsi que les perspectives proposées ci-après, soulignent l'intérêt du LIDAR comme outil de compréhension de phénomènes, qui pourrait être utilisé par les AASQA pas nécessairement comme outil de surveillance, mais plus vraisemblablement dans le cadre de campagnes à caractère scientifique.

Ainsi, les différents rapports intermédiaires de ce programme de recherche permettent de démontrer que l'étape préliminaire à toute stratégie d'intégration d'un LIDAR dans un réseau de surveillance de la qualité de l'air (description et compréhension de phénomènes atmosphériques, paramétrage et de validation de modèles déterministes) était d'étudier et d'évaluer cet instrument ainsi que ses résultats vis-à-vis d'autres techniques de mesurage auxquels il devait être associé. Enfin, l'intégration d'un LIDAR dans un réseau nécessite d'être poursuivie par la mise en place de recherches complémentaires visant à optimiser cet outil afin d'en augmenter les applications possibles, notamment sur la caractérisation de l'aérosol atmosphérique. En effet, si la pollution par certains gaz tels que O_3 ou SO_2 , est de mieux en mieux mesurée, les aérosols restent difficiles à quantifier de manière précise car les paramètres les caractérisant sont beaucoup plus nombreux que dans le cas des polluants gazeux : outre l'évolution temporelle de la concentration, il faut également connaître la distribution de taille et la nature des particules présentes en chaque point de mesure. Ces informations sont indispensables afin de prévoir l'effet des aérosols sur la physico-chimie

atmosphérique ainsi que sur la santé. La prise en compte des aérosols et de leur dynamique permettrait également d'accéder à une compréhension de leurs effets en terme de santé publique ou de leur influence sur la physico-chimie atmosphérique. Pour ce faire, nous avons engagé un programme de recherche (BCRD LIDAR aérosols) sur le développement d'une application du LIDAR de l'INERIS pour la détection quantitative d'aérosols, dans le but d'obtenir une caractérisation quantitative tridimensionnelle (concentration et distribution de taille) des émissions diffuses d'aérosols. Cet outil, essentiel à la surveillance des émissions diffuses ainsi qu'à l'évaluation de l'impact sur la qualité de l'air, permettra alors d'intervenir comme instrument de paramétrage et comme support de validation de modèle d'évaluation des émissions diffuses d'aérosols, qui soit à même de quantifier et de localiser les émissions ainsi que d'en évaluer la dispersion et les retombées.

D'autre part, il a été largement démontré dans ce programme de recherche, l'importance des techniques optiques et plus particulièrement de la technique LIDAR dans la surveillance de la qualité de l'air et sa compréhension. Néanmoins, si la pollution par certains gaz tels que l'ozone peut être quantifiée très précisément, compte tenu des concentrations mesurées très supérieures à la limite de détection, d'autres gaz tels que le benzène ou le NO₂ ne peuvent être suivis que très difficilement à l'air ambiant en raison de leurs limites de détections élevées. De plus, la caractérisation des émissions diffuses, qu'elles soient en zone urbaine ou industrielle, requiert une extension des capacités du LIDAR à la mesure de certains polluants spécifiques et notamment des COVs ou bien encore les métaux lourds (mercure gazeux,...). De ce fait, l'INERIS devrait engager un programme de recherche appliqué visant, d'une part, à obtenir un LIDAR qui soit un outil opérationnel permettant d'effectuer une localisation précise et un suivi des émissions diffuses et notamment sur les COVs et le mercure, mais également, de s'en servir ensuite comme support de paramétrage et instrument de validation de modèles numériques qui les décrivent. Un tel programme, qui nous permettra, d'une part, d'obtenir une caractérisation fine de nombreux polluants gazeux et, d'autre part, de l'appliquer aux émissions diffuses gaz/particules, est une étape indispensable à la caractérisation et la modélisation de la qualité de l'air à l'échelle de la rue.

Enfin, l'étude sur les données ESCOMPTE présentée dans ce programme de recherche, va conduire à la réalisation de programmes de recherche sur des objectifs plus spécifiques, tels que sur la compréhension de l'influence de l'humidité sur la mise en cohérence de différentes techniques de mesurage de l'ozone en altitude pilotée par l'INERIS dans le cadre d'un programme PNCA ou bien encore sur la compréhension de la stratification atmosphérique dans le cadre d'une demande PRIMEQUAL commune entre l'INERIS, le LMD de l'École Polytechnique de Palaiseau et le Laboratoire d'Aérodynamique.

2.3 SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS, PRESENTANT UN INTERET DIRECT AUPRES DES AASQA

2.3.1 Métrologie LIDAR

Les différentes évaluations effectuées par l'INERIS entre 1996 et 2001 ont permis de montrer la faisabilité d'un mesurage de l'Ozone, du SO₂, du NO₂ et du Toluène à l'air ambiant, alors que dans le cas du Benzène, le seuil de quantification s'avère de l'ordre de grandeur de la concentration en Benzène généralement rencontrée à l'air ambiant. Ces essais nous ont également amené à effectuer des calculs de la valeur théorique d'interférence de l'Ozone sur le Toluène. Enfin, il est à noter que les différentes

évaluations qui ont été menées sur 4 appareils LIDAR de 1996 à 2001, ont mis en évidence des spécifications sensiblement différentes d'un appareil à l'autre issues des avancées technologiques entreprises. Ainsi par exemple, l'amélioration importante sur la stabilité de l'appareil (à la source de son fonctionnement en mode autonome) a permis de réduire les limites de détections : en stabilisant le laser, on a réduit les phénomènes de décalage en longueur d'onde qui contribuent à l'augmentation de la limite de détection d'un polluant donné.

Les deux tableaux ci-dessous montrent les différentes caractéristiques obtenues.

		Séction efficace d'absorption et Interférences générées				
		NO ₂	SO ₂	O ₃	Toluène	Benzène
NO ₂	λ _{on} = 398.30 nm	<u>6.73</u>	0	0	0	0
	λ _{off} = 397.00 nm	<u>5.71</u>	0	0	0	0
	Δσ (10 ⁻¹⁹ cm ²)	<u>1.02</u>	négligeable	négligeable	négligeable	négligeable
	Interférence Théorique		0 %	0 %	0 %	0 %
SO ₂	λ _{on} = 286.90 nm	0	<u>10.47</u>	20.33	0	0
	λ _{off} = 286.30 nm	0	<u>6.39</u>	21.65	0	0
	Δσ (10 ⁻¹⁹ cm ²)	négligeable	<u>4.08</u>	-1.32	négligeable	négligeable
	Interférence Théorique	0 %		-32.4 %	0 %	0 %
O ₃	λ _{on} = 282.4 nm	0	6.82	<u>31.77</u>	0	0
	λ _{off} = 286.3 nm	0	6.39	<u>21.65</u>	0	0
	Δσ (10 ⁻¹⁹ cm ²)	négligeable	0.43	<u>10.12</u>	négligeable	négligeable
	Interférence Théorique	0 %	4.2%		0 %	0 %
Toluène	λ _{on} = 266.90 nm	0	5.33	89.05	<u>12.85</u>	0.93
	λ _{off} = 266.10 nm	0	4.69	94.34	<u>1.87</u>	0.22
	Δσ (10 ⁻¹⁹ cm ²)	négligeable	0.64	-5.29	<u>10.98</u>	0.71
	Interférence Théorique	0 %	5.8%	-48.2%		6.5%
Benzène	λ _{on} = 259.10 nm	0	2.49	112.45	5.13	<u>14.06</u>
	λ _{off} = 257.90 nm	0	1.86	112.04	4.94	<u>0.37</u>
	Δσ (10 ⁻¹⁹ cm ²)	négligeable	0.63	0.41	0.19	<u>13.69</u>
	Interférence Théorique	0 %	4.6 %	3.0 %	1.4 %	

Réglages LIDAR en longueur d'onde du polluant souligné ainsi que les interférences qui vont en découler : interférence d'un polluant (en gras) sur le polluant mesuré (souligné)

NB : A titre d'exemple, l'ozone engendre une interférence de – 32.4% sur la mesure du SO₂. Ainsi, pour mesurer le SO₂, il est nécessaire d'effectuer une mesure préalable de l'ozone C₀(O₃).

	SO2	NO2	Ozone	Toluène	Benzène
Linéarité	$y = 0,987x - 0,45$	$y = 1,11x + 10,17$	$y = 1,069x + 3,53$	$y = 1,01x + 1,88$	$y = 0,954x + 2,95$
Limite de détection (ELIGHT)	8 µg/m3.km	20 µg/m3.km	2 µg/m3.km	10 µg/m3.km	10 µg/m3.km
Limite de quantification (INERIS)	entre 2,1 et 8,7 µg/m3.km	entre 11,9 et 15,5 µg/m3.km	entre 7,8 et 11,2 µg/m3.km	entre 3,4 et 5,5 µg/m3.km	entre 2,7 et 3,4 µg/m3.km
Portée (ELIGHT)	2200m	2500m	2100m	1700m	1600m
Portée (INERIS)	2500m	4000m	4000m	2000m	1500m

Principales caractéristiques mesurées (INERIS) et données constructeur (ELIGHT)

Nous avons par ailleurs étudié la dépendance en température du spectre d'absorption de l'Ozone qui a montré une légère influence de la température (entre - 30°C et 25°C) sur la concentration mesurée : ignorer la dépendance sur cette gamme de température entraîne une incertitude sur la mesure de la concentration inférieure à 6 %.

Enfin, des études théoriques des spectres d'absorption du Para Xylène et du Styène montrent la faisabilité de la mesure par LIDAR à l'émission ou bien encore dans la recherche d'émissions diffuses. En revanche, les limites de détection obtenues théoriquement ne semblent pas permettre une étude de ces polluants à l'air ambiant.

2.3.2 Le LIDAR comme instrument de validation de modèles physico-chimiques tridimensionnels : campagnes de Lyon 1999

Cette campagne fut coordonnée par le centre de recherche CRES de la société ELF (Jean Paul Boch) et ses principaux partenaires furent le Laboratoire de l'environnement de la Ville de Lyon (E. Frejafon), la société Exp'Air (O. Duclaux) et le LASIM (A. Thomasson). Bien que n'apparaissant pas dans cette étude, l'INERIS y fut néanmoins associé au travers du financement de la thèse d'Alexandre Thomasson liée à ce programme de recherche.

L'objectif principal de cette campagne était d'effectuer un paramétrage et une validation d'un modèle physico-chimique tridimensionnel, ce dernier devant ensuite être installé dans un réseau de surveillance de la qualité de l'air. Cette campagne nous a permis de mettre en évidence la nécessaire complémentarité qui devait exister entre un LIDAR et un réseau de capteurs ponctuels, afin d'accéder à une meilleure compréhension des phénomènes physico-chimiques à l'échelle urbaine et péri-urbaine, intervenant dans les processus de formation et destruction de l'ozone.

En effet, les mesures LIDAR ont permis d'obtenir des informations en altitude, et de caler certains paramètres importants pour la modélisation, comme la hauteur de couche limite, l'évolution de la stratification verticale des concentrations d'ozone ou encore les conditions aux limites aux bords supérieurs du domaine. Ceci, en renseignant et quantifiant les imports en altitude, a notamment mis en évidence l'importance d'une prise en compte des imports verticaux lors d'inclusions stratosphériques occasionnelles. Ce point est délicat à numériser car la mise en place de modèles non divergents impose la fermeture verticale

du domaine (vent nul au bord supérieur du domaine) ne permettant donc pas de prendre en compte directement les inclusions verticales de masses d'air (le modèle numérique UAM se fonde sur un ensemble compact, donc fermé et borné). D'autre part, les données d'entrée en limite supérieure du domaine sont celles fournies par le modèle européen CHIMERE qui se fonde sur l'utilisation de rétro-trajectoires jusqu'à une altitude de 3 000 m et ne peut donc pas prendre en compte les inclusions stratosphériques. Enfin, les données d'entrée en limite supérieure de domaine sont fixées mensuellement. Or la présence d'inclusions stratosphériques impose une modulation horaire des valeurs d'entrée en sommet de maillage.

Lors de cette campagne de mesure ainsi que lors de la campagne de Paris en 1999, les mesures LIDAR/DIAL ont été effectuées en milieu urbain, au-dessus d'une grande agglomération, et nous ont permis d'observer deux fois la même structure en couche : durant la nuit, en l'absence de rayonnement solaire, l'ozone est détruit par réaction avec le NO, depuis le sol jusqu'à une altitude de quelques centaines de mètres. Au-dessus, un réservoir d'ozone est observé, où les concentrations sont régulées par les mouvements verticaux ou horizontaux des masses d'air. Lorsque l'ensoleillement est suffisant et que la convection débute (entre 09h 00 et midi, heure locale), les deux couches se mélangent et les concentrations s'homogénéisent.

L'étude réalisée ainsi que la campagne effectuée à Paris en 1999 ont donc parfaitement mis en évidence la complémentarité qui devait exister entre des mesures LIDAR tridimensionnelles et des mesures ponctuelles, afin d'accéder à une meilleure compréhension des phénomènes de pollution atmosphérique.

Ces deux études ont également mis en évidence la nécessité de construire une base de données qui soit la plus large possible, associant des mesures de paramètres chimiques tout autant que météorologiques, afin d'effectuer une validation de modèles photochimiques, le phénomène de pollution par l'ozone, polluant secondaire, étant en effet très complexe. Ainsi, forts de ces deux expériences, nous avons ensuite participé à la campagne ESCOMPTE dont le principal objectif est la construction d'une base de données aussi large que possible, permettant de mieux comprendre et modéliser le phénomène de pollution par l'ozone.

2.3.3 Apport de la technique LIDAR dans la campagne ESCOMPTE

L'INERIS a participé à une grande campagne de mesures qui s'est déroulée à Fos-Marseille, du 5 juin au 13 juillet 2001 : la campagne ESCOMPTE (Expérience sur Site pour COntreindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Émissions).

L'expérience ESCOMPTE, unique en Europe, avait pour objectif l'établissement d'une base de données tridimensionnelle très détaillée des émissions de polluants primaires ainsi que la composition et la dynamique de l'atmosphère lors d'épisodes de pollution photochimique par l'ozone. Des moyens importants ont été mis en œuvre : une centaine d'équipes françaises et étrangères ainsi que des équipements lourds. Cette campagne est destinée, d'une part, à servir de référence pour la validation des modèles de pollutions urbaine et péri-urbaine et, d'autre part, à participer à l'évolution de ces modèles en prenant en compte des mécanismes qui intègrent photo-oxydants et particules et leur interaction. Pour ce faire, une documentation expérimentale ad hoc devait être construite, incluant non seulement les mesures des composés gazeux et des radicaux, mais aussi la mesure des caractéristiques physiques et la composition chimique des aérosols dans les phases organiques et inorganiques.

Cette campagne de mesures, où l'INERIS est intervenu tant sur le plan de la coordination (QCQA Ozone et NO_x, moyens de télédétection) que sur le plan de la mesure en gérant deux instruments LIDAR, nous a permis d'obtenir un retour d'expérience important sur la

stratégie d'implémentation de ces instruments dans les réseaux de surveillance de la qualité de l'air. En effet, nous avons pu, d'une part, confirmer ses caractéristiques métrologiques et, d'autre part, démontrer quelques exemples d'application, fournissant ainsi des réponses spécifiques aux demandes des réseaux :

- La mise en comparaison des différentes techniques de mesurage de l'ozone en altitude, nous a permis de démontrer leur cohérence, tant qualitative dans leur capacité à décrire la stratification atmosphérique, que quantitative avec une incertitude globale associée inférieure à 15 %. Une étude plus spécifique nous a également permis de montrer que cette incertitude, qui dépendait fortement de l'altitude et était corrélée avec le profil vertical d'humidité, pourrait être issue d'une dépendance des analyseurs embarqués vis-à-vis de l'humidité, notamment lors de fortes variations temporelles de cette dernière. Ces résultats, qui intéressent au plus haut point les réseaux, tendent à montrer que l'association de différentes techniques de mesurage de l'ozone est réalisable, en prenant soin d'y associer une incertitude globale de 15 %.
- Le couplage entre des données LIDAR et des analyseurs ponctuels a permis de montrer la faible contribution de la position de la ligne d'échantillonnage, sur le mesurage de l'ozone, notamment en zone rurale. En effet, la comparaison entre un échantillonnage effectué le long d'un bâtiment situé dans une forêt avec celui effectué sur une plate-forme dégagée, nous a permis de montrer que cet effet, inférieur à 10 ppb la nuit en absence de brassage, devient négligeable la journée. Il s'agit d'une information, qu'il serait important de confirmer sur d'autres sites et qui pourrait ensuite permettre d'orienter les réseaux de surveillance dans la rédaction de leur cahier des charges lié à l'installation de stations de mesures.
- Le couplage entre des instruments LIDAR, SODAR, RADAR et des analyseurs ponctuels nous a permis de décrire la dynamique associée à un épisode de pollution à l'ozone, en quantifiant la fraction d'ozone résiduelle par rapport à celle produite sur place et enfin à celle importée par des effets de transports en situation de brise de mer.
- Enfin, ce couplage nous a permis de calculer la vitesse de dépôt nocturne sur ce site, donnée essentielle au paramétrage des modèles déterministes qui souffrent d'une prise en compte insuffisante de la dynamique nocturne de l'ozone.

Par ailleurs, l'étude métrologique de mise en comparaison de différents instruments de mesure de l'ozone, a fait l'objet d'une étude plus spécifique, visant à évaluer l'influence de l'humidité sur la réponse des techniques ponctuelles de mesurage de l'ozone, comme décrit ci-dessous.

2.3.4 Étude métrologique spécifique sur le mesurage de l'ozone en altitude

Nous rappelons que l'objectif principal de la campagne ESCOMPTE fut la construction d'une base de données tridimensionnelle très détaillée des paramètres physiques et chimiques présents sur la zone de Marseille-Fos-Berre. La construction de cette base de données a reposé sur l'utilisation de nombreuses techniques de mesurage de ces différents paramètres. Ainsi par exemple le mesurage de l'ozone fut réalisé par des analyseurs au sol ou embarqués, par des sondes électrochimiques et enfin par des LIDAR. Un contrôle qualité de l'ensemble des paramètres intervenant dans la construction de la base de données fut donc réalisé. Cela a permis de mettre en évidence des écarts sur les valeurs d'ozone entre les sondes O₃ ECC, les analyseurs O₃ embarqués dans les avions et le lidar, aboutissant à une incertitude globale de 15 %, comme décrit précédemment. Par

ailleurs, la mise en comparaison de l'ensemble des moyens embarqués et des sondes ECC a permis de mettre en évidence des écarts fonction de l'altitude. Une étude particulière fut menée visant à en déterminer l'origine. Ainsi, pour comprendre ces différences et trouver leur origine, nous avons essayé de recréer des conditions de la campagne dans une enceinte climatique. Le but de cette étude était d'effectuer une simulation des variations atmosphériques que pouvait subir une sonde ECC lors d'un lâcher de ballon ou des analyseurs embarqués dans des avions ou bien encore installés dans des stations climatisées.

En effet, les sondes O₃ ECC instrumentant des ballons, traversaient les différentes couches atmosphériques du sol à 3 000 mètres d'altitude en une quinzaine de minutes. Les analyseurs embarqués dans les avions effectuaient également ce type de profils verticaux. Or les résultats sur des profils verticaux d'humidité relative, montrent des variations importantes sur ces 3 000 premiers mètres. Nous avons donc généré des concentrations connues d'ozone dans une enceinte climatique et fait varier l'humidité relative entre 10 et 80 % sur des périodes de 15 minutes.

Le montage était le suivant :

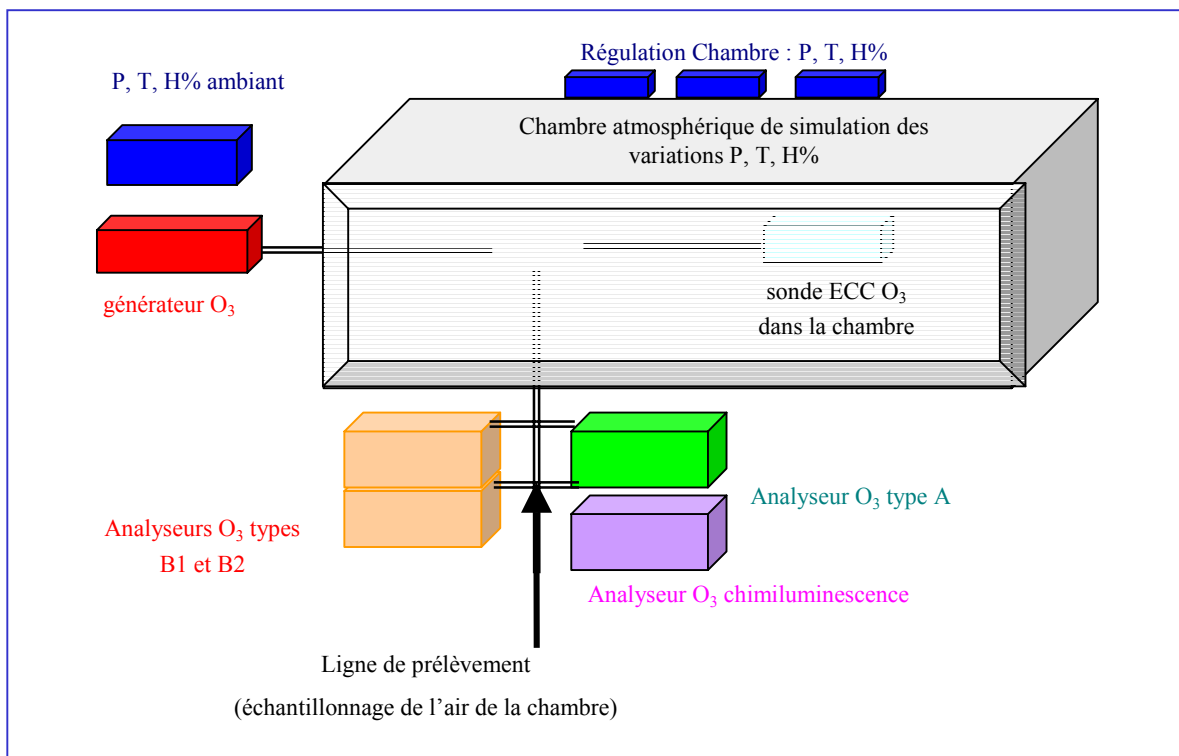


Figure 1 Schéma du test d'influence de l'humidité en chambre climatique

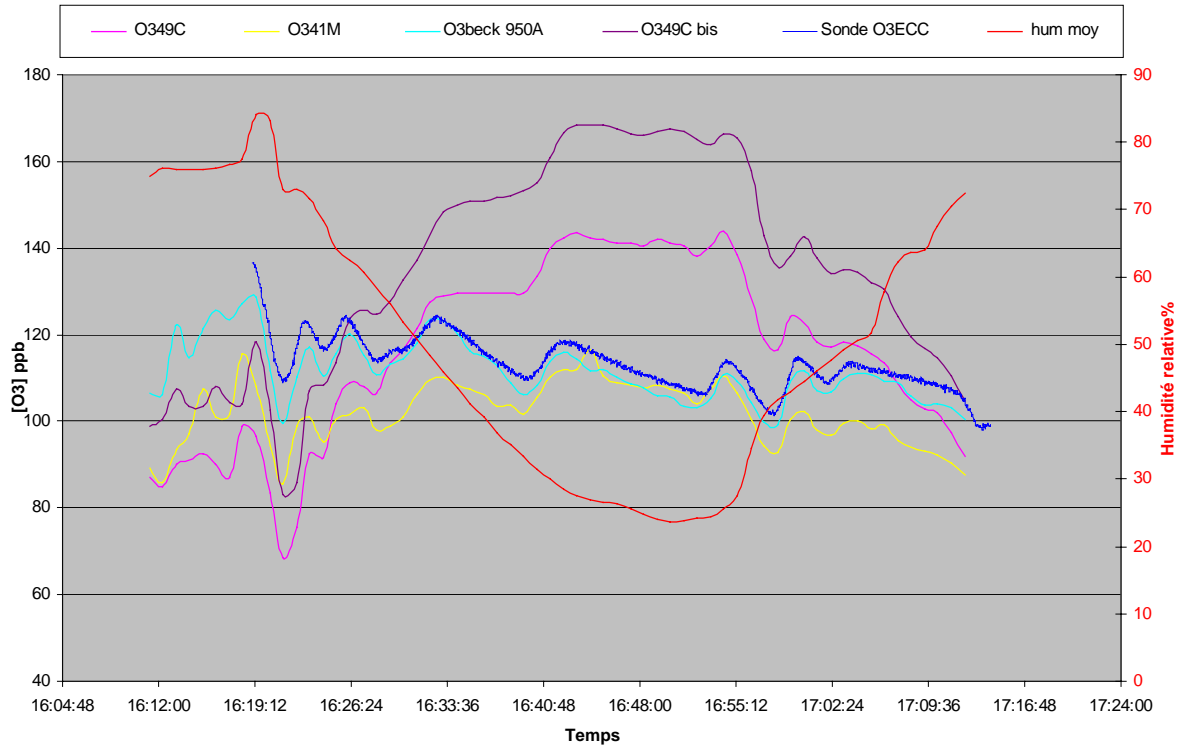


Figure 2 Variations analyseurs sondes et humidité - 12 juin 16 h - [O₃]=[100;120] ppb

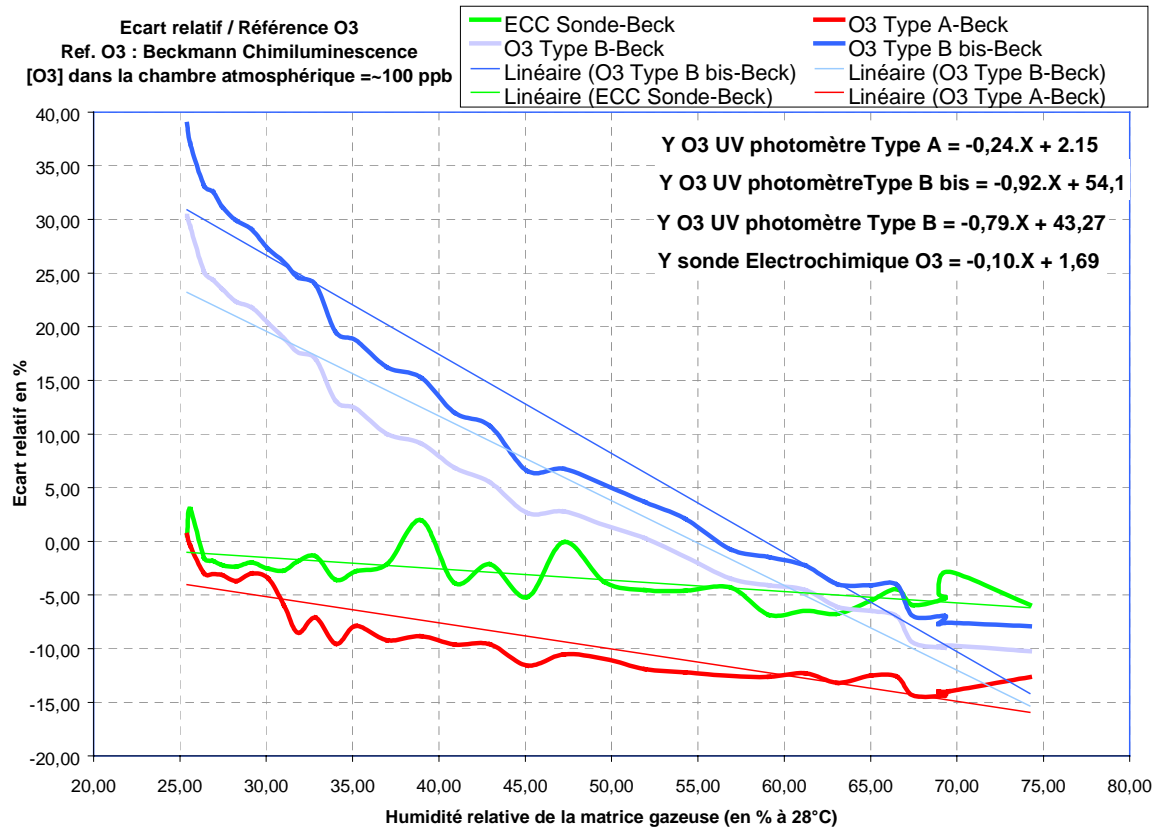


Figure 3 Courbe d'influence de l'humidité - 12 juin 16 h - [O₃]=[100;120] ppb

Les principaux résultats obtenus lors de ces tests, sont les suivants :

- Les sondes O₃ ECC, l'analyseur O₃ 41 M et le Beckman 950 A semblent avoir des comportements proches, quelle que soit la concentration d'ozone générée.
- Les 2 analyseurs 49 C TEI ont un comportement similaire face aux variations d'humidité, mais se distinguent nettement des précédents pour une humidité comprise entre 20 et 50 %. Dans ces conditions d'hygrométrie, les réponses en ozone sont beaucoup plus élevées. Cette différence est valable pour toutes les concentrations générées d'ozone (20, 50, 100, 120 ppb). Elle est d'autant plus frappante que sans génération d'ozone dans l'enceinte en fonctionnement, alors que les autres analyseurs détectent entre 5 et 15 ppb pendant l'essai, les analyseurs 49 C TEI détectent jusque 80 ppb. (13 juin 11h30)
- On peut en outre remarquer que l'écart entre les 49 C TEI et les autres analyseurs est d'autant plus important que la concentration en ozone est basse.

L'analyseur Beckman 950 A est, par son principe de détection par chimiluminescence, le moins sensible aux variations d'humidité. On a donc choisi de traiter l'écart entre les analyseurs et le Beckman comme méthode d'évaluation de l'influence de l'humidité sur la mesure. En traçant la courbe des écarts relatifs ($(X_{\text{mesurée}} - X_{\text{beckman}}) / X_{\text{beckman}} \times 100$) par rapport à la référence Beckman choisie, on remarque :

- Les 2 analyseurs 49 C TEI se distinguent très nettement pour une humidité inférieure à 60%. Mais ils se comportent de manière identique : la pente des droites est quasi la même.
- La sonde O₃ ECC et l'analyseur O₃ 41 M ont des écarts relativement constants vis à vis du Beckman 950A lors des variations d'humidité. La pente des droites est presque nulle ou très faible.

Dans le cas d'une absence de génération d'ozone, on trace la courbe des écarts absolus :

- on obtient la même variation linéaire pour les 2 analyseurs 49 C TEI caractérisée par un écart très important pour une humidité inférieure à 45%. Il s'affaiblit pour une humidité comprise entre 55 et 75%.
- Le O₃ 41 M varie avec une étendue de [-2 ; +5] mais reste néanmoins très proche de la référence Beckman.
- La sonde O₃ ECC surestime de manière constante à +6 ppb la concentration en O₃ vis à vis du Beckman 950 A. Cet offset pourrait s'expliquer par une dérive de la calibration initiale de la sonde.

Au terme de cette étude, il apparaît que :

- Le Beckman 950A, compte tenu de son principe, n'est pas influencé par l'humidité et peut être utilisé comme méthode de référence.
- Les analyseurs O₃ 41M et les sondes O₃ ECC ne sont pas ou faiblement influencés par la variation d'humidité, à température constante. L'influence de l'humidité est inférieure à 10 % pour les sondes ECC et inférieure à 20% pour l'analyseur O₃ 41M. Cette influence traduit l'erreur générée par l'humidité sur la concentration en ozone (50% d'humidité engendre +5 ppb d'O₃ sur la mesure des sondes ECC).

- Les mesures des analyseurs 49 C TEI restent cohérentes avec celles des analyseurs précédents pour une humidité relative supérieure à 60 %. En dessous de cette valeur, les écarts deviennent très importants et atteignent leur valeur maximale à humidité minimale (+ 40 à + 60 ppb par rapport à la sonde O₃ ECC au Beckman et à l'O₃ 41M pour une humidité égale à 25-30%, indépendamment la concentration d'ozone générée). Il semblerait donc que l'humidité interfère considérablement sur les mesures des analyseurs 49C TEI en créant un offset sur la mesure.

Nous avons transmis ces résultats aux constructeurs et plus particulièrement TEI (dont le représentant français est la société Mégatec) afin, d'une part, de vérifier si les tests effectués sont compatibles avec le principe de mesure de l'appareil et, d'autre part, de connaître leur avis sur cette influence. Certaines hypothèses pourraient être envisagées telle que l'influence d'effets transitoires sur la mesure ou bien encore l'absence d'un sécheur d'air en entrée des analyseurs TEI. En effet, la présence d'un sécheur d'air sur la ligne de prélèvement ou à l'entrée de l'analyseur garantit un taux d'humidité constant dans la chambre, mais également au niveau du filtre IO (Scrubber permettant, en détruisant l'ozone, de calculer l'absorption de référence). Or, il semblerait que toute variation d'humidité dans la chambre engendre un effet transitoire sur l'appareil qui se compenserait en plusieurs heures du fait du rôle tampon joué par le scrubber. Toutes ces hypothèses sont actuellement étudiées et devraient permettre de conclure prochainement sur la qualité des données embarquées dans des avions.

Des études furent menées par le constructeur en utilisant une ligne d'échantillonnage humide. Une influence de l'humidité fut constatée également, dans des proportions moindres et inverses de celles observées ici. Ces résultats divergents, mais qui ne correspondent pas aux mêmes tests, sont en cours d'étude dans le cadre d'un programme spécifique : programme de recherche PNCA (Programme National de Chimie Atmosphérique) financé par l'INSU.

3. LIDAR AEROSOLS

3.1 OBJECTIFS GENERAUX

Ce programme vise à développer une application du LIDAR de l'INERIS pour la détection quantitative d'aérosols, afin d'obtenir une caractérisation quantitative tridimensionnelle (concentration et distribution de taille) des émissions diffuses d'aérosols en site industriel. Cet outil, essentiel à la surveillance de sites industriels ainsi qu'à l'évaluation de leurs impacts sur la qualité de l'air, permettra dans le cadre d'études complémentaires d'intervenir comme instrument de paramétrage et comme support de validation de modèle d'évaluation des émissions diffuses d'aérosols, qui soit à même de quantifier et de localiser les émissions ainsi que d'en évaluer la dispersion et les retombées.

Cette première application qui sera faite sur site industriel constitue une étape indispensable à une application ultérieure en milieu urbain. En effet, la diversité des caractéristiques physico-chimiques ainsi que leurs variabilités spatiales imposent une connaissance précise des particules impliquées et des processus de diffusion de la lumière correspondants.

3.2 DESCRIPTION SUCCINCTE DU PROGRAMME DE RECHERCHE ENVISAGE

La caractérisation de la pollution atmosphérique tend à devenir une préoccupation majeure. Si la pollution par les gaz est de mieux en mieux mesurée, les aérosols restent difficiles à quantifier de manière précise car les paramètres les caractérisant sont beaucoup plus nombreux que dans le cas des polluants gazeux. En effet, outre l'évolution temporelle de la concentration, il faut également connaître la distribution de taille et la nature des particules présentes en chaque point de mesure. Ces informations sont indispensables afin de prévoir l'effet des aérosols sur la physico-chimie atmosphérique ainsi que sur la santé. Les mesures routinières actuelles se contentent de déterminer la masse de particules en suspension dans un volume d'air unitaire, donc indépendamment de leur taille et de leur composition. Il est donc nécessaire de développer des techniques d'analyses des particules, permettant d'accéder à de nouvelles sources d'information. Dans ce but les méthodes optiques, en particulier celles qui sont basées sur les phénomènes de diffusion permettent de couvrir en partie ce besoin (plusieurs appareils commerciaux), bien qu'elles utilisent des hypothèses a priori qui ne tiennent pas compte de la forme et qui imposent de connaître la composition de la particule (indice de réfraction).

Parmi les techniques optiques, le LIDAR tient une place privilégiée, puisqu'il autorise une mesure à distance des concentrations de polluants en 3D. Cependant, la très grande majorité des LIDAR actuels ne fournissent qu'une évaluation qualitative des aérosols, indépendamment de leur taille, composition chimique, masse et enfin de leur nombre. Or, pour prendre en compte les aérosols dans des outils de modélisation de la qualité de l'air, il est fondamental de pouvoir accéder à une caractérisation tridimensionnelle complète. Un développement doit donc être engagé, pour obtenir des réponses LIDAR quantitatives. Ceci nécessite la mise en place d'études particulières sur la diffusion de la lumière par des particules, dépendant de leur taille, forme et composition chimique, puis leur extrapolation à la mise en place d'algorithmes validés permettant d'accéder à une mesure quantitative des aérosols par technique LIDAR.

Pour cela, nous proposons d'effectuer des études particulières sur la caractérisation optique des aérosols, c'est à dire mettre en place, optimiser et valider des algorithmes de diffusion de la lumière par une particule. Cette étape est indispensable à la mise en place d'algorithmes spécifiques appliqués à la caractérisation quantitative tridimensionnelle par LIDAR des émissions diffuses d'aérosols en sites industriels. Cette étude constituerait donc un premier pas vers la mise en place d'un projet spécifique basé sur la validation par LIDAR d'un modèle de caractérisation des émissions diffuses d'aérosols, qui soit à même de quantifier et de localiser les émissions ainsi que d'en évaluer la dispersion et les retombées, outil essentiel à la surveillance de sites industriels ainsi qu'à l'évaluation de leurs impacts sur la qualité de l'air.

Les études particulières réalisées sur la diffusion de la lumière par des aérosols, permettraient de constituer une première étape vers une caractérisation tridimensionnelle complète des aérosols urbains. En effet, la diversité des caractéristiques physico-chimiques de ces derniers ainsi que leurs variabilités spatiales imposent une connaissance très précise des processus de diffusion optique qui les gouvernent.

Enfin, en fournissant des cartographies tridimensionnelles de concentration en aérosols, on pourrait accéder à une meilleure compréhension de l'influence des aérosols sur la physico-chimie atmosphérique, qui est par exemple une donnée entrant dans la compréhension et la modélisation des épisodes de pollution à l'ozone. Ainsi, une première mise en application des algorithmes du LIDAR aérosols serait faite, en retraitant spécifiquement les données LIDAR obtenues dans l'UV et l'IR sur le site du Vallon Dol lors de la campagne ESCOMPTE.

3.3 PRINCIPAUX RESULTATS DEJA OBTENUS

Ce programme de recherche implique, d'une part, un développement technologique sur la partie laser, afin d'effectuer une mesure des grosses particules, dans le domaine infrarouge et, d'autre part, des études théoriques sur la diffusion de la lumière par une particule et sa modélisation, dans le but de concevoir un outil informatique d'obtention de la distribution de taille et de la concentration en aérosols à partir des signaux lidar bruts.

Des résultats ont déjà été obtenus, tant sur le développement technologique, que sur la mise en place des outils informatiques de traitement des signaux lidar.

3.3.1 Obtention d'une source laser infrarouge

Un travail d'intégration d'une source laser IR dans un lidar UV a été entrepris. Il a permis d'obtenir un laser émettant à $3.37 \mu\text{m}$, basé sur un OPO pompé par un laser de type

solide Nd-YAG (Fig.3). De plus, l'intégration d'un étage d'amplification (OPA) a permis d'obtenir une puissance laser émise suffisante pour des applications environnementales : effectuer une mesure sur une distance de 3 à 4 kilomètres nécessite une puissance laser d'une dizaine de mJ.

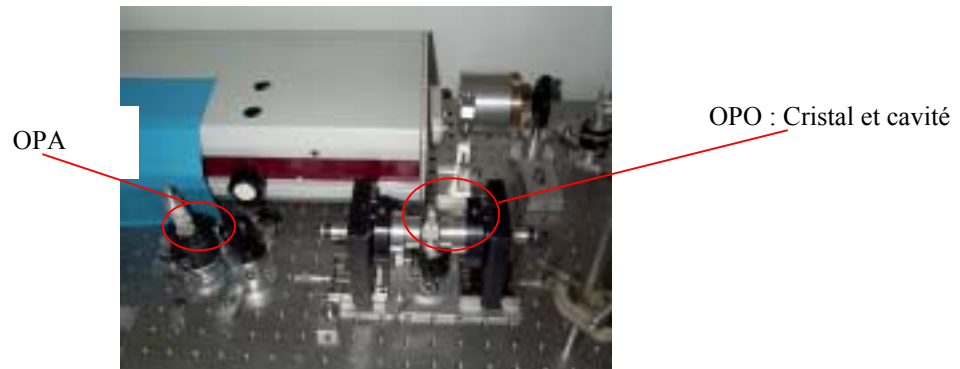


Figure 3 : Photo de l'OPO et de l'OPA

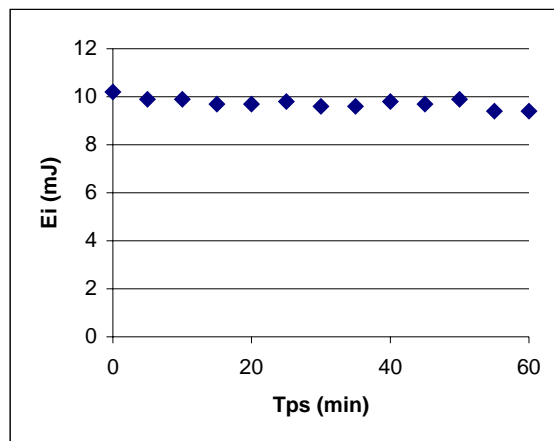


Figure 4 : Stabilité temporelle de l'énergie du laser à 3.37 µm

Les caractéristiques laser obtenues sont les suivantes :

- L'énergie maximale est de 17 mJ (corrigée de la transmission des miroirs et du filtre). Elle a été obtenue avec un seul cristal de KTA pour l'amplification et avec E_{pompe} de l'OPO = 125 mJ et E_{pompe} de l'OPA = 176 mJ. Cette énergie, suffisante pour nos applications, pourrait par ailleurs être augmentée, par le rajout d'un second cristal non linéaire. De même cette énergie fut obtenue avec une stabilité meilleure que 8 % sur une période de 1 heure (Fig. 4).
- La divergence latérale est de 4 mrad et de 5 mrad pour la divergence en hauteur. Ce résultat est important pour des applications lidar car la portée de l'instrument sera d'autant plus grande que la divergence sera faible. Ce résultat imposera donc le rajout d'un télescope afin de corriger cette divergence et ainsi concevoir un lidar IR.
- La longueur d'onde du signal est comprise entre 1 550 et 1 562 nm et la longueur d'onde de la complémentaire est comprise entre 3 337 et 3 393 nm. Ainsi, nous avons obtenu deux gammes infrarouges dont une gamme autour de 3 µm, spécifiquement adaptée à la caractérisation des grosses particules, puis à terme à la caractérisation des COV

Les premiers résultats obtenus sur la partie laser, ont donc permis de démontrer la faisabilité d'obtention d'un lidar infrarouge, appliqué au mesurage des grosses particules (micrométriques), mais également la possibilité de développer la surveillance des COV sur cette gamme de longueur d'onde.

Les applications au domaine environnemental devraient donc être envisageables, dans la mesure où la difficulté principale réside dans l'obtention d'un laser infrarouge stable et accordable sur la gamme 3 à 3,5 μm .

3.3.2 Algorithme de traitement des signaux lidar

Un développement théorique est en cours, visant à obtenir la distribution de taille des aérosols. Pour cela un traitement multi-non-linéaire est envisagé sur une combinaison de signaux lidar répartis entre l'UV et l'IR. Sans entrer dans l'aspect théorique, il s'agit principalement d'obtenir un ajustement de la distribution de taille en utilisant, non pas des paramètres mathématiques (méthode de Klett, Monte-Carlo), mais des paramètres physiques connus, ce qui permettrait d'optimiser le choix du paramètre et donc de réduire l'erreur associée. Ainsi, on pourrait obtenir une information pertinente sur la spatialisation de la granulométrie à partir, d'une part, de signaux lidar (4 à 8 longueurs d'ondes seraient nécessaires) et, d'autre part, de caractéristiques des particules telles que leur indice de réfraction et leur forme géométrique. Ces deux derniers paramètres seraient obtenus par ailleurs, par microscopie électronique à balayage et micro analyse à rayons X des aérosols impactés.

Bien qu'en cours de réalisation, ce développement théorique effectué en plusieurs étapes successives doit être testé très prochainement sur les données ESCOMPTE.

3.3.3 Implémentation du traitement des signaux lidar

Afin de tester la faisabilité de réalisation d'un lidar aérosols, il était nécessaire, dans une première étape, de vérifier la faisabilité d'une mise en complémentarité d'outils laser, d'outils d'acquisition de signaux et enfin d'outils de traitement et de visualisation. Pour ce faire, une campagne de mesure lidar fut réalisée. Ainsi, des mesures Lidar UV ont été réalisées à LYON le week-end du 11 et 12 janvier 2002, lors d'un épisode de pollution aux poussières (indice de 9 sur l'échelle ATMO).

Le but de cette expérience était en premier lieu d'optimiser la mise en jeux des différents points clefs d'un Lidar : les instruments de mesures (photomultiplicateur, acquisition du signal), l'alignement du faisceau, les différents paramètres (angle par rapport à l'horizontale, nombre de coup), le traitement (mise en place de l'algorithme d'inversion Earlinet) et la présentation des résultats. Les signaux typiquement recueillis sont présentés sur la figure 5. La distribution spatio-temporelle du rapport R de diffusion des aérosols,

$R = (\beta_{Mie} + \beta_{Rayleigh}) / \beta_{Rayleigh}$, est présentée sur la figure 6.

Sans entrer dans l'approche théorique, on retiendra que des rapports R dépassant des valeurs de 30 montrent effectivement une charge énorme en aérosols. A titre de comparaison, $R=1,3$ est le rapport de diffusion pour les aérosols de fond en basse troposphère. Ces premières expériences ont permis d'acquérir les bases expérimentales de la télédétection laser et de mettre en place toute l'infrastructure informatique et de traitement des signaux Lidar permettant d'obtenir une information sur la charge en aérosol ainsi que sur leur spatialisation.

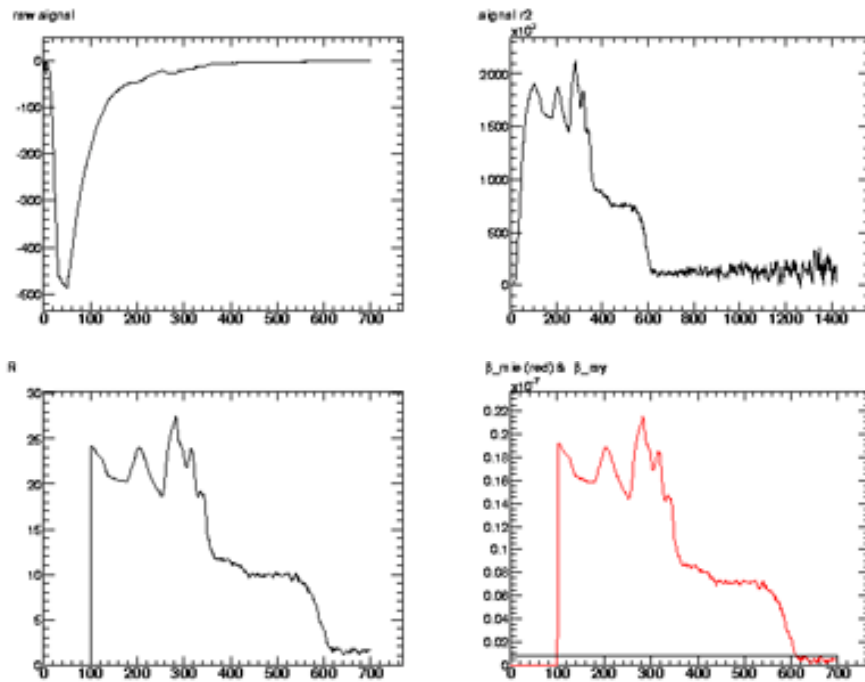


Figure 5 : Signaux lidar obtenus la journée du 11 janvier 2002, en situation d'épisode de pollution aux poussières. On observe très nettement une couche limite située entre 150 et 350 m

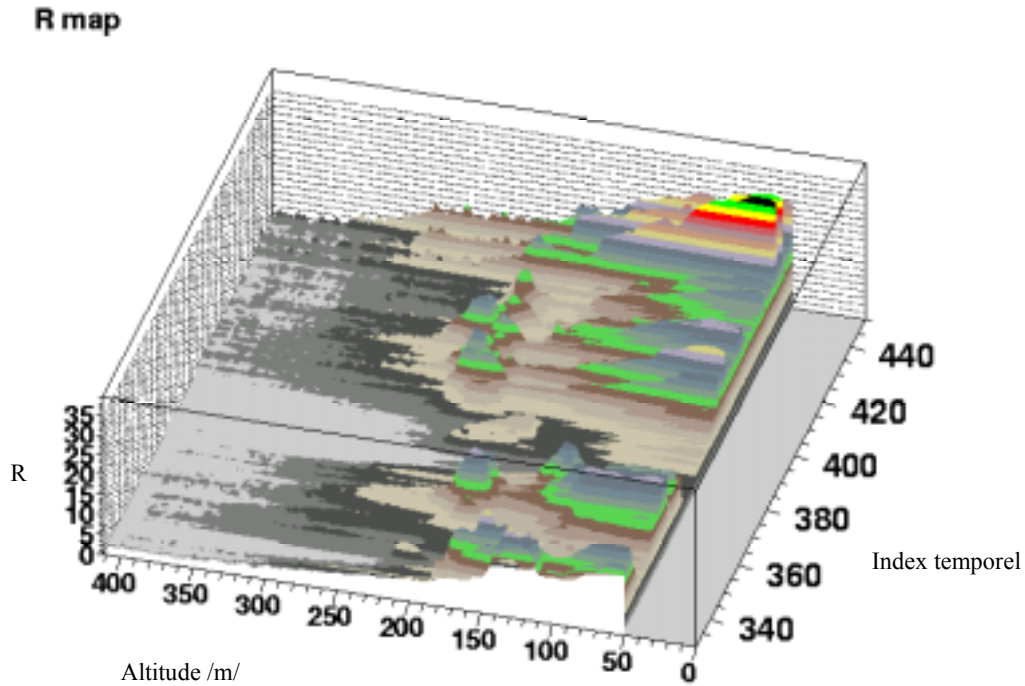


Figure 6 : Carte 3D traduisant la charge en aérosols (rapport R) le samedi 12 janvier 2002 au matin

A partir de cette information sur la charge en aérosols et en utilisant des paramètres physiques obtenus lors d'une précédente campagne sur Lyon¹, la distribution spatiale du nombre de particules fut obtenue. En utilisant une distribution de taille ad hoc, la spatialisation de la concentration en aérosols fut donc calculée.

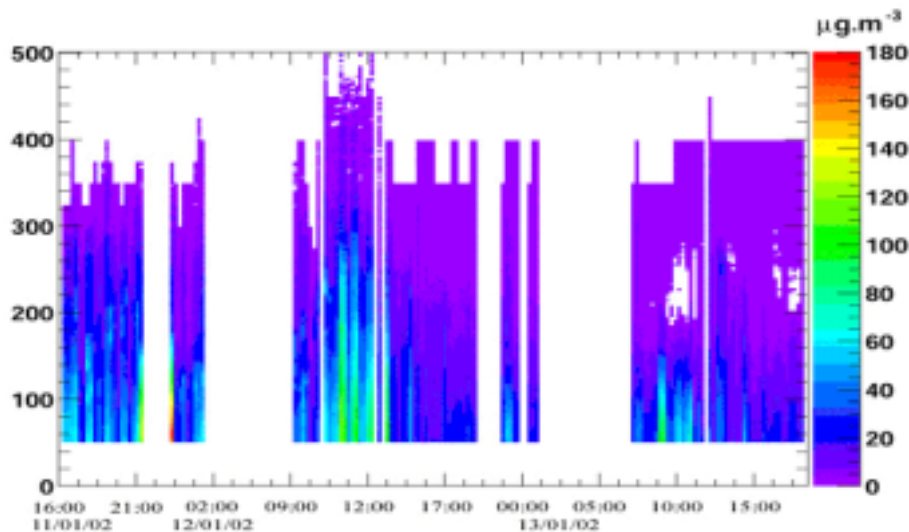


Figure 7 : profil vertical de concentration en aérosols au-dessus du site du lidar. On observe très nettement une concentration importante à l'intérieur de la couche limite urbaine

¹ O. Duclaux et al, "3D-air quality model evaluation using the Lidar technique." *Atm. Env.* 36: 5081-5095

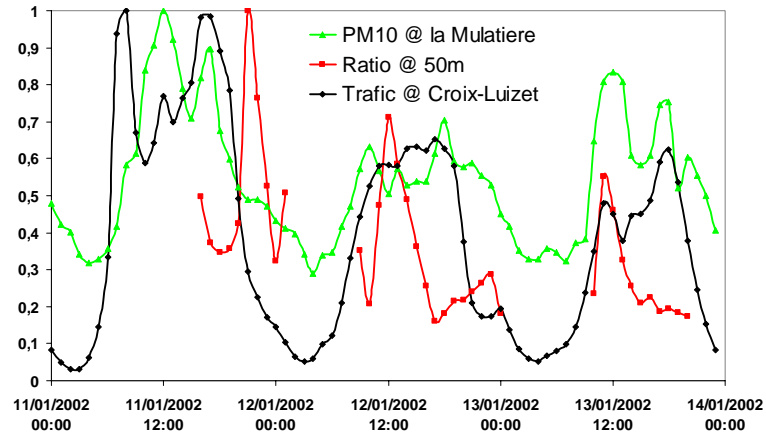


Figure 8 : Comparaison entre le rapport R de charge en aérosols, la concentration en PM10 sur le site de la Mulatière et le trafic à proximité du lidar (comptage normalisé sur le site de Croix Luizet).

A partir de ces informations et, connaissant, d'une part, la hauteur de la couche limite et, d'autre part, la surface de Lyon, nous avons alors obtenu la charge globale en aérosols présente sur Lyon lors de ce week end de pollution aux poussières. La figure ci-dessous montre l'évolution de la charge totale, exprimée en tonne.

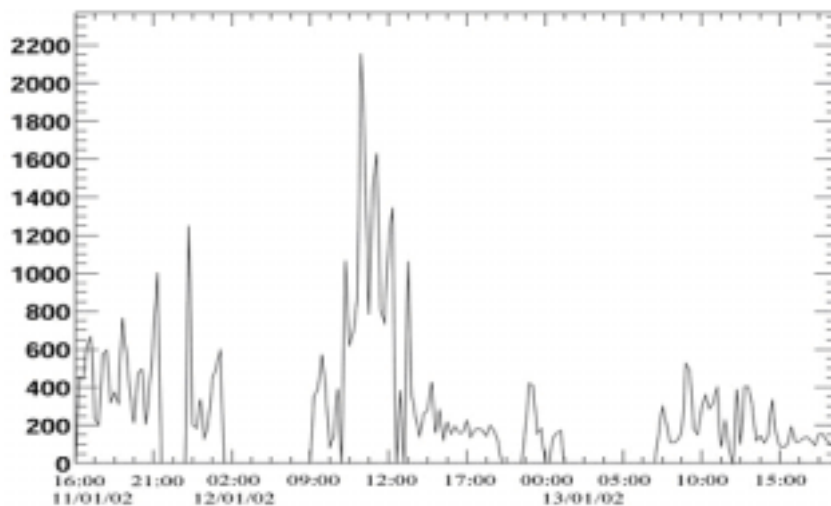


Figure 9 : évolution de la charge totale en aérosols au-dessus de la ville de Lyon

Afin de comprendre l'origine de cette importante charge en aérosols le 12 janvier à 11h, le modèle dynamique ADMS-3 fut utilisé. Développé afin de simuler la dispersion d'une source, donc essentiellement sur la génération de post-trajectoires, il fut modifié afin de construire des rétro-trajectoires sur un point de l'espace. Nous avons donc choisi un point situé à 50 m au-dessus du site du lidar, correspondant à l'altitude de la première donnée lidar. La figure suivante montre les rétro-trajectoires et les post-trajectoires respectivement aboutissant et partant de ce point situé à 50 m au-dessus du lidar, le 12 janvier à 11h.

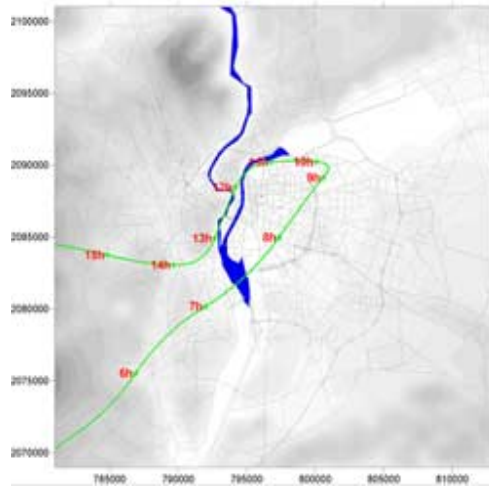


Figure 10 : Rétro-trajectoires et post-trajectoires à 50m d'altitude, arrivant sur le site du lidar le 12/01 à 11h

La figure ci-dessus permet de remonter à l'historique de la masse d'air mesurée par le lidar le 12 janvier à 11h mais également, d'en visualiser le devenir. Ainsi on peut en déduire que la masse d'air mesurée par le lidar possède l'historique suivant :

- 7h-8h : masse d'air située sur la zone industrielle de Lyon.
- 9h : la masse d'air passe une première fois au-dessus de l'autoroute
- 10h : second passage de cette masse d'air au-dessus du périphérique lyonnais.
- 11h : passage au-dessus du point de mesure lidar
- 12h-13h : la topographie lyonnaise impose un basculement de la masse d'air qui passe au-dessus du centre historique de Lyon avant de s'orienter à l'ouest.

On constate donc que cette masse d'air, qui se trouve au-dessus du point de mesure lidar à 11h et qui se caractérise par une concentration très élevée en particules, est resté de 7h à 11h de matin sur des zones d'émissions, que ce soit industrielles ou de trafic.

Finalement, cette première mise en application d'outils lidar orientés sur la mesure des aérosols, nous a permis de démontrer que la complémentarité entre des données lidar, des données issues du réseau de surveillance et enfin des sorties de modèles dynamiques a permis, d'une part, de quantifier précisément un épisode de pollution aux poussières et, d'autre part, d'en comprendre son origine.

4. LIDAR UV/IR MULTI-POLLUANTS

4.1 OBJECTIFS GENERAUX

Ce projet, qui doit s'étaler sur une période de 4 ans et donner lieu à deux programmes de recherche consécutifs, devrait nous permettre de développer une application du LIDAR de l'INERIS pour la détection quantitative multipolluants et particules à faible limite de détection, incluant les COV ayant un spectre d'absorption sur la gamme infrarouge, afin d'obtenir une caractérisation quantitative tridimensionnelle des émissions diffuses gaz/particules en site industriel. Cet outil, essentiel à la surveillance de sites industriels ainsi qu'à l'évaluation de leurs impacts sur la qualité de l'air, permettra également d'intervenir comme instrument de paramétrage et comme support de validation de modèle d'évaluation des émissions diffuses gaz / particules, qui soit à même de quantifier et de localiser les émissions ainsi que d'en évaluer la dispersion et les retombées. Pour ce faire, un développement LIDAR doit être entrepris afin, d'en améliorer les limites de détection, mais également d'en étendre son domaine d'application à certains polluants industriels par des études spécifiques de faisabilité, et enfin de le mettre en application par une campagne de terrain. Le développement de cet outil, réalisé dans ce programme de recherche, nous permettra ensuite d'obtenir un support de paramétrage et de validation de modèles d'émissions diffuses gaz/particules dans le cadre d'un second programme (AP 2004).

Pour développer cet outil LIDAR, nous utiliserons les acquis obtenus sur le BCRD Lidar aérosol en cours (AP 2002), et nous étendrons ses capacités tant au niveau de son rendu opérationnel pour la caractérisation des particules, que sur sa précision ou sur les polluants mesurés. Cela permettra d'obtenir un outil adapté au suivi des polluants nécessitant une très bonne résolution spatiale et notamment sur la spatialisation des émissions diffuses en site urbain ou industriel. De plus, une extension des capacités du LIDAR actuel à la caractérisation des COV, permettra d'obtenir un outil opérationnel très adapté à la surveillance des sites industriels et des zones de stockage.

Par ailleurs, les modèles numériques présentent un intérêt majeur pour la qualification des émissions diffuses. En effet par nature, celles-ci sont difficiles à décrire et à mesurer, tant du point de vue géométrique (forme, dimensions) que du point de vue quantitatif (flux de polluants effectivement émis). Ainsi, le développement de modèles inverses, qui permettraient de qualifier une ou plusieurs sources de polluant en connaissant assez précisément les concentrations atmosphériques dans l'environnement est une alternative pertinente. Le couplage de la mesure (dans le cadre du projet, les tirs LIDAR) avec la simulation devient alors incontournable. Le programme de modélisation qui sera proposé dans l'AP2004 aura donc un double objectif : d'une part grâce à des techniques proches de la modélisation inverse, exploiter les mesures LIDAR gaz/aérosols effectuées sur des sites industriels pour proposer une description modélisée des sources de polluants et, d'autre part, exploiter ces travaux afin de développer un modèle d'émission des sources diffuses, adapté aux sites industriels et zones de stockage de COV. Afin de vérifier la pertinence de ces développements, des modèles de dispersion mis en œuvre pour le calcul des concentrations atmosphériques seront utilisés dans la phase applicative du projet.

Enfin, à moyen terme, un tel programme, qui nous permettra d'obtenir une caractérisation fine des émissions diffuses gaz/particules, est une étape indispensable à la caractérisation et la modélisation de la qualité de l'air à l'échelle de la rue. En effet, évaluer l'influence d'une rue ou d'un feu sur la qualité de l'air à l'échelle de la rue ou du quartier, nécessite la mise en place d'un instrument possédant une résolution spatiale adaptée des limites de détection en correspondances avec les taux attendus.

Ainsi, les modèles d'émissions diffuses gaz/particules, développés, paramétrés et validés sur site industriel par LIDAR dans le cadre de la seconde partie de ce programme de recherche, pourront ensuite être utilisés comme fondements d'une étude et d'une modélisation à petite échelle et notamment au niveau de la rue ou du quartier.

4.2 DESCRIPTION SUCCINCTE DU PROGRAMME DE RECHERCHE ENVISAGE

Il a été largement démontré l'importance des techniques optiques et plus particulièrement de la technique LIDAR dans la surveillance de la qualité de l'air et sa compréhension. Néanmoins, si la pollution par certains gaz tel que l'ozone peut être quantifiée très précisément compte tenu des concentrations mesurées très supérieures à la limite de détection, d'autres gaz tels que le benzène ou le NO₂ ne peuvent être suivis que très difficilement à l'air ambiant en raison de leur limites de détections élevées. En outre, la caractérisation des émissions diffuses requiert une extension des capacités du LIDAR à la mesure de certains polluants spécifiques et notamment des COV. Enfin, cette caractérisation doit permettre de paramétrer et valider des modèles qui soient ensuite à même de localiser précisément les sources d'émissions diffuses ainsi que leur devenir.

Ainsi, l'objectif de ce programme de recherche est d'accéder à un outil intégré de quantification et de modélisation des émissions diffuses. Il sera composé de deux modules complémentaires :

- Un LIDAR angulaire à faible limite de détection, permettant la surveillance de nombreux polluants gazeux spécifiques des émissions industrielles incluant les COV, associés à de faibles limites de détection. Ce LIDAR permettra également une évaluation qualitative des émissions diffuses de particules (outil développé dans le cadre d'un programme de recherche en cours). Le développement de cet outil s'effectuera dans ce programme de recherche.
- Un outil de modélisation des émissions diffuses paramétré et validé au moyen du LIDAR gaz/particule ci-dessus. Cette seconde phase, qui comprend l'utilisation de modèles d'émissions diffuses et leur paramétrage et validation par LIDAR, sera proposée en 2004. En effet, au vu du retour d'expérience obtenu après la première année de réalisation de l'AP 2003 (développement du LIDAR), nous serons à même d'évaluer la faisabilité d'un paramétrage et d'une validation de modèles d'émissions diffuses par technique LIDAR.

Ainsi, ce programme de recherche se réalisera en deux étapes successives et nous permettra d'obtenir un outil intégré et validé de surveillance des sites industriels et de modélisation de leurs émissions diffuses. Un tel outil intégré nous permettra ensuite de concevoir un programme de recherche visant à quantifier et modéliser de manière fine la qualité de l'air à l'échelle de la rue. En effet, effectuer une caractérisation tridimensionnelle précise à l'échelle de la rue, requiert un outil permettant de quantifier de nombreux polluants en simultané et possédant une résolution spatiale adaptée à cette échelle mais également, des modèles spécifiques se fondant sur la spatialisation d'émissions diffuses.

Enfin, développer le LIDAR à la mesure des COVs, permettrait d'étendre ses applications et notamment sur la surveillance des sites industriels et des zones de stockage ou bien encore en zones urbaines.

4.3 PRINCIPAUX RESULTATS ATTENDUS

Ceci permettrait de faire tout d'abord du LIDAR un outil de surveillance des sites industriels, de caractérisation de leur influence en terme de qualité de l'air et enfin un outil de validation de nouvelles techniques de modélisation. En effet, la localisation précise d'une émission diffuse gazeuse pourrait ensuite être obtenue en utilisant des techniques de modélisation inverse, nécessitant une base de données tridimensionnelles précises comme support à la mise au point puis ensuite comme instrument de validation.

Sur le plan scientifique, notre projet devrait permettre d'étendre la technique LIDAR à la caractérisation simultanée de polluants gazeux et particulaires, dans le cas particulier d'émissions diffuses, permettant ainsi d'obtenir le tout premier LIDAR multipolluants gaz/particules incluant les COV.

Les résultats obtenus seront publiés dans des revues scientifiques internationales et seront également présentés lors de conférences spécifiques internationales.

Les résultats de ce travail pourraient permettre d'engager ensuite une étude spécifique sur la caractérisation de la qualité de l'air à l'échelle de la rue ou du quartier, donnée essentielle à l'évaluation de l'impact d'un plan de déplacement urbain ou bien encore plus largement à la modélisation déterministe tridimensionnelle à l'échelle du quartier ou de la rue, support de construction de scénarios alternatifs.

5. SYNTHÈSE DES APPLICATIONS LIDAR DANS LE CADRE DES PROGRAMMES EUROPEENS LIES AU 6^{ÈME} PCRD

5.1 UN ROLE D'EXPERT AUPRES DE LA COMMISSION EUROPEENNE

Il nous a été demandé d'être expert auprès de la commission européenne, en charge de l'évaluation de certains projets proposés dans le cadre du 6^{ème} PCRD. Le domaine de compétence sera principalement la caractérisation 3D de la physico-chimie de l'atmosphère et notamment sur l'utilisation de la technique LIDAR.

Cette place, qui nous permet de jouer un rôle au tout premier rang tant dans la communauté scientifique qu'auprès des décideurs européens, nous permettra de bénéficier d'un retour d'expérience et d'une veille scientifique importante sur les domaines utilisant la technologie LIDAR comme instrument de mesure ou outils de validation.

5.2 SYNTHÈSE DES PROJETS EUROPÉENS UTILISANT LA TECHNIQUE LIDAR, AUXQUELS DEVRAIT PARTICIPER L'INERIS

L'INERIS a choisi de s'impliquer dans plusieurs projets européens s'appuyant sur la technique LIDAR, sans pour autant pouvoir garantir dès aujourd'hui de leur chance de succès. Ainsi, nous avons répondu aux projets décrits brièvement ci-dessous.

5.2.1 AVATAIR

AVATAIR (Assessment of Uncertainties and Verification of Emissions to Air to Improve Air Pollution Modelling and Air Quality Assessment) est un projet intégré (IP) visant à développer et à mettre en place de nouveaux outils permettant d'améliorer la qualité et la précision des données de qualité de l'air, qu'elles soient à l'émission ou bien encore à l'immission. Pour ce faire, des développements seront effectués, d'une part, en métrologie et plus globalement dans la fourniture d'instruments de mesures (au sol, en altitude, depuis des satellites), d'autre part, sur des approches théorique et statistique et enfin, par des outils de modélisation. Bien qu'ayant pour objectif une meilleure caractérisation des gaz à effet de serre ayant un effet direct sur le climat, il repose néanmoins largement sur la détermination précise des facteurs d'émission. L'implication du LIDAR sera donc très forte en tant qu'instrument de détermination des facteurs d'émission et de leur spatialisation.

5.2.2 GMES/CREATE

GMES/ CREATE (Construction, Use, and Delivery of an European Aerosol Database) est un projet intégré visant à construire une base de données 3D des aérosols qui servira de support de paramétrage et d'instrument de validation des données issues des satellites. De ce fait, il s'agit donc d'une des actions du programme GMES. Les données LIDAR, associées à d'autres outils tels que Sun-photometer, aétalomètre, analyseur au sol, devraient permettre d'obtenir précisément une information 3D quantitative sur les aérosols. Ainsi, le LIDAR sera un élément essentiel de ce programme européen.

Ce projet, auquel l'INERIS a émis le souhait d'y participer, devrait permettre d'obtenir une action concertée dans la mise en place d'un lidar aérosol.

Par ailleurs, d'autres équipes de l'INERIS et notamment Bertrand Bessagnet et Laurence Rouil pourraient également y participer en utilisant cette base de données comme moyen de paramétrage de modèles d'aérosols à l'échelle continentale.

5.2.3 NEOAMT

NEOAMT (Network of Excellence in Optical Analytical Measurement Technology) est un réseau d'excellence visant à structurer les développements engagés dans les techniques optiques de mesure. Ses domaines d'actions sont nombreux sur le plan environnemental, tant sur la mesure à l'air ambiant ou à l'émission par le développement de nouveaux instruments de mesure que sur la surveillance de la santé publique par le développement de nouveaux instruments médicaux. Le rôle de ce réseau d'excellence est de diffuser l'information, d'effectuer des formations sur les techniques optiques, de développer de nouveaux instruments, mais aussi d'en faciliter ensuite le transfert technologique. L'INERIS interviendra principalement sur la diffusion de l'information, la formation et enfin le développement de nouveaux outils utilisant la technique optique et donc, de ce fait, le LIDAR.

5.2.4 LASERRDAP

LASERRDAP est un projet intégré visant à développer un LIDAR ayant des applications sur site industriel. Ce projet, qui a une portée limitée dans un cadre européen, d'une part, et dans les actions du 6^{ème} PCRD d'autre part, correspond néanmoins très étroitement au programme de recherche que nous sommes en train de débiter à l'INERIS. Nous avons donc décidé de nous associer à ce projet, tout en souhaitant qu'il soit rattaché au projet NEOAMT cité précédemment.

5.2.5 RADMED

RADMED (RADiative Forcing by Aerosols, Clouds, Water Vapour, Ozone and Minor Gases in the MEDiterranean Area) est un réseau d'excellence visant à réunir les différents outils permettant de construire une base de données 4D gaz, particules et vapeur d'eau. L'utilisation de données LIDAR, satellite, avion, ballons constituerait la base de ce projet. Sa vocation est donc principalement d'effectuer une mise en commun de moyens visant à documenter les phénomènes radiatifs, les comprendre et évaluer leur impact multi-échelle, mais également de pouvoir ensuite les modéliser et l'appliquer à des modèles de transport régional. Enfin, ce réseau d'excellence pourrait fournir un support de validation des données satellites comme cela est décrit dans le programme CREATE.

5.2.6 AIROS

AIROS (Atmospheric Integrated Regional Observing System) est un projet intégré visant à construire un réseau européen de mesure 4D gaz et aérosols, qui reposerait sur l'utilisation rationnelle des données des réseaux existants (EMEP, GAW, EARLINET, PHOTON), sur le rajout de données satellites, LIDAR et d'autres moyens de mesures en altitude. La finalité étant l'obtention d'une base de données 4D (3D avec son évolution temporelle) qui permettra d'accéder à une meilleure compréhension et modélisation des phénomènes physico-chimiques se développant à l'échelle européenne, d'en déduire les effets de transport à longue distance et enfin de pouvoir fournir à terme un instrument opérationnel de prévision du temps et de la qualité de l'air.

Nous avons signifié au groupe de coordination de ce projet, notre volonté d'y participer, en apportant une contribution qui pourrait leur être utile sur la fourniture d'outil de mesures 3D et sur la participation à la mise en place d'un réseau européen de LIDAR. Les techniques optiques, satellite et LIDAR seront notamment des éléments essentiels de la construction de cette base de données 4D.

5.2.7 Impact d'une zone aéroportuaire

Par ailleurs, nous sommes en collaboration avec un organisme italien (l'ENEA) afin de mettre en place, avec d'autres partenaires, un projet de réseau européen d'excellence sur la surveillance et la caractérisation multi-échelle de l'impact d'une zone aéroportuaire, qu'il soit situé sur le plan de la qualité de l'air, sur les rayonnements électromagnétiques, le sol, l'eau, le bruit, mais aussi prendre en compte l'impact économique. Pour ce faire, nous devons également nous associer avec des motoristes et des constructeurs d'avions afin de prendre en compte l'objectif d'obtention d'un « avion vert » et avec des plates-formes aéroportuaires, partenaires indispensables pour l'évaluation globale d'un impact et pour la mise en place de stratégies de réduction adaptées.

Nos chances de succès restent néanmoins faibles car seuls de réels réseaux européens d'excellence, qui sont les outils majeurs du 6^{ème} PCRD, ont des chances d'aboutir. Or la majorité des projets présentés peuvent faire ressortir certaines redondances et ne pourront donc pas aboutir. Néanmoins des regroupements sont envisagés, visant à proposer des projets plus structurés et couvrant un domaine d'action plus large. Nous pouvons donc clairement voir que les principaux outils du 6^{ème} PCRD seront vastes, incluant divers domaines d'actions et regrouperont de très nombreuses équipes.

6. CONCLUSION

D'une manière générale, le retour d'expérience obtenu lors des différentes campagnes de mesures organisées au cours de ces 3 dernières années, a démontré que l'apport du LIDAR fut important, tant sur le plan métrologique que sur la description des phénomènes liés à la dynamique de l'ozone, fournissant ainsi des éléments de réponse ou de compréhension aux réseaux dans leurs missions de surveillance de la qualité de l'air. Cela est renforcé par la très large présence des outils LIDAR sur le plan européen, dans le cadre de projets de recherche ou de réseaux d'excellence visant à les utiliser en réseau comme instrument de mesure, mais également comme outil de validation de données qu'elles soient fournies par des satellites, des appareils embarqués ou bien encore de modèles tridimensionnels.

Cette étude a également permis de démontrer que l'étape préliminaire à toute stratégie d'intégration d'un LIDAR dans un réseau de surveillance de la qualité de l'air, que ce soit à des fins de compréhension de phénomènes atmosphériques ou de paramétrage et de validation de modèles déterministes, était d'étudier et d'évaluer cet instrument ainsi que ses résultats vis-à-vis d'autres techniques de mesurage auxquels il devait être associé. Cette intégration d'un LIDAR dans un réseau nécessite d'être poursuivie par la mise en place de recherches complémentaires visant à optimiser cet outil afin d'en augmenter les applications possibles. Pour ce faire, les principaux axes d'études sont, d'une part, l'amélioration de ses performances, qu'elles soient métrologiques (limite de détection, portée) ou techniques (fiabilité, fonctionnement en mode autonome) et, d'autre part, son extension au mesurage de nouveaux polluants tels que les COV ou les métaux lourds à l'état gazeux, mais également les aérosols. Ces projets de développement LIDAR seront engagés au travers de programmes nationaux supportés par le MEDD. Par ailleurs, notre présence au plan européen, notamment dans des réseaux d'excellence, nous permettra de bénéficier d'un retour d'expérience important et d'un accès simplifié à la mise en commun de compétences visant à optimiser ces développements technologiques.

VEILLES SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE, NATIONALE ET INTERNATIONALE

1. SYNTHÈSE SCIENTIFIQUE DE LA CONFÉRENCE ILRC 2002

La participation de l'INERIS au congrès international des LIDAR (International Laser Radar Conference, Québec, juillet 2002), a permis de recenser les principaux développements LIDAR, tant sur le plan commercial, que sur les prototypes en cours de développement.

Les principales sessions furent :

- « Lidar in atmospheric and Earth science », thématique généraliste s'intéressant aux perspectives de couplage entre des instruments LIDAR au sol ou en avion et des satellites.
- « New lidar technologies and methods », très large session s'intéressant aux développements lidar et notamment sur la mesure de polluants (gaz, particules, humidité, visibilité), sur l'acquisition de données géographiques (topographie, altimétrie) ou bien à leur intégration dans des avions ou des satellites.
- « Atmospheric boundary layer and local-scale pollution », très large session visant à synthétiser les applications de l'outil lidar dans la compréhension de la physico-chimie troposphérique. Les principaux retours d'expérience ont été axés sur l'étude de la couche limite, l'étude de l'ozone, l'étude de la dispersion de panaches ou bien encore plus épisodiquement à la détection à distance de composés biologiques.
- « Regional and global-scale atmospheric dynamics and transport », petite session qui s'intéressait principalement à la valorisation des données LIDAR d'ozone et d'aérosols issues du réseau EARLINET.
- « Middle atmosphere physics and chemistry », session traitant du retour d'expérience sur les études stratosphériques et notamment concernant l'étude par LIDAR des polluants O₃, Na, NAT,...
- « Aerosols/clouds/humidity/Temperature and the physics of weather and climate », très large session s'intéressant au développement LIDAR et à leurs applications aux études météorologiques telles que l'obtention de profils verticaux (de visibilité, de température, de vapeur d'eau), l'obtention de la dynamique de la couche limite, l'étude de la hauteur des nuages mais aussi l'étude de phénomènes météorologiques particuliers (ouragans).
- « Space program and space exploration », petite session visant à effectuer un retour d'expérience sur l'implémentation de LIDAR (notamment aérosols ou vapeur d'eau) dans des satellites ou des avions.
- « Regional and global wind », petite session traitant de la caractérisation par LIDAR de la dynamique atmosphérique et notamment des LIDAR vent angulaires en fonctionnement au sol ou embarqués dans des avions ou des satellites.

Le programme, décrit de manière succincte ci-dessous, nous permet de constater que cette conférence s'est focalisée sur le développement d'outils LIDAR visant à fournir des informations quantitatives, d'une part, sur la chimie de l'atmosphère et sa dynamique (gaz et aérosols et, d'autre part, sur les paramètres météorologiques associés (vapeur d'eau, hauteur de couche limite). Ci-dessous figure une synthèse des ces principales avancées technologiques.

1.1 CARACTERISATION DE LA VAPEUR D'EAU

De nombreuses équipes engagent des développements lidars visant à quantifier l'évolution verticale du rapport de mélange de la vapeur d'eau. Un tel instrument permet notamment de fournir un support de paramétrage et de validation des modèles météorologiques tridimensionnels. Ces instruments, qui tendent à devenir opérationnels, souffrent néanmoins de contraintes de fonctionnement : données de bonne qualité uniquement la nuit, obtenues en utilisant un laser qui n'est pas en sécurité oculaire. Les principales équipes ayant obtenu des résultats probants sont les suivantes :

- Les équipes américaines (NASA Goddard, Université du Maryland) sur l'optimisation de mesures de vapeur d'eau le jour et sur la dépendance des effets de température sur l'incertitude.
- Les équipes américaines (NCAR, Boulder-Colorado) et françaises (CNRS-SA et INSU) sur le développement de LEANDRE, lidar vapeur d'eau embarqué dans un avion.
- L'équipe japonaise de l'université de Kyoto, sur le développement d'un lidar vapeur d'eau, température et aérosols
- L'équipe française de l'IGN sur le développement d'un lidar vapeur d'eau mobile. Cet instrument fut notamment utilisé durant ESCOMPTE pour l'obtention de profils verticaux de vapeur d'eau la nuit.
- Les équipes allemandes de l'institut de météorologie Max-Planck et du DWD (service météorologique allemand), sur le développement de lidars vapeur d'eau et de leur contrôle qualité respectif et leur implémentation dans des réseaux de mesures. On citera par ailleurs que le DWD est en collaboration avec la société ELIGHT, pour le développement d'un lidar vapeur d'eau autonome.

1.2 CARACTERISATION DES AEROSOLS

Il s'agit du principal axe de développement des LIDAR car ses applications sont nombreuses : concentration, distribution de taille, visibilité, hauteur de couche limite, hauteur et composition des nuages (fraction solide), mais également spatialisation de composés spécifiques (aérosols bactériologiques, émissions diffuses industrielles, contrôle de la combustion des moteurs d'engins volants).

Néanmoins, très peu de LIDAR sont actuellement en sécurité oculaire, limitant de ce fait leur utilisation à des applications éloignées de toute présence humaine. En effet, le laser source étant généralement un Nd:Yag, les longueurs d'ondes utilisées sont principalement à 1 064 nm et 532 nm. Or, ces deux longueurs d'ondes, respectivement dans les domaines IR et visibles, ne sont en sécurité oculaire que dans le cas de puissances émises trop faibles pour être utilisable à des fins de caractérisation 3D sur plusieurs kilomètres.

Seules quelques équipes, dont les principales applications sont à l'air ambiant, ont fait le choix d'utiliser des LIDAR en sécurité oculaire. Pour ce faire, les longueurs d'ondes utilisées imposent la réalisation de laser plus spécifiques : modification des longueurs d'ondes d'un laser Nd:Yag en utilisant des cristaux non linéaires. On conçoit donc aisément que de tels laser deviennent plus difficiles à réaliser et qu'ils sont associés à des coûts financiers plus importants. On citera les travaux ci-dessous :

- L'équipe américaine de Burtonsville (MD) sur la surveillance d'aérosols biologiques par un lidar embarqué dans un avion, fonctionnant en sécurité oculaire.
- L'équipe américaine de l'institut de géophysique sur la surveillance des brouillards givrants par lidar en sécurité oculaire (IR à 1574 nm).
- L'équipe américaine de l'université du Wisconsin, sur la réalisation à très faible coût d'un lidar aérosol compact qui soit en sécurité oculaire, pour des applications visant à effectuer une surveillance de la hauteur de la couche limite ou de la hauteur des nuages.

Par ailleurs, d'autres équipes ont obtenu des résultats très importants sur la caractérisation des aérosols, sans que les lidar utilisés soient en sécurité oculaire. On citera par exemple les travaux des équipes suivantes :

- Les équipes allemandes (GTCO et l'institut de météorologie) sur la réalisation d'un lidar transportable (POLIS : portable lidar) permettant l'obtention des profils d'extinction atmosphérique. Cet instrument, qui permet de fournir des informations sur la visibilité ou la signature des aérosols (données qualitatives) peut aisément instrumenter un avion ou un satellite.
- Les équipes russes (centre d'instrumentation de Moscou), américaine (NASA), et allemandes (l'institut de la recherche troposphérique de Leipzig et l'institut de mathématique de Postdam) sur l'obtention du profil vertical de la distribution de taille des aérosols par lidar multilongueurs d'ondes. L'association entre des équipes théoriques et appliquées, a permis d'obtenir le tout premier lidar aérosols permettant d'obtenir le profil vertical de distribution de taille en aérosols et la spatialisaiton de la concentration, qu'elle soit en masse ou en nombre.
- L'équipe américaine (du laboratoire d'optique de New York, NOAA) et japonaise (de l'université de Chiba) sur l'obtention de lidar multilongueurs d'ondes et les développements d'algorithmes d'inversion des signaux lidar, outils nécessaires à l'obtention des profils verticaux de distribution de taille ou de concentration. Néanmoins, ces développements sont plus essentiellement axés sur le traitement de données et l'inversion de signaux lidar, que sur la réalisation d'un lidar multilongueurs d'ondes.

Ces LIDAR devraient permettre notamment de mieux comprendre la stratification atmosphérique associée à la dynamique des couches limites, d'effectuer une caractérisation complète des émissions diffuses d'aérosols en sites industriel et urbain, d'effectuer un suivi de panaches spécifiques (biologique) ou bien encore de fournir une assistance en météorologie (visibilité, plafond nuageux, densité des nuages).

1.3 CARACTERISATION DES POLLUANTS GAZEUX ET NOTAMMENT L'OZONE

Plusieurs équipes tentent de mettre en place un couplage entre des LIDAR ozone satellites avec ceux installés au sol. Cela permettrait de connaître très précisément la dynamique de l'ozone, tant au niveau du sol que dans la stratosphère, mais surtout de suivre ainsi les phénomènes d'inclusions stratosphériques (quantification, facteur de dilution, impact au niveau de la basse troposphère). On citera notamment les travaux obtenus par les équipes suivantes :

- Les équipes françaises (l'INERIS et le service d'aéronomie de l'université de Paris) et suisse (l'EPFL) sur l'utilisation de lidar mobiles dans des campagnes de mesures visant à étudier les épisodes de pics de pollution à l'ozone et leurs origines et plus principalement la campagne ESCOMPTE.
- Les équipes italiennes de l'institut de physique atmosphérique et du CNR, sur le développement d'un lidar autonome appliqué à l'étude de la troposphère libre et l'étude de la stratosphère.
- Les équipes américaines (NASA Langley, SAIC-Hampton) et canadienne (Optech Inc.) sur le développement de lidar embarqués dans des avions, qui autorisent l'étude de l'ozone et des aérosols. Il s'agit de deux prototypes, dont la commercialisation ne peut pas être actuellement envisagée, compte tenu des montants financiers qui ont été nécessaires à leur réalisation.

Par ailleurs, des équipes ont développé des lidar pour la surveillance de polluants gazeux plus spécifiques, tels que le NO₂, le CO₂, les métaux lourds à l'état gazeux, l'ammoniac, le méthane (et plus globalement les COV). On citera les résultats obtenus par les équipes suivantes :

- L'équipe suédoise de l'université de Lund, sur la mesure des COV et du mercure gazeux par lidar UV/IR. Un programme de recherche de l'INERIS est notamment sur le développement d'un tel instrument, comme décrit dans la synthèse scientifique.
- L'équipe indienne du National Physical Laboratory de New Delhi, sur la mesure du NH₃ en utilisant un lidar DIAL centré sur les longueurs d'ondes du CO₂.
- Les équipes françaises (LASIM de UCB Lyon1, École Polytechnique Palaiseau, Thomson) et allemandes (universités de Berlin et de Essen) sur le développement d'un lidar TeraWatt non-linéaire, permettant d'effectuer une mesure simultanée de tous les principaux polluants atmosphériques. Cet instrument, premier prototype du genre, utilise la génération de plasma dans l'atmosphère pour analyser l'air présent.

2. RECENTS DEVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES

Un télémètre de nuage industrialisé par la société VAISSALA, a été adapté à la mesure en continu de la hauteur de la couche de mélange en collaboration avec Météo-France et notamment Marcel Zéphoris, Hubert Holin et Franck Lavie de la Direction des Systèmes d'Observation / DOE - Trappes.

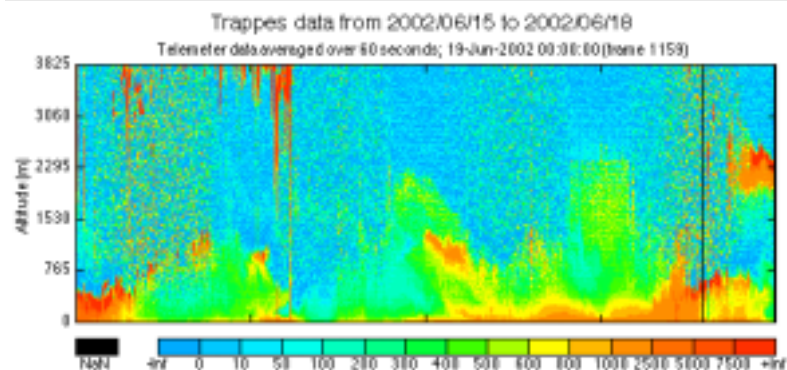
Pour cela, un télémètre à laser de hauteur de couches de nuages (de longueur d'onde 905 nm), disponible dans le commerce, fut modifié afin d'autoriser la mesure en continu de la hauteur de couche de mélange. Il permet également d'observer dans les basses couches de l'atmosphère, les accumulations d'aérosols ainsi que les zones de précondensation. Ce système a été mis en fonctionnement pendant 10 mois sur le site de Trappes, couplé à deux radios sondages quotidiens qui servaient à caractériser les profils verticaux de température et d'humidité. Par ailleurs, des mesures météorologiques permettaient de définir les conditions météorologiques au sol (température, humidité, vent, précipitations, visibilité).

Un tel développement est aisément réalisable car les signaux bruts d'un télémètre de nuages permettent d'observer l'écho principal rétrodiffusé par la base des nuages, mais autorise également l'enregistrement des échos de faible intensité, issus de la rétrodiffusion des aérosols et les gouttelettes présentes entre le sol et la base des nuages.

Les aérosols s'accumulent principalement au niveau des stratifications de température et d'humidité de l'atmosphère et des micro-gouttelettes apparaissant dans les zones de précondensation, la mesure de l'altitude de ces échos secondaires permet de déterminer l'épaisseur de la couche de mélange, ainsi que de reconstituer la forme et l'altitude des nuages d'aérosols et des zones de précondensation.

L'instrument réalise ainsi un profil vertical possédant une résolution verticale de 15 mètres pour une résolution temporelle de l'ordre de 1 minute.

Cette période d'essai de 10 mois a montré que cet instrument peut, dans les 4 premiers kilomètres de l'atmosphère et lors de situations météorologiques propices à la stratification de l'atmosphère, mesurer en continu l'épaisseur de la couche de mélange et déterminer l'altitude et la géométrie de la coupe de nuages d'aérosols.



Source d'information :

M. Zéphoris, Météo-France / DSO / DOE - Trappes

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES AU REGARD DE L'UTILISATION DU LIDAR DANS LES AASQA

L'année 2002, qui fut caractérisée sur le plan national par un nombre relativement faible de campagnes lidar en raison d'un manque de disponibilité de lidar en fonctionnement nominal et sur le plan international par un nombre important de campagnes de longue durée utilisant des lidar autonomes, fut surtout une année de transition technologique majeure et une étape importante dans la multiplication de ses domaines d'application. Nous sommes, en effet, sur le point d'accéder à une technologie lidar qui soit largement utilisable, tant dans des applications de compréhension de la chimie atmosphérique, que dans la description de sa dynamique ou de ses paramètres météorologiques.

Par ailleurs, ces instruments tendent à s'inscrire dans la volonté de construire des réseaux de lidar en fonctionnement autonome. Néanmoins, si ces avancées sont réelles sur la surveillance de l'ozone, de la vapeur d'eau ou bien encore sur la hauteur de la couche limite et que des lidar autonomes sont en activité ou en passe de l'être (cf. campagnes ESCOMPTE, FU-Berlin et NOAA), un développement est également entrepris sur les mesures des aérosols ou de nouveaux polluants gazeux. En effet, les études météorologiques menées par l'INERIS au cours de ces dernières années et les résultats obtenus lors des campagnes lidar, nous ont permis de confirmer les spécifications de ces instruments, de mettre en comparaison les données obtenues avec d'autres techniques de mesurage et notamment des instruments de référence et enfin d'en comprendre les écarts. Ainsi, on a pu mettre en évidence l'influence de l'humidité sur la réponse de certains analyseurs fonctionnant par absorption UV, responsable pour partie de l'incertitude globale constatée de 15 % entre toutes les techniques de mesurage de l'ozone en altitude.

Néanmoins, si l'intégration d'un LIDAR dans un réseau tend à devenir de plus en plus aisée pour certains polluants et quelques applications précises en raison de leur fonctionnement autonome, il reste nécessaire de la poursuivre par la mise en place de recherches complémentaires visant à optimiser cet outil afin d'en augmenter son domaine d'application.

Notamment, si la pollution par certains gaz tels que O_3 ou SO_2 , est de mieux en mieux caractérisée par des lidars qui tendent à devenir quasi-autonomes, les aérosols restent difficiles à quantifier de manière précise car les paramètres les caractérisant sont beaucoup plus nombreux que dans le cas des polluants gazeux. En effet, outre l'évolution temporelle de la concentration, il faut également connaître la distribution de taille et la nature des particules présentes en chaque point de mesure. Ces informations sont indispensables afin de prévoir l'effet des aérosols sur la physico-chimie atmosphérique ainsi que sur la santé.

De ce fait, de nombreuses études sont engagées dans des projets nationaux ou internationaux sur le développement de lidars multilongueurs d'ondes permettant d'obtenir une spatialisation de la distribution de taille et de la concentration des aérosols atmosphériques. De tels outils, essentiels dans des applications locales (émissions diffuses), régionales (bilan radiatif, modèles météorologique et dynamique régionaux) ou globales couplées à des données de satellites (changement climatique), restent encore au stade de prototypes et imposent certaines études complémentaires. Des premiers résultats ont été obtenus sur Lyon très récemment (LASIM-UCB Lyon1, École Centrale Lyon, COPARLY, INERIS) sur la description de l'apparition d'un épisode de pollution aux aérosols.

Enfin, l'importance des techniques optiques et plus particulièrement de la technique lidar dans la surveillance de la qualité de l'air et sa compréhension a été largement démontrée. Néanmoins, si la pollution par certains gaz tels que l'ozone peut être quantifiée très précisément, compte tenu des concentrations mesurées très supérieures à la limite de détection, d'autres gaz tels que le benzène ou le NO₂ ne peuvent être suivis que très difficilement à l'air ambiant en raison de leur limites de détections élevées. De plus, la caractérisation des émissions diffuses, qu'elles soient en zone urbaine ou industrielle, requiert une extension des capacités du LIDAR à la mesure de certains polluants spécifiques et notamment des COVs ou bien encore les métaux lourds tel que le mercure gazeux. De ce fait, de nombreux projets de recherche sont engagés, visant à développer des lidar multipolluants opérationnels. Une des applications possible de tels outils serait la surveillance simultanée de plusieurs polluants gazeux réglementés (O₃, NO₂, BTX) comme instrument de mesure, outil de description et de compréhension de leurs interactions et enfin comme support de validation de modèles qui les décrivent.

Ainsi, bien que de nombreuses applications lidar soient déjà réalisables depuis quelques années, elles tendent, d'une part, à devenir de plus en plus simples à mettre en place au vu des progrès constatés sur le caractère opérationnel de tels instruments (fonctionnement en mode autonome) et, d'autre part, elles devraient se diversifier vers des études plus spécifiques et ayant un intérêt direct pour les associations de surveillances comme par exemple l'étude de la spatialisation de la concentration et la distribution de taille des aérosols urbains ou bien encore l'étude simultanée de polluants ayant des interactions fortes (NO₂, BTX, O₃, aérosols).