



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

Etude des instruments à long trajet optique « LIDAR »

Laboratoire Central de Surveillance de la
Qualité de l'Air

Convention 41/2000

Emeric FREJAFON - Yves GODET

Unité Qualité de l'Air – Direction des Risques Chroniques

Décembre 2001

Etude des instruments à long trajet optique « LIDAR »

Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité
de l’Air

Convention 41/2000

DECEMBRE 2001

personnes ayant participé à l’étude

Emeric FREJAFON -Yves *GODET* – Nathalie BOCQUET – Danièle GUILLARD

Ce document comporte 117 pages (hors couverture) incluant les annexes.

| | 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..... | 3 |
|--------------------------------|----------|

| | |
|--------------------|----------|
| RÉSUMÉ..... | 5 |
|--------------------|----------|

| | |
|--|---|
| 1. Test de performances, évaluation du LIDAR acquis en décembre 2000 par l'INERIS | 5 |
| 2. Campagne escompte..... | 5 |
| 3. Contrôle qualité des analyseurs O ₃ et NO _x ainsi que des moyens de mesurage de l'ozone en altitude ayant participé à la campagne escompte..... | 6 |
| 4. Retour d'expérience de l'utilisation du LIDAR | 7 |

| | |
|--|----------|
| SYNTHÈSE DE LA CAMPAGNE ESCOMPTE 2001 ET DE L'ÉVALUATION SIMPLIFIÉE DES LIDAR LORS D'UN CONTRÔLE QUALITÉ SPÉCIFIQUE AUX MESURES EN ALTITUDE | 9 |
|--|----------|

| | |
|--|----|
| 1. Contrôle qualité des analyseurs NO _x et O ₃ | 9 |
| 2. Contrôle qualité des mesures en altitude | 10 |
| 3. Campagne LIDAR ESCOMPTE 2001 | 10 |

| | |
|--|-----------|
| SYNTHÈSE SUR LE RETOUR D'EXPÉRIENCE LIDAR EN FRANCE ET NOTAMMENT DANS LES AASQA | 13 |
|--|-----------|

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 13 |
| 2. Moyens existants..... | 13 |
| 3. Campagnes réalisées dans les AASQA | 18 |
| 4. Retour d'expérience, applications d'un LIDAR..... | 24 |
| 5. Conclusion | 27 |

| | |
|--------------------------------|-----------|
| LISTE DES ANNEXES | 29 |
|--------------------------------|-----------|

| | |
|---|-----------|
| ANNEXE 1 : CONTRÔLE QUALITÉ ET INTER COMPARAISONS DES LIDAR, DES AVIONS ET DES RADIOSONDAGES | 33 |
|---|-----------|

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 33 |
| 2. Objectifs de ce contrôle qualité des mesures O ₃ en altitudes..... | 34 |
| 3. Moyens mis en œuvre..... | 34 |
| 4. Situation météorologique et planning réalisé | 35 |
| 5. calibrage des LIDAR et résultats obtenus..... | 36 |
| 6. Calibrage et de raccordement des capteurs O ₃ fonctionnant par absorption UV, cas de l'ulm | 41 |
| 7. calibrage des sondes O ₃ électrochimiques..... | 43 |

| | | |
|-----|--|----|
| 8. | Résultats pour la journée du 6 juin 2001 | 44 |
| 9. | Résultats pour la journée du 7 juin 2001 | 51 |
| 10. | Conclusion préliminaire sur le contrôle qualité des mesures d’ozone en altitude..... | 54 |

ANNEXE 2 : CAMPAGNE LIDAR ESCOMPTE 2001 58

| | | |
|----|---|----|
| 1. | Introduction..... | 58 |
| 2. | La campagne ESCOMPTE..... | 59 |
| 3. | Objectifs des mesures LIDAR dans ESCOMPTE..... | 62 |
| 4. | Moyens mis en œuvres..... | 63 |
| 5. | Caractéristiques et spécifications des LIDAR..... | 74 |
| 6. | Taux de fonctionnement des LIDAR..... | 75 |
| 7. | Exemples de résultats LIDAR..... | 81 |
| 8. | Conclusion sur l’intervention des LIDAR | 84 |

ANNEXE 3 : CARACTERISTIQUES DU PROFILER O₃ ELIGHT 88

ANNEXE 4 : CONTRÔLE QUALITÉ DES ANALYSEURS D’OXYDES D’AZOTES ET D’O₃ DURANT ESCOMPTE..... 94

| | | |
|----|--|-----|
| 1. | résumé | 94 |
| 2. | Objectif du contrôle qualité à Avignon | 94 |
| 3. | DEROULEMENT DU QA/QC CHIMIE OZONE ET COMPOSES AZOTES NO et NO ₂ | 95 |
| 4. | RESULTATS DES REGLAGES ET CALIBRAGES | 100 |
| 5. | CONCLUSION..... | 107 |
| 6. | références | 107 |

RESUME

Pour faire suite aux demandes du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, puis de l'ADEME et des AASQA, l'INERIS a conduit de 1996 à 2000 un programme d'étude sur les appareils de mesure à long trajet optique de type LIDAR. Les principaux travaux réalisés au cours de ces quatre années sont les suivants :

- Evaluation du LIDAR concernant les polluants gazeux SO₂, NO₂, O₃, Toluène
- Evaluation partielle du LIDAR concernant le Benzène
- Campagne de mesure sur l'Ozone à Paris en juillet 1999
- Inter comparaison entre des mesures LIDAR et des capteurs ponctuels lors de la campagne d'ozone à Paris en juillet 1999
- Approche théorique du mesurage de nouveaux polluants : Styrene, et Para-Xylène

Le LIDAR ELIGHT 510M récemment acquis par l'INERIS ainsi que la mise à disposition par la société ELIGHT d'un Profiler d'Ozone lors de la campagne ESCOMPTE, nous ont permis de réaliser en 2001, les études suivantes.

1. TEST DE PERFORMANCES, EVALUATION DU LIDAR ACQUIS EN DECEMBRE 2000 PAR L'INERIS

Nous avons effectué la vérification des spécifications constructeurs et de la fiabilité du système lors d'une procédure de réception matériel. Il s'est avéré que le système LIDAR était en totale conformité avec les spécifications constructeurs, fournissant des limites de détection et des portées supérieures à nos attentes. D'autre part la fiabilité du système était excellente et autorisait des mesures routinières sans dysfonctionnement notable, mais nécessitant néanmoins la présence permanente d'un personnel formé sur l'appareil, lors de son fonctionnement.

2. CAMPAGNE ESCOMPTE

Nous avons participé à la campagne ESCOMPTE qui s'est déroulée en juin et juillet 2001, sur la région de Marseille-Fos-Berre. Son objectif était la création d'une base de données permettant de quantifier les différents composés chimiques présents dans l'atmosphère, ainsi que leur dynamique. Dans ce cadre, nous avons d'une part coordonné les moyens de télédétection d'ozone regroupant 5 LIDAR, et d'autre part assuré la réalisation complète de la campagne pour 3 d'entre eux (installation, obtention des mesures, suivi technique et traitement des données) :

- Le LIDAR angulaire INERIS puis son remplaçant, suite à sa détérioration complète par un incendie : le LIDAR angulaire l'Université du Littoral Côte d'Opale (UCLO) au terme d'une collaboration entre l'INERIS et l'Université du Littoral Côte d'Opale.
- Le LIDAR profiler vertical d'ozone mis à disposition par la société ELIGHT

- Le LIDAR angulaire de BTU-COTTBUS. Ces derniers, ayant des moyens humains limités, nous ont demandé de participer à la réalisation de la campagne. Nous avons donc détaché une personne sur cet instrument, pour la durée de la campagne.

L'ensemble des objectifs de ESCOMPTE en terme d'observation a été réalisé : la totalité des périodes intensives d'observation a été couverte. La base de données concernant les LIDAR, peut à présent être constituée, avec un taux de données supérieur à 90% et un taux de données validées supérieur à 80%. Nos rapports détaillés concernant cette campagne, figurent en annexe du présent document.

3. CONTROLE QUALITE DES ANALYSEURS O₃ ET NO_x AINSI QUE DES MOYENS DE MESURAGE DE L'OZONE EN ALTITUDE AYANT PARTICIPE A LA CAMPAGNE ESCOMPTE

L'objectif prioritaire de la campagne ESCOMPTE étant la création d'une large base de données, il était nécessaire d'effectuer au préalable un contrôle qualité des moyens intervenant dans sa construction. Ainsi, un calibrage et un raccordement des différents instruments devaient être effectué. L'évaluation de la cohérence des résultats obtenus suivant différentes techniques de mesurage de l'ozone, a été réalisé à la suite de cette période de calibrage .

L'INERIS, dans le cadre du LCSQA, a coordonné sur l'aéroport d'Avignon, du 5 au 10 juin, le calibrage et le raccordement de l'ensemble des analyseurs d'oxydes d'azotes et des analyseurs d'ozone. Il a permis de mettre en évidence la relative cohérence entre des instruments raccordés au même étalon, soulignant néanmoins des écarts entre les analyseurs prélevant au même endroit et dans des conditions identiques. Cela a donc permis de conclure que la précision des analyseurs impliqués dans la campagne ESCOMPTE, ne pourrait être meilleure que 15%.

Suite au raccordement des moyens de mesures ponctuels, nous avons ensuite coordonné le contrôle qualité des mesures d'ozone en altitudes regroupant les LIDAR, les Avions et les radiosondages. Pour ce faire, nous avons effectué une évaluation simplifiée et un calibrage des différents LIDAR, qui a mis en évidence une précision de mesure de l'ordre de 15%. Une mise en comparaison des différentes techniques, ayant effectué leur propre calibrage fut alors réalisée. Elle a permis de montrer la relative cohérence entre ces différentes techniques de mesurage de l'ozone, d'en évaluer les limitations et les conditions d'utilisation et enfin de fournir une explication détaillée des écarts rencontrés. Ainsi nous avons pu constater des écarts de l'ordre de 10% entre les mesures obtenues par les différents avions. De même, nous avons mis en évidence l'impossibilité pour certains analyseurs embarqués dans les avions à observer la stratification atmosphérique de l'ozone, quantifiée par les LIDAR et validée ensuite lors de la campagne proprement dite. Enfin, nous avons souligné l'importance de la matrice servant à effectuer le raccordement des analyseurs d'ozone. En effet, nous avons constaté un écart de 8% entre un raccordement effectué sous air sec et un raccordement effectué sous air humide.

Finalement le contrôle qualité des moyens de mesurage de l'ozone à permis de définir un intervalle de confiance de 15% sur la construction de la base de données ESCOMPTE.

4. RETOUR D'EXPERIENCE DE L'UTILISATION DU LIDAR

La campagne ESCOMPTE, résumée ci-dessus, à laquelle 5 LIDAR de technologies différentes ont participé, ainsi que les différentes campagnes LIDAR réalisées depuis les deux dernières années, nous ont permis d'effectuer une synthèse sur le retour d'expérience de l'utilisation des LIDAR, notamment dans les AASQA. Elle nous a permis de mettre en évidence l'apport fondamental de cette technique dans la validation des modèles photochimiques tridimensionnels, en permettant de documenter finement la stratification atmosphérique et sa dynamique, à des coûts variant du simple au triple suivant le LIDAR utilisé.

Ce retour d'expérience a montré les bonnes qualités métrologiques des LIDAR commercialisés en France, reposant sur une technologie laser de type Titane-Saphir, pour la mesure à l'air ambiant des polluants gazeux O₃, NO₂ et SO₂, avec comme principal inconvénient la nécessité d'un personnel qualifié constamment présent sur l'instrument durant son utilisation.

En revanche, les essais du Profiler d'Ozone ELIGHT ont montré les excellentes performances des nouveaux LIDAR reposant sur une technologie Nd-Yag, autorisant un fonctionnement en mode autonome et permettant ainsi de réduire très fortement la logistique et les coûts associés.

Cela nous a également permis de montrer que le suivi de panache par LIDAR est délicat à effectuer et ne peut donc se faire que dans le cas d'une source émettant fortement du SO₂ ou du NO₂, à des flux supérieurs au gramme/seconde et dans des conditions météorologiques garantissant un panache très stable.

Enfin, il a été mis en évidence l'impossibilité de réaliser une surveillance du benzène et du toluène à l'air ambiant pour les LIDAR reposant sur une technologie laser de type Titane-Saphir, compte tenu de leur limite de détection de l'ordre de 10 µg.m⁻³. En revanche, le prochain LIDAR angulaire de l'INERIS, qui devrait très certainement reposer sur une technologie laser de type Nd-Yag, possédera des limites de détection inférieures à 5 µg.m⁻³ pour tous les polluants, notamment pour les BTX, associées à des portées supérieures.

SYNTHESE DE LA CAMPAGNE ESCOMPTE 2001 ET DE L'EVALUATION SIMPLIFIEE DES LIDAR LORS D'UN CONTROLE QUALITE SPECIFIQUE AUX MESURES EN ALTITUDE

Une très large campagne de mesure s'est déroulée du 6 juin 2001 au 14 juillet 2001 sur Marseille-Fos-Berre : ESCOMPTE (Expérience sur Site pour CONtraindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Emissions). Elle a réuni plus de cinquante équipes françaises, mais également allemandes, italiennes et américaines. L'objectif prioritaire du programme ESCOMPTE était 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.

Cette campagne était destinée d'une part à servir de référence pour la validation des modèles de pollution 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. La construction de cette large base de données tridimensionnelle s'est fondée sur l'utilisation de diverses techniques de mesurage. Ainsi par exemple, des LIDAR DIAL, des capteurs ponctuels, des sondes électrochimiques et enfin des avions embarquant des analyseurs d'ozone à absorption UV intervenaient dans le mesurage de l'ozone. Or la construction de cette base de données impose une cohérence entre ces diverses techniques d'analyse ainsi que leur raccordement préalable à un étalon reconnu. Ainsi, après un calibrage et un raccordement des analyseurs d'oxydes d'azote et d'ozone, une mise en confrontation des différentes techniques de mesurage de l'ozone a donc été effectuée du 6 au 10 juin 2001, sur la base militaire d'Aix les Milles. Cette confrontation ayant permis de constater la cohérence entre les mesures, les mesures intervenant directement dans la construction de la base de données, ont pu être réalisées lors de la campagne proprement dite.

1. CONTROLE QUALITE DES ANALYSEURS NOX ET O3

La campagne ESCOMPTE a réuni de nombreux appareils venant d'horizons très différents pour l'analyse des constituants gazeux tels que O₃, NO_x, COV et radicaux libres en différents sites répartis sur la zone concernée par ESCOMPTE. Les résultats obtenus seront introduits dans une base de données unique. Les mesures ont été effectuées au sol ou par des appareils embarqués dans des avions. Il était donc indispensable de s'assurer de la bonne qualité des mesures au départ de la campagne. Pour ce faire, au cours de la période allant du 4 au 8 juin 2001 trois objectifs ont été poursuivis :

- 1) vérifier le bon fonctionnement des appareils utilisés et calculer les facteurs liés aux variations de température et de pression pour les appareils embarqués,
- 2) effectuer une calibration en se servant de sources uniques vérifiées auparavant par le Laboratoire National d'Essai,
- 3) réaliser une mini campagne d'intercomparaison.

La majorité des appareils utilisés durant la campagne a été testée. Le fait de choisir la base d'Avignon a permis notamment de réunir les appareils embarqués dans les camions, les avions et également ceux en poste fixe. En fin de période, tous les appareils présents ont effectué une mesure de l'Ozone durant quelques heures. Cette intercomparaison a été organisée et coordonnée par l'équipe de l'INERIS.

L'intercomparaison fait apparaître que les mesures d'ozone sont à $\pm 12\%$ et l'incertitude a été estimée selon la norme ISO 14956 à $\pm 14\%$.

2. CONTROLE QUALITE DES MESURES EN ALTITUDE

Cette période de contrôle qualité des mesures en altitude a mis en évidence de nombreuses similitudes entre les mesures avions, LIDAR et ballons, tant sur la stratification atmosphérique constatée, que sur les teneurs mesurées. Elle a également permis d'évaluer les limitations et les contraintes de fonctionnement de ces différentes techniques de mesurage de l'ozone.

En effet, nous avons constaté des biais entre les différents avions, alors même que leurs analyseurs étaient tous raccordés (au sol) au même standard NIST. Des biais de 10% ont été observés entre les mesures avions et la stratification atmosphérique fut constatée différemment suivant les appareils embarqués dans les avions, tels que notamment sur les deux analyseurs embarqués dans l'avion ARAT.

La comparaison des mesures des avions et du LIDAR INERIS, pour les journées du 06 et 07 juin, a permis de mettre en évidence un très bonne cohérence entre les mesures, avec des écarts inférieurs à 10% et une stratification atmosphérique constatée de manière identique par la plupart des instruments.

Néanmoins, il s'agit de conclusions préliminaires, de nombreuses données devant encore être traitées, telles que notamment les mesures de ULM et du LIDAR ALTO, pour la journée du 06 juin 2001. De même une correction d'altitude des mesures ULM pour la journée du 07 juin 2001 devra être effectuée prochainement.

Enfin, il serait important d'engager des études complémentaires sur ces mesures, afin d'évaluer l'influence des aérosols sur la mesure LIDAR et donc d'en optimiser la qualité. Cela sera effectué en utilisant les données annexes fournies par les différents instruments embarqués dans les avions. De même, le LIDAR angulaire INERIS a mis en évidence une inhomogénéité horizontale des concentrations d'ozone sur des échelles de l'ordre de quelques kilomètres. Il serait important de vérifier si les écarts observés entre les mesures des différents instruments, ne pourraient trouver pour partie leur explication dans la non-cohérence spatiale des mesures réalisées. Pour ce faire, une vérification des coordonnées GPS de chaque mesure, doit être réalisée afin de comparer uniquement des mesures ayant une cohérence spatiale et temporelle ; cela devra ensuite être également effectué sur toutes les mesures intervenant dans la construction de la base de données ESCOMPTE.

3. CAMPAGNE LIDAR ESCOMPTE 2001

Une fois la cohérence des différentes techniques de mesurage d'un même polluant établie, ESCOMPTE était un programme inscrit dans un effort général de recherche visant à disposer d'outils permettant notamment de mieux caractériser le phénomène de pollution par l'O₃. Parmi ces moyens figurent les modèles de chimie-transport de la pollution atmosphérique, dont le but est de décrire finement les relations entre les émissions

polluantes, les conditions météorologiques, et les niveaux de pollution résultants en zone urbaine et rurale. Ces modèles sont des outils indispensables pour évaluer l'efficacité des politiques de réduction des émissions polluantes, et pour procéder à des prévisions en vue de satisfaire des objectifs exigeants de qualité de l'air. Mais, afin de les paramétrer, de les optimiser et ensuite de les valider, il est fondamental de construire une large base de données tridimensionnelle qui soit à même de fournir l'ensemble de ces besoins. Pour ce faire, de nombreuses équipes ont participé, instrumentant très finement divers sites répartis sur une zone de 100 km par 100 km. Ainsi 5 LIDAR ont été utilisés lors de cette campagne, dont l'objectif principal était de fournir une information quantitative sur l'ozone présent en altitude, notamment lors des quatre phases intensives d'observations (POI) réparties tout au long de la campagne.

On a constaté que toutes les POIs ont été couvertes de manière nominale ou quasi-nominale par 4 des 5 LIDAR. Seul le LIDAR angulaire de l'INERIS installé au Vallon Dol n'a pas participé à la POI 1 : le LIDAR de remplacement, suite à l'incendie du premier LIDAR de l'INERIS sur le site de la BA114, est en effet arrivé sur le site le 19 juin. De plus, les POIs 2a et 2b ont été couvertes de manières nominales par tout l'ensemble du réseau de profilers. Enfin, suite à une demande faite par le comité de coordination ESCOMPTE, les POIs 3 et 4 ont été couvertes de manière continues, en mode 24H/24.

Le bilan de fonctionnement de l'ensemble du réseau pour la campagne ESCOMPTE est donc très satisfaisant car la construction de la base de données pourra être effectuée avec un taux de données supérieur à 80% pour chaque POI.

Il est à souligner que ce résultat positif ne préjuge pas pour l'instant de la qualité des données, celle-ci ne pouvant être révélée qu'après leur analyse plus approfondie. En revanche les premiers traitements, effectués sur les POI 2 et 3, montrent une très bonne qualité des données, avec un taux de données utilisables (validées) supérieur à 90%.

Cette campagne nous a également permis d'effectuer une évaluation simplifiée du Profiler d'ozone ELIGHT au travers du contrôle qualité effectué sur le site d'Aix les Milles, puis lors de la campagne proprement dite. Nous avons pu, après une prise en main rapide, constater le très bon fonctionnement en mode autonome de cet instrument. En effet, seules 2 heures d'absence de données sur 1 mois de mesure en continu, sont imputables à une défaillance de l'appareil. L'ensemble des données a ensuite été traité très rapidement, permettant ainsi de construire la base de données, avec un taux de données supérieur à 96% et un taux de données validées supérieur à 90%.

Enfin, le LIDAR angulaire INERIS/UCLO, bien que nécessitant la présence constante de moyens humains, n'a pas rencontré de problèmes techniques particuliers. La qualité des données obtenues nous permet d'une part de construire la base de données avec un taux de données supérieur à 80% et un taux de données validées supérieur à 75%. Les différents profils angulaires effectués nous ont d'autre part permis de mettre en évidence de nombreux autres phénomènes, donnant lieux à la mise en place de programmes de recherches spécifiques. Ainsi par exemple, deux programmes PNCA en collaboration avec le LIDAR Vents LVT, vont s'intéresser d'une part aux phénomènes de dilution à l'échelle urbaine et à la stratification atmosphérique et d'autre part tenter de mieux quantifier l'évolution verticale du profil de distribution de taille des aérosols présents au-dessus de la ville de Marseille.

SYNTHESE SUR LE RETOUR D'EXPERIENCE LIDAR EN FRANCE ET NOTAMMENT DANS LES AASQA

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 ou des 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. La campagne ESCOMPTE, synthétisée ci-dessus, à laquelle 5 LIDAR de technologies différentes ont participé, ainsi que les différentes campagnes LIDAR réalisées depuis les deux dernières années, nous ont permis d'effectuer une synthèse sur le retour d'expérience de l'utilisation des LIDAR, notamment dans les AASQA.

Ainsi, de nombreuses études ont été menées en France depuis deux ans, utilisant la technique optique comme moyen de compréhension des phénomènes locaux, comme support de paramétrage ou bien encore comme instrument de validation de modèles numériques photochimiques ou dispersifs.

De récentes avancées dans le domaine LIDAR ont enfin permis d'en étendre les applications possibles en limitant très fortement les coûts globaux associés à leur achat, utilisation ou bien encore maintenance. Ainsi certaines applications, permettant de fournir directement des réponses aux AASQA à des coûts faibles et ne nécessitant pas de personnel qualifié, sont donc devenues réalisables.

2. MOYENS EXISTANTS

Il existe deux grandes catégories de LIDAR, disponibles en version commerciale, ou au travers d'un partenariat avec une université possédant un LIDAR de laboratoire. Nous détaillons ci-dessous ces différentes catégories de LIDAR, ainsi que les coûts associés.

2.1 LIDAR ANGULAIRE MULTI-POLLUANTS EN VERSION COMMERCIALE

Les LIDAR angulaires multi-polluants 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 suspensions au travers de la visibilité ou de l'extinction atmosphérique. Ces LIDAR n'existent qu'en version commerciale, toutes fournies par le même constructeurs ELIGHT :

- Le LIDAR de BTU-COTTBUS (Allemagne), acquis en 1996
- Le LIDAR de RSO (Prague, République tchèque), acquis en 2000
- Le LIDAR de COPARLY, acquis en 1999
- Le LIDAR de INERIS, acquis en décembre 2000.
- Le LIDAR de l'Université du Littoral Côte d'Opale, acquis en décembre 2000.

Les LIDAR de INERIS et de UCLO sont tous deux identiques, bénéficiant d'améliorations technologiques importantes sur la partie laser, notamment sur les puissances émises et autorisant des portées plus importantes, comme le résume le tableau général.

Dans tous les cas ci-dessus, 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. Un double oscillateur permet de générer deux longueurs d'ondes en simultané sur cette gamme d'accordabilité. Ces signaux sont alors doublés et triplés en fréquence afin d'obtenir les longueurs d'ondes nécessaires à la mesure de l'ozone. 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.

Sa configuration en mode angulaire lui autorise des balayages sur un angle solide de 2π stéradians. De ce fait, des suivis de panaches peuvent être réalisés tout aussi bien que la réalisation d'une cartographie tridimensionnelle couvrant l'espace de l'horizon au zénith, comme le décrit la figure ci-dessous.

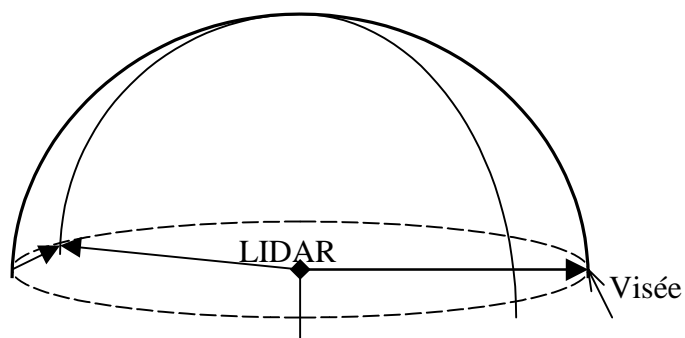


Figure 1 : schéma du balayage angulaire, réalisable par le LIDAR angulaire INERIS



Figure 2 : photographie du LIDAR angulaire INERIS acquis en décembre 2000

2.2 LIDAR PROFILER VERTICAL D'OZONE ELIGHT

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.

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 800 nm et de 1500 nm. Un mixage de fréquence est ensuite réalisé avec la troisième harmonique du laser Nd-Yag pour obtenir une longueur d'onde située entre 266 nm et 320 nm. 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.



Figure 3 : LIDAR profiler vertical d'ozone

L'INERIS a effectué une évaluation simplifiée de cet instrument durant un mois complet de mesures, lors de la campagne ESCOMPTE (cf. annexe Campagne ESCOMPTE). Nous avons ainsi pu constater son bon fonctionnement ainsi que l'excellente stabilité de l'appareil. Aucune présence humaine n'a réellement été nécessaire au fonctionnement de l'appareil durant l'ensemble de la campagne, ce qui constitue une première dans le monde des LIDAR. En effet, la communauté des LIDAR, représentées par des utilisateurs (INERIS) ainsi que des universitaires tels que l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), le CNRS-SA (Service d'Aéronomie) et le LMD/EP (Laboratoire de Météorologie Dynamique de l'Ecole Polytechnique) présents lors d'ESCOMPTE, ont souligné les excellents résultats obtenus par cet appareil en fonctionnement autonome. Ainsi on retiendra que sur 1 mois complet de mesures ¼ horaires, les mesures ont été fournies instantanément avec un taux de données supérieur à 96% et un taux de données validées supérieur à 90%.

2.3 CAS DU PROCHAIN LIDAR ANGULAIRE INERIS, PREVU POUR FIN 2002

Il devrait s'agir 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.

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 800 nm et de 1500 nm. Un mixage de fréquence est ensuite réalisé avec la troisième harmonique du laser Nd-Yag pour obtenir une longueur d'onde située entre 266 nm et 320 nm. La mise en rotation des différents cristaux permet alors d'obtenir les différentes longueurs d'ondes nécessaires à la mesure de l'ozone, le SO₂, le NO₂, le benzène et le toluène et fournissant enfin une information qualitative sur les aérosols atmosphériques.

Cette technique, reposant sur un laser Nd-Yag, permet d'obtenir une plus grande stabilité du système, ce type de laser étant couramment utilisé dans le domaine industriel ou médical.

Cet appareil est totalement autonome et peut être piloté à distance. Un suivi quotidien peut être effectué 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.

L'INERIS ne possédant pas encore cet instrument, ses caractéristiques ne peuvent 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, où nous en avons la charge et avons donc pu constater son excellent fonctionnement.

2.4 SPECIFICATIONS

Les tableaux ci-dessous regroupent les différentes spécifications, fournies par les constructeurs ainsi que celles obtenues lors des évaluations LIDAR effectuées à l'INERIS entre 1996 et 2000.

| | Distance minimale de mesure* | Distance maximale de mesure | Résolution spatiale minimale | Résolution spatiale typique | Limite de détection | Incertitude de mesure en % |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------------|
| LIDAR angulaire BTU | 250m/ 0 m | 2 000 m | 50 m | 400 m | 2 µg.m ⁻³ | 5 % |
| LIDAR angulaire COPARLY | 250m/ 0 m | 2 500 m | 50 m | 200 m | 2 µg.m ⁻³ | 5 % |
| LIDAR angulaire INERIS 2001 | 250m/ 0 m | 3 000 m | 50 m | 200 m | 2 µg.m ⁻³ | 5 % |
| LIDAR angulaire INERIS 2002 | 250m/ 0 m | 4 500 m | 50 m | 100 m | 1 µg.m ⁻³ | 3 % |
| LIDAR vertical O ₃ ELIGHT | 100 m | 2 500 m | 100 m | 200 m | 2 µg.m ⁻³ | 5 % |
| LIDAR vertical O ₃ ALTO-SA | 500 m | 8 000 m | 200 m | 1 000 m | 3 µg.m ⁻³ | 10 % |

Tableau 1 spécifications techniques des LIDAR concernant le polluant Ozone

(*) : la distance minimale de mesure est la distance minimale d'obtention de la première mesure. Pour les LIDAR angulaires, elle est de 250 m en mode angulaire et de 50 m lorsque l'on crée un profil vertical de concentration en effectuant le moyennage horizontal d'un profil angulaire.

| | Distance minimale de mesure * | Distance maximale de mesure | Résolution spatiale minimale | Résolution spatiale typique | Limite de détection | Incertitude de mesure en % |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| LIDAR angulaire BTU | 250m/ 0 m | 2 000 m | 50 m | 400 m | 8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 10 % |
| LIDAR angulaire COPARLY | 250m/ 0 m | 2 500 m | 50 m | 200 m | 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 10 % |
| LIDAR angulaire INERIS 2001 | 250m/ 0 m | 3 000 m | 50 m | 200 m | 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 10 % |
| LIDAR angulaire INERIS 2002 | 250m/ 0 m | 4 500 m | 50 m | 100 m | 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 5 % |

Tableau 2 spécifications techniques des LIDAR concernant le polluant SO₂

| | Distance minimale de mesure * | Distance maximale de mesure | Résolution spatiale minimale | Résolution spatiale typique | Limite de détection | Incertitude de mesure en % |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| LIDAR angulaire BTU | 250m/ 0 m | 2 500 m | 50 m | 400 m | 25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 15 % |
| LIDAR angulaire COPARLY | 250m/ 0 m | 3 000 m | 50 m | 200 m | 18 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 15 % |
| LIDAR angulaire INERIS 2001 | 250m/ 0 m | 3 500 m | 50 m | 200 m | 15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 15 % |
| LIDAR angulaire INERIS 2002 | 250m/ 0 m | 6 000 m | 50 m | 100 m | 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 5 % |

Tableau 3 spécifications techniques des LIDAR concernant le polluant NO₂

| | Distance minimale de mesure * | Distance maximale de mesure | Résolution spatiale minimale | Résolution spatiale typique | Limite de détection | Incertitude de mesure en % |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| LIDAR angulaire BTU | 250m/ 0 m | 1 200 m | 50 m | 400 m | 15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 20 % |
| LIDAR angulaire COPARLY | 250m/ 0 m | 1 500 m | 50 m | 200 m | 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 20 % |
| LIDAR angulaire INERIS 2001 | 250m/ 0 m | 2 000 m | 50 m | 200 m | 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 20 % |
| LIDAR angulaire INERIS 2002 | 250m/ 0 m | 3 000 m | 50 m | 100 m | 4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 5 % |

Tableau 4 spécifications techniques des LIDAR concernant le polluant Benzène

| | Distance minimale de mesure * | Distance maximale de mesure | Résolution spatiale minimale | Résolution spatiale typique | Limite de détection | Incertitude de mesure en % |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| LIDAR angulaire BTU | 250m/ 0 m | 1 500 m | 50 m | 400 m | 15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 20 % |
| LIDAR angulaire COPARLY | 250m/ 0 m | 2 000 m | 50 m | 200 m | 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 20 % |
| LIDAR angulaire INERIS 2001 | 250m/ 0 m | 2 200 m | 50 m | 200 m | 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 20 % |
| LIDAR angulaire INERIS 2002 | 250m/ 0 m | 3 000 m | 50 m | 100 m | 4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 5 % |

Tableau 5 spécifications techniques des LIDAR concernant le polluant Toluène

Nous constatons que, quel que soit l'appareil, les limites de détections restent semblables pour les polluants O₃, NO₂ et SO₂. Cela est dû au principe de mesure lui-même, qui en étant optique, ne permet pas réellement d'amélioration de sensibilité sur des polluants ayant des spectres à bandes larges (raies d'absorption ayant une grande largeur spectrale). En revanche le benzène et le toluène sont des polluants ayant des spectres beaucoup plus étroits (raies fines d'absorption). Le prochain LIDAR INERIS, compte tenu des améliorations apportées sur la stabilité du laser, devrait permettre de réduire très fortement la limite de détection sur ces deux polluants, autorisant ainsi une mesure à l'air ambiant qui était compromise avec les LIDAR reposant sur un laser de technologie Titane-Saphir, dont l'instabilité laser engendrait une limite de détection trop élevée.

2.5 COUTS D'ACHAT, D'UTILISATION ET DE MAINTENANCE

| | Coût d'achat (en K€) | Coût pour 72h de mesures en continu | Coût pour 5 journées de mesures (10h/j) | Coût annuel maintenance | Moyens humains formés |
|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|---|-------------------------|-----------------------|
| LIDAR angulaire BTU | 750 | 35 000 € | 30 000 € | 40 000 € | constant |
| LIDAR angulaire COPARLY | 800 | 30 000 € | 25 000 € | 30 000 € | constant |
| LIDAR angulaire INERIS 2001 | 825 | 30 000 € | 25 000 € | 30 000 € | constant |
| LIDAR angulaire INERIS 2002 | ~800 | ~10 000 € | ~15 000 € | ~25 000 € | 1 j/semaine |
| LIDAR vertical O ₃ ELIGHT | 300 | 5 000 € | 5 000 € | 10 000 € | 1 j/semaine |

Tableau 6 coûts d'achat, d'utilisation et d'entretien des LIDAR commerciaux

Ces données sont indicatives et ne sont fournies qu'au vu des informations recueillies à la date de réalisation de ce tableau. Les coûts de maintenance intègrent les différents remplacements de composants à effectuer dans les 5 années suivant l'achat de l'appareil. Il s'agit donc d'une évaluation du coût de maintenance sur 5 ans, rapportée à un coût annuel. Les moyens humains formés représentent le temps de présence d'une personne spécialement formée sur l'instrument. Ainsi on observe que les 3 LIDAR angulaire utilisant le laser Titane-Saphir comme élément de base, nécessite un personnel formé constamment présent dans l'appareil. Cette constatation est appuyée par les différentes campagnes réalisées à ce jour.

En revanche le prochain LIDAR INERIS reposera sur l'utilisation d'un laser ne nécessitant aucun moyen humain en permanence, ce qui limitera donc fortement les coûts d'utilisation. L'INERIS étant sur le point de passer commande de ce nouveau LIDAR, les coûts d'achat, d'utilisation et de maintenance sont donc indicatifs. En revanche le cahier des charges du LIDAR INERIS a été réalisé de manière à posséder un outil ayant des coûts d'utilisation à long terme qui soient faibles. Ainsi l'INERIS devrait pouvoir fournir, dans le cas d'une campagne de mesure de 1 mois en continu fournissant des profils verticaux de O₃ ou NO₂ toutes les 15 minutes, une prestation associée à un coût de l'ordre de 50 000 €. Cela permettrait d'utiliser le LIDAR comme un outil de paramétrage et de validation des modèles photochimiques sur du long terme, campagne à l'heure actuelle irréalisable, compte tenu des coûts associés.

3. CAMPAGNES REALISEES DANS LES AASQA

3.1 PARAMETRAGE D'UN MODELE DISPERSIF (SO₂, RHONE-ALPES, 1999)

3.1.1 Objectif

Réalisation d'un suivi de panache d'incinérateur d'ordures ménagères, afin de pouvoir le caractériser en terme de sur-hauteur et de dispersion, données essentielles au paramétrage de modèles dispersifs. Cette étude s'est inscrite dans un projet ADEME de caractérisation de la dispersion des émissions d'une IUOM. Dans ce cadre, le LIDAR devait permettre d'effectuer le paramétrage d'un modèle développé par ARIA, outil permettant ensuite d'effectuer une cartographie haute résolution des dépôts dans un rayon de 5 km autour de l'incinérateur. Un suivi des émissions de SO₂ (traceur) a donc été proposé.

3.1.2 Moyens utilisés

COPARLY, au moyen de son opérateur technique le laboratoire de l'environnement de la Ville de Lyon, a réalisé cette campagne en utilisant son propre LIDAR angulaire multi-polluants. Les moyens humains nécessaires à la mise en place, la réalisation, le traitement des données et leur interprétation furent donc ceux de la Ville de Lyon.

3.1.3 Coût réel associé

Cette campagne fut effectuée, sur un budget ADEME, à hauteur d'environ 12 500 € comprenant la réalisation de la campagne et le traitement des données. Des problèmes techniques, détaillés ci-dessous, ont engendré un coût réel largement supérieur à ce financement. En effet le coût global de cette campagne fut d'environ 25 000 € sans tenir compte des nombreuses réunions de travail ayant découlé de cette étude et se poursuivant encore actuellement.

3.1.4 Résultats obtenus et conclusion

Un premier essai de suivi de SO₂ fut non concluant, compte tenu des teneurs en SO₂ réellement émises par cet incinérateur. Nous avons donc choisi d'utiliser un traceur (ajout de gaz SO₂ dans la cheminée) afin d'effectuer cette caractérisation du panache. Nous avons ainsi obtenu sur une semaine de mesure, environ deux épisodes de 2 heures chacune où le panache était effectivement caractérisé. Cette campagne a été délicate à réaliser, le panache étant en effet situé dans une zone géographique très turbulente : la stabilité du panache n'était établie que sur des temps inférieurs à 1 minute, entraînant alors une très grande imprécision des mesures LIDAR sur des intégrations temporelles aussi courtes.

Cette étude a permis d'effectuer le paramétrage du modèle dispersif, mais a également montré les limites de l'utilisation du LIDAR dans le suivi de panache, du fait des faibles teneurs émises, mais surtout en raison de la non-stabilité de ce panache inscrit dans une topographie trop accidentée.

Nous préconisons donc des études de suivi de panache, sur des situations météorologiques telles que le panache soit stable sur des échelles de temps supérieures à 10 minutes et lorsque les flux émis autorisent des mesures de concentrations supérieures aux limites de détection de l'instrument. A titre d'information, les flux émis par une raffinerie doivent être de l'ordre de quelques grammes/sec afin de pouvoir être suivis par LIDAR sur des distances de l'ordre de quelques centaines de mètres après la cheminée.

3.2 *CAMPAGNE ETUDE LYONNAISE SUR L'OZONE ELO (O₃, LYON, 1999)*

3.2.1 Objectif

Obtention de profils verticaux et angulaires d'ozone, avec une résolution temporelle de 15 minutes, dans le but de valider un modèle photochimique tridimensionnel de type UAM, spécialement paramétré sur la région lyonnaise.

3.2.2 Moyens utilisés

COPARLY, au moyen de son opérateur technique le laboratoire de l'environnement de la Ville de Lyon, a réalisé cette campagne en utilisant son propre LIDAR angulaire multi-

polluants. Les moyens humains nécessaires à la mise en place, la réalisation, le traitement des données et leur interprétation furent donc ceux de la Ville de Lyon.

3.2.3 Coût réel associé

Cette campagne, effectuée à la demande du centre de recherche ELF-Solaize, a eu un coût d'environ 35 000 € comprenant la réalisation de la campagne et le traitement des données. Suite à cette étude, une recherche plus approfondie fut engagée sur l'écart rencontré entre les mesures LIDAR et les sorties de modèles, afin d'une part d'effectuer un contrôle qualité plus précis des données LIDAR, mais également afin de chercher l'origine de ces écarts. Ces recherches annexes ne furent pas prises en compte dans le coût de campagne.

3.2.4 Résultats obtenus

Des profils angulaires de concentration en ozone et d'extinction atmosphérique ont été obtenus durant 3 jours de mesures en continu (24h/24), avec une résolution temporelle de 15 minutes.

Quelques dysfonctionnements de la partie laser de l'appareil ont été constatés, mais ils n'ont pas entraîné de pertes de données supérieures à 6 heures. Néanmoins une très forte instabilité de la partie laser, reposant sur une technologie Titane-Saphir, a été constatée au cours de la campagne, nécessitant la présence constante et soutenue de moyens humains formés sur cet instrument.

3.2.5 Conclusion sur l'apport du LIDAR dans cette étude

Cette étude a permis d'effectuer une validation d'un modèle tridimensionnel sur 3 jours en continu. Les écarts rencontrés entre les valeurs mesurées et les sorties de modèles ont également permis de mettre en évidence la présence d'inclusions stratosphériques lors de cette campagne. Ces résultats font l'objet d'une publication en cours de finalisation.

3.3 *CAMPAGNE DE GRENOBLE SUR L'OZONE (O₃, GRENOBLE, 1999)*

3.3.1 Objectif

Obtention de profils verticaux et angulaires d'ozone, avec une résolution temporelle de 15 minutes, dans le but de valider un modèle photochimique tridimensionnel développé par l'EPFL en collaboration avec le réseau ASCOPARG, spécialement paramétré sur la région grenobloise.

3.3.2 Moyens utilisés

COPARLY, au moyen de son opérateur technique le laboratoire de l'environnement de la Ville de Lyon, a réalisé cette campagne en utilisant son propre LIDAR angulaire multi-polluants. Les moyens humains nécessaires à la mise en place, la réalisation, le traitement des données et leur interprétation furent donc ceux de la Ville de Lyon.

3.3.3 Coût réel associé

Le coût réel de cette campagne été d'environ 40 000 €

3.3.4 Résultats obtenus

Des profils angulaires de concentration en ozone et d'extinction atmosphérique ont été obtenus durant 2,5 jours de mesures en continu (24h/24), avec une résolution temporelle de 15 minutes. De nombreux dysfonctionnements de la partie laser de l'appareil ont été constatés, ayant entraîné des pertes de données durant quelques heures et l'arrêt de la campagne le 3^{ème} jour au matin. La partie laser, reposant sur une technologie Titane-Saphir, fut à l'origine de tous ces dysfonctionnement et notamment, l'explosion de son alimentation est survenue à deux reprises.

3.3.5 Conclusion sur l'apport du LIDAR dans cette étude

Cette étude a permis le paramétrage et la validation d'un modèle photochimique d'ozone, spécialement optimisé pour la région grenobloise, intégrant des modules spécifiques d'étude des effets de vallées. Néanmoins cette étude a également mis en évidence de nombreux dysfonctionnements de la partie laser de l'appareil, ayant entraîné des pertes de données et un arrêt prématuré de la campagne de mesure. Les différentes interventions du constructeur ont permis de fiabiliser l'alimentation du laser, sans pour autant réellement stabiliser le laser Titane-Saphir. De ce fait, des moyens humains constamment présents sur l'instrument sont nécessaires à la réalisation de telles campagnes.

3.4 CAMPAGNE D'OZONE A PARIS (O_3 , PARIS, 1999)

3.4.1 Objectif

Réalisation de profils angulaires d'ozone sur Paris en juillet 1999, dans le but de documenter la structure verticale de l'atmosphère en zone urbaine et afin d'effectuer une comparaison entre des données LIDAR et des données du réseau de surveillance (capteurs d'ozone installés à différentes altitudes sur la Tour Eiffel).

3.4.2 Moyens utilisés

L'INERIS a réalisé cette campagne en utilisant le LIDAR angulaire BTU-COTTBUS, au terme d'un accord bilatéral. BTU-COTTBUS a donc réalisé cette campagne et utilisant comme moyens humains, du personnel de BTU-COTTBUS ainsi que de l'INERIS.

3.4.3 Coût réel associé

Le coût réel de la campagne peut être estimé à environ 40 000 € incluant la réalisation de la campagne et le traitement des données LIDAR et la synthèse des résultats obtenus. Ceci n'inclut pas la mise en comparaison des mesures LIDAR et des capteurs ponctuels ainsi que son traitement et sa synthèse.

3.4.4 Résultats et conclusion sur l'apport du LIDAR dans cette étude

Cette étude a d'une part montré la très bonne cohérence entre deux techniques de mesures, ayant des principes de fonctionnement différents et des méthodes de calibrage et de raccordement qui leur sont propres. Nous sommes également en train de retraiter les données afin d'évaluer si, dans une certaine mesure, les aérosols pouvaient intervenir dans les quelques écarts rencontrés. Des conclusions préliminaires nous permettent d'affirmer que l'influence des aérosols était négligeable sur la mesure de l'ozone par LIDAR lors de cette campagne et que les quelques écarts rencontrés lors de cette mise en comparaison, étaient issus d'une erreur de traitement.

Une instabilité de la partie laser de l'appareil fut constatée ainsi qu'une détérioration à deux reprises de l'alimentation du laser, ayant entraîné la perte de données durant plusieurs heures. La nécessité d'une présence constante de moyens humains formés sur cet instrument fut également soulignée lors de cette campagne.

3.5 CAMPAGNE A L'ECHELLE URBAINE (O_3 , SO_2 , NO_2 , LYON, 1999-2000)

3.5.1 Objectif

COPARLY a adopté une stratégie d'utilisation du LIDAR pour l'aider à la restructuration de son réseau de surveillance fixe. Des mesures, pour différents polluants tels que le NO_2 , le SO_2 , l' O_3 , sont planifiées tout au long de l'année, sur différents sites de l'agglomération lyonnaise. Chaque emplacement doit permettre de réaliser des profils angulaires horizontaux, couvrant une surface importante de la canopée urbaine, et couvrant la position de plusieurs capteurs. COPARLY utilise son propre LIDAR angulaire multi-polluants.

3.5.2 Résultats et conclusion sur l'apport du LIDAR dans cette étude

Les cartographies obtenues permettent alors de visualiser la dynamique spatiale du polluant mesuré durant la journée, et d'apprécier l'emplacement des capteurs vis-à-vis de la zone plus large couverte par le LIDAR.

Des mesures répétées pour plusieurs polluants et des météorologies différentes ont permis de mieux qualifier la représentativité d'un site, fournissant alors une aide précieuse pour le déplacement d'un site, l'ajout ou l'échange d'un capteur (mesure d'autres polluants), ou bien encore la suppression de sites redondants.

3.6 CAMPAGNE ESCOMPTE (O_3 , MARSEILLE, 2001)

3.6.1 Objectif

Une très large campagne de mesure s'est déroulée du 6 juin 2001 au 14 juillet 2001 sur Marseille-Fos-Berre : ESCOMPTE (Expérience sur Site pour CONtraindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Emissions). Elle a réuni plus de cinquante équipes françaises, mais également allemandes, italiennes et américaines. L'objectif prioritaire du programme ESCOMPTE était 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.

Lors de la campagne, cinq LIDAR O3/Aérosols ont suivi quasiment en continu la dynamique des profils de concentrations en ozone ainsi que l'évolution temporelle de la hauteur de la couche limite. Le dispositif avait pour but d'apporter une documentation expérimentale, une aide à l'interprétation et une contribution à la validation de modèles tridimensionnels photochimiques : il a servi d'une part de support de paramétrage de ces modèles et d'autre part d'instrument de validation au travers d'une phase intensive d'observation cachée (période de trois jours durant laquelle l'ensemble des mesures obtenues reste caché afin d'être comparés ultérieurement aux résultats des modèles tridimensionnels). Ce dispositif devrait également permettre d'étudier, dans le cadre de programmes de recherche annexes (PNCA, Programmes Nationaux de Chimie Atmosphérique), la structure verticale de l'atmosphère ainsi que sa dynamique (stratification de la concentration en ozone, couche limite, mouvements verticaux) et son interaction avec les conditions orographiques.

3.6.2 Moyens utilisés

L'INERIS a eu en charge d'une part deux LIDAR (le LIDAR angulaire INERIS et le profiler vertical d'ozone), d'autre part a coordonné le contrôle qualité des moyens de mesures de l'ozone (capteurs et mesures en altitudes) et enfin a assuré la coordination des moyens LIDAR présents lors de cette campagne. Pour notre part deux LIDAR étaient donc sous notre responsabilité :

- Le LIDAR angulaire INERIS puis son remplaçant, suite à sa détérioration complète par un incendie : le LIDAR angulaire UCLO au terme d'une collaboration entre l'INERIS et l'Université du Littoral Côte d'Opale.
- Le LIDAR profiler vertical d'ozone mis à disposition par la société ELIGHT
- De plus, le LIDAR angulaire de BTU-COTTBUS ayant des moyens humains limités, nous a demandé de participer à la réalisation de sa campagne. Nous avons donc détaché une personne sur cet instrument, pour la durée de la campagne.

3.6.3 Coût réel associé

Il est très difficile de chiffrer le coût réel de cette campagne de mesure, compte tenu des différents objectifs poursuivis tout autant de recherche que dans le cadre du LCSQA mais également suite aux perturbations introduites par l'incendie du LIDAR angulaire INERIS dans la mise en œuvre des différents moyens humains et techniques. Néanmoins, une première évaluation nous permet d'avancer les coûts suivants :

- Coût de campagne du profiler vertical d'ozone : 30 000 € traitement inclus
- Coût de campagne du LIDAR angulaire INERIS : 60 000 € traitement inclus
- Coût de la participation INERIS dans le LIDAR BTU : 20 000 €
- Coût de la logistique associée à la coordination des LIDAR : 20 000 €
- Coût associé à la coordination et la réalisation du contrôle qualité ozone : 20 000 €

Le problème de l'évaluation exacte du coût global est récurrent sur les campagnes LIDAR. En effet, la qualité de données ainsi que la campagne elle-même, peuvent généralement induire un traitement complémentaire des données, dans un but de valorisation ou plus largement dans le cadre de programmes de recherche résultant de cette campagne.

3.6.4 Résultats obtenus

Des profils angulaires et verticaux de concentration en ozone ont été obtenus sur une période de 1 mois, avec un taux de données global supérieur à 90% et un taux de données validées supérieur à 80%. Ces données serviront pour certaines de support de paramétrage des modèles photochimiques et, dans le cas d'une période cachée, d'instrument de validations de ces modèles. De plus les profils d'extinction atmosphériques ont permis d'accéder à la dynamique de la couche limite, données essentielles en matière de modélisation, et serviront donc de support de paramétrage des modèles météorologiques.

3.6.5 Conclusion sur l'apport du LIDAR dans cette étude

Bien qu'ayant un coût très élevé, cette campagne a permis de fournir des résultats essentiels à une meilleure compréhension de la dynamique photochimique de l'ozone ainsi que de sa structure verticale. La qualité des données obtenues permet de conclure sur l'utilité de tels instruments dans cette campagne de validation de modèles photochimiques. La comparaison des deux moyens utilisés par l'INERIS lors de cette campagne nous a montré que, sur de longues périodes, le profiler vertical d'ozone permettait de fournir des données de très bonne qualité à un coût faible. Enfin, le contrôle qualité des mesures d'ozone nécessaire à la création d'une base de données cohérentes, incluant les analyseurs, les avions, les radiosondages et les LIDAR, a permis de mieux comprendre les écarts rencontrés entre ces différents moyens de mesurage de l'ozone en soulignant les avantages, les limitations et les conditions d'utilisation de ces instruments.

4. RETOUR D'EXPERIENCE, APPLICATIONS D'UN LIDAR

4.1 PARAMETRAGE ET VALIDATION DE MODELES PHOTOCHEMIQUES O₃ ET MISE EN EVIDENCE DES INCLUSIONS STRATOSPHERIQUES D'O₃

Les différentes campagnes réalisées ont été ou bien de courte durée (3 jours) ou très longues (1 mois). Durant ces périodes, les LIDAR ont fourni des profils verticaux de concentration en ozone et d'extinction atmosphérique, avec une résolution temporelle de l'ordre de 15 minutes.

La qualité des données obtenues et l'information qu'ils furent à même d'apporter en font des instruments optimisés pour ces types d'études. En effet, ils présentent l'avantage majeur de pouvoir fournir des données en altitude, à des coûts très inférieurs aux moyens aéroportés, pour une qualité de données au moins identique.

Le profiler vertical d'ozone, tout autant que le LIDAR angulaire multi-polluants, sont à même de fournir cette information, pour une qualité de résultats quasi-identique. Néanmoins les coûts de campagnes associés à ces deux instruments sont très différents. Ainsi, à titre d'exemple, le coût de campagne associé à 3 jours de mesures intensives avec les LIDAR angulaires reposant sur une technologie Titane-Saphir, permet de fournir un mois de mesures avec le profiler vertical d'ozone ou un LIDAR angulaire reposant sur une technologie Nd-Yag (LIDAR angulaire INERIS prévu pour fin 2002).

Parallèlement à ceci, les différents organismes développant des modèles à mésoéchelles jugent utile de paramétrer et de valider ces modèles sur différentes situations météorologiques.

De même, les différents organismes étudiant les phénomènes d'inclusions stratosphériques s'accordent à dire que de tels phénomènes sont délicats à prévoir et qu'il est donc nécessaire de les étudier sur des temps longs

Ceci pourrait être réalisé suivant les grandes lignes suivantes:

- Matériel : Profiler d'ozone vertical ou LIDAR angulaire INERIS 2002
- Mesures : 2 périodes de 15 jours de mesures en continu (24h/24) réparties d'une part en été et d'autre part en hiver
- Coûts de campagne : environ 40 000 € à 50 000 € suivant l'instrument utilisé
- Données fournies : Profils verticaux d'ozone et d'extinction atmosphérique, avec une résolution temporelle de 15 minutes. L'altitude des mesures dépendra de l'instrument utilisé (2 500 m dans le cas du Profiler vertical, et 4 500 m dans le cas du nouveau LIDAR de l'INERIS).

Nous privilégierons bien entendu les instruments permettant de fournir des profils verticaux jusqu'à la troposphère libre, afin de pouvoir suivre l'inclusion stratosphérique avant son entrée dans la couche limite urbaine. Ainsi par exemple, le LA-CNRS associé à Météo France va réaliser une campagne LIDAR avec l'INERIS, en suivant le schéma de campagne décrit ci-dessus. L'objectif sera de fournir une information quantitative sur le profil vertical d'ozone, depuis le sol jusqu'en troposphère libre, en instrumentant le Pic du Midi, afin de mieux comprendre les inclusions stratosphériques et pour permettre de valider le modèle MOCAGE sur ces situations particulières

4.2 PARAMETRAGE ET VALIDATION DE MODELES URBAINS (O₃, NO₂, BTX)

Les différentes campagnes réalisées ont été ou bien de courte durée (3 jours) ou très longues (1 mois). Les résultats obtenus montrent la faisabilité d'une telle étude, mais également les limitations, notamment dans le cas des polluants benzène et toluène pour les LIDAR angulaires utilisant une technologie laser reposant sur un Titane-Saphir.

Durant ces périodes, les LIDAR ont eu à fournir des profils angulaires de concentration en polluants gazeux et d'extinction atmosphérique, avec une résolution temporelle de l'ordre de 15 minutes, sur des distances de plusieurs kilomètres. Les LIDAR angulaires multi-polluants sont à même de fournir cette information en créant une cartographie tridimensionnelle sur des échelles comparables aux modèles utilisés. Néanmoins les coûts de campagnes associés à ces instruments sont encore élevés à l'heure actuelle, ne permettant pas réellement d'études sur des temps supérieurs à quelques jours.

Parallèlement à ceci, les différents organismes travaillant sur les modèles urbains, de quartiers ou bien encore de rues, souhaitent effectuer des paramétrages et des validations lors de conditions très spécifiques.

Ceci pourrait être réalisé suivant les grandes lignes suivantes :

- Matériel : LIDAR angulaire multi-polluants
- Mesures : 3 périodes de 5 journées de mesures à raison de 10 heures quotidiennes dont au moins une nuit, étalées sur différentes conditions météorologiques.
- Polluants mesurés : SO₂, NO₂ et O₃ pour les LIDAR angulaire utilisant une technologie Titane-Saphir et SO₂, NO₂, O₃ et BTX, pour le prochain LIDAR angulaire de l'INERIS, qui compte tenu de ses spécifications particulières, devrait permettre un suivi des BTX à l'air ambiant et notamment à l'échelle de la rue.
- Coûts de campagne : environ 60 000 € à 70 000 € suivant l'instrument utilisé
- Données fournies : Profils angulaires de concentration en polluants gazeux avec une résolution spatiale inférieure à 200 m et une résolution temporelle de 5 à 15 minutes (5 minutes dans le cas d'une validation de modèle de rue).

4.3 PARAMETRAGE, VALIDATION DE MODELES DISPERSIFS (NO₂, SO₂, BTX)

Seule une campagne a été réalisée en France, de courte durée (5 jours). Elle a permis de fournir uniquement des conclusions limitées sur l'apport d'un tel instrument dans la validation d'un modèle dispersif. En effet, un suivi de SO₂ fut effectué dans un incinérateur d'ordure ménagère de dernière génération. Les taux rejetés furent en dessous de la limite de détection de l'instrument, nécessitant l'injection d'un gaz traceur (SO₂), afin de mener à bien cette campagne.

Néanmoins, de nombreuses autres études ont été réalisées (Allemagne, République tchèque et Grèce) qui ont montré la faisabilité du suivi d'un panache d'émission de SO₂, dans le cas d'une raffinerie ou d'une unité thermique collective (chaufferie industrielle).

Durant ces campagnes, les LIDAR ont eu à fournir des profils angulaires de concentration en polluants gazeux, avec une résolution temporelle aussi fine que possible. Les LIDAR angulaires multi-polluants sont plus à même de fournir cette information en créant une cartographie tridimensionnelle de suivi de panache. Néanmoins les coûts de campagnes associés à ces instruments sont encore élevés à l'heure actuelle, ne permettant pas réellement d'études sur des temps supérieurs à quelques jours.

Parallèlement à ceci, les différents organismes travaillant sur les modèles dispersifs, souhaitent essentiellement effectuer des paramétrages et des validations lors de conditions très spécifiques, et notamment d'accéder aux paramètres d'expansion et de sur-hauteur d'un panache. D'autre part, le suivi de panache impose une très grande stabilité de ce dernier sur des échelles de temps de l'ordre de plusieurs minutes, afin d'obtenir des données de qualité suffisante. Nous proposons donc le plan de campagne suivant :

- Matériel : LIDAR angulaire multi-polluants
- Industries concernées : gros émetteurs de SO₂ ou NO₂ tels que le raffinage et les complexes pétrochimiques, unités thermiques,... En revanche l'expérience réalisée sur un incinérateur d'ordure ménagère a montré les limites d'utilisation de la technique LIDAR.
- Mesures : 1 période de 5 jours à raison de 10 heures quotidiens, en privilégiant des conditions météorologiques dominantes et où le panache est très stable.
- Polluants mesurés : SO₂ et NO₂ pour les LIDAR angulaire utilisant une technologie Titane-Saphir et SO₂, NO₂ et BTX, pour le prochain LIDAR angulaire de l'INERIS, qui compte tenu de ses spécifications particulières, permet un suivi du benzène et du toluène à l'émission, tout autant qu'à l'air ambiant.
- Coûts de campagne : environ 30 000 € à 40 000 € suivant l'instrument utilisé
- Données fournies : Profils angulaires de concentration en polluants gazeux, avec une résolution spatiale verticale inférieure à 5 m et une résolution temporelle inférieure à 5 minutes. Une telle mesure permet alors de fournir précisément la sur-hauteur et la dispersion verticale d'un panache.

4.4 LOCALISATION ET IMPACT D'UNE EMISSION DIFFUSE (BTX, MERCURE, ET CERTAINS POLLUANTS SPECIFIQUES)

Aucune campagne n'a encore été réalisée en France sur ce sujet. Néanmoins la faisabilité a été démontrée dans le cas de zones de stockage de produits pétrolier (Chili), en permettant une localisation précise des émissions de toluène issues de différentes cuves de stockage d'essence sans plomb.

Parallèlement à ceci, de nombreux industriels ainsi que des organismes travaillant sur la modélisation des émissions diffuses et de leur dispersion, souhaitent accéder à une information quantitative sur ce sujet, afin de paramétrer et ensuite de valider des modèles adaptés. Pour ce faire, il est important de pouvoir leur fournir cette information, de manière précise, dans une condition météorologique donnée. Nous proposons donc le plan de campagne suivant :

- Matériel : LIDAR angulaire multi-polluants
- Mesures : 1 période de 5 journées de mesures à raison de 10 heures quotidiennes dont au moins une nuit de mesures.
- Polluants mesurés : Benzène et Toluène dans le cadre d'applications commerciales, et vraisemblablement de nombreux autres polluants tels que le mercure, le cadmium ou bien encore le plomb à l'état gazeux dans le cadre d'applications de recherche visant à développer l'applicatif LIDAR à la surveillance des sites industriels. En effet, ces polluants possèdent un spectre d'absorption présentant des raies atomiques sur la gamme UV, garantissant des sections efficaces d'absorptions importantes démontrant la faisabilité de leur mesurage.
- Coûts de campagne : environ 30 000 € à 40 000 € suivant l'instrument utilisé, dans le cadre d'applications commerciales, donc sur les polluants benzène et toluène.
- Données fournies : cartographie horizontale ou/et verticale de sites industriels, permettant de localiser des émissions diffuses, avec une résolution spatiale de 50 m et une résolution temporelle d'environ 15 minutes

De même l'INERIS a engagé un programme de recherche sur la caractérisation des émissions diffuses industrielles et notamment concernant le cas particulier des particules. Ainsi, le LIDAR de l'INERIS sera modifié à terme, afin de pouvoir fournir une caractérisation quantitative des émissions diffuses d'aérosols industriels (spatialisation de la concentration, de la distribution de taille et de la composition chimique). Une fois ce projet mené à bien, une extension aux cas de certaines émissions diffuses d'aérosols urbains sera envisagée.

5. 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.

Néanmoins, 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 être effectuées. 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 de 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.

LISTE DES ANNEXES

| Repère | Désignation précise | Nb pages |
|--------|---|----------|
| 1 | Contrôle qualité des mesures en altitudes lors de ESCOMPTE Inter comparaison de différentes techniques de mesurage de l’ozone, préalablement calibrées et le cas échéant raccordées LIDAR, Avions, Radiosondages et ULM | |
| 2 | Campagne LIDAR ESCOMPTE 2001 Compte rendu des 5 LIDAR présents : campagne réalisée, localisation, taux de fonctionnement, qualité des données. Conclusion sur l’apport des LIDAR durant ESCOMPTE 2001 | |
| 4 | Fiche technique du Profiler Vertical d’Ozone distribué par ELIGHT | 2 |
| 3 | Contrôle qualité des analyseurs d’ozone et d’oxydes d’azote Calibrages des analyseurs NO _x et raccordement Calibrage des analyseurs O ₃ et raccordement Parc concerné : AASQA, laboratoire mobiles, avions | 3 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

ANNEXE 1

Annexe 1: contrôle qualité des mesures d'ozone en altitude lors de la campagne ESCOMPTE

(LIDAR, Avions, Radiosondages, ULM)

Annexe 1 : contrôle qualité et inter comparaisons des LIDAR, des avions et des radiosondages

Site d'Aix les Milles, 05-10 juin 2001

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la campagne ESCOMPTE, des mesures d'ozone ont été réalisées par de nombreuses équipes avec différents moyens (analyseurs installés en station, en laboratoire mobile ou embarqués dans des avions, des radiosondages et des moyens de télédétection utilisant la technique LIDAR). L'INERIS a été chargée d'organiser des inter comparaison entre les différents moyens de mesurage de l'ozone, de manière à vérifier la cohérence entre les résultats obtenus, étape préalable indispensable en vu de la construction d'une base de données globale.

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. Cette technique est donc incompatible avec certains principes de calibrage en vigueur. Ainsi par exemple, le zéro absolu d'une mesure n'existe pas et ne peut être défini par avance (car il évolue d'une mesure à l'autre, en fonction de la stabilité atmosphérique), seul le zéro relatif a un sens. De même la sensibilité ne peut être réglée par avance car elle évolue en fonction de la distance de mesure, du temps d'intégration, et de la stabilité atmosphérique

D'autre part les capteurs fonctionnant par absorption UV sont très largement utilisés dans les réseaux, les unités mobiles ou bien encore en tant que système embarqué dans des avions. Ces capteurs possèdent des méthodes précises de définition du zéro, de calcul de la réponse du système et d'évaluation de la sensibilité de l'appareil. Ces méthodes ponctuelles utilisent également comme support de calibrage un générateur d'ozone de référence (NIST) qui ne peut être utilisé dans le cas de systèmes à long trajet optique.

Enfin, les sondes électrochimiques qui équipent le ballons plafonnant ou les ballons de radiosondage, utilisent des procédures très particulières de calibrage chimique.

On constate donc qu'il existe principalement quatre méthodes de mesurage de l'ozone, reposant sur des référentiels qui leur sont propres. Il est donc fondamental de pouvoir les comparer entre elles et d'évaluer leurs performances et leur domaine d'action, avant d'effectuer une large campagne de mesure aboutissant à une base de données créée en utilisant ces diverses techniques de mesurage de l'ozone.

Cette période d'inter comparaison a été mise en place et coordonnée par l'INERIS.

2. OBJECTIFS DE CE CONTROLE QUALITE DES MESURES O₃ EN ALTITUDES

Le but de cette campagne de contrôle qualité était d'effectuer d'une part un calibrage et une inter comparaison entre 4 systèmes LIDAR mais également un raccordement et une inter comparaison entre 3 systèmes de mesurage de l'ozone (LIDAR, capteur à absorption UV et sonde électrochimique), ayant préalablement été évalués selon leur propre méthode de calibrage. Cette campagne devait d'autre part, tenter de comprendre les écarts qui ont été mis en évidence antérieurement entre les différentes techniques de mesure.

Pour ce faire nous devons définir tout d'abord une procédure de calibrage des différentes méthodes, un choix précis de traitement à effectuer sur les données brutes puis une méthodologie d'inter comparaison des résultats obtenus par ces différents systèmes et enfin effectuer une interprétation, au regard des nombreuses mesures complémentaires telles que les paramètres météorologiques, l'extinction atmosphérique ou bien encore la concentration, le nombre (CNC TSI) et la taille (Grimm) des aérosols présents.

3. MOYENS MIS EN ŒUVRES

3.1 INSTRUMENTS DE TYPES LIDAR

5 LIDAR ont participé à la campagne ESCOMPTE. Néanmoins des contraintes d'ordres techniques n'ont pas permis à tous les LIDAR d'être présents à cette période de contrôle qualité. Ainsi, les LIDAR présents étaient les suivants :

- INERIS : LIDAR Angulaire de type ELIGHT 510M 3^{ème} génération
- INERIS : LIDAR Vertical ELIGHT
- SA-INSU (Service d'Aéronomie du CNRS) : LIDAR Vertical ALTO

Le LIDAR de l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), nécessitant un camion grue pour son installation, n'a pas effectué le déplacement depuis son site de mesure, jusqu'au site d'Aix les Milles où s'est effectuée cette inter comparaison. De même, le LIDAR de BTU-COTTBUS (Université Technique de Cottbus), arrivant du Nord de l'Allemagne par convoi spécifique, n'a pas été présent à cette inter comparaison. On signalera néanmoins que ce dernier a effectué son propre contrôle qualité, comme convenu dans le cadre du programme ESCOMPTE : les équipes allemandes se devaient en effet d'effectuer leurs propres calibrages et raccordements de tous leurs instruments.

3.2 MOYENS AEROPORTES

- JUNKERMAN IFU (Institut Atmosphärische Umweltforschung-Garmish-Partenkirchen, Allemagne) : avion de type ULM équipé de nombreux capteurs (T, P, J_{NO2}, J_{O1D}, Capteur O₃, CNC, TSI, GRIMM...)
- INSU (Institut Nationale des Sciences de l'Univers) : Avion ARAT équipé de nombreux capteurs, qui a effectué un vol d'inter comparaison le 6 Juin lors du transfert vers son site d'attente à Avignon
- CAM-CNRM (Centre Nationale de Recherche Météorologique) : Avion Merlin équipé de nombreux capteurs, qui a effectué un vol d'inter comparaison le 6 Juin lors du transfert vers son site d'attente à Avignon

- CAM-CNRM : Avion PIPER équipé de nombreux capteurs, qui a effectué un vol d'inter comparaison le 6 Juin lors du transfert vers son site d'attente à Avignon

3.3 SONDES O₃ ELECTROCHIMIQUES

- LA/CNRM/4M : 2 Sondes Electrochimiques Vaisala modèle RS80 : R/S
- LA/CNRM/4M : unité de calibrage sous air sec
- LA/CNRM/4M : module de température et de pression couplé à la sonde.

3.4 MOYENS ANNEXES DE RACCORDEMENT ET DE CALIBRAGE

- INERIS : cellules de calibrage LIDAR et un générateur d'O₃ haute concentration, permettant le cas échéant, d'effectuer un calibrage plus précis des LIDAR (en suivant le protocole mis en place à l'INERIS)
- INERIS : capteurs de Température et de Pression certifiés par le LNE, permettant d'évaluer et de raccorder les capteurs de température et de pression présents dans les analyseurs d'ozone fonctionnant par absorption UV.
- INERIS : capteur O₃ et NO_x raccordés, embarqué dans le LIDAR
- INERIS : générateur d'ozone : ThermoEnv. 49PS fonctionnant sous air sec, permettant d'effectuer un raccordement des analyseurs d'ozone fonctionnant par absorption UV ainsi que des sondes O₃ électrochimiques. Cet instrument fut préalablement raccordé à la référence du LNE (photomètre NIST).

Il faut souligner que cette inter comparaison entre différentes techniques de mesurage de l'Ozone, se fait à partir de données sans qu'aucune mesure puisse être définie comme de référence. En effet, s'il est avéré que les capteurs à absorption UV sont dits de référence au sol, cela n'a pas encore été montré en altitude, notamment lorsque l'influence de l'humidité, de la température et de la pression deviennent primordiales, comme l'a souligné le QAQC Chimie effectué sur la Base militaire d'Avignon.

4. SITUATION METEOROLOGIQUE ET PLANNING REALISE

Des inter comparaisons LIDAR-AVIONS ont déjà été effectuées à Berlin en 2000 au cours de la campagne allemande BERLIOZ 2 (intitulée OLAC). Cette campagne, de large envergure utilisait également des mesures optiques d'aérosols (nephelomètre, retro diffusion sur plusieurs canaux LIDAR). Elle a montré que la présence d'une forte concentration en aérosols pouvait être la principale cause d'écarts entre les données LIDAR et celles fournies par les avions. Dans notre cas, compte tenu des connaissances dans ce domaine, nous avons décidé d'un commun accord entre les différents partenaires, de négliger l'influence des aérosols, n'ayant pas d'algorithme de prise en compte des aérosols qui soit validé. Ainsi il est probable que des écarts apparaissent entre les mesures LIDAR et les autres techniques de mesure, lors de situation météorologiques de type smog. Notre souci était de comparer des techniques entre elles, avec comme principale priorité un contrôle total sur la qualité des mesures. Insérer un algorithme non reconnu, aurait pu induire un rajout d'incertitude sur la mesure qui était non contrôlable. Un choix optimisé de conditions atmosphériques pouvait en revanche limiter cette influence des aérosols.

Nous avons donc effectué ce QAQC LIDAR, en essayant le plus possible de se rapprocher de la situation météorologique suivante :

- Absence d'une couverture nuageuse afin de ne pas limiter la portée des LIDAR
- Concentration moyenne en ozone de l'ordre de $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ afin d'avoir une portée LIDAR qui soit grande (2500m pour le Profiler ELIGHT, 3500m pour les deux LIDAR angulaire et 5000m pour le LIDAR ALTO) avec une précision de mesure qui reste très correcte (environ 5 à 10%).
- Vent faible à modéré afin de conserver une stabilité atmosphérique autorisant une intégration temporelle de l'ordre de 30 minutes. Une situation de vent faible serait recherchée si l'on effectue également des lâchers de ballons (RadioSondages).

Dans la pratique, la journée d'inter comparaison entre les avions et les LIDAR a été décidée le 6 juin 2001, date du transfert des avions depuis leurs lieux de résidences, vers leur base d'attente pour la campagne ESCOMPTE, indépendamment des conditions météorologiques, du fait des contraintes techniques et financières liées à cette mise en comparaison.

Nous retiendrons que fort heureusement les conditions météorologiques, bien que dominées par un vent fort le 6 juin (ayant entraîné la perte d'un ballon de radio sondage), furent idéales le 7 juin et ont donc permis d'effectuer cette mise en comparaison dans des conditions optimales.

Le planning a donc été le suivant :

| Date | Calibrage LIDAR | Mesures LIDAR | Radio Sondages | Vols avions | Raccordements NIST |
|---------|-----------------|---------------|----------------|-------------|--------------------|
| 04-juin | | | | | |
| 05-juin | | | | | |
| 06-juin | | | | | |
| 07-juin | | | | | |
| 08-juin | | | | | |

Calibrage : protocole simplifié de calibrage des différents LIDAR

Mesures : effectués en simultané entre les différents instruments, dans la mesure du possible

Raccordement NIST : effectués sur l'analyseur embarqué dans l'ULM et sur les sondes O₃ électrochimiques de radio sondage.

5. CALIBRAGE DES LIDAR ET RESULTATS OBTENUS

Une procédure d'évaluation des systèmes à long trajet optique LIDAR a été développée à l'INERIS, afin d'obtenir leurs caractéristiques (rapport d'avancement BCRD sur le NO₂, rapports LCSQA sur le SO₂, l'O₃, le Benzène et le Toluène) :

- Linéarité ou courbe de réponse (Norme X20-300)
- Seuils de détection et de quantification suivant trois méthodes dont la norme X20-300
- Reproductibilité
- Influence des interférents chimiques (Gazeux)
- Portée du système

Il n'était pas question d'effectuer l'évaluation préconisée par l'INERIS sur tous les systèmes de mesure LIDAR présents lors de la campagne ESCOMPTE car cette procédure n'étant pas uniquement un QAQC, elle s'apparente plus à une phase dite « Type Approval » et nécessite donc des périodes de mesure s'étalant sur plusieurs semaines.

Cette période devait en revanche permettre, au travers d'un QAQC LIDAR, d'effectuer une inter comparaison de systèmes LIDAR ayant préalablement été calibrés par chacune des équipes. Pour se faire une évaluation simplifiée des chaque LIDAR devait être faite par chaque équipe, préalablement à la campagne d'inter comparaison, suivant le protocole décrit ci-dessous.

5.1 CALIBRAGE DES LONGUEURS D'ONDES

5.1.1 Méthodologie

- INERIS, COTTBUS et ELIGHT : il peut être effectué par une comparaison des longueurs d'ondes LIDAR choisies, avec celles fournies par une lampe : comparaison des spectres et calage des longueurs d'ondes LIDAR vis à vis des raies d'une lampes Argon (galvatron). Ce calibrage a été effectué quotidiennement durant toute la période de QAQC LIDAR et deux fois par jour durant la période d'inter comparaison.
- ALTO : l'obtention de la longueur d'onde « off » est faite à partir des décalages Raman D₂ (1^{ère} raie Stokes à 289nm) de la quadruplée du Yag (266nm). Cette longueur d'onde est donc fixe et le rendement est fonction principalement de la concentration en gaz, de la température et de la pression dans la cellule, qui doivent donc être suivies très précisément.

5.1.2 Résultats obtenus

Les différents calibrages, effectués plusieurs fois par jours au cours de cette période d'inter comparaison, ont montré une dérive en longueur d'onde inférieure à 0,05 nm. Or, le spectre d'absorption de l'ozone dans l'UV est qualifié de spectre à bandes larges où une variation de 0,05 nm sur la longueur d'onde entraîne une incertitude inférieure à 1% sur la mesure. Cette variation de longueur d'onde, dans le cas de LIDAR INERIS, est principalement issue d'une variation thermique du laser générée par une brusque variation de la température extérieure, qui apparaissaient essentiellement en début et fin de journée.

De plus, ce calibrage étant effectué préalablement et successivement à toute mesure, toute variation de longueur d'onde fut donc prise en compte sur le traitement des données LIDAR.

Ainsi on retiendra que les calibrages en longueur d'onde ont été effectué conformément à la méthodologie citée ci-dessus, garantissant ainsi une incertitude de mesure liée au calibrage en longueur d'onde, inférieure à 1%.

5.2 CALIBRAGE DE LA REPONSE LIDAR

5.2.1 Méthodologie

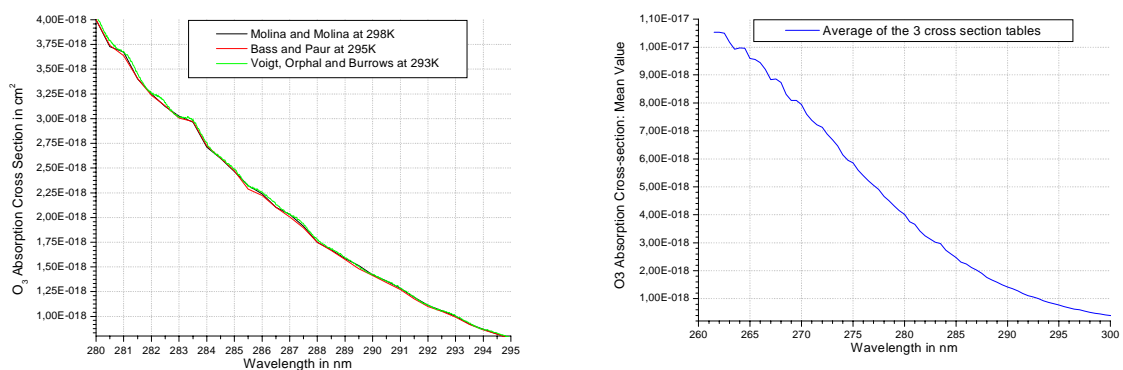
Une fois les longueurs d'ondes définies, il était essentiel de quantifier la section efficace différentielle vis à vis d'une table (spectre d'absorption de l'ozone). En effet la réponse des appareils optiques est directement proportionnelle à cette section efficace d'absorption, au même titre que les instruments DOAS ou bien encore les analyseurs à absorption UV. Il était donc important que la table de calcul de cette section efficace différentielle, soit identique pour l'ensemble des LIDAR présents lors de l'inter comparaison.

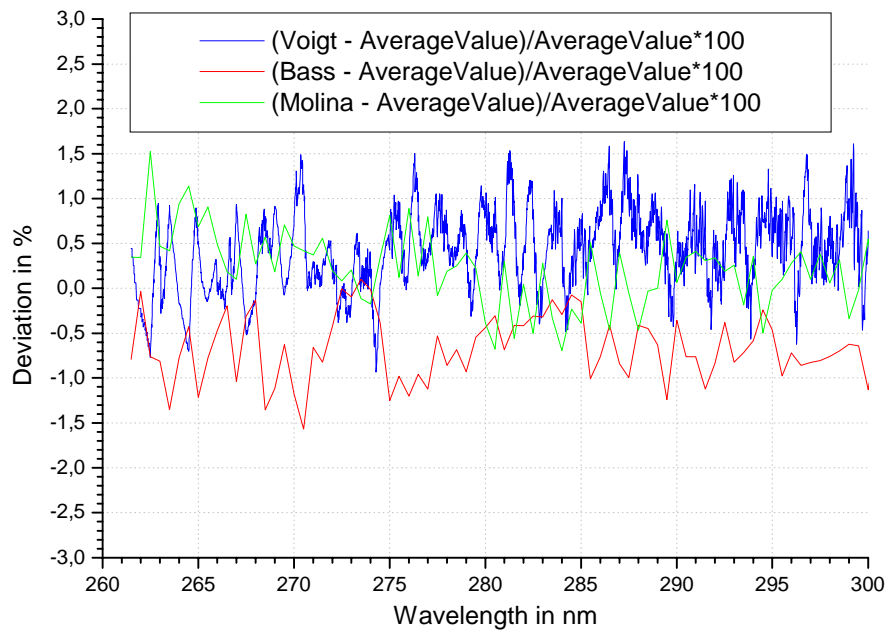
5.2.2 Résultats obtenus

On devait se fonder sur l'utilisation de tables des sections efficaces d'absorption, mesurées très précisément par :

- 1995 par l'IEP de l'université de Bremen (Voigt, Orphal et Burrows).
ESA 11340/95/NL/CN UV - 293 K, 100 mbar total pressure*
- 1981 par l'INIST et l'US EPA (Bass et Paur).
O3 Absorption Cross-sections, 295 K, Pers. Comm. (1981)
- 1986 par Molina et Molina.
O3 Abs. Cross-sect., at 298 K, J. Geo. Res. 91 (1986)

La figure ci-dessous montre les différentes sections efficaces obtenues, sur la gamme de longueur d'onde considérée, ainsi que l'écart relatif constaté, vis à vis de la valeur moyenne des trois tables citées précédemment. On observe que cet écart reste inférieur à 2% sur la gamme 260-300nm. Ainsi les différences constatées entre les différents couples de longueurs d'ondes, compte tenu du choix entre les trois tables d'absorption, entraîneront une erreur relative qui restera inférieure à 4%. En effet chaque section efficace différentielle possédera une erreur vis à vis de la valeur moyenne de 4% au maximum.





Application au différents couples choisis par les équipes LIDAR : le tableau ci-dessous montre les différents choix de table et couples de longueurs d’ondes, en les comparant vis à vis de la valeur obtenue sur la table moyenne (figure ci-dessus) :

| | Table choisie | λ_{on} (nm) | λ_{off} (nm) | $\Delta\sigma \cdot 10^{-18}$ Voigt | $\Delta\sigma \cdot 10^{-18}$ Bass | $\Delta\sigma \cdot 10^{-18}$ Molina | $\Delta\sigma \cdot 10^{-18}$ Moyen | Ecart Max % ($\Delta\sigma_{min} - \Delta\sigma_{Max}$) |
|--------|---------------|---------------------|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|
| INERIS | Voigt | 282,4 | 286,3 | 0,99 | 1,04 | 0,99 | 0,98 | 1% |
| BTU | Bass | 282,4 | 286,3 | 0,99 | 1,04 | 0,99 | 0,98 | 6% |
| ALTO | Molina | 266,0 | 289,0 | 7,85 | 7,82 | 7,90 | 7,86 | 1% |
| Elight | Bass | 286,4 | 289,5 | 0,65 | 0,64 | 0,62 | 0,63 | 2% |

5.3 PORTEE DU SYSTEME ET LIMITE DE DETECTION

5.3.1 Méthodologie

Il était important que la portée du système ainsi qu’une évaluation de la limite de détection, puissent être faites quotidiennement, en choisissant les deux longueurs d’ondes égales, car par cette méthode il est alors possible d’obtenir :

- La mesure d’un offset éventuel qui invaliderait le choix des longueurs d’ondes
- La limite de détection à partir de l’étude de la déviation standard vis à vis de la concentration nulle. Cela correspond à l’évaluation de la répétabilité du système. Elle peut être faite en générale en fixant les deux longueurs d’ondes égales, mais ce n’est nullement une obligation (l’avantage majeur étant de ne dépendre que faiblement de la concentration dans l’atmosphère).
- La portée du système en étudiant l’évolution du rapport signal/bruit (ou de l’écart type) avec la distance. A pas d’intégration constant, la portée sera la distance à partir de laquelle le rapport signal/bruit (ou l’écart type) devient plus que 10 fois supérieur à la valeur calculée au niveau du point opératoire de mesure (valeur

optimale). Cette définition est en conformité avec la norme VDI-DIN 4210 relative aux instruments à long trajet optique. Elle peut être faite en fixant les deux longueurs d’ondes égales car la dépendance est faible vis à vis de la concentration dans l’atmosphère. En effet, on rappellera qu’en présence d’une forte concentration en ozone, la portée du système LIDAR sera réduite, car l’absorption de la longueur d’onde λ_{on} étant très forte, le rapport signal sur bruit chute très rapidement avec la distance.

5.3.2 Résultats obtenus

Les résultats obtenus, lors de cette période d’inter comparaison, ou ceux fournis par les utilisateurs sur la base de mesures précédemment réalisés (ALTO) permettent de résumer les spécifications des LIDAR dans le tableau ci-dessous :

| | Distance Mini de mesure | Portée Maxi | Résolution spatiale optimale | Résolution spatiale standard | Limite de détection | incertitude % de la Concentration |
|------------------------|-------------------------------|----------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| INERIS Lidar angulaire | 0 | 3km | 50m | 200m | 2 µg/m ³ | 5% |
| BTU Lidar angulaire | 0 | 2km | 50m | 400m | 2 µg/m ³ | 5% |
| ALTO Lidar vertical | 500m | 8km | 200m | 1000m | 2 µg/m ³ | 10% |
| INERIS Lidar vertical | 100m | 2,5km | 100m | 200m | 3 µg/m ³ | 5% |

5.4 CONCLUSION SUR LE CALIBRAGE DES LIDAR

Un calibrage simplifié des différents LIDAR a été effectué, permettant de fournir les spécifications de chacun des appareils et de garantir la qualité des mesures ainsi que leur précision associée. Cela nous a permis de montrer que tous les LIDAR possédaient des sensibilités identiques et des incertitudes inférieures à 5% pour la plupart.

En revanche la portée et la résolution est propre à chaque appareil et dépend très fortement de son mode de fonctionnement. Ainsi, les appareils effectuant des profils verticaux, ne peuvent accéder à des résolutions inférieures à 100 m, compte tenu de la faible statistique associée. Le LIDAR angulaire, en effectuant un profil vertical par moyennage horizontal de profil angulaire, augmente très fortement la statistique (le nombre de points intervenants dans une mesure) et permet donc d’accéder à une résolution spatiale de l’ordre de 50 m.

6. CALIBRAGE ET DE RACCORDEMENT DES CAPTEURS O₃ FONCTIONNANT PAR ABSORPTION UV, CAS DE L'ULM

6.1 METHODOLOGIE DE CALIBRAGE ET RACCORDEMENT

Les différents capteurs embarqués dans les moyens aéroportés devaient également être d'une part calibrés et d'autre part raccordés à un standard NIST. Ceci fut effectué sur la Base Militaire d'Avignon du 6 juin au 10 juin 2001, dans le cadre du QAQC chimie où l'INERIS encadrait également un contrôle qualité de tous les analyseurs d'ozone fonctionnant par Absorption UV (rapport en annexe). Il était en effet très important que tous ces appareils aient d'une part le même raccordement et d'autre part que les sondes de température et de pression les équipant, soient également contrôlées avec un appareil de référence.

De plus, afin d'effectuer une surveillance complète de ces analyseurs d'ozone, et notamment de celui embarqué dans l'ULM, sur le site de l'inter comparaison LIDAR-Avion-Ballons d'Aix les Milles étaient donc présents deux sondes de température et de pression raccordées ainsi qu'un générateur d'ozone basse concentration raccordé (O3 49PS TEI raccordé par le Laboratoire National d'Essais en Mai 2001).

L'analyseur d'ozone embarqué dans l'ULM a donc été raccordé à ce standard NIST, sous air sec ainsi que sous air humide, avant ainsi qu'après chaque vol, pour 3 concentrations différentes (100 µg.m⁻³, 200 µg.m⁻³ et 400 µg.m⁻³). Les capteurs de pression et de température équipant ce capteur, ont également été calibrés (à l'aide des sondes de T et P de référence, qui seront en circulation dans le cadre du QAQC Ozone).

6.2 SYNTHÈSE

Cette partie fut réalisée dans le cadre du QAQC chimie, qui s'est tenu sur la base militaire d'Avignon (cf. rapport correspondant).

Néanmoins nous analyserons plus en détail deux situations particulières qui furent d'une part l'installation de deux analyseurs d'ozone dans l'ARAT et d'autre part le double raccordement sous air sec et sous air humide de l'analyseur embarqué dans l'ULM.

6.2.1 Etalonnage des analyseurs et comparaison des mesures d'Ozone à bord de l'ARAT Fokker 27

Les différents analyseurs présents dans les avions, ont été étalonnés au travers du QAQC Ozone qui s'est déroulé sur l'aéroport d'Avignon. Néanmoins, des écarts ont subsisté entre les différents analyseurs et notamment pour les deux analyseurs embarqués dans l'ARAT. En effet, au cours de la campagne ESCOMPTE 2001, deux systèmes de mesure de la concentration en ozone ont été installés à bord de l'ARAT Fokker 27 (les deux appareils effectuent leurs prélèvements dans le même échantillon d'air par l'intermédiaire d'un bocal en surpression par rapport à la pression à l'intérieur de la cabine):

- Thermo-Electron TEI 49PS appartenant à l'INSU (49S INSU)
- Thermo-Electron TEI 49C appartenant au LISA (49C LISA)

Plusieurs calibrages ont été effectués avant et pendant la campagne, souvent en collaboration avec le CAM. Des divergences subsistent malgré les étalonnages effectués dans des situations identiques, nous permettant de fournir les constatations suivantes :

- Une dérive temporelle de l'écart de mesure des deux capteurs **49S INSU** et **49C LISA**, existe, qui peut être estimée à environ 5-6 ppb en 3 heures.
- Un biais de 3.5 ppbv subsistant après l'étalonnage qui peut provenir du protocole mis en œuvre ayant considéré des appareils totalement stabilisés en fonctionnement. L'absence d'information sur les Δt entre la mise sous tension de l'ARAT F27 et les calibrages des appareils, nous empêche de prendre une décision sur l'origine de ce biais. Les nombreux essais effectués tendent donc à montrer que le capteur **49C LISA** demande un certain temps pour se stabiliser de retour au sol.

Des études complémentaires ont mis en évidence la nécessité d'effectuer une correction sur la réponse du 49C LISA, ayant été calibré et raccordé de manière incorrecte. Ainsi on appliquera donc un facteur correctif sur les mesures de cet appareil :

$$49C \text{ LISA} : C(O_3)_{\text{réel}} = C(O_3)_{\text{appareil}} * 1,034 + 0,5918$$

6.2.2 Double raccordement sous air sec, puis sous air humide de l'analyseur d'ozone embarqué dans l'ULM

L'ULM possède un analyseur d'ozone fonctionnant par absorption UV. Il s'agit d'un appareil de type Thermo Env. modifié, qui fut tout d'abord raccordé à un standard NIST sous air humide (TEI 49PS de IFU) et fut également raccordé dans un second temps à un autre standard NIST fonctionnant sous air sec (TEI 49 PS de INERIS). Ce double raccordement a mis en évidence une dépendance de la réponse vis à vis du taux humidité présent dans l'air. En effet, nous avons constaté un écart de 8% entre ces deux raccordements.

Or, il est fondamental de pouvoir effectuer un raccordement des instruments dans un environnement qui soit le plus possible proche des conditions d'utilisation de l'appareil, à savoir pour celui-ci, sous air humide, dans la mesure où son plan de vol se situe à des altitudes où l'humidité n'est pas nulle. Nous avons donc choisi de prendre comme raccordement réel, celui effectué sous air humide.

Il est à noter que cette remarque s'applique également à l'ensemble des analyseurs d'ozone fonctionnant par absorption UV, notamment ceux effectuant des mesures au niveau du sol. Or l'ensemble des raccordement des analyseurs d'ozone fonctionnant par absorption UV s'est effectué, compte tenu de contraintes techniques, sous air sec.

7. CALIBRAGE DES SONDES O₃ ELECTROCHIMIQUES

Il s'agissait de sondes électrochimiques de type VAISALA R80, mis en œuvre par le groupe 4M du CNRM, unité de recherche de Météo France.



Figure 4 Photo d'une sonde électrochimique de mesure de l'ozone

Les sondes électrochimiques qui ont été embarquées dans les ballons de radio sondage, ont préalablement été étalonnées par les utilisateurs, puis raccordées à notre standard NIST en effectuant une inter comparaison au sol avec un générateur d'ozone NIST (TEI. 49PS), pour 3 concentrations (100 $\mu\text{g.m}^{-3}$, 200 $\mu\text{g.m}^{-3}$ et 400 $\mu\text{g.m}^{-3}$) avant et après chaque période de mesure. L'étalonnage de la sonde est long (3 heures), se fait sous air sec, et doit être répété après 2 à 3 heures d'utilisation. Ainsi les périodes d'inter comparaisons entre les différentes techniques de mesure de l'ozone, ont donc du être définies en tenant compte de cette contrainte.

8. RESULTATS POUR LA JOURNEE DU 6 JUIN 2001

8.1 VOLS DU 6 JUIN 2001

Pendant la mise en place de l'ARAT Fokker 27, une séquence de comparaison des mesures d'ozone *in situ* avec les mesures obtenues par des méthodes de télédétection à l'aide des LIDAR installés sur la base d'Aix-les-Milles a été faite. Le Merlin IV et le Piper Aztec 23 ont aussi participé à cette mise en inter comparaison. Les heures des sondages des avions au-dessus d'Aix-les-Milles le 6 juin 2001 sont données dans le tableau ci-dessous :

| Avion | heure de début | heure de fin | remarques | Analyseurs O ₃ |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|---|-------------------------------|
| MERLIN IV | 11:04:58 (39898 s) | 11:14:52 (40492 s) | sondage en montée à la verticale d'Aix | TEI 49C CAM |
| | 11:15:49 (40549 s) | 11:33:04 (41584 s) | en descente, avec retour sur Avignon | TEI 49C CAM |
| ARAT Fokker 27 | 11:24:33 (41073 s) | 11:39:20 (41960 s) | sondage en montée à la verticale d'Aix | TEI 49C LISA TEI 49PS INSU |
| | 11:40:01 (42001 s) | 11:55:00 (42900 s) | en descente, avec retour sur Avignon | TEI 49C LISA TEI 49PS INSU |
| PIPER- AZTEC 23 | 12:54:46 (46496 s) | 13:13:32 (47612 s) | sondage en montée à la verticale d'Aix | AC 31M CAM |
| | 13:13:33 (47613 s) | 13:28:45 (48525 s) | en descente, avec retour sur Avignon | AC 31M CAM |
| ULM IFU | | | Sondage en montée à la vertical d'Aix | 49C modifié IFU |
| | | | Sondage en descente à la vertical d'Aix | 49C modifié IFU |
| | | | Sondage en montée à la vertical d'Aix | 49C modifié IFU |
| | | | Sondage en descente à la vertical d'Aix | 49C modifié IFU |

Les profils verticaux obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous, où les concentrations sont exprimées en rapport de volume (ppbV).

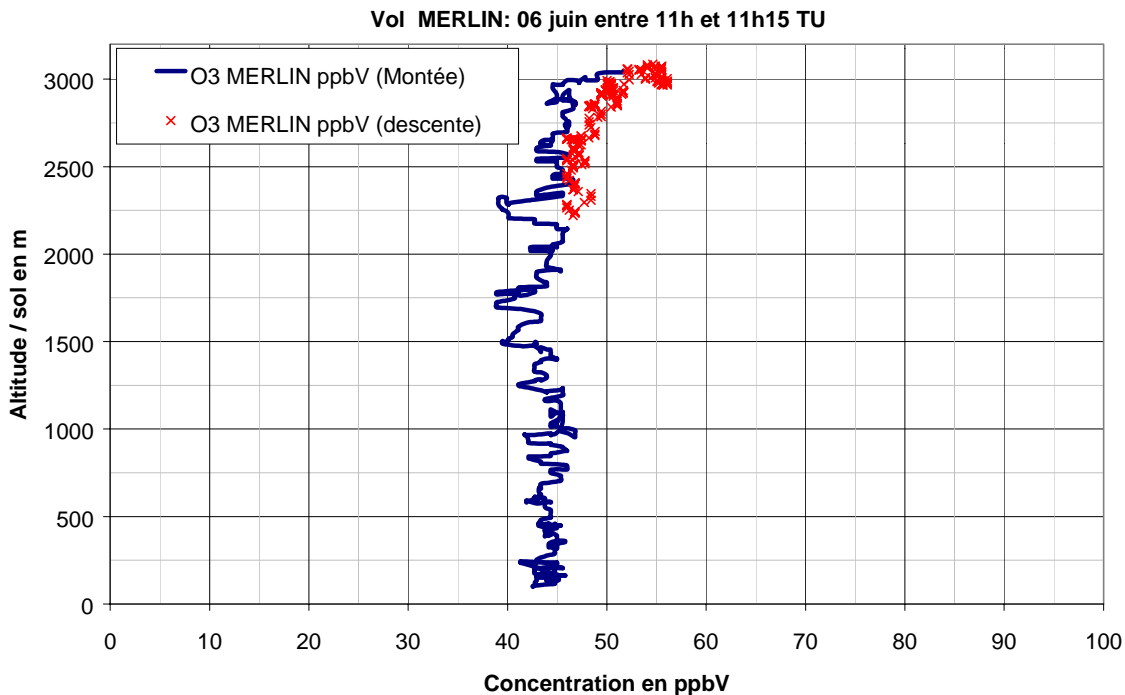


Figure 5 : Vol MERLIN effectué de 11h TU à 11h15 TU au dessus du site d'Aix les Milles

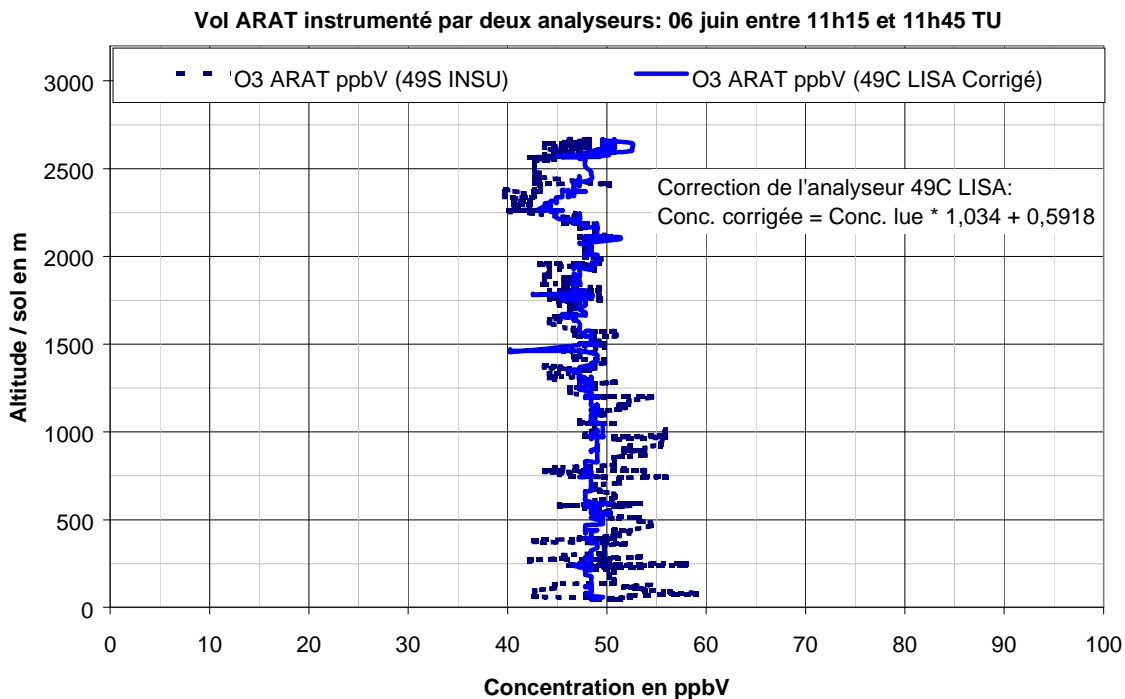


Figure 6 : Vol ARAT effectué de 11h24 TU à 11h40 TU au dessus du site d'Aix les Milles

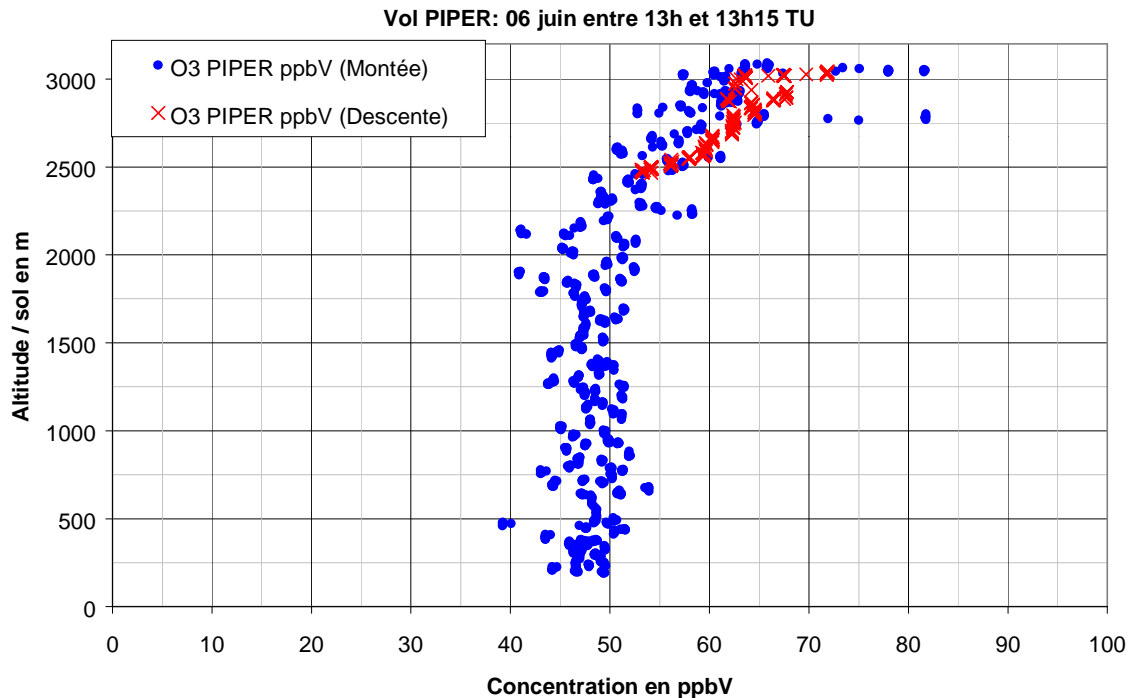


Figure 7 : Vol PIPER effectué de 13h TU à 13h15 TU au dessus du site d'Aix les Milles

Nous constatons, que bien que fournissant une concentration moyenne relativement constante entre les trois appareils, les profils de concentrations sont sensiblement différents. En effet le PIPER observe par exemple une couche de plus forte concentration en ozone au dessus de 2000 m, alors que les deux autres appareils n'observent pas cette couche. Il est néanmoins délicat de les mettre en comparaison, sachant que les profils n'ont pas été effectués au même instant. En revanche, la mise en comparaison des mesures effectuées par le PIPER et celles obtenues par le LIDAR INERIS montrera un décalage des mesures en altitudes. On notera que l'analyseur embarqué dans le PIPER est de technologie ancienne et qu'une défaillance du contrôle de la compensation en pression pourrait être à l'origine de cette erreur de mesure en altitude.

Une hystérésis des mesures est également plus ou moins présente entre les phases de montée et de descente des différents appareils, soulignant l'importance de la variation de pression sur la mesure, dans le cas d'analyseurs embarqués.

Commentaires par avion sur les profils de concentrations obtenus:

- **Merlin IV (Figure 5) :** les phases de montée et de descente sont différentes et l'écart atteint 5-6 ppbv, soit 10% de la concentration mesurée. Seule une partie de la descente est présentée, le reste du vol en descente s'étant effectué lors du retour sur Avignon.
- **PIPER PA23 (Figure 7) :** les courbes de montée et de descente sont cohérentes, avec néanmoins un profil plus bruité lors de la descente. Il est sans doute vraisemblable que la valeur de 80 ppbv à 2800 m pourrait correspondre à un artefact de mesure.

- **ARAT Fokker 27 (Figure 6)** : un défaut de calibrage avait été constaté sur l'analyseur 49C LISA car avant correction, les capteurs **49S INSU** et **49C LISA** présentaient un biais important. Le contrôle qualité chimie avait donc mis en évidence la nécessité d'effectuer une correction sur le 49C LISA. Sur ce graphique est donc représenté la mesure corrigée de cet analyseur. On observe néanmoins des écarts de mesures entre ces deux analyseurs, pouvant atteindre notamment 10 ppbV à certaines altitudes. De même la courbe du 49S INSU possède une variabilité plus importante que le 49S LISA alors que les temps d'intégrations de ces deux appareils sont identiques.

Comparaison des avions Merlin IV et ARAT (Figure 8):

- Indépendamment des remarques ci-dessus, il y a une bonne similitude entre les mesures faites par le **Merlin IV** et le capteur **49C LISA** entre le point bas et 2600 m/sol, avec un biais positif de 2-3 ppbv du **49C LISA**
- de façon symétrique, l'aspect du profil du **PA23** et celui du **49S INSU** sont très ressemblants, avec néanmoins un biais de +5 ppbV du 49S INSU.

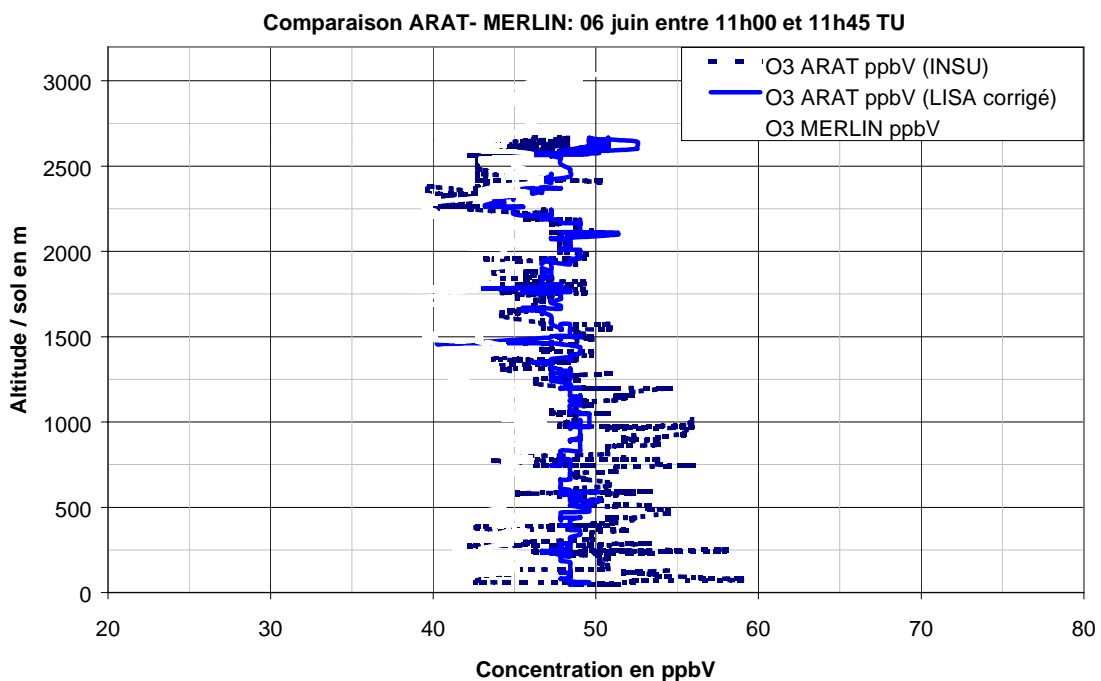


Figure 8 : Mise en comparaison des vols MERLIN et ARAT

1.1. Mesures LIDAR

Le LIDAR INERIS vertical, n'ayant pu être préparé à temps, du fait de sa livraison tardive sur le site de mesure, n'a pas pu participer à cette journée d'inter comparaison. Nous analyserons donc les résultats obtenus par :

- Le LIDAR INERIS angulaire
- Le LIDAR ALTO vertical

N'ayant pas encore reçu les données du LIDAR ALTO, il ne sera présenté que les mesures du LIDAR INERIS. Les résultats obtenus sont résumés dans la figure ci-dessous montrant le profil vertical de concentration en ozone obtenu entre 11h et 17h locale. Ce profil (Figure 9) correspond au moyennage horizontal de profils angulaires effectués toutes les 15 minutes, dont un exemple est également présenté ci-dessous (Figure 10).

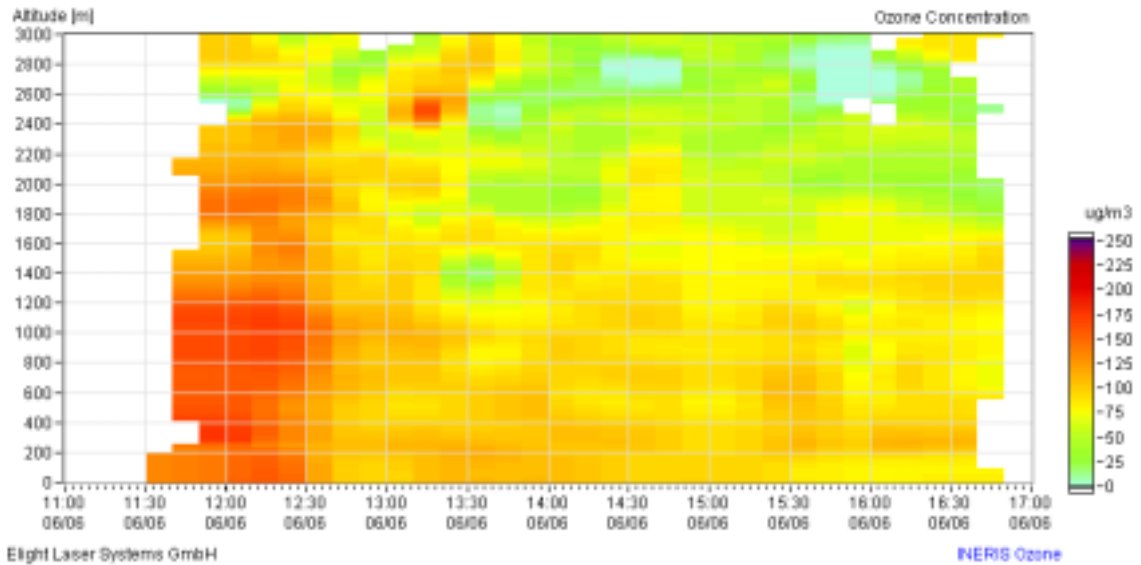


Figure 9 : Profil vertical de concentration en O₃ obtenu par le LIDAR angulaire INERIS

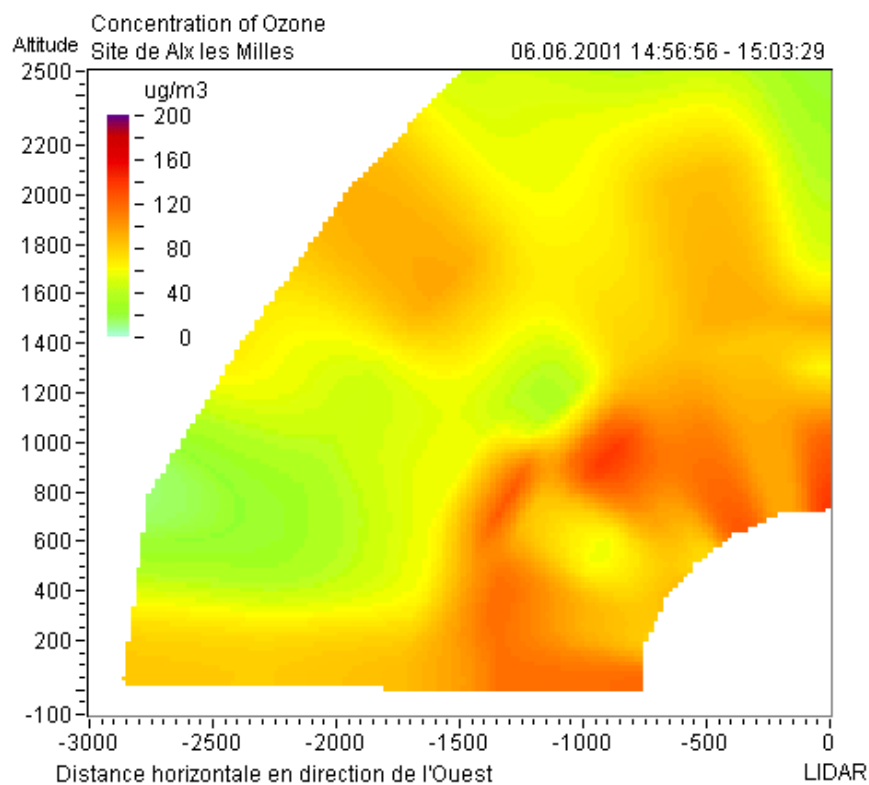


Figure 10 : Profil angulaire de concentration en O₃ du LIDAR angulaire INERIS.

8.2 MISE EN COMPARAISON DES RESULTATS AVIONS ET LIDAR

On rappellera qu'un lâcher de ballon fut effectué lors de cette journée, qui malheureusement n'a pas pu fournir de résultats exploitables (ballon et sonde endommagés après avoir heurtés un bâtiment).

Afin de mettre en comparaison les différentes mesures effectuées, une conversion des données non LIDAR devait être effectuée, afin de fournir un résultat en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réel. Pour

cela il était nécessaire de connaître les données de Pression et température en chaque point de mesure. Pour ce faire l'ULM, les avions ainsi que les ballons de radio sondage, possédaient des sondes de température et de pression. Ainsi la mise en comparaison était effectuées sur les mesures ci-dessous :

- 2 LIDAR exprimées en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réel
- 1 capteur à absorption UV embarqué dans l'ULM, converties en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réel
- 2 capteurs à absorption UV embarqués dans l'ARAT, converties en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réel
- 1 capteur à absorption UV embarqué dans le MERLIN, converties en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réel
- 1 capteur à absorption UV embarqué dans le PIPER, converties en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réel

En reportant les différents profils sur un même graphique, on obtient alors les comparaisons ci-dessous, exprimées pour chaque instrument en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réel. On a choisi de mettre en comparaison des mesures effectuées au même instant, donc en comparant chaque avion avec les profils LIDAR correspondants.

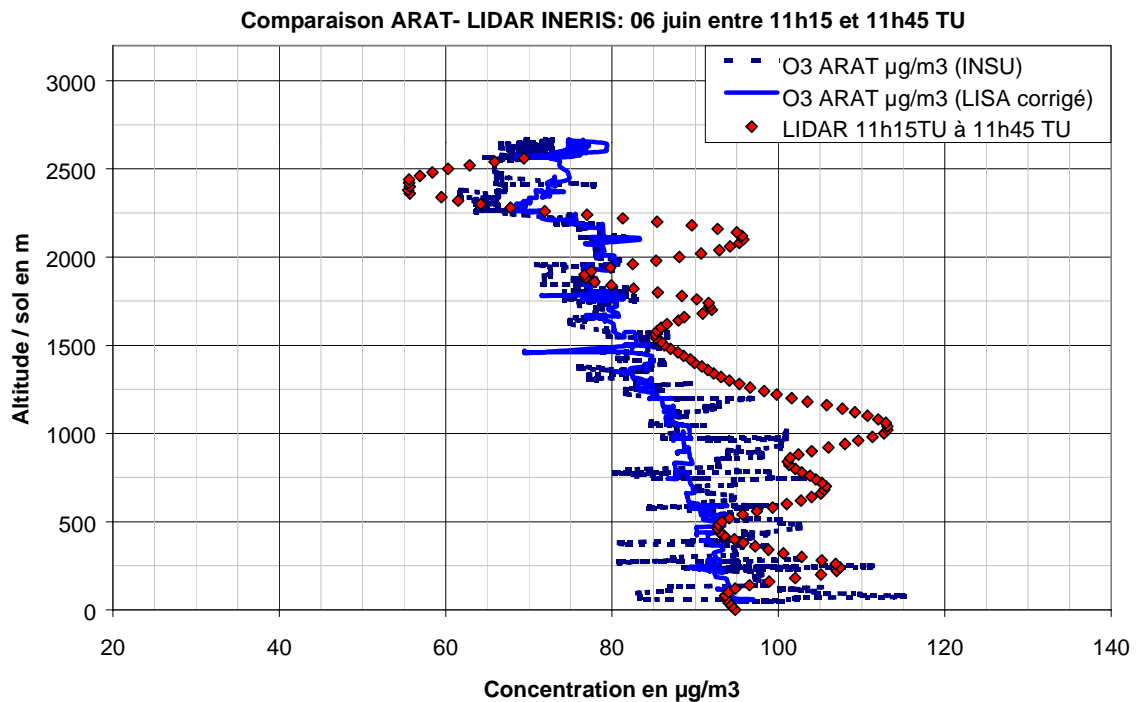


Figure 11 : Comparaison entre l'ARAT et le LIDAR INERIS

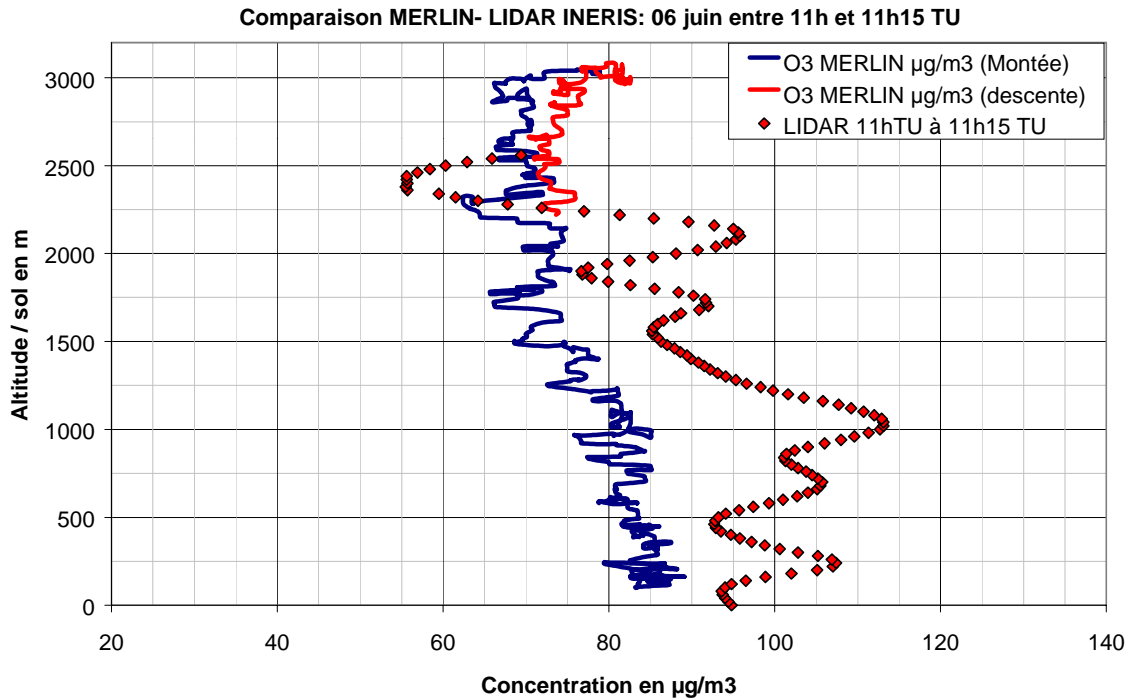


Figure 12 : Comparaison entre le MERLIN et le LIDAR INERIS

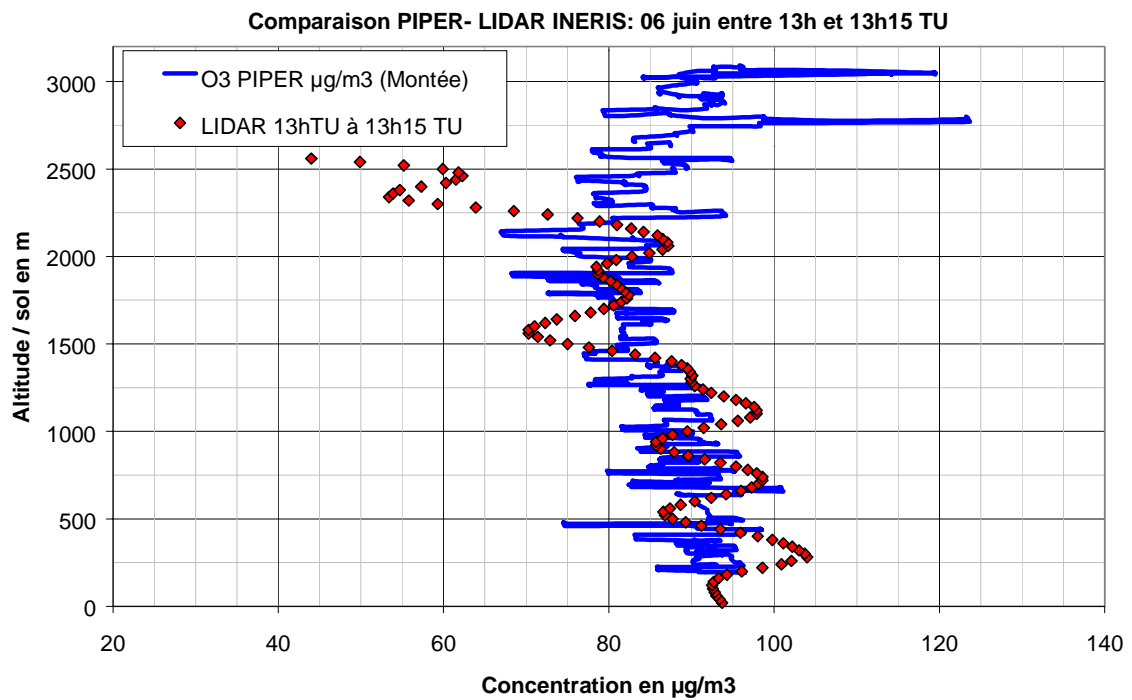


Figure 13 : Comparaison entre le PIPER et le LIDAR INERIS

8.3 CONCLUSION PRELIMINAIRE

La mise en comparaison de mesures d’ozone effectuées par d’une part les avions et d’autre part les LIDAR n’est que partiellement traitée car de nombreuses données sont encore manquantes. Néanmoins quelques constatations peuvent déjà être formulées :

- La réalisation de mesures embarquées nécessite un protocole de calibrage très rigoureux afin de garantir une qualité des mesures meilleure que 10%. Ainsi l'analyseur 49C LISA instrumentant l'ARAT a subi une correction de calibrage. Néanmoins, bien que calibrés et raccordés au sol de manière identique, les mesures obtenues par les différents avions diffèrent plus ou moins fortement et peuvent présenter un biais de l'ordre de 5 à 10%.
- Une variabilité de certains appareils est constatée, reproduisant pour partie la stratification atmosphérique observée par les mesures LIDAR, tel que notamment le 49S INSU (*Figure 11*). En revanche d'autres appareils observent une couche atmosphérique très homogène et lissée, en contradiction avec les mesures observées par les LIDAR (*Figure 12*). Ainsi le 49S INSU semble reproduire le plus exactement les inhomogénéités atmosphériques.
- La mise en comparaison des mesures avions et LIDAR montrent de nombreuses similitudes, tant sur la forme du profil atmosphérique, que les teneurs présentes. Ainsi, par exemple les profils ARAT et LIDAR sont très cohérents entre eux, avec néanmoins des écarts pouvant atteindre 10% à certaines altitudes (*Figure 11*). De même les courbes PIPER et LIDAR INERIS sont très semblables en dessous de 2000 m, puis divergent fortement ensuite (*Figure 13*). Un défaut de compensation en pression de l'analyseur pourrait être à l'origine de cet écart constaté au dessus de 2000 m.
- En revanche, les courbes MERLIN et LIDAR INERIS sont sensiblement différentes, tant sur l'allure du profil que sur les concentrations mesurées (*Figure 12*). Une étude plus détaillée doit donc être engagée, afin de pouvoir en trouver la cause. Néanmoins la mise en comparaison des mesures MERLIN et ARAT montre d'une part un biais de -10% du MERLIN et d'autre part des profils très différents entre eux (*Figure 8*). Il semble donc que le MERLIN présente un biais pouvant atteindre -10% et une tendance à amortir fortement la stratification atmosphérique.

Il s'agit de conclusions préliminaires, ne prenant pas en compte les mesures effectuées d'une part par l'ULM et d'autre part par le LIDAR ALTO. Un complément d'information sera donc fourni une fois l'ensemble des données traitées et mises en comparaison.

9. RESULTATS POUR LA JOURNEE DU 7 JUIN 2001

Afin de mettre en comparaison les différentes mesures effectuées, une conversion des données non LIDAR devait être effectuée, afin de fournir un résultat en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réel. Pour cela il était nécessaire de connaître les données de Pression et température en chaque point de mesure. Pour ce faire l'ULM, les avions ainsi que les ballons de radio sondage, possédaient des sondes de température et de pression. Ainsi la mise en comparaison était effectuée sur les mesures ci-dessous :

- 2 LIDAR exprimées en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réel
- 1 capteur à absorption UV embarqué dans l'ULM, converties en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réel
- 1 sonde électrochimique embarquée dans le ballon, converties en $\mu\text{g.m}^{-3}$ réel

Nous sommes actuellement en cours de traitement et d'analyse des données obtenues lors de cette campagne d'inter comparaison. La Figure 14 montre par exemple, pour la matinée du 7 Juin 2001, l'inter comparaison entre le LIDAR angulaire de l'INERIS, le LIDAR ALTO, l'ULM et un radio sondage.

Cette Figure 14 nous permet de donner quelques conclusions préliminaires sur la cohérence entre ces diverses techniques de mesurage de l’ozone.

- Toutes les techniques observent une couche de forte concentration en ozone, située aux environs de 2000m, démontrant par cela une cohérence quantitative sur la mesure. On observe un écart de l’ordre de 300m sur l’altitude de cette bulle de forte concentration. De même, l’étendue de cette bulle varie de 300m à 500m, suivant les différentes techniques. Cet écart est également observé et analysé sur la Figure 15.
- Un très fort écart est observé au niveau du sol, entre les données fournies par la sonde, et celles fournies par les autres techniques de mesure. Cet écart entre la sonde électrochimique et le capteur UV embarqué dans l’ULM disparaît au dessus de 800m d’altitude. Cela semble provenir du type de calibrage effectué. En effet le calibrage de la sonde est effectué sous air sec. Or le taux d’humidité relative était de l’ordre de 40% lors de cette inter comparaison. Parallèlement à ceci, la réponse de la sonde est très fortement dépendante du taux d’humidité. Lorsque l’on s’élève en altitude, le taux d’humidité chute et la mesure devient alors de meilleure qualité, se rapprochant ainsi des résultats obtenus par les autres techniques (au dessus de 800m).
- Le LIDAR de l’INERIS a une très bonne cohérence avec l’ULM, bien que la position de la bulle de forte concentration soit décalée d’environ 200m. Cet écart est également observé puis analysé sur la Figure 15.
- Le LIDAR ALTO a une très bonne cohérence avec l’ULM, bien que la position de la bulle de forte concentration ainsi que son étendue soient légèrement différente. Cet écart est également observé puis analysé sur la Figure 15.

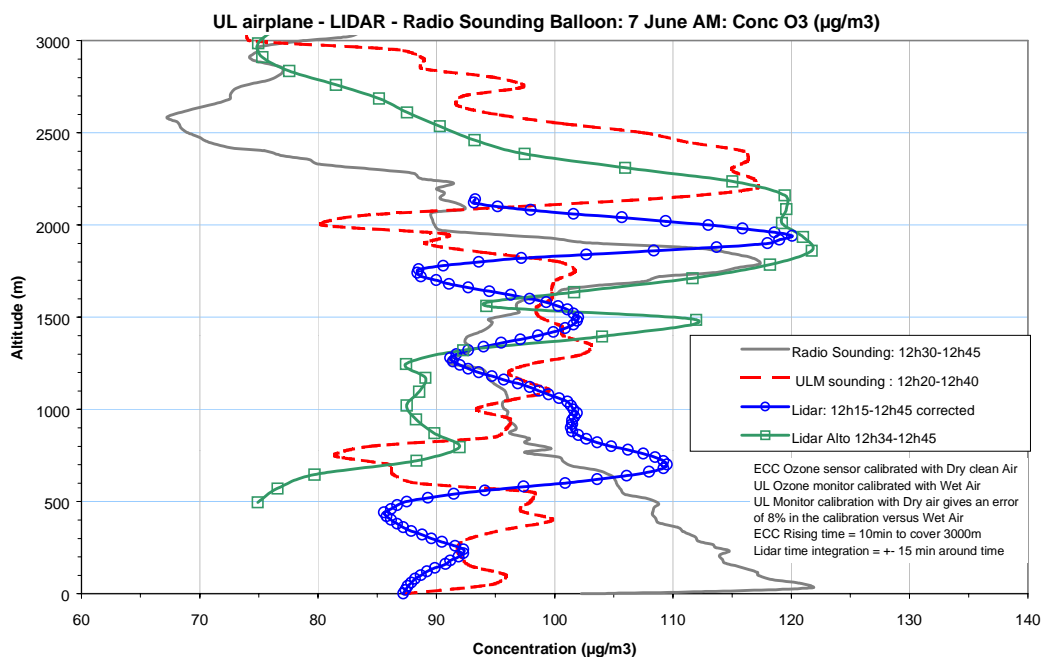


Figure 14 Inter comparaison entre d’une part les LIDAR de l’INERIS et ALTO, d’autre part un radio sondage et enfin un profil obtenu par l’ULM : le 7 Juin matin, Aix les Milles

La Figure 15 montre une comparaison effectuée le 7 juin dans l’après midi, entre d’une part les LIDAR de l’INERIS et ALTO et d’autre part deux profils obtenus par l’ULM à 30 minutes d’intervalle. On observe tout d’abord une grande variabilité entre les deux profils

obtenus par l'ULM, à 30 minutes d'intervalle. Ainsi lors de sa première ascension, on relève de concentrations d'ozone qui sont d'environ $125 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ entre le sol et 1000m d'altitude, alors qu'elles sont plus globalement de l'ordre de $105 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ une demi heure plus tard. Ceci permet de mettre en évidence une grande variabilité atmosphérique pour cette période de la journée. Les différents profils effectués par l'ULM lors de son vol en fin de matinée, ont en revanche montré une réelle stabilité atmosphérique. Afin de clarifier cet effet, nous sommes en cours de traitement des différentes données météorologiques et d'ensoleillement, qui pourraient permettre de valider cette perte de stabilité atmosphérique en cours de journée. Ainsi l'hypothèse selon laquelle l'atmosphère pouvait être considérée comme stable sur des échelles de temps de l'ordre de 30 minutes, n'est pas valide pour cette après midi du 7 juin, rendant donc beaucoup plus difficile la mise en comparaison des différentes techniques en présence.

Néanmoins, on observe que d'une manière générale, les techniques en présence observent bien toutes une forte réduction de la concentration en ozone au dessus de 1500m avec une très bonne cohérence quantitative. L'altitude de ce décrochement varie en revanche d'environ 300m entre les différentes techniques. Cela peut être expliqué tout d'abord par l'intégration spatiale effectuée par les LIDAR, mais également par l'imprécision sur la valeur de l'altitude fournie par l'ULM. En effet l'intégration spatiale du LIDAR ALTO était d'environ 150m à cette altitude. De même l'intégration spatiale du LIDAR de l'INERIS était proche de 100m. Enfin l'ULM a fourni des mesures en utilisant un calcul d'altitude approximatif, entraînant une imprécision de l'ordre de 100m. De plus les deux profils obtenus par l'ULM montrent une évolution de 200m de la position de ce décrochement de concentration sur un intervalle de 30 minutes, montrant par cela l'instabilité atmosphérique présente cet après midi du 7 juin.

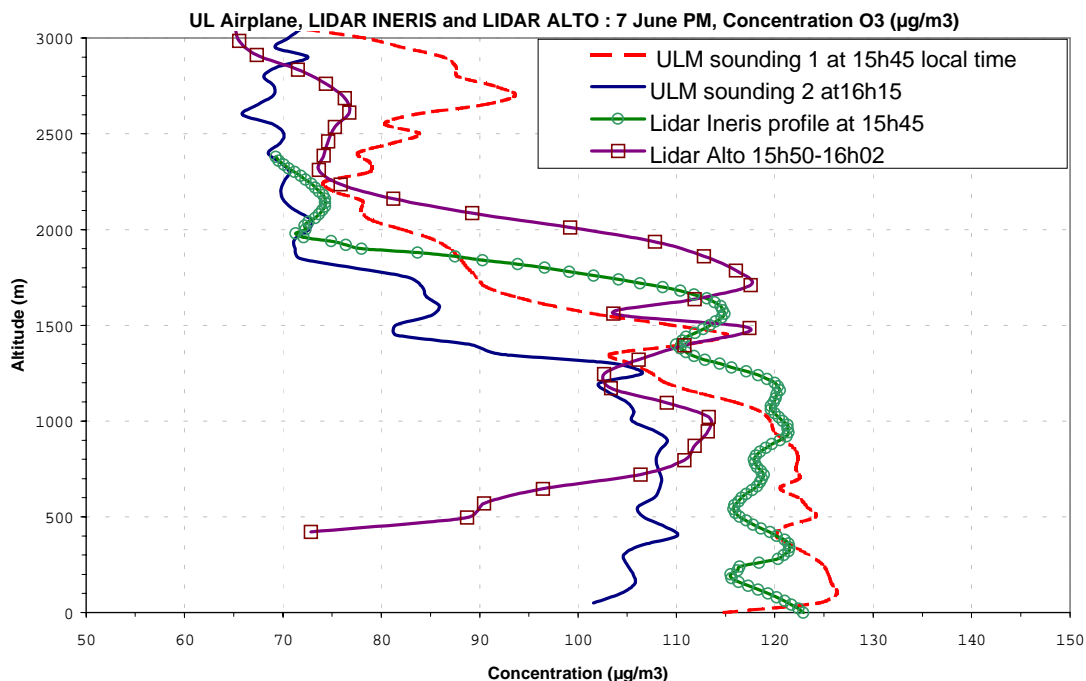


Figure 15 Inter comparaison entre d'une part les LIDAR de l'INERIS et ALTO, et d'autre part des profils obtenus par l'ULM : le Juin après midi, Aix les Milles

Finalement, la figure ci-dessus permet de fournir les remarques suivantes :

- Très bonne cohérence des mesures du LIDAR de l'INERIS avec les résultats du premier profil de l'ULM, l'écart observé étant inférieur à 10%.
- Toutes les techniques observent le même décrochement de la concentration entre 1500m et 1700m, avec une précision de l'ordre de 100m pour chacune.
- Le LIDAR ALTO, étant optimisé pour de mesures jusqu'à la troposphère libre, n'est pas adapté pour la mesure en dessous de 600m d'altitude.
- Cette journée, bien que remplissant les contraintes météorologiques fixées, à montré une grande variabilité atmosphérique sur des espaces de temps courts, ce qui rend difficile la mise en comparaison des techniques imposant une intégration temporelle de l'ordre de 30 minutes.

10. CONCLUSION PRELIMINAIRE SUR LE CONTROLE QUALITE DES MESURES D'OZONE EN ALTITUDE

Les premiers résultats montrent une relative cohérence entre les différentes techniques de mesurage de l'ozone, modulée par certains écarts plus ou moins importants. Au stade actuel, des premiers éléments tendent à montrer que :

- les LIDAR angulaires fournissent des résultats de très bonne qualité à faible altitude, mais que leurs mesures deviennent rapidement imprécises au dessus de 2000m
- les profils ULM effectués dans l'après midi du 7 juin montrent une très forte variabilité spatio-temporelle de l'atmosphère, avec des écarts pouvant être de 40% en 30 minutes. Néanmoins des études complémentaires doivent être entreprises afin de vérifier si les écarts observés entre deux profils successifs, sont liés à des phénomènes atmosphériques , ou bien s'ils traduisent des incertitudes sur la mesure.
- Les sondes électrochimiques, calibrées sous air sec, présentent de gros écarts de mesures pour de faibles altitudes, tant que le taux d'humidité est élevé. Ainsi lorsque l'humidité chute, la mesure devient de meilleure qualité. Les sondes devant effectuer des profils jusqu'à la stratosphère, il est donc raisonnable d'effectuer un calibrage sous air sec, garantissant ainsi des mesures de bonnes qualité de 2Km à 20Km d'altitude. En revanche les mesures sont dans ce cas de mauvaise qualité en dessous de la couche limite.
- Les différents analyseurs embarqués dans les avions, bien que préalablement étalonnés, présentent néanmoins des différences pouvant atteindre 10%, comme notamment entre les deux analyseurs présents dans l'ARAT et celui présent dans le MERLIN.
- Les différents profils obtenus par les avions semblent nettement mettre en évidence un écart entre les valeurs obtenues en phase de montée et celles obtenues en phase de descente. Cette constatation rejoint celle déjà formulée pour l'ULM et tend à confirmer qu'il existe un effet d'hystérésis des mesures effectuée en phase ascensionnelle, de celles obtenues en phase de descente des appareils.
- D'une manière générale les mesures avions et LIDAR sont très cohérentes, avec notamment des similitudes tant sur la stratification atmosphérique constatée que sur les teneurs mesurées, avec des écarts restant pour la plupart inférieurs à 10%.

Ces premières constatations sont très importantes car par exemple de nombreuses équipes utilisent les radio sondage d'ozone, comme support de paramétrage et validation de modèles physico chimiques, induisant de ce fait de grosses erreurs à basses altitudes. En revanche les LIDAR fournissent des résultats qui sont très cohérents avec ceux donnés par les avions, particulièrement pour des altitudes de 0m à 2000m pour les LIDAR angulaires. Ainsi ils pourraient être de très bon instruments de paramétrage et validation de modèles photochimiques, pour les basses couches atmosphériques.

Nous venons de montrer des résultats préliminaires. Des études complémentaires sont en cours, afin de traiter l'ensemble des données, ce qui permettra d'une part de confirmer ou d'infirmer les points décrits ci-dessus, mais également de donner d'autres informations sur la qualité des mesures en fonction de la technique utilisée.

ANNEXE 2

**Annexe 2: rapport de synthèse des LIDAR durant
la campagne de mesure escompte 2001**

Annexe 2 : campagne LIDAR ESCOMPTE 2001

Bouche du Rhône, 05 juin – 14 juillet 2001

1. INTRODUCTION

Les objectifs généraux de la télédétection était de suivre dans le temps, à la verticale des sites d'installation des différents instruments, l'évolution des profils verticaux des trois composantes du vent et des concentrations d'ozone (O_3) dans la basse troposphère. L'acquisition de ces deux types de profils permet de localiser les zones de forte concentration d' O_3 et de savoir si elles se créent ou se dissipent sur place par réaction chimique ou si elles résultent d'un processus de transport. Une évaluation expérimentale de la distribution de la concentration d' O_3 et des conditions dynamiques sur l'ensemble de la zone ESCOMPTE est rendu possible par le déploiement d'un réseau de profilers judicieusement situés. Pour répondre à ces objectifs, des profilers de vent (sodars, radars UHF et VHF) et de concentration d' O_3 (LIDARs O_3) ont été installés.

Le choix des sites d'installation a été guidé par une stratégie expérimentale qui visait, d'une part, à avoir des mesures au-dessus de zones critiques pour la création/dissipation d' O_3 et son transport et, d'autre part, à colocaliser des instruments complémentaires tant en paramètres mesurés (vent et O_3) qu'en gamme d'altitude sondée. Trois catégories de sites ont été choisis :

- (1) : des sites appartenant à l'agglomération marseillaise et entourant l'étang de Berre, au-dessus desquels on s'attend à avoir un fort taux de production d' O_3 lors de conditions de forte chaleur et d'absence de vent synoptique (Mistral, vents d'Est ...)
- (2) : des sites intermédiaires au-dessus desquels on s'attend à voir se propager et éventuellement s'accumuler l' O_3 produit (région aixoise et entrée de la vallée de la Durance)
- (3) : des sites en ou hors limite de la zone ESCOMPTE proprement dite pour documenter les conditions dynamiques d'entrée-sortie.

En plus des profilers, le LIDAR Vent Transportable (LVT) du LMD-EP (Laboratoire de Métrologie Dynamique, Ecole Polytechnique) a été installé au nord et au-dessus de Marseille (Vallon Dol). La spécificité de cet instrument est qu'il peut fonctionner en mode de balayage dans différents plans horizontaux, obliques ou verticaux, ou sur des surfaces coniques ou demi-sphériques. Quel que soit le type de surface choisi, le LVT obtient sur celle-ci le champ de vitesse radiale. Sa façon de fonctionner et sa localisation en font un moyen expérimental approprié à l'études des régimes de brises. Cet instrument sera également présenté dans ce chapitre, avec la liste des périodes couvertes et des exemples d'observations.

Tous les instruments de télédétection au sol ont des espacements entre eux et des résolutions temporelles et verticales adaptées à des études de processus à des échelles allant de l'échelle locale (quelques centaines de mètres à quelques kilomètres) à la mésoéchelle (quelques dizaines de kilomètres à quelques centaines de kilomètres), ce qui constitue le domaine d'échelle visé par les objectifs de la campagne.

Dans ce rapport, nous nous intéresserons uniquement aux bilan de fonctionnement ainsi qu'aux résultats obtenus par les LIDAR ozone, en fonctionnement vertical ou angulaire.

L'INERIS a eu en charge la coordination des LIDAR lors de la campagne ESCOMPTE. A ce titre ce rapport correspond donc pour partie au rapport de campagne des moyens LIDAR, que l'INERIS a envoyé au comité de coordination du programme ESCOMPTE..

2. LA CAMPAGNE ESCOMPTE

2.1 DEFINITION

Cette description de la campagne de mesure est rédigée, en prenant pour base le document de travail du comité de pilotage de la campagne ESCOMPTE

Il a été montré au cours de ces 30 dernières années l'impact considérable que pouvait avoir l'activité anthropique sur l'état de l'atmosphère aussi bien au plan planétaire (l'effet de serre ou bien encore la destruction de la couche d'ozone) qu'au plan local (les pollutions acides, gazeuses ou photo-oxydantes ou bien encore les dépôts secs ou humides). Cet impact va se traduire sous diverses formes :

- en milieu urbain par des problèmes de santé publique et de conservation du patrimoine,
- en milieu péri-urbain et rural par des dommages sur la végétation et une dégradation de la visibilité.

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.

Il existe actuellement en France et en Europe un effort important de développement de modèles mésoéchelle de chimie-transport qui, pour certains, intègrent la composante aérosol. D'autre part les premières simulations réalisées à l'échelle régionale confirment l'importance de la contribution de grande échelle sur les concentrations observées à l'échelle locale en particulier pour l'ozone qui dépend de plus d'espèces réservoir susceptibles d'être transportées sur de longues distances. Il existe maintenant à l'intérieur de la communauté scientifique un large consensus pour penser que le problème des niveaux élevés d'ozone en milieu urbain ne peut se traiter sans connaître les contributions respectives du local et du régional.

L'objectif prioritaire du programme ESCOMPTE est donc l'établissement d'une base de données tridimensionnelle très détaillée des émissions de polluants primaires ainsi que de la composition et la dynamique de l'atmosphère lors d'épisodes de pollution atmosphérique. Elle est destinée d'une part à servir de référence pour la validation des modèles de pollution. Elle est d'autre part destinée à participer à l'évolution de ces modèles en prenant en compte des mécanismes qui intègrent photo-oxydants et particules ainsi que leur interaction.

On espère ainsi apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Quel est le rôle respectif des différents mécanismes dynamiques et chimiques sur l'apparition des épisodes de pollution ?
- Comment prendre en compte les émissions urbaines dans les modèles régionaux ou globaux ?
- Peut-on développer une prévision opérationnelle des épisodes de pollution ?
- Quelle stratégie faut-il développer pour réduire les concentrations de photo-oxydants et de particules ?

Dans tout modèle chimie-transport, les concentrations dépendent de trois modules principaux : dynamique, chimie, émissions. Le plan d'expérience devait donc permettre l'acquisition des données propres à contraindre les modèles sur chacun de ces points dans une échelle d'espace cohérente avec les objectifs.

Parmi les sites potentiels pour effectuer cette expérience, Berre-Marseille apparaît de loin comme le plus satisfaisant : occurrence des épisodes de pollution, qualité du réseau de surveillance et des bases de données existantes, forçage dynamique, accessibilité aux conditions aux limites, caractère généralisable des validations. Le seul point qui soit moins favorable concerne la souplesse de définition des plans de vol du fait d'une activité aéronautique importante. Il faut noter en outre que :

- cette région a déjà fait l'objet d'une campagne d'étude de la pollution atmosphérique (Fos-Berre 3- 16 juin 1983), axée principalement sur les polluants primaires.
- c'est un site riche et diversifié, constitué de 2 bassins:
 1. celui de Marseille qui permettra de tester des modèles vis à vis des émissions d'une grande agglomération de plus de un million d'habitant. Il est entouré de chaînons montagneux : la chaîne de l'Etoile (670 m) et la montagne Sainte Victoire (1000 m) au nord, le massif de la Sainte Baume (1000 m) à l'est et les monts Carpiagne (647 m) et Puget (564 m) au sud ,
 2. celui de Fos-Berre qui permettra de tester les modèles sur une région industrielle avec un environnement naturel et rural important. Il est situé autour de l'étang de Berre à 15 km au nord-ouest de Marseille duquel il est séparé par les collines de l'Estaque (300m). Ce bassin s'ouvre sur la mer au sud-ouest et sur la plaine de la Crau au nord-ouest.
- c'est un des sites d'étude choisi par le programme PHAMA pour étudier le couplage entre ozone et aérosols dans un système NOx/VOC/NH3

Enfin, la campagne vise à documenter 4 à 5 épisodes de pollution, dont la durée moyenne doit être de 2 à 3 jours. L'observation doit être de plusieurs types : à la surface (continentale), au-dessus de la mer, et en altitude ; d'autre part, certaines observations doivent être fixes, d'autres doivent être mobiles pour aller traquer le phénomène intéressant là où il se produit. Enfin, certaines observations sont continues, pendant et entre les épisodes de pollution, alors que d'autres, coûteuses, ne peuvent être activées que lors de ces épisodes. Ces différentes contraintes ont conduit à mettre sur pied le dispositif et le protocole expérimental décrits ci-dessous.

2.2 CHOIX DE LA PERIODE DE MESURE

ESCOMPTE a choisi de faire porter son effort sur la pollution photochimique. Cette pollution est liée aux émissions d'oxydes d'azote et de composés organiques par les activités humaines; elle se traduit par des niveaux élevés d'ozone et d'autres espèces toxiques pour l'homme, les animaux et les végétaux. Elle apparaît principalement en période estivale et dans les régions ensoleillées. Ces raisons ont motivé le choix de la région de Marseille-Fos-Berre l'Etang comme site de la campagne de terrain. Cette région présente en effet une probabilité élevée d'observation d'épisodes de pollution photochimique.

Les études préparatoires au programme, à la fois par la simulation numérique d'épisodes observés lors des étés précédents, et par la réalisation d'une campagne préparatoire au cours de l'été 2000, ont permis de définir le domaine d'intérêt et de préciser le dispositif expérimental à déployer afin d'être à même de cerner le plus étroitement possible les émissions près des zones « source », les panaches transportés par les circulations

météorologiques régionales, les échanges entre la couche limite et l'atmosphère « libre », ainsi que les conditions de référence dans les zones dites « éloignées » des sources. La carte ci-dessous présente la zone retenue pour ESCOMPTE.



D'un point de vue chimique, la zone est caractérisée par les émissions du complexe industriel de Fos-Berre, et de l'agglomération de Marseille. On a donc affaire à la fois à des sources industrielles et urbaines. Suivant les conditions météorologiques rencontrées (fin de Mistral, brise pure, brise composée, entrées maritimes,...), les panaches issus de ces deux régions vont être dirigés dans différentes directions. Les simulations préparatoires ont permis de dresser un inventaire assez détaillé de ces différentes possibilités, et la campagne préliminaire a permis de documenter, sur trois journées consécutives, trois écoulements différents. Le dispositif mis en place doit être à même de couvrir toutes ces éventualités.

La campagne ESCOMPTE a commencé le 5 juin et s'est terminée le 16 juillet, comme prévu initialement. La période du 5 au 10 juin était dédiée à une opération de « contrôle-qualité / assurance-qualité » (QC/QA), au cours de laquelle la plupart des instruments mesurant des paramètres identiques à des échelles d'espace comparables ont été réunis au même endroit pour un exercice d'inter-comparaison / inter-calibrage.

A partir du 11 juin a commencé la période d'alerte proprement dite, au cours de laquelle étaient prévues plusieurs « périodes d'observation intensive » (POI).

Le choix de la période (5 juin – 16 juillet) a été motivé d'une part par le souci d'avoir un rayonnement important (on se situe de part et d'autre du solstice d'été), et d'autre part parce que les circulations de brise s'y produisent de façon fréquente ; ces circulations, associées à des périodes anticycloniques, font apparaître des cycles diurnes importants dans les écoulements méso-échelles, avec des vents de mer dans la journée, et un renversement en milieu et fin de nuit. Ces mécanismes contribuent à transporter les polluants à travers le domaine, voire à les y ramener après les en avoir expulsés. Ces circulations sont d'autre part

conditionnées par les reliefs importants de la région (plusieurs massifs atteignent 1000m d'altitude), ce qui peut conduire à l'apparition de quantités importantes de polluants dans des vallées très éloignées des zones source.

2.3 DEFINITION ET CHOIX DES PERIODES INTENSIVES DE MESURES (POI)

Nous avons vu que certains moyens de mesures, tels que les avions, ne peuvent effectuer des mesures en continu durant l'ensemble de la campagne de mesure. Cette campagne de mesures a donc été découpée en plusieurs période intensive d'observations de 2 à 3 jours chacune, durant lesquelles les moyens impliqués devaient être opérationnels.

Une POI (épisode de pollution) se déroule du jour J au jour $J+n$, les vols des avions sur la zone ESCOMPTE commençant le jour $J+1$. Le jour J est considéré comme faisant partie de la POI, car un certain nombre de moyens spécifiques sont activés (radiosondages, ballons plafonnants, LIDAR volumiques, LIDAR vents,...).

Les choix de ces périodes intensives d'observation (POI) étaient basés sur une analyse de la situation météorologique et chimique présente et future à l'échelle de l'Europe ainsi que de la région. Concernant la situation météorologique, les outils disponibles étaient les prévisions météorologiques à grande et moyenne échelle d'ARPEGE et du Centre Européen (échéances supérieures à deux jours) et les prévisions à échelle régionale du modèle d'aire limitée ALADIN. Ce dernier fournit également des trajectoires de parcelles d'air, directes et rétrogrades, d'une durée de 48heures, arrivant ou commençant dans les zones d'émissions de polluants du domaine ESCOMPTE. Pour les prévisions chimiques, on a eu accès à des prévisions en mode semi-opérationnel des modèles MOCAGE du CNRM et CHIMERE du LMD, ainsi qu'aux résultats du modèle statistique de prévision à 24h développé par AIRFOBEP.

Il s'agissait de prévoir l'un des scénarios identifiés, susceptible de correspondre à un épisode de pollution. Ces scénarios sont en général liés à l'existence d'un régime anticyclonique avec présence d'une dorsale en altitude et d'un faible gradient barométrique qui induisent au sol un régime de brise côtière. Au cours de la campagne préparatoire de l'été 2000, et grâce aux simulations numériques d'épisodes observés lors des années antérieures, un certain nombre de situations caractéristiques ont été relativement bien identifiées. Enfin, lors de cette période les conditions de formation photochimique sont favorables ($T \geq 25^{\circ}\text{C}$, ciel clair, rayonnement intense).

3. OBJECTIFS DES MESURES LIDAR DANS ESCOMPTE

Lors de la campagne ESCOMPTE, cinq LIDAR O3/Aérosols ont suivi quasiment en continu la dynamique des profils de concentrations en ozone ainsi que l'évolution temporelle de la hauteur de la couche limite. Le dispositif a pour but d'apporter une documentation expérimentale, une aide à l'interprétation et une contribution à la validation de modèles tridimensionnels photochimiques. Ainsi ce dispositif sert d'une part de support de paramétrage de ces modèles et d'autre part d'instrument de validation au travers de la phase intensive d'observation cachée (POI3). Ce dispositif permettra également d'étudier la structure verticale de l'atmosphère ainsi que sa dynamique (stratification de la concentration en ozone, couche limite, mouvements verticaux) et de son interaction avec les conditions orographiques.

4. MOYENS MIS EN ŒUVRES

5 LIDAR étaient présents pour la campagne ESCOMPTE, réparti sur l'ensemble du domaine d'étude, comme le montre la figure ci-dessous. On observe que les sites instrumentés appartiennent à des sites d'émissions des polluants précurseurs de l'ozone ou des sites intermédiaires où de fortes concentrations d'ozone peuvent être constatées, étant sous le panache photochimique des émissions.



Figure 16 : plan détaillé des différents sites de mesures LIDAR

L'ensemble des sites LIDAR constitue un double maillage (courte et moyenne échelle), permettant de documenter d'une part les modèles tridimensionnels fins ayant un maillage inférieur à 10 km et d'autre part les modèles ayant un maillage de l'ordre de 30 à 40 km. En effet, chaque site LIDAR a été choisi de manière à être au centre d'un double maillage :

- Cadarache-Aix, Aix-Marseille et Aix-St Chamas forment un maillage de l'ordre de 30 km de coté
- Marseille-Vallon Dol-Aix en Provence-Réaltor forme un maillage de l'ordre de 10 km de coté

4.1 CNRS-SA (SERVICE D'AERONOMIE) : LIDAR PROFILEUR VERTICAL O₃ ET AEROSOLS

Il s'agit d'un LIDAR non commercial, développé par une unité du CNRS, afin d'effectuer des profils verticaux d'ozone sur de longues distances. Il permet également d'obtenir l'évolution temporelle de la hauteur de la couche limite.

Ce système, qui peut également être installé dans un avion, repose sur l'utilisation d'un laser à impulsions Nd-Yag doublé en fréquence. L'émission dans le proche UV, nécessaire pour une mesure différentielle de l'ozone, est obtenue par doublage de fréquence de la longueur d'onde 0.53 μm et pompage optique d'une cellule pressurisée contenant de l'hydrogène ou du deutérium : le faisceau de pompage (266 nm) et ceux générés par le processus de diffusion Raman stimulée dans H₂ et D₂ correspondant à la première transition Stokes (299 nm, 289 nm) ainsi qu'à la seconde (341 nm, 316 nm).

Ce LIDAR, transporté dans un container de 55 m³ (longueur = 9.5 m, largeur= 2.5 m) d'un poids de 8 tonnes, nécessite une alimentation électrique triphasée. La figure ci-dessous montre un aperçu des dimensions de l'instrument.



Figure 17 : photographie du LIDAR ALTO installé sur la BA 114 d'Aix les Milles

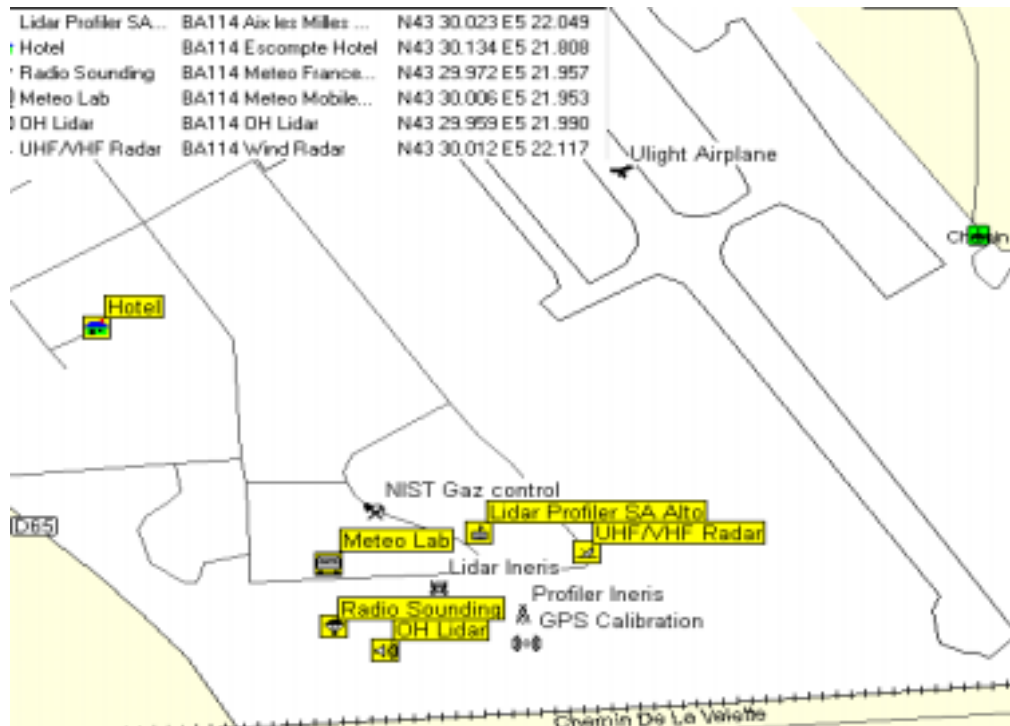


Figure 18 : plan du site de mesure d'Aix les Milles où était installé le LIDAR ALTO

Ce LIDAR fut installé de manière continue, sur la Base Aérienne 114 d'Aix les Milles durant l'ensemble de la campagne ESCOMPTE, à savoir du 05 juin au 14 juillet 2001. Ce site, ayant une classification de type (2), donc un site intermédiaire, où l'on s'attend à voir se propager et éventuellement s'accumuler l'O₃ produit lors des processus de transports des polluants primaires (site de catégorie 1) jusqu'au site de mesure. Ainsi la zone d'Aix en Provence, bien que générant des polluants primaires, précurseurs d'ozone, est également sous les vents de Marseille en situation de brise de mer.

Sur ce site étaient également présent deux unités de mesures des profils verticaux de vents (un RADAR UHF ainsi qu'un RADAR VHF). Enfin, des radiosondages d'ozone étaient effectués régulièrement depuis ce site, tout au long de la campagne de mesure. Un couplage entre ces différents moyens de mesures pourra donc être effectué, afin d'obtenir par exemple des profils de flux verticaux d'ozone, mais également afin de mettre en parallèle les hauteurs de couche limite mesurés par chacun de ces instruments.

4.2 EPFL (ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE) : LIDAR PROFILEUR VERTICAL O₃ ET AEROSOLS

Il s'agit d'un LIDAR non commercial, développé par une unité de recherche de l'EPFL, afin d'effectuer des profils de concentrations en ozone sur des distances de plusieurs kilomètres, avec une résolution temporelle inférieure à 30 minutes. Il permet également d'obtenir l'évolution temporelle de la hauteur de la couche limite.

Ce système repose sur l'utilisation d'un laser à impulsions Nd-Yag doublé en fréquence. L'émission dans le proche UV, nécessaire pour une mesure différentielle de l'ozone, est obtenue par doublage de fréquence de la longueur d'onde 0.53 mm et pompage optique d'une cellule pressurisée contenant de l'hydrogène et du deutérium : le faisceau de pompage (266 nm) et ceux générés par le processus de diffusion Raman stimulée dans H₂ et D₂

correspondant à la première transition Stokes (299 nm, 289 nm) ainsi qu'à la seconde (341 nm, 316 nm).

Ce LIDAR, installé dans une remorque de 90 m³ (longueur = 10 m, largeur= 3 m) d'un poids de 11 tonnes, nécessite une alimentation électrique triphasée pour son fonctionnement et un poids lourd de type tracteur pour son déplacement.



Figure 19 : photographie du LIDAR EPFL installé sur le site de Saint Chamas



Figure 20 : plan détaillé du site de mesure de St Chamas où était installé le LIDAR EPFL

Ce LIDAR fut installé de manière continue, sur le site de Saint Chamas durant l'ensemble de la campagne ESCOMPTE, à savoir du 05 juin au 14 juillet 2001. Ce site, classé de catégorie 1 (zone d'émissions) devait permettre d'évaluer l'influence des émissions de polluants primaires, précurseurs (COV) et destructeurs (NO) sur la concentration d'ozone. Il était en effet situé sous les vents des principales raffineries et usines pétrochimiques, en situation de brise de mer. Ce site devrait également permettre d'évaluer l'influence de l'étang de Berre sur la photochimie de l'ozone : cette zone, de type « mer intérieure » est en effet très délicate à évaluer.

Sur ce site était également présent un profiler de vent de type SODAR. Un couplage entre ces différents moyens de mesures pourra donc être effectué, afin d'obtenir par exemple des profils de flux verticaux d'ozone, mais également afin de mettre en parallèle les hauteurs de couche limite mesurés par chacun de ces deux instruments.

4.3 INERIS : LIDAR PROFILEUR VERTICAL O₃ ET AEROSOLS

Il s'agit d'un système commercial, développé par la société ELIGHT Laser System. Cet appareil, tout premier modèle de cette nouvelle génération de LIDAR, fut mis à la disposition de l'INERIS par le constructeur, pour la campagne ESCOMPTE. Une formation nous a été donnée afin de pouvoir ensuite être à même d'utiliser cet appareil autonome.

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 800 nm et de 1500 nm. Un mixage de fréquence est ensuite réalisé avec la troisième harmonique du laser Nd-Yag pour obtenir une longueur d'onde située entre 266 nm et 320 nm. La mise en rotation des différents cristaux permet alors d'obtenir les différentes longueurs d'ondes nécessaires à la mesure de l'ozone. Il est à noter que cet instrument devrait évoluer prochainement vers la mesure d'autres polluants gazeux tels que le SO₂, le NO₂, le benzène et le toluène.

Cet appareil est totalement autonome et peut être piloté à distance. Un suivi quotidien à néanmoins été effectué durant la campagne, afin d'optimiser la qualité des mesures. De même une ligne GSM fut installée afin de suivre à distance les mesures et les réglages de l'appareil au moyen d'un logiciel de prise de contrôle distant (PC ANYWHERE). Il ne fut en effet pas possible d'installer une ligne téléphonique temporaire sur les différents sites de mesures de cet instrument, compte tenu de contraintes techniques importantes. En effet le site de Cadarache, décrit plus loin, ne possédait pas d'arrivée téléphonique distante de moins de 1 kilomètre et nécessitant des autorisations spécifiques ainsi que des coûts d'installations très élevés. Bien que très lent, ce type de connexion nous a néanmoins permis de constater le bon fonctionnement de l'appareil, évitant ainsi de nombreux déplacements sur les sites de mesures.

Ce LIDAR, d'un volume de 4m³ (longueur = 2m, largeur = 1m, hauteur = 2m) pour un poids de 400 kg, nécessite une alimentation monophasée standard 220V, 16A. Son installation est donc très simple à réaliser car cet instrument peut être connecté sur une servitude électrique présente tout aussi bien sur une zone industrielle, que chez un particulier. De même son poids relativement faible, autorise une manutention au moins d'un véhicule particulier, ayant un PTAC inférieur à 3,5 tonnes.



Figure 21 : LIDAR INERIS installés sur Cadarache et l'observatoire de Marseille



Figure 22 : plan détaillé du site de mesure de Cadarache où était installé le LIDAR Profiler vertical INERIS, pour la période du 14 juin au 06 juillet 2001



Figure 23 : plan du site de mesure de l'observatoire de Marseille où était installé le LIDAR Profiler vertical INERIS, pour la période du 09 juillet au 14 juillet 2001

Ce LIDAR fut installé de manière continue sur deux sites de mesures successifs. Il a dans un premier temps participé à l'instrumentation du site de mesure de Cadarache, puis fut déplacé du 09 au 14 juillet au centre de Marseille, sur le site de l'Observatoire.

Cadarache fut choisi car ce site se présente sous le panache de Marseille et d'Aix en Provence en situation de brise de mer. Les concentrations en ozone peuvent en effet être extrêmement élevées lorsque l'ensoleillement favorise les processus photochimiques de formation d'ozone durant son transport entre les sites émetteurs de Marseille-Fos-Berre et Aix en Provence et le site de mesure de Cadarache, situé dans la vallée de la Durance. Cet effet de panache est également renforcé par la présence de cette vallée, canalisant le panache en orientation Ouest-Est.

Marseille fut ensuite choisi afin de documenter un site générant de nombreux précurseurs d'ozone, mais également afin d'observer l'inhomogénéité verticale de la concentration en ozone et ainsi tenter de mieux comprendre la liaison entre la stratification urbaine de l'ozone et la présence combinée d'une couche limite urbaine et d'une couche limite liée à l'effet des brises de mer et de terre.

Sur chacun de ces deux sites étaient également présents des profiler verticaux de vents de type SODAR (Cadarache) ou RADAR (Observatoire de Marseille). Un couplage entre ces différents moyens de mesures pourra donc être effectué, afin d'obtenir par exemple des profils de flux verticaux d'ozone, mais également afin de mettre en parallèle les hauteurs de couche limite mesurés par chacun de ces instruments.

4.4 BTU-COTTBUS (UNIVERSITE TECHNIQUE DE COTTBUS, ALLEMAGNE) : LIDAR ANGULAIRE MULTI-POLLUANTS ET AEROSOLS

Il s'agit d'un appareil commercial, vendu par la société ELIGHT. L'université technologique de Cottbus située à 50 km à l'Est de Berlin, a fait l'acquisition de ce LIDAR en 1989. Il a participé à de nombreuses campagnes, tout aussi bien en Europe (Athènes, BERLIOZ, Séville,...) que sur le continent américain (Chili, Mexique,...).

Ce système repose sur l'utilisation d'un laser à impulsions tout solide de type Titane-Saphire accordable de 750 nm à 900 nm. Un double oscillateur permet de générer deux longueurs d'ondes en simultané sur cette gamme d'accordabilité. Ces signaux sont alors doublés et triplés en fréquence afin d'obtenir les longueurs d'ondes nécessaires à la mesure de l'ozone. Ce système permet également la mesure d'autres polluants tels que le NO₂, le SO₂ et les BTX. Le LIDAR est installé dans un véhicule laboratoire de 5 tonnes et nécessite une alimentation électrique triphasée. Sa configuration en mode angulaire lui autorise des balayages sur un angle solide de 2PI stéradians.



Figure 24 : photographie du LIDAR angulaire BTU installé sur le site du Réaltor

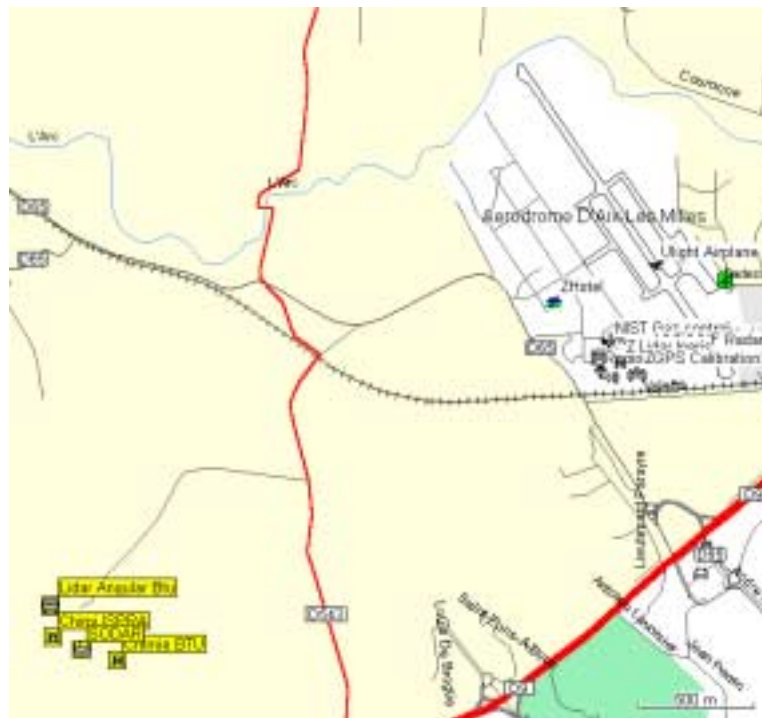


Figure 25 : plan détaillé du site de mesure du Réaltor où était installé le LIDAR BTU

Ce LIDAR fut installé de manière continue, sur le site du Réaltor durant l'ensemble de la campagne ESCOMPTE, à savoir du 05 juin au 14 juillet 2001. Ce site, ayant une classification de type (2), donc un site intermédiaire, où l'on s'attend à voir se propager et éventuellement s'accumuler l'O₃ produit lors des processus de transports des polluants primaires (site de catégorie 1) jusqu'au site de mesure.

Sur ce site était également présent une unité de mesures des profils verticaux de vents (SODAR). Un couplage entre ces différents moyens de mesures pourra donc être effectué, afin d'obtenir par exemple des profils de flux verticaux d'ozone, mais également afin de mettre en parallèle les hauteurs de couche limite mesurés par chacun de ces deux instruments.

4.5 INERIS/UCLO (UNIVERSITE DU LITTORAL COTE D'OPALE) : LIDAR ANGULAIRE MULTI-POLLUANTS ET AEROSOLS

Il s'agit d'un système commercial distribué par la société ELIGHT. Cet instrument est la dernière génération des LIDAR angulaires. L'INERIS et l'université du Littoral Côte d'Opale ont respectivement acquis en décembre 2000 un appareil de ce type, qui diffèrent entre eux uniquement de quelques éléments optionnels.

Ce système repose sur l'utilisation d'un laser à impulsions tout solide de type Titane-Saphir de forte puissance, accordable de 750 nm à 900 nm. Un double oscillateur permet de générer deux longueurs d'ondes en simultané sur cette gamme d'accordabilité. Ces signaux sont alors doublés et triplés en fréquence afin d'obtenir les longueurs d'ondes nécessaires à la mesure de l'ozone. Ce système, mesurant l'ozone et l'extinction atmosphérique, permet également la mesure d'autres polluants tels que le NO₂, le SO₂, le benzène, le toluène et le xylène. Des études ont montré que de nombreux autres polluants pouvaient, dans certaines mesures, être quantifiés. 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.

Sa configuration en mode angulaire lui autorise des balayages sur un angle solide de 2PI stéradians. De ce fait, des suivis de panaches peuvent être réalisés tout aussi bien que la réalisation d'une cartographie tridimensionnelle couvrant l'espace de l'horizon au zénith, comme le décrit la figure ci-dessous.

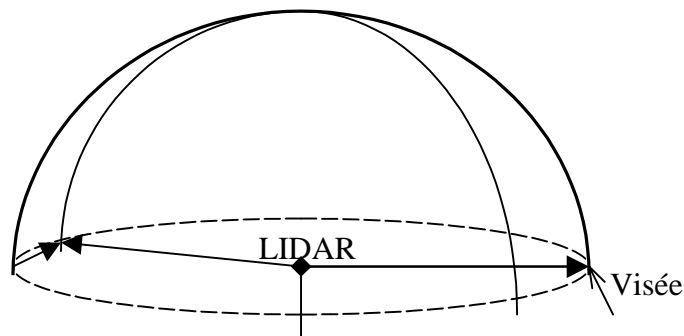


Figure 26 : schéma du balayage angulaire, réalisable par le LIDAR angulaire INERIS



Figure 27 : photographie du LIDAR angulaire INERIS lors du contrôle qualité des moyens de mesures de l'ozone en altitude, effectué sur le site d'Aix les Milles du 05 au 10 juin

Cet appareil fut présent lors du contrôle qualité des mesures d’ozone en altitude, effectué du 05 au 10 juin 2001 sur le site d’Aix les Milles (BA114). Un rapport figure en annexe du rapport général, détaillant cette étude des différentes techniques de mesurage de l’ozone, effectuée sous la responsabilité de l’INERIS.

Malheureusement, cet instrument a subi un très grave incendie quelques heures avant son transfert depuis le site d’Aix les Milles, vers le site de mesure du Vallon Dol. L’appareil fut totalement endommagé le 11 juin 2001 entre 20h et 22h. Une enquête fut immédiatement ouverte et un expert judiciaire fut mandaté par le bureau du procureur d’Aix en Provence, pour tenter d’élucider l’origine de ce sinistre. Néanmoins, les différentes expertises réalisées sur le véhicule, n’ont pas permis à ce jour, de définir la cause exacte du sinistre. L’expert judiciaire semble orienter ses conclusions sur un incendie d’origine accidentel, sans pour autant pouvoir localiser la source.

Il nous a donc fallu trouver une solution de remplacement, nous permettant de mener à bien les engagements que nous avons pris, tout autant vis-à-vis des programmes de recherche et LCSQA sur ce sujet, que vis-à-vis du comité de coordination ESCOMPTE nous ayant désigné comme coordinateur des moyens LIDAR. Nous avons donc décidé d’engager des négociations avec différentes équipes européennes possédant des LIDAR, afin que l’INERIS puisse aussi rapidement que possible, trouver un autre LIDAR afin d’instrumenter le site du Vallon Dol, site de mesure fondamental dans la campagne ESCOMPTE. Finalement un accord fut obtenu avec l’Université du Littoral Côte d’Opale (UCLO) basée à Dunkerque. Nous avons donc décidé de prendre en charge la mise à disposition de ce LIDAR, son transport ainsi que sa maintenance, mais également les frais de mission du personnel de UCLO mis à disposition avec l’instrument.

Un peu plus d’une semaine nous a donc été nécessaire pour acheminer un nouveau LIDAR sur le site du Vallon Dol, appelé LIDAR angulaire INERIS/UCLO pour la suite.



Figure 28 : photographie du LIDAR angulaire INERIS/UCLO installé sur le site du Vallon Dol, du 20 juin au 16 juillet 2001. L’algéco bleu correspond au LIDAR LVT



Figure 29 : plan détaillé de l'instrumentation du site du Vallon Dol situé en périphérie Nord de Marseille, où était installé le LIDAR angulaire INERIS/UCLO

Ce LIDAR fut installé de manière continue, sur le site du Vallon Dol durant la majeure partie de la campagne ESCOMPTE, à savoir du 20 juin au 16 juillet 2001. Les négociations avec UCLO, l'acheminement et la mise en place du remplaçant du LIDAR angulaire INERIS détruit sur la BA114 nous ont pris une semaine. L'acheminement fut notamment un point délicat car le LIDAR de UCLO n'était toujours pas immatriculé. Nous avons donc affrété un convoi exceptionnel pour transporter ce LIDAR entre Dunkerque et Marseille, ce qui a engendré une durée de trajet de 48 heures. Finalement le LIDAR angulaire fourni par UCLO et pris en charge par INERIS, fut opérationnel à compter du 20 juin 2001.

Ce site, classé de catégorie 1 (zone d'émissions) devait permettre d'évaluer l'influence des émissions de polluants primaires, précurseurs (COV) et destructeurs (NO) sur la concentration d'ozone. Il était en effet situé sous les vents de la ville de Marseille, en situation de brise de mer.

Sur ce site était également présent un profiler de vent de type SODAR ainsi qu'un LIDAR vent angulaire (LVT). Un couplage entre ces différents moyens de mesures pourra donc être effectué, afin d'obtenir par exemple des profils de flux verticaux et radiaux d'ozone, mais également afin de mettre en parallèle les hauteurs de couche limite mesurés par chacun de ces trois instruments. Il est en effet très important de pouvoir d'une part construire une cartographie des flux radiaux d'ozone, donnée essentielle à la compréhension des cinétiques photochimiques de formation et destruction de l'ozone troposphérique.

De même, la mise en comparaison des profils angulaires d'extinction atmosphérique, obtenus par le LIDAR angulaire INERIS/UCLO et par le LIDAR Vents LVT, permettra d'évaluer la cohérence entre les hauteurs de couches limites, mais également devrait permettre d'observer le cas échéant les fortes modifications de distribution de tailles des aérosols en altitude. En effet, des résultats préliminaires ont montré que le LIDAR angulaire INERIS, mesurant dans l'UV, observait une couche limite urbaine à basse d'altitude (300 m). Cette couche était également observée par le LIDAR LVT aux mêmes altitudes. Mais ce dernier, mesurant dans l'IR, observait une autre couche limite, très prononcée à des altitudes plus élevées (1000 m). Or ces deux appareils, mesurant sur des gammes de longueurs d'ondes différentes, ne sont pas sensibles de manière identique aux aérosols présents. Ainsi le LIDAR INERIS est sensible à globalement toutes les particules (grosses, fines et ultra fines) alors que le LIDAR LVT n'est sensible qu'aux grosses particules. Ainsi on peut donc en déduire que la

couche limite observée par le LIDAR LVT à 1000 m d'altitude, pourrait correspondre à une discontinuité de concentration des grosses particules (sans doute véhiculées par la brise de mer et ayant donc une forte stratification verticale). Cette couche n'est alors pas observable par le LIDAR INERIS car la proportion d'aérosols présents reste importante en nombre (fines et ultra fines). Des études complémentaires sont engagées, dans le cadre de programmes de recherche (projets PNCA), afin de mettre en évidence ce phénomène et tenter de le quantifier.

5. CARACTERISTIQUES ET SPECIFICATIONS DES LIDAR.

Chacun des LIDAR possédait des caractéristiques et des spécifications propres, qui sont détaillées dans le tableau ci-dessous. Elles ont été obtenues lors du contrôle qualité LIDAR effectué sur le site d'Aix les Milles (cf. rapport en annexe) ou bien fournies par les utilisateurs (ALTO et EPFL).

| | Type de LIDAR | Altitude première mesure | Altitude dernière mesure | Résolution verticale minimale | Résolution verticale maximale | Limite détection O ₃ | Précision de mesure |
|-------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| SA ALTO | Vertical | 500 m | 7 000 m | 200 m | 1 000 m | 2 µg/m ³ | 10 % |
| EPFL | Vertical | 500 m | 7 000 m | 200 m | 1 000 m | 2 µg/m ³ | 10 % |
| INERIS | Vertical | 100 m | 3 000 m | 100 m | 200 m | 3 µg/m ³ | 5 % |
| BTU | Angulaire | 5 m | 3 000 m | 50 m | 200 m | 2 µg/m ³ | 5 % |
| INERIS/UCLO | Angulaire | 5 m | 3 000 m | 50 m | 200 m | 2 µg/m ³ | 5 % |

6. TAUX DE FONCTIONNEMENT DES LIDAR

6.1 RESUME GENERAL DU FONCTIONNEMENT DES LIDAR

| | Date | CNRS/SA BA114 | EPFL St Chamas | BTU Réaltor | INERIS Vallon Dol | INERIS Cadarache | INERIS Marseille | |
|-----------------|------------|------------------|-------------------|----------------|---|---|---------------------|--------|
| POI 1 | 14 Juin | 06H-22H | 18H-24H | 05H-20H | Attente du LIDAR de remplacement suite à l'incendie sur la BA114 | 24H/24 | | |
| | 15 juin | 04H-19H | 00H-18H | 05H-20H | | 24H/24 | | |
| | 16 juin | | | | | 24H/24 | | |
| | 17 juin | | | | | 24H/24 | | |
| | 18 juin | | | | | 24H/24 | | |
| | 19 juin | | | | | 24H/24 | | |
| | 20 juin | | | 21H-24H | | | 08H-21H | 24H/24 |
| POI 2A | 21 juin | 04H-19H | 24H/24 | 05H-21H | 04H-21H | 24H/24 | | |
| | 22 juin | 04H-20H | 24H/24 | 05H-21H | 04H-21H | 24H/24 | | |
| | 23 juin | 04H-21H | 24H/24 | 05H-21H | 04H-21H | 24H/24 | | |
| POI 2B | 24 juin | 04H-23H | 24H/24 | | 04H-21H | 24H/24 | | |
| | 25 juin | 05H-23H | 24H/24 | | 04H-21H | 24H/24 | | |
| | 26 juin | 07H-21H | 00H-21H | 05H-21H | 04H-21H | 24H/24 | | |
| | 27 juin | | | | 06H-20H | 24H/24 | | |
| | 28 juin | | | | 06H-20H | 24H/24 | | |
| | 29 juin | | | | 06H-20H | 24H/24 | | |
| | 30 juin | | | | | 24H/24 | | |
| | 01 juillet | | | | | 24H/24 | | |
| POI 3 cachée | 02 juillet | 07H-24H | 08H-24H | 24H/24 | 24H/24 | 24H/24 | | |
| | 03 juillet | 24H/24 | 24H/24 | 24H/24 | 24H/24 | 24H/24 | | |
| | 04 juillet | 00H-17H | 00H-20H | 24H/24 | 24H/24 | 24H/24 | | |
| | 05 juillet | | | | 06H-20H | 24H/24 | | |
| | 06 juillet | 08H-18H | | | 06H-20H | 00H-17H | | |
| | 07 juillet | 10H-13H | | | 06H-20H | Appareil déplacé de Cadarache à Marseille afin de documenter la couche urbaine | 24H/24 | |
| | 08 juillet | 10H-13H | | | | | 24H/24 | |
| | 09 juillet | 07H-15H | | | | | 00H-17H | |
| | POI 4 | 10 juillet | 05H-22H | 13H-24H | | | 24H/24 | 24H/24 |
| | | 11 juillet | 03H-24H | 24H/24 | | | 24H/24 | 24H/24 |
| 12 juillet | | 00H-14H | 00H-21H | | 24H/24 | | 24H/24 | |
| 13 juillet | | 06H-08H | | | 00H-17H | | 00H-17H | |
| 14 juillet | | | | | 06H-20H | 24H/24 | | |
| 15 Juillet | | | | | 06H-20H | 24H/24 | | |

Les différents LIDAR impliqués dans la campagne ESCOMPTE nécessitaient des contraintes de fonctionnement particulières. Ainsi bon nombre d'entre eux ont fonctionné principalement durant les phases intensives d'observation (POI). Seul le Profiler vertical O₃ de l'INERIS a fonctionné de manière autonome durant l'ensemble de la campagne de mesure (14 Juin-14 juillet) en fournissant des données ¼ horaires. Le tableau ci-dessus récapitule le fonctionnement de chaque LIDAR durant la campagne de mesure.

Les heures (TU) figurant dans ce tableau correspondent aux périodes nominales d'exploitation, fournissant des résultats exploitables pouvant être incérés dans la base de données.

Les zones grisées correspondent à des périodes de mesures intensives en mode continu (24h/24). Les interruptions inférieures à 2 heures ne sont pas mentionnées.

A titre d'information et afin de se rendre compte des contraintes d'utilisation de certains LIDAR, nous avons détaillé ci-dessous les plannings de fonctionnement de certains LIDAR, permettant de constater d'une part l'absence ou la nécessité de présence humaine en terme d'utilisation, de maintenance ou de réglage et d'autre part la fréquence des pannes rencontrées sur chaque appareil.

6.2 PLANNING DE FONCTIONNEMENT DETAILLE DU LIDAR PROFILEUR VERTICAL INERIS

| | Date | Mesures effectuées | Présence humaine en heures | Réglages et maintenance | Problème LIDAR | Problème Logistique |
|--------------|------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| POI 1 | 14 Juin | 24H/24 | 5 | 1 | | Câblage électrique |
| | 15 juin | 24H/24 | 3 | 1 | | |
| | 16 juin | 24H/24 | | | | |
| | 17 juin | 24H/24 | | | | |
| | 18 juin | 24H/24 | 3 | 1 | Transfert données | |
| | 19 juin | 24H/24 | | | | |
| | 20 juin | 24H/24 | | | | |
| POI 2A | 21 juin | 24H/24 | 3 | 1 | Ligne GSM | |
| | 22 juin | 24H/24 | 3 | 1 | | |
| | 23 juin | 24H/24 | 3 | 1 | | |
| POI 2B | 24 juin | 24H/24 | 5 | 3 | Défaut climatisation | |
| | 25 juin | 24H/24 | 5 | 3 | Défaut climatisation | |
| | 26 juin | 24H/24 | 3 | 1 | | |
| | 27 juin | 24H/24 | | | | |
| | 28 juin | 24H/24 | | | | |
| | 29 juin | 24H/24 | | | | |
| | 30 juin | 24H/24 | | | | |
| | 01 juillet | 24H/24 | | | | |
| POI 3 cachée | 02 juillet | 24H/24 | 3 | 1 | | |
| | 03 juillet | 24H/24 | 3 | 1 | | |
| | 04 juillet | 24H/24 | 3 | 1 | | |
| | 05 juillet | 24H/24 | | | | Défaut électrique |
| | 06 juillet | 00H-17H | 5 | 3 | | Cadarache vers BA114 |
| | 07 juillet | 24H/24 | | | | |
| | 08 juillet | 24H/24 | | | | |
| | 09 juillet | 00H-17H | 5 | 3 | | BA114 vers Marseille |
| POI 4 | 10 juillet | 24H/24 | 3 | 1 | | |
| | 11 juillet | 24H/24 | 3 | 1 | Refroidissement | |
| | 12 juillet | 24H/24 | 3 | 1 | | |
| | 13 juillet | 00H-17H4 | 5 | 3 | | Marseille vers Vallon Dol |
| | 14 juillet | 24H/24 | 5 | 3 | Refroidissement | |
| | 15 Juillet | 24H/24 | | | | |

Le problème de refroidissement était lié à un sous dimensionnement du groupe de refroidissement du laser, car la température extérieure était trop élevée (supérieure à 35°C). Ce défaut fut corrigé ensuite par le constructeur.

Le problème de défaut de climatisation était lié à une erreur humaine lors du réglage de l'instrument. Nous avons en effet effectué un réglage manuel de l'instrument en milieu de journée, en déconnectant le système de climatisation. Or la température extérieure était supérieure à 40°C, entraînant immédiatement une coupure du laser durant 2 heures afin que la température de l'instrument retrouve sa valeur de fonctionnement (inférieure 27°C). Pour la suite, les réglages manuels nécessitant l'ouverture de l'appareil, furent donc effectués très tôt le matin ou en début de soirée.

6.3 PLANNING DE FONCTIONNEMENT DETAILLE DU LIDAR ANGULAIRE INERIS/UCLO

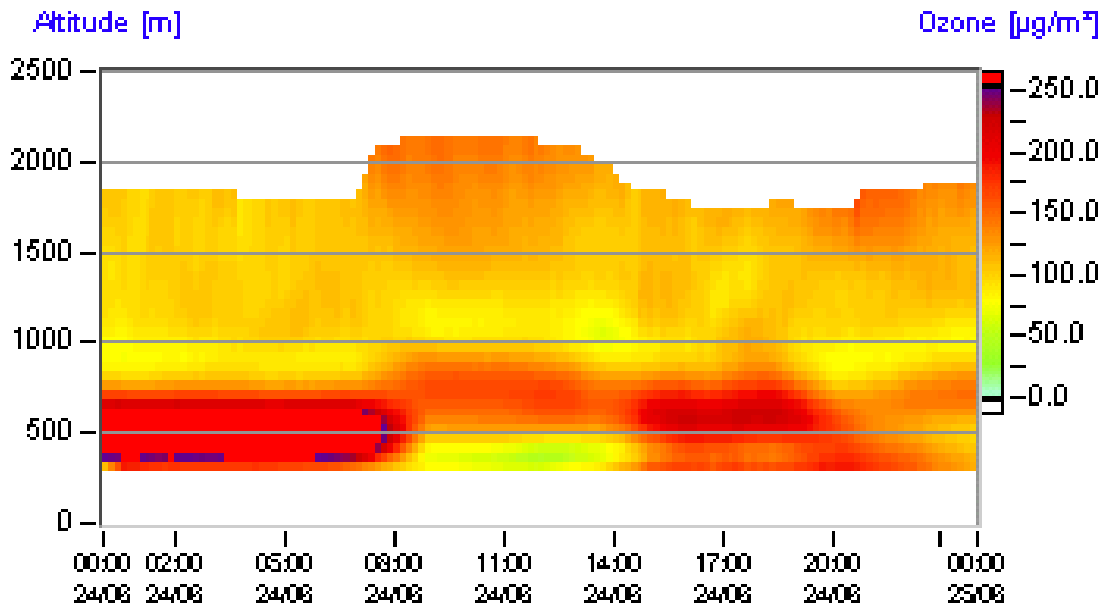
| | Date | Mesures effectuées | Présence humaine en heures | Réglages et maintenance | Problème LIDAR | Problème Logistique |
|--------------|------------|---|----------------------------|-------------------------|----------------|---|
| POI 1 | 14 Juin | LIDAR de remplacement suite à l'incendie sur la BA114 | | | | Grève du personnel devant effectuer le câblage électrique du site |
| | 15 juin | | | | | |
| | 16 juin | | | | | |
| | 17 juin | | | | | |
| | 18 juin | | | | | |
| | 19 juin | | | | | |
| | 20 juin | 08H-21H | Constante | Lampes laser | climatisation | Câblage électrique |
| POI 2A | 21 juin | 04H-21H | Constante | 3 | | |
| | 22 juin | 04H-21H | Constante | 3 | | |
| | 23 juin | 04H-21H | Constante | 3 | | |
| POI 2B | 24 juin | 04H-21H | Constante | 3 | climatisation | |
| | 25 juin | 04H-21H | Constante | 3 | climatisation | |
| | 26 juin | 04H-21H | Constante | 3 | | |
| | 27 juin | 06H-20H | Constante | 2 | | |
| | 28 juin | 06H-20H | Constante | 2 | | |
| | 29 juin | 06H-20H | Constante | 2 | | |
| | 30 juin | | 3 | | | |
| | 01 juillet | | 5 | Lampes laser | | |
| POI 3 cachée | 02 juillet | 24H/24 | Constante | 3 | climatisation | |
| | 03 juillet | 24H/24 | Constante | 3 | climatisation | |
| | 04 juillet | 24H/24 | Constante | 3 | | |
| | 05 juillet | 06H-20H | Constante | 2 | | |
| | 06 juillet | 06H-20H | Constante | 2 | | |
| | 07 juillet | 06H-20H | Constante | 2 | | |
| | 08 juillet | | 3 | | | |
| | 09 juillet | | 3 | | | |
| POI 4 | 10 juillet | 24H/24 | Constante | 3 | climatisation | |
| | 11 juillet | 24H/24 | Constante | 3 | climatisation | |
| | 12 juillet | 24H/24 | Constante | 3 | climatisation | |
| | 13 juillet | 00H-17H | Constante | 1 | | |
| | 14 juillet | 06H-20H | Constante | 1 | | |
| | 15 Juillet | 06H-20H | Constante | 1 | | |

Le problème de climatisation était lié à un sous dimensionnement du groupe de refroidissement du véhicule, car la température extérieure était trop élevée (supérieure à 35°C). Ce défaut fut corrigé ensuite par le constructeur.

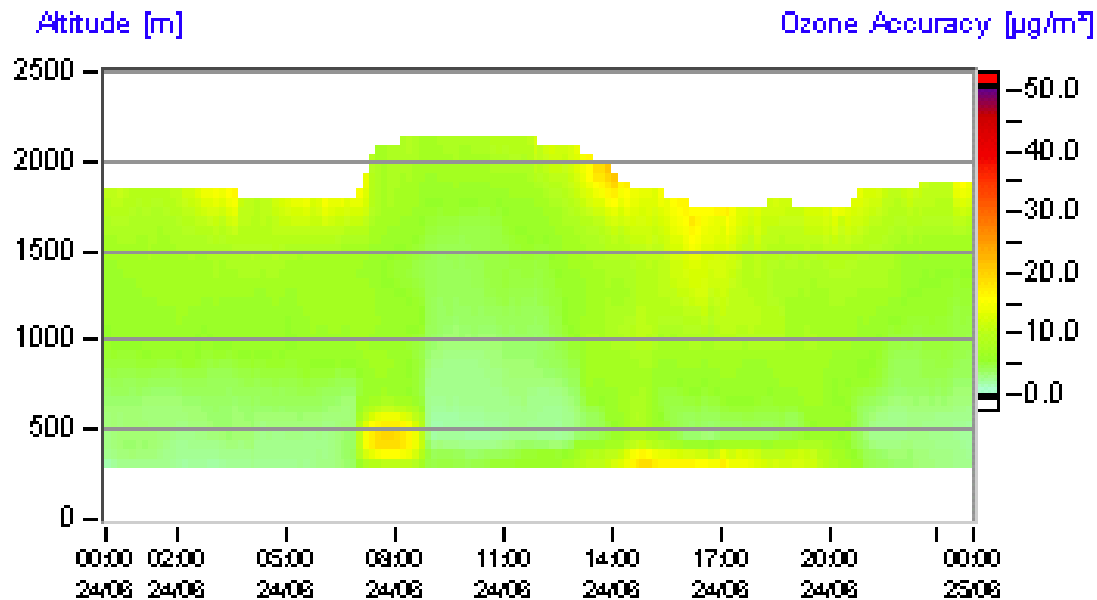
Ces deux exemples ci-dessus montrent la très importante différence des moyens humains nécessaires à leur fonctionnement. Ainsi les coûts de campagne associés à chacun de ces appareils deviennent donc très différents. A titre d'exemple, les coûts associés à chacun de ces deux instruments, ont différencié d'un facteur d'environ 10 à 15. Néanmoins les objectifs de campagne de ces deux appareils étaient sensiblement différents car le LIDAR angulaire intervient également dans de nombreuses études développées en parallèle de cette campagne : étude de la couche limite urbaine, de l'hétérogénéité horizontale des mesures, de la stratification atmosphérique,...

7. EXEMPLES DE RESULTATS LIDAR

Les figures ci-dessous présentent quelques exemples d'observations effectuées par les LIDAR lors de la campagne ESCOMPTE.

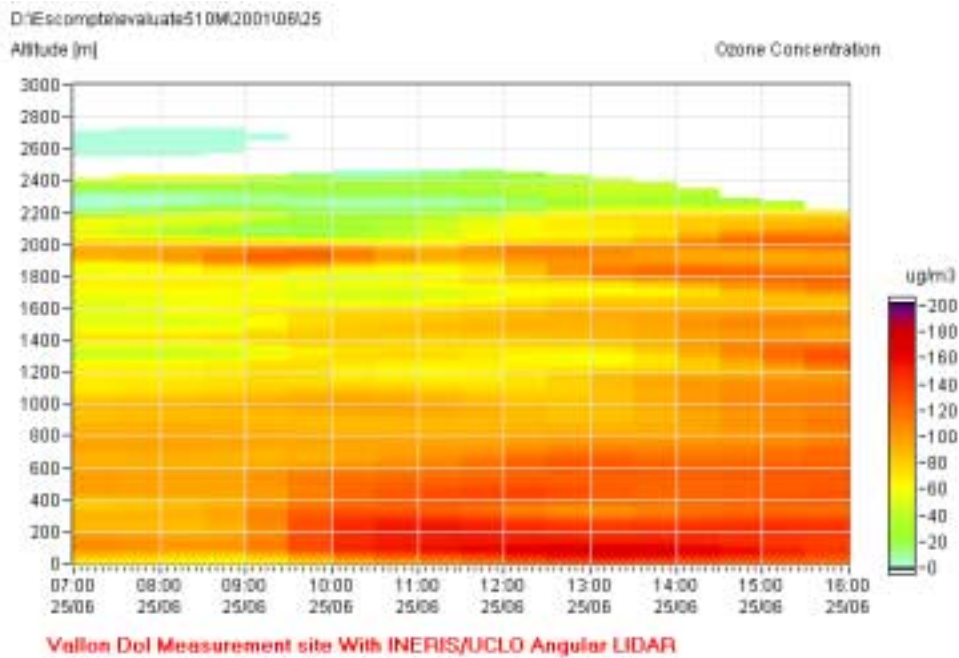
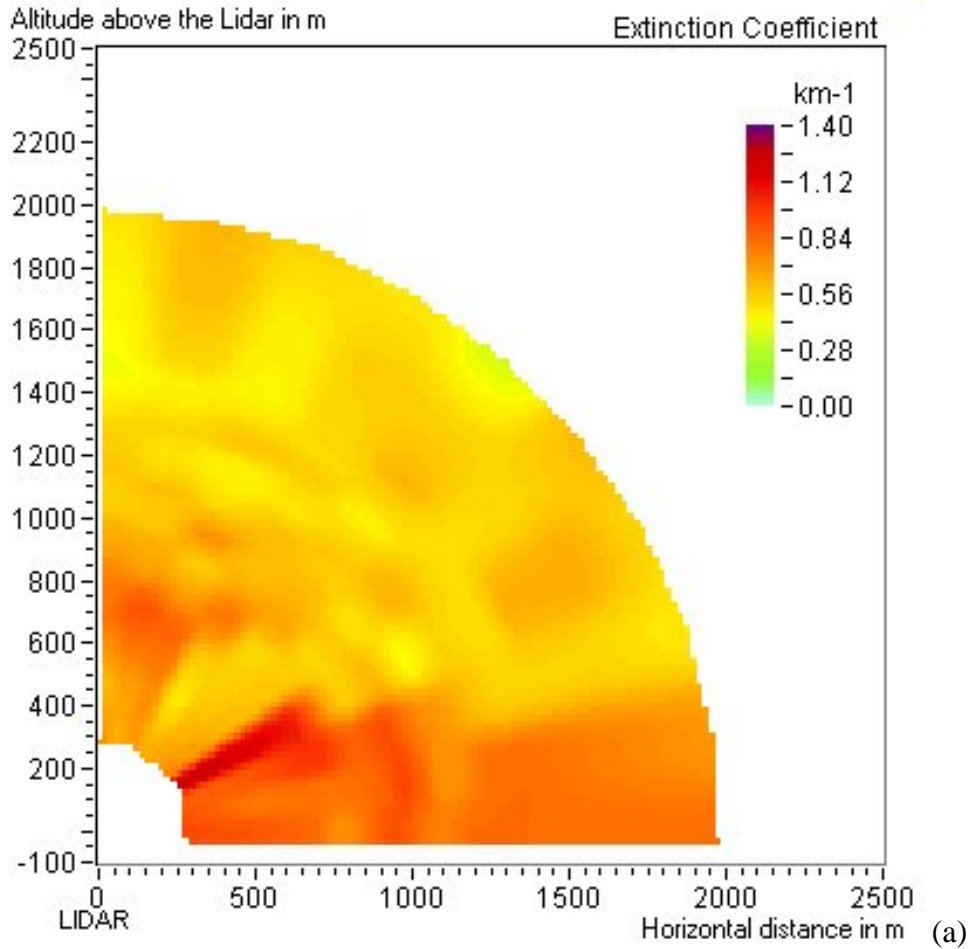


(a)



(b)

Figure 30 : Profils verticaux de concentration en ozone ainsi que la précision associée obtenus sur le site de Cadarache pour la journée du 24 juin 2001, exprimées en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$



(b)

Figure 31 : Profil angulaire d'extinction atmosphérique et profil temporel de concentration en ozone obtenus sur le site de Vallon Dol pour la journée du 25 juin 2001.

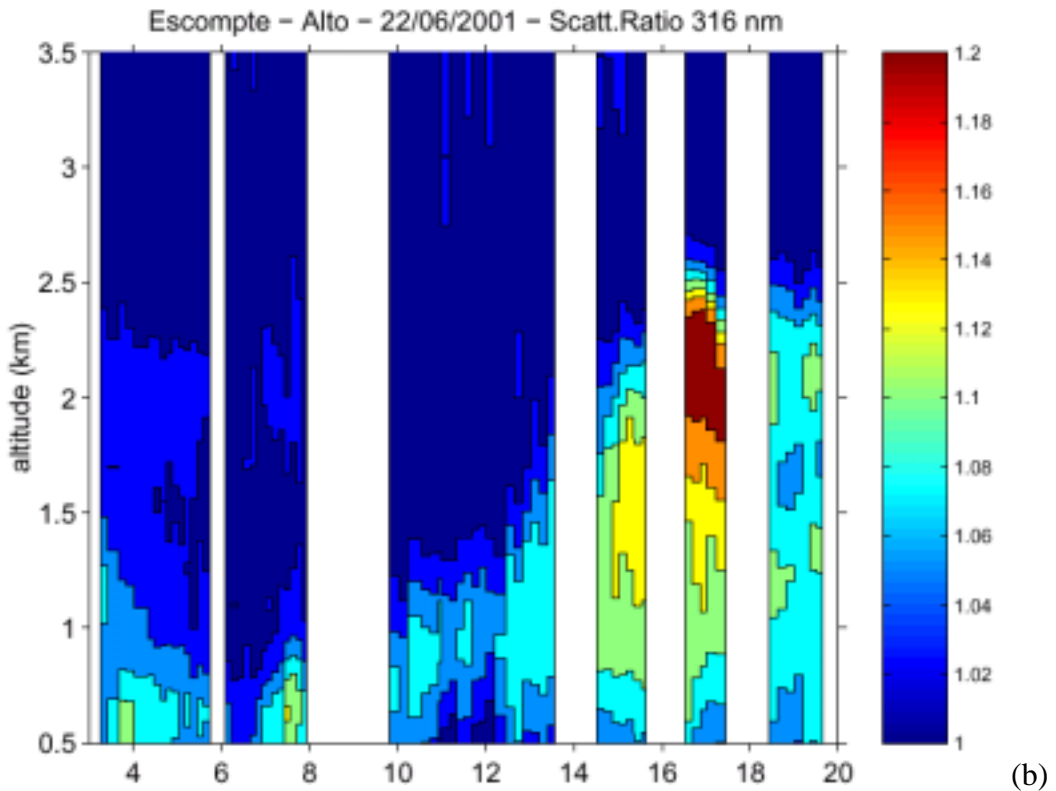
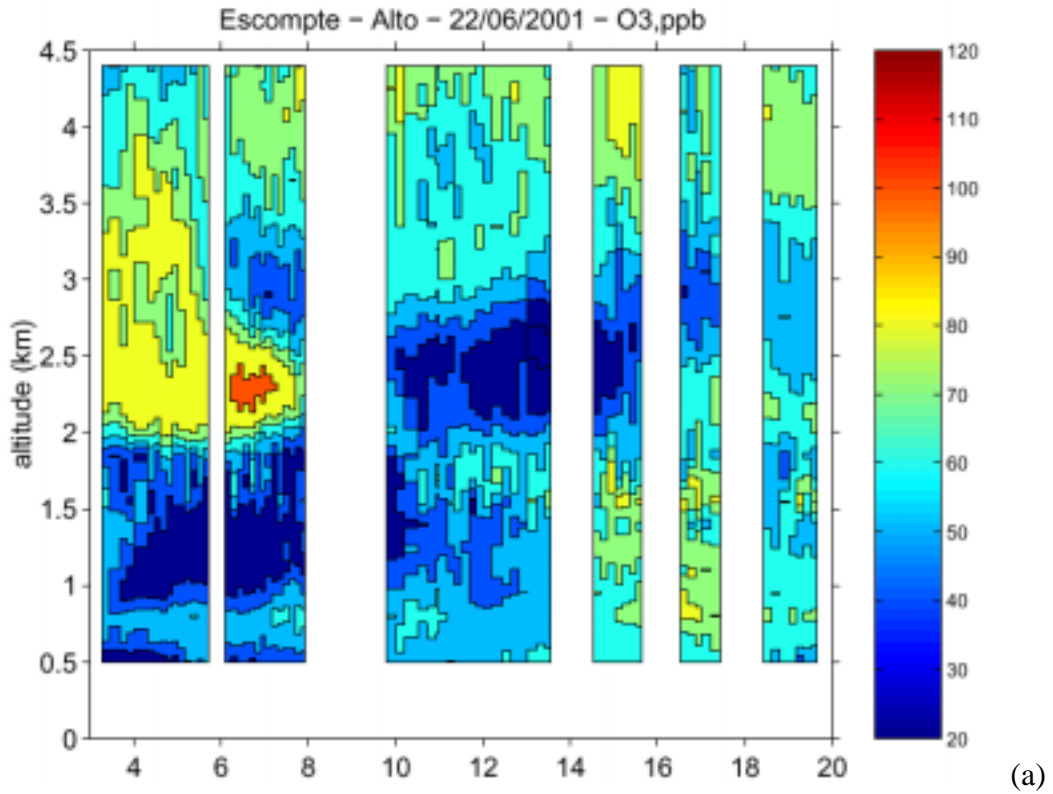


Figure 3

Figure 32 : Profils verticaux de concentration en ozone et dynamique de la couche limite obtenus sur la BA114 d'Aix les Milles pour la journée du 22 juin 2001.

La *Figure 30 (a)*, *Figure 31 (b)* et *Figure 32 (a)* montrent des exemples de profils verticaux de concentration en ozone. Toutes ces mesures, obtenus par les différents instruments, en des lieux qui leur sont propres, montrent une stratification très importante de l'atmosphère, qui correspondent, pour certaines, avec une stratification identique des champs de vents décrits ci-après.

La *Figure 31 (a)* montre un profil angulaire d'extinction atmosphérique obtenu par le LIDAR angulaire. On observe une très nette couche de fortes concentrations en aérosols à 400 m d'altitude au-dessus du LIDAR, soit donc environ 700m au-dessus du niveau de la mer. Cette couche, qui était positionnée au-dessus de la ville de Marseille, correspond très exactement avec les mesures d'extinction effectuées par le LIDAR LVT. En revanche ce dernier observe une seconde couche à 1000 m d'altitude au-dessus du niveau de la mer, couche non observée sur l'exemple de la figure 2a. L'explication de cette seconde couche pourrait être liée à une forte variation de la distribution de taille des aérosols présents au-dessus de la ville de Marseille. En effet le LIDAR angulaire, mesurant dans l'UV, est sensible à toutes les classes de tailles de particules. En revanche le LIDAR LVT infrarouge, n'est sensible qu'au grosses particules. Ainsi une analyse différentielle entre ces deux LIDAR pourrait mettre en évidence des variations importantes de la distribution de taille des aérosols avec l'altitude. Des études complémentaires dans ce sens vont être engagées.

Enfin, la *Figure 32 (b)*, obtenue par le LIDAR ALTO du SA, montre le développement de la couche limite pour la journée du 22 juin 2001. Ainsi on observe une couche limite à 1000 m d'altitude la nuit, qui se développe jusqu'à 2 500 m en cours de journée, lorsque les phénomènes convectifs se mettent en place. De même une comparaison entre les figures 3a et 3b, montre que la concentration en ozone ainsi que sa stratification n'est pas liée à la présence d'aérosols, garantissant ainsi pour cette journée l'absence d'une interférence des aérosols sur la mesure de l'ozone par LIDAR.

8. CONCLUSION SUR L'INTERVENTION DES LIDAR

ESCOMPTE était un programme inscrit dans un effort général de recherche visant à disposer d'outils permettant notamment de mieux caractériser le phénomène de pollution par l'O₃. Parmi ces moyens figurent les modèles de chimie-transport de la pollution atmosphérique, dont le but est de décrire finement les relations entre les émissions polluantes, les conditions météorologiques, et les niveaux de pollution résultants en zone urbaine et rurale. Ces modèles sont des outils indispensables pour évaluer l'efficacité des politiques de réduction des émissions polluantes, et pour procéder à des prévisions en vue de satisfaire des objectifs exigeants de qualité de l'air. Mais, afin de les paramétrer, de les optimiser et ensuite de les valider, il est fondamental de construire une large base de données tridimensionnelle qui soit à même de fournir l'ensemble de ces besoins. Pour ce faire, de nombreuses équipes ont participé, instrumentant très finement divers sites répartis sur une zone de 100 km par 100 km. Ainsi 5 LIDAR ont été utilisés lors de cette campagne, dont l'objectif principal était de fournir une information quantitative sur l'ozone présent en altitude, notamment lors des quatre phases intensives d'observations (POI) réparties tout au long de la campagne.

On a constaté que toutes les POIs ont été couvertes de manière nominale ou quasi-nominale par 4 des 5 LIDAR. Seul le LIDAR angulaire de l'INERIS installé au Vallon Dol n'a pas participé à la POI 1 : le LIDAR de remplacement, suite à l'incendie du premier LIDAR de l'INERIS sur le site de la BA114, est en effet arrivé sur le site le 19 juin. De plus, les POIs 2a et 2b ont été couvertes de manières nominales par tout l'ensemble du réseau de profilers. Enfin, suite à une demande faite par le comité de coordination ESCOMPTE, les POIs 3 et 4 ont été couvertes de manière continues, en mode 24H/24.

Le bilan de fonctionnement de l'ensemble du réseau pour la campagne ESCOMPTE est donc très satisfaisant car la construction de la base de données pourra être effectuée avec un taux de données supérieur à 80% pour chaque POI.

Il est à souligner que ce résultat positif ne préjuge pas pour l'instant de la qualité des données, celle-ci ne pouvant être révélée qu'après leur analyse plus approfondie. En revanche les premiers traitements, effectués sur les POI 2 et 3, montrent une très bonne qualité des données, avec un taux de données utilisables (validées) supérieur à 90%.

Cette campagne nous a également permis d'effectuer une évaluation simplifiée du Profiler d'ozone ELIGHT au travers du contrôle qualité effectué sur le site d'Aix les Milles, puis lors de la campagne proprement dite. Nous avons pu, après une prise en main rapide, constaté le très bon fonctionnement en mode autonome de cet instrument. En effet, seules 2 heures d'absence de données sur 1 mois de mesure en continu, sont imputables à une défaillance de l'appareil. L'ensemble des données a ensuite été traité très rapidement, permettant ainsi de construire la base de données, avec un taux de données supérieur à 96% et un taux de données validées supérieur à 90%.

Enfin, le LIDAR angulaire INERIS/UCLO, bien que nécessitant la présence constante de moyens humains, n'a pas rencontré de problèmes techniques particuliers. La qualité des données obtenues nous permet d'une part de construire la base de données avec un taux de données supérieur à 80% et un taux de données validées supérieure à 75%. Les différents profils angulaires effectués nous ont d'autre part permis de mettre en évidence de nombreux autres phénomènes, donnant lieux à la mise en place de programmes de recherches spécifiques. Ainsi par exemple, deux programmes PNCA en collaboration avec le LIDAR Vents LVT, vont s'intéresser d'une part aux phénomènes de dilution à l'échelle urbaine et à la stratification atmosphérique et d'autre part tenter de mieux quantifier l'évolution verticale du profil de distribution de taille des aérosols présents au-dessus de la ville de Marseille.

ANNEXE 3

Annexe3: caractéristiques du PROFILER VERTICAL O₃ ELIGHT

ANNEXE 3 : CARACTERISTIQUES DU PROFILER O₃ ELIGHT



Profiler LIDAR ELIGHT : (L,l,h) = 1.2m*1m*1.5m pour un poids de 450 kg

Le profiler LIDAR ELIGHT est un système laser permettant une mesure du profil vertical de concentration en Ozone. Il est autonome, contrôlé à distance via une connexion Internet, Ethernet, RTC ou encore GSM. Par ailleurs, un système GPS enregistre en permanence le positionnement du laboratoire mobile afin de permettre le géo-référencement des mesures et leur utilisation aisée en exploitation avec un SIG.

SPECIFICATIONS LIDAR

Polluants mesurés et sensibilité :

| Polluants | λ_{ON} | λ_{OFF} | $\Delta\sigma^{(*)}$ | Energie | Sensibilité VDI-DIN (**) | Portée moyenne | Portée maxi |
|-----------|----------------|-----------------|----------------------|---------|-----------------------------|-------------------|----------------|
| O3 | 282.4 | 286.3 | 9.92 | 4 mJ | 2 $\mu\text{g.m}^{-3}$ | 2.5 km | 3.5 km |

(*) : exprimée en $10^{-18} \cdot \text{cm}^2$

(**): la sensibilité exprime la limite de détection, conformément à la norme VDI DIN 4210 (intégration spatiale sur 1000 mètres et intégration temporelle sur 15 minutes).

Intégration spatiale moyenne : 100 m

Point opératoire de début de mesure : à partir de 50m d'altitude

Résolution temporelle : limitée par la précision désirée sur la mesure et par la limite de détection (plus le temps de mesure est long, plus la limite de détection est faible).

Directions de tir : verticale, à l'aplomb du système.

Etude optimale : Intégration spatiale de 100 m et intégration temporelle de ½ heure.

Format des données : une cartographie LIDAR montrant l'évolution temporelle du, profil vertical de concentration, se présente sous la forme d'une matrice ASCII, complétée par sa précision (également sous la forme d'une matrice ASCII). Il est donc possible de traiter ensuite les résultats en utilisant un tableur standard (type Excel).

Manufacturer: Elight Laser Systems
 Instrument: Profiler O3 Lidar
 Observable: Concentration of Ozone
 Location: Marignane
 Filename: Marignane.ddmmaaaa.dat
 StartTime: 11.06.01 00:00:00
 EndTime: 11.06.01 23:45:00
 StepTime: 15 min
 NrOfRows: xxx
 TimeSmooth: 30 min
 StartY: 0 m
 EndY: 2500 m
 StepY: 20 m
 NrOfColumns: xxx
 AltitudeSmooth: 50 m
 Unit: ug/m3
 InvalString: -99.9
 Delimiter: Tab
 ColumnsToSkip: 1
 RowsToSkip: 1

DD.MM.YYYY hh:mm:ss 0m 20m 40m 60m 80m 100m...
 11.06.2001 00:00:00 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9
 11.06.2001 00:15:00 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9
 11.06.2001 00:30:00 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9
 11.06.2001 00:45:00 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9
 11.06.2001 01:00:00 -99.9 -99.9 -99.9 -99.9 38.6 38.4
 11.06.2001 01:15:00 -99.9 -99.9 -99.9 40.4 39.9 39.5
 11.06.2001 01:30:00 -99.9 -99.9 43.8 42.7 41.9 41.3
 11.06.2001 01:45:00 -99.9 -99.9 47.0 45.7 44.6 43.8
 11.06.2001 02:00:00 -99.9 52.5 50.6 49.0 47.7 46.7

Evolution temporelle de profils verticaux de concentration en O₃.

BESOINS ET CONTRAINTES EXPERIMENTALES

Accès au site : aucune contrainte particulière car il s'agit d'un système ayant un poids de 300 kg, pour une longueur de 2m, une largeur de 1m et une hauteur de 2m.

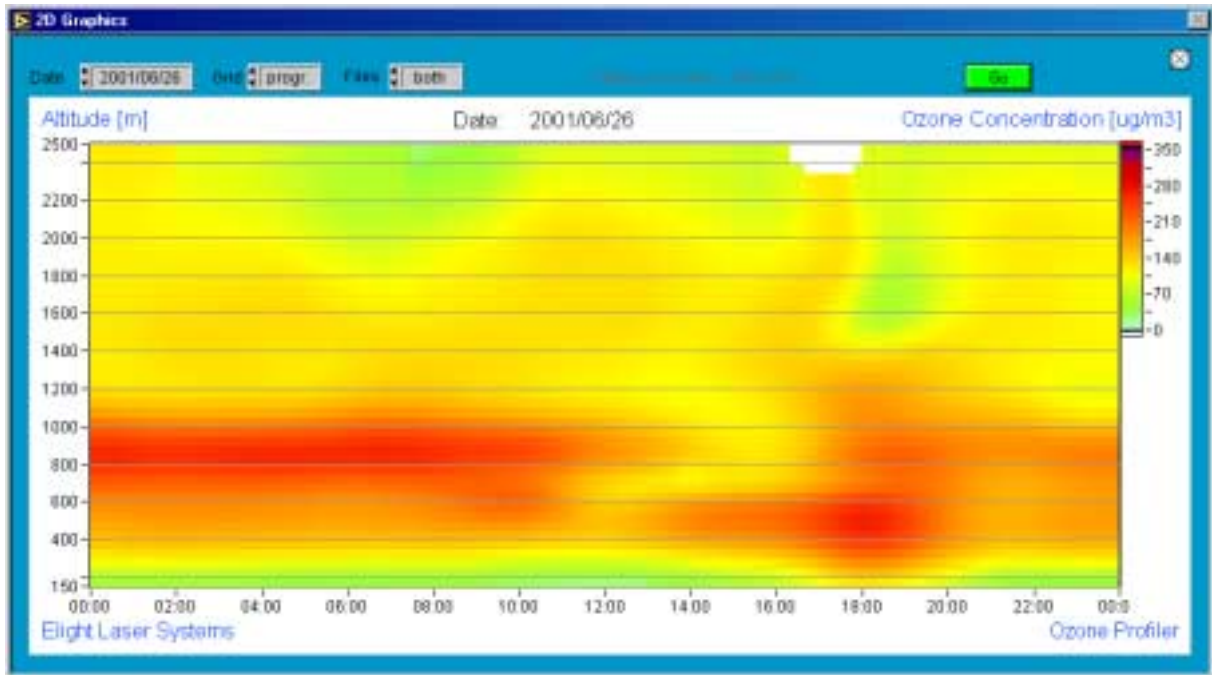
Alimentation électrique : la puissance nécessaire au fonctionnement général du profiler LIDAR est d'environ 8 KW en 3Phases-Neutre-Terre à 16A ou bien en 1Phase-Neutre-Terre à 32A (régime TN ou IT). Le point d'alimentation doit se trouver si possible à une distance inférieure à 100 m du point de mesure LIDAR afin d'éviter de trop longues rallonges entraînant de fortes pertes de charges.

Logistique le système est autonome, contrôlé à distance. Sur des sites non protégés une surveillance particulière doit être prévue.

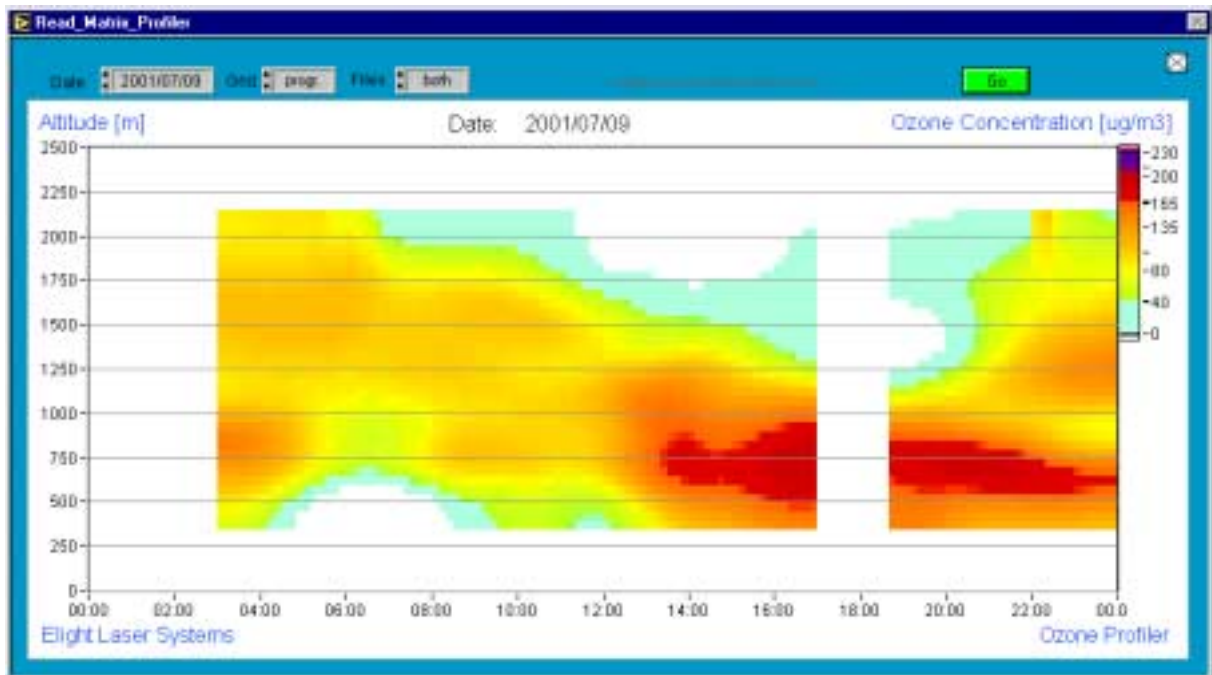
Contraintes de fonctionnement : Aucune

Interférences : des interférences sont possibles avec de fortes concentrations en aérosols, entraînant une augmentation de la déviation standard affectée aux mesures LIDAR. Lors de cas de smog, la concentration en Ozone mesurée peut ainsi être faussée d'environ 10% (voir 20% lors de cas extrême).

EXEMPLES DE RESULTATS DU PROFILER OZONE



Evolution temporelle du profil vertical de concentration en ozone, Site de Cadarache le 26 Juin 2001 : situation de pic de pollution (POI 2B)



Evolution temporelle du profil vertical de concentration en ozone, Site d'Aix les Milles le 09 juillet 2001 : situation très orageuse

ANNEXE 4

**Annexe 4: contrôle qualité des analyseurs
d'oxydes d'azotes d'O₃ lors de la campagne
ESCOMPTE**

ANNEXE 4 : Contrôle qualité des analyseurs d'oxydes d'azotes et d'O₃ durant ESCOMPTE

1. RESUME

La campagne ESCOMPTE a réuni de nombreux appareils venant d'horizons très différents pour l'analyse des constituants gazeux tels que O₃, NO_x, COV et radicaux libres en différents sites répartis sur la zone concernée par ESCOMPTE. Les résultats obtenus seront introduits dans une base de données unique. Les mesures ont été effectuées au sol ou par des appareils embarqués dans des avions. Il était donc indispensable de s'assurer de la bonne qualité des mesures des analyses au départ de la campagne. Pour ce faire, au cours de la période allant du 4 au 8 juin 2001 trois objectifs ont été poursuivis :

- 1) vérifier le bon fonctionnement des appareils utilisés et calculer les facteurs liés aux variations de température et de pression pour les appareils embarqués,
- 2) effectuer une calibration en se servant de sources uniques vérifiées auparavant par le Laboratoire National d'Essai,
- 3) réaliser une mini campagne d'intercomparaison.

La majorité des appareils utilisés durant la campagne ont été testés. Le fait de choisir la base d'Avignon a permis notamment de réunir les appareils embarqués dans les camions, les avions et également ceux en poste fixe. En fin de période, tous les appareils présents ont effectué une mesure de l'Ozone durant quelques heures. Cette intercomparaison a été réalisé par l'équipe de l'INERIS.. Tous les documents concernant la traçabilité de la campagne d'intercomparaison font l'objet de ce présent rapport détaillé pour l'ozone et les oxydes d'azote.

2. OBJECTIF DU CONTROLE QUALITE A AVIGNON

Avant la campagne de mesures, durant la période du 5 au 10 juin, les essais d'assurance et de contrôle qualité nous a permis de :

- vérifier le bon fonctionnement de tous les analyseurs de NO_x et d'O₃ qui nous ont été présentés et notamment les réglages des capteurs de température et de pression permettant les calculs de compensation,
- de leur attribuer le bon coefficient de calibrage par rapport à une référence unique délivrée par le LNE,
- d'effectuer une intercomparaison sur l'ozone, de tous les appareils disponibles sur le site de la base aérienne d'Avignon.

Le site de la base aérienne d'Avignon situé à 43° 54.6 latitude Nord et 4° 53.9 longitude Est, a été choisi pour son infrastructure pouvant accueillir toutes les équipes travaillant en même temps dans les différents domaines tels que les COV, le CO, l'ozone, les NO_x.

3. DEROULEMENT DU QA/QC CHIMIE OZONE ET COMPOSES AZOTES NO ET NO₂

Le but de cette opération a été de vérifier le bon fonctionnement des analyseurs et de "raccorder" ou "calibrer" par rapport à une référence nationale unique, (à l'aide "d'étalons de transferts") tous les analyseurs d'ozone et d'oxydes d'azote qui nous ont été présentés et qui seront utilisés durant cette campagne ESCOMPTE.

3.1 OZONE "TRANSFERTS D'OZONE " ET ANALYSEURS

3.1.1 Principe

- Principe de l'analyse de l'O₃ : basé sur l'absorption U.V.

La loi de Beer Lambert à 254 nm est appliquée avec le coefficient 308 atm⁻¹ cm⁻¹.

Les conditions de température et de pression dans la chambre d'absorption sont mesurées à l'aide de capteurs.

Une pompe permet de faire varier différentes conditions de ce vide. Ses capteurs de température et de pression sont raccordés à l'aide d'autres capteurs mobiles vérifiés à la chaîne d'étalonnage COFRAC/ BNM N° 2-1251 disponible à l'INERIS.

- Calibrage des analyseurs d'O₃

Ils ont tous été calibrés à l'aide d'un "étalon de transfert" modèle 49PS TEI à 90ppb et 180ppb ± 1.6% (incertitude élargie) lui-même raccordé à la référence du LNE (Photomètre direct NIST).

- Calibrage du "transfert" de Météo France SONIMIX 3001

Météo France avait apporté son "transfert" qui est un matériel commercialisé par LNI. Nous l'avons calibré par comparaison à l'aide d'un autre transfert tous deux alimentant alternativement le même analyseur d'ozone.

Le coefficient du transfert SONIMIX 3001 est le suivant: valeurs O₃ générées par le Sonimix = valeurs vraies* 0.974. Cela veut dire que le Sonimix 3001 fournit des concentrations d'ozone légèrement sous-estimées: - 2.6 % par rapport à son affichage.

- Inter comparaison des 2 photomètres INERIS et AIRMARAIX :

Ces 2 photomètres ont été comparés au préalable avant la campagne en mars 2001. Compte tenu de l'incertitude due à la valeur vraie de 1.6 % fournie par le LNE et de la répétabilité des deux appareils à 1.2 % nous pouvons dire que les calibrages effectués par l'INERIS sont à ± 3%. C'est cette valeur que nous prendrons dans le calcul d'incertitude globale des analyseurs dans l'application de la norme ISO 14956 qui est une somme quadratique de toutes les incertitudes élémentaires.

- Calibrages

Dix sept analyseurs d'O₃ ont été calibrés. Pour chaque analyseur d'ozone, nous avons raccordé les capteurs de température, de pression avec nos baromètres et thermomètres de référence et ensuite nous avons recalé l'analyseur à l'aide de mélanges de gaz pour étalonnage aux 3 niveaux de concentration prévus: 0 ; 90 ; 180 ppb générées dynamiquement à partir des transferts dont les valeurs ont été déterminées par le LNE.

Pour chaque appareil calibré et selon sa gamme d'utilisation, nous avons donné sur une feuille Excel l'équation de régression de la sortie en millivolts de l'appareil en fonction des 3 concentrations d'ozone générées. Les utilisateurs de ces analyseurs ont utilisé cette équation dans le système d'acquisition des données aussi bien pour l'inter comparaison des instruments que pour la campagne de mesures proprement dite.

Voir en annexe A les 16 fichiers Excel concernant les calibrages des analyseurs d'ozone.

3.1.2 Matériel mis en œuvre

Liste du matériel utilisé pour le QA/QC ozone.

Pour vérifier le bon fonctionnement des analyseurs d'ozone nous avons eu besoin du matériel suivant:

- une pompe à vide à palettes Beaudouin ref 1099A pour effectuer différents paliers de vide dans la chambre de mesure,
- un ensemble de lecture du vide: boîtier de lecture FLK 83-3 modèle de base réf. 284-21-87 et capteur de vide PV350 ref. 181-63-39 avec câble électrique de branchement chez Radio Spare,
- un ensemble de mesure de la pression atmosphérique HUBA CONTROL type 680 99309 plage 0.8 à 1.1 bar absolu, associé à un boîtier électrique confectionné par l'INERIS, (adresse du capteur: 19 rue de la république BP 6 57520 GROSBLIEDRESTORFF – Tél.: 0387091110 - Fax: 0387090598),
- un ensemble de mesure de la température : sonde Pt 100 réf: 339 54 68 et du boîtier Testo 520 réf: 248 31 54 chez Radio Spare.

Ces capteurs ont été raccordés à la chaîne d'étalonnage BNM-COFRAC pression température de l'INERIS.

3.1.3 Raccordement des photomètres de transfert utilisés.

Nous avons raccordé à Avignon dès le 04 juin les analyseurs d'ozone aux niveaux 0 ; 90 et 180 ppb avec le photomètre prêté par le Réseau AIRMARAIX, celui de l'INERIS étant à Aix les Milles durant la même période et utilisé pour le calibrage des ballons captifs et du matériel embarqué sur l'ULM.

Les analyseurs gérés par le Réseau AIRMARAIX et utilisés pour la campagne ESCOMPTE ont été raccordés par AIRMARAIX avant la campagne.

3.2 COMPOSES AZOTES

3.2.1 Principe de la mesure et recommandations

La mise en œuvre a été la suivante:

- utilisation des analyseurs NO, NO₂, NO_x modèle 42C et modèles AC31M par chimiluminescence.
- pour la mise en œuvre du calibrage et l'utilisation de mélanges de gaz pour étalonnage en NO et NO_x raccordés à la référence nationale française unique au LNE,

- utilisation d'un diluteur à orifices soniques 3002 de chez LNI permettant de mettre en œuvre la T.P.G.. Ceci va nous permettre de déterminer le rendement de conversion du NO₂ en NO. L'ensemble NO et composés azotés réduits est appelé NO_x.

Remarque N°1: les convertisseurs au molybdène ne sont pas spécifiques au NO₂ mais à d'autres composés azotés tels que l'acide nitrique. Pour les mesures spécifiques du NO₂ d'autres instruments tels que NO_x Toy, Luminol, ont été mis en œuvre.

- génération de concentrations connues de NO₂: lors de la mise en œuvre de la T.P.G.: la différence en NO = à la différence en NO₂. (mesure différentielle du NO₂).

Remarque N°2: les cylindres de NO₂ commandés pour la campagne et que nous devons raccorder au LNE, n'ayant pas été livrés à la date prévue, nous avons utilisé la méthode mentionnée ci-dessus.

3.2.2 Matériel utilisé pour le QA/QC composés azotés et préparatifs

Pour le raccordement des analyseurs d'oxydes d'azote nous avons utilisé le matériel et la procédure suivante:

1 analyseur Thermo Environnemental NO/NO_x/NO₂ Modèle 42C, gamme 0- 1 000 ppb.

1 analyseur Environnement SA NO/NO_x/NO₂ Modèle AC31M, gamme 0- 1 000 ppb.

Ces 2 analyseurs ont été raccordés avec des bouteilles raccordées au LNE :

- 788 ppb en NO et 812 ppb en NO_x à ±1% près dont nous disposions à l'INERIS
- 250 ppb en NO et 251 ppb en NO_x à ± 1% près.

La T.P.G. (Titration en Phase Gazeuse) a été mise en œuvre à partir d'une bouteille de NO à haute concentration à 86.7 ppm en NO et 88.9 ppm en NO_x pour respecter la cinétique de réaction de la TPG ce qui nous a permis :

- de déterminer le rendement du four de conversion des analyseurs en examinant la variation de la voie NO_x: $R = 100 - \{(\Delta \text{NO}_x) / (\Delta \text{NO})\}$. C'est une procédure relative différentielle très précise qui élimine les erreurs absolues,
- de calibrer la voie NO₂ par le gaz de concentration connue en NO₂ notamment pour les analyseurs Thermo Environmental disposant de coefficients de sensibilité indépendants sur les voies NO, NO_x, NO₂.

3.2.3 Procédure d'utilisation des cylindres de gaz

Afin d'éviter la contamination des cylindres de mélanges de gaz pour étalonnage par l'oxygène et l'humidité, nous avons utilisé la procédure suivante:

- les cylindres sont équipés de détendeur en INOX équipé de raccord C munis de 3 vannes et 3 voies afin d'éliminer l'humidité et l'oxygène à l'intérieur des volumes morts des détendeurs à leur première mise en service,
- la mise sous vide du détendeur afin d'éliminer l'humidité et l'oxygène
- la mise en œuvre du protocole fourni par l'Université de Créteil permettant de détendre les gaz de NO à basse concentration dans les meilleures conditions de qualité,
- la génération de NO/ NO₂ en excès contrôlé par rotamètre à pression atmosphérique.

3.3 NOTE SUR LE CALCUL DES INCERTITUDES DES MESURES EFFECTUEES DANS L'ENVIRONNEMENT SELON LA NORME ISO 14956

OZONE: l'incertitude des photomètres (NIST) transferts raccordés au LNE est de 1.2%.

L'écart observé entre les 2 « transferts » utilisés raccordés au même photomètre est de 1.6 %. L'incertitude du calibrage de l'ozone est environ 3 %.

Dans l'environnement, les analyseurs subissent les différentes influences suivantes: température, pression atmosphérique, alimentation électrique, humidité relative dans la ligne d'échantillonnage, dérive, linéarité, interférents (COV, Hg,...), erreur due aux convertisseurs au molybdène, lignes d'échantillonnage, erreur de moyennage notamment pour les appareils cycliques, filtres d'échantillonnage, etc... L'incertitude des mesures est la combinaison quadratique de l'ensemble. Elle doit être inférieure à 15% selon les exigences de la Directive européenne. Voir en **annexe D** un calcul d'incertitude selon la norme ISO14956 qui est une combinaison quadratique des incertitudes élémentaires effectuée dans les conditions suivantes:

- répétabilité au niveau zéro = 2 ppb
- répétabilité au niveau d'échelle à 120 ppb = 3 ppb
- écart de linéarité = 3 % à 120 ppb
- dérive à court terme d'échelle = 1 ppb
- influence de la pression d'échantillonnage = 1% de 120 ppb / 1 KPa
- influence de la température d'environnement = 3 ppb / 10 °C
- influence de la température d'échantillonnage = 3 ppb / 10 °C
- influence de l'alimentation électrique = 3 ppb / 10 Volts
- erreur de moyennage = 3 % à 120 ppb
- interférence de l'hygrométrie des aromatiques et du mercure = 10 ppb à 120 ppb
- incertitude du gaz de calibrage = 3% à 120 ppb
- répétabilité sur site durant 3 mois 5% de 120 ppb
- dérive à long terme du zéro = 7 ppb sur 3 mois
- dérive à long terme du point d'échelle = 3% sur le niveau 120 ppb

*3.4 QUELQUES PHOTOGRAPHIES ILLUSTRANT LE TRAVAIL DES EQUIPES
DURANT LE QA/QC A AVIGNON*