



Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air



Etude n° 9 - Instruments à long trajet optique

SYNTHESE ANNUELLE SUR LES INSTRUMENTS « A LONG TRAJET OPTIQUE » LIDAR - DOAS

Novembre 2004
Convention : 04000087
Emeric FREJAFON





Convention 087/2004 financée par la Direction des Préventions des
Pollutions et des Risques (DPPR)

NOVEMBRE 2004

personnes ayant participé à l'étude

Emeric FREJAFON, Amandine FIEVET, Ludivine GRAS

Ce document comporte 33 pages (hors couverture et annexes).

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Emeric FREJAFON	Rémi PERRET	Martine RAMEL
Qualité	Ingénieur Unité AIRE	Responsable Unité AIRE	Responsable LCSQA/INERIS
Visa		2	

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	3
RESUME GENERAL	6
ETALONNAGE SUR SITE DES INSTRUMENTS A LONG TRAJET OPTIQUE DE TYPE DOAS : UTILISATION DE CELLULES SCHELLES	8
1. INTRODUCTION :	8
2. PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS	10
2.1 PROTOCOLE DE CALIBRAGE	10
2.2 DESCRIPTION TECHNIQUE DE LA CELLULE SCHELLEE	11
2.3 ETUDE DE LA REACTIVITE DE LA CELLULE	11
2.4 ETUDE DE LA STABILITE DES GAZ EN PRESENCE DE FLUX LUMINEUX	12
2.5 ETUDE DE LA LINEARITE DES DOAS A L'AIDE D'UNE CELLULE SCHELLEE	13
2.6 CELLULE SCHELLEE MULTI-GAZ	13
3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	15
RETOUR D'EXPERIENCE SUR L'UTILISATION DES DOAS : CAMPAGNE EN ZONE AEROPORTUAIRE	16
1. PREAMBULE	16
2. CADRE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS :	16
3. PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS PAR LE DOAS :	17
3.1 POLLUANTS MESURES ET CONFIGURATION DU SITE	17
3.2 CONTROLE QUALITE DES MESURES DOAS ET POLLUANTS SURVEILLES	17
3.3 TAUX DE FONCTIONNEMENT DU DOAS	18
ASSISTANCE TECHNIQUE SUR L'UTILISATION DES DOAS DANS LES AASQA	20
1. AMPASEL	20
2. AIRAQ	20
ASSISTANCE TECHNIQUE SUR L'UTILISATION DES LIDAR	22
1. UTILISATIONS DES LIDAR COMMERCIALISES PAR LA SOCIETE ELIGHT LASER SYSTEM GMBH	22
1.1 SYNTHESE SUR L'UTILISATION DES LIDAR ELIGHT	22
1.2 SYNTHESE SUR LE CARACTERE OPERATIONNEL DES LIDAR ELIGHT	24
1.3 AVENIR DES LIDAR ELIGHT SUITE A LA MISE EN CESSATION D'ACTIVITE DE LA SOCIETE	24
2. ASSISTANCE AUX DEVELOPPEMENTS DE LIDAR COMMERCIAUX	26
2.1 DESCRIPTION DU LIDAR COMMERCIALISE PAR LEOSPHERE	26
2.2 DESCRIPTION DU LIDAR COMMERCIALISE PAR CIMEL	29
2.3 DESCRIPTION DU LIDAR COMMERCIALISE PAR VAISALA SA	30
2.4 AUTRES CONSTRUCTEURS DE LIDAR A FAIBLE COUT, DEDIES A LA SURVEILLANCE DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE	31
2.5 EVALUATION DES PERFORMANCES DES APPAREILS	32

LISTE DES ANNEXES **34**

**ANNEXE A : ETALONNAGE SUR SITE DES INSTRUMENTS A LONG TRAJET
OPTIQUE DE TYPE DOAS : UTILISATION DE CELLULES SCHELLES** **36**

**ANNEXE B : REPONSES TECHNIQUE DE L'INERIS SUR L'UTILISATION ET LE
FONCTIONNEMENT DES LIDAR CONSTRUITS PAR LA SOCIETE ELIGHT LASER
SYSTEM GMBH** **60**

ANNEXE C : LIDAR COMMERCIALISE PAR LA SOCIETE LEOSPHERE **90**

ANNEXE D : LIDAR COMMERCIALISE PAR LA SOCIETE CIMEL ELECTRONIQUE
94

ANNEXE E : LIDAR COMMERCIALISE PAR LA SOCIETE VAISALA **96**

**ANNEXE F : COMPTE RENDU DE LA REUNION TECHNIQUE EPFL-COPARLY-
INERIS RELATIVE AUX DOAS 2000 TEI RECEMMENT ACQUIS PAR COPARLY** **100**

RESUME GENERAL

Dans le cadre des missions du LCSQA, nous avons effectué durant l'année 2004 plusieurs actions relatives aux instruments à long trajet optique DOAS :

- Réaliser des essais de faisabilité d'utilisation de cellules scellées comme support d'étalonnage sur site des instruments à long trajet optique de type DOAS. Cela nous a permis de concevoir, après de nombreuses tentatives infructueuses, une cellule scellée appliquée aux étalonnages sur site des DOAS pour les polluants NO et SO₂. En revanche, la trop grande réactivité du NO₂ vis-à-vis d'un rayonnement lumineux incident, n'a pas permis d'obtenir des résultats concluants concernant ce polluant.
- Fournir une assistance technique aux AASQA souhaitant installer des DOAS sur site et plus particulièrement aider les associations agréées COPARLY, AMPASEL, AIRMARAIX et AIRAQ à évaluer les performances de leurs appareils, configurer leurs sites, valider les installations ou réaliser des étalonnages sur site. Cela a notamment permis de confirmer le rendu opérationnel du DOAS de AIRAQ installé à Arcachon, qui est configuré pour le suivi quotidien de l'indice ATMO dans cette ville.
- Poursuivre la mise en circulation du calibrateur d'ozone dans les AASQA et former certains utilisateurs. Les formations, qui ont été réalisées dans les AASQA ont notamment permis de confirmer la stabilité des mesures du DOAS de AIRAQ et de valider l'ensemble des résultats enregistrés par cet instrument.
- Effectuer une synthèse annuelle sur l'utilisation des DOAS. Il convient de noter, en particulier, que l'INERIS a réalisé, pour le compte de l'ONERA (Pr. R. Ramarosson), une campagne de mesure sur une zone aéroportuaire parisienne qui impliquait notamment un DOAS. Les polluants suivis ont été NO, NO₂, SO₂, Benzène, Toluène et Xylène de manière quantitative, mais également HCHO, HNO₂, PAN, Phénols et NH₃ de manière qualitative car aucun étalonnage autre que le réglage de l'offset n'ayant pu être réalisé, faute de méthodes adaptées disponibles. Les premiers résultats obtenus ont permis de montrer un rendu opérationnel optimal sur l'ensemble de la période de mesures avec un taux de données validées supérieur à 80% pour la majorité de polluants suivis, mais également de mettre en évidence une corrélation étroite entre l'activité aéroportuaire et certains polluants. Enfin, il s'agit d'une campagne préliminaire, devant donner lieu à une campagne de mesures de plus grande envergure courant 2005 au cours de laquelle nous souhaitons réaliser un étalonnage du DOAS pour le HCHO.

Les missions dans le cadre de la présente étude concernaient également une veille sur les instruments à long trajet optiques de type LIDAR. Dans ce cadre, nous avons réalisé les actions suivantes :

- Rédaction, à la demande de COPARLY et de l'ADEME, d'une note technique sur le fonctionnement et l'utilisation des LIDAR construits par la société ELIGHT Laser System GmbH, mais également proposer différentes options sur la manière dont COPARLY pourrait envisager l'utilisation de son LIDAR. Ce document, qui recense 44 études et qui intègre le retour d'expérience de 12 utilisateurs, a permis de mettre en évidence un lien étroit entre la technique utilisée et son degré d'opérationnalité en temps qu'outil de surveillance en continu. Nous avons ainsi pu montrer que les lidar 510M utilisant des laser Titane:Saphire souffrent de dysfonctionnements et nécessitent un personnel dédié. En revanche, les lidar UV11 et les profiler d'ozone utilisant des laser Nd :Yag de moyenne à forte puissance sont des outils plus opérationnels pour des campagnes de mesure. Ainsi, on a pu constater que les activités de mesures en routine sont réalisées par des instituts avec des LIDAR reposant sur un laser Yag Continuum. Néanmoins, si l'activité des mesures en routine s'est largement développée, il s'agit d'une surveillance des phénomènes atmosphériques et non pas une surveillance réglementaire dans le cadre des missions des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air.
- Réaliser une veille scientifique et technologique annuelle sur ce type d'instrument, qui a permis de mettre en évidence l'arrivée sur le marché de nouveaux type de LIDAR à faible coût permettant de fournir en temps réel et en continu, un suivi de la dynamique de la couche limite et de la charge en aérosols présents (visibilité atmosphérique). Des contacts sont notamment en cours avec des constructeurs français et étrangers visant à évaluer le caractère opérationnel de ces instruments.

ETALONNAGE SUR SITE DES INSTRUMENTS A LONG TRAJET OPTIQUE DE TYPE DOAS : UTILISATION DE CELLULES SCELLEES

1. INTRODUCTION :

L'INERIS, dans le cadre de sa mission d'assistance auprès des AASQA, avait programmé la réalisation d'une étude de faisabilité sur l'utilisation de cellules scellées comme support d'étalonnage des instruments DOAS sur site. En effet, si l'étalonnage de l'ozone est actuellement opérationnel (calibrateur d'ozone en circulation dans les AASQA), ce dernier reste problématique pour les autres polluants car il repose sur l'utilisation de cylindres de gaz haute pression et haute teneur. Or, la certification de ces teneurs (environ 1 000 ppm) est délicate et leur utilisation peut s'avérer impossible sur certains sites, compte tenu des moyens d'accès disponibles (échelle, trappe) ou des contraintes de sécurité afférentes. Nous avons donc cherché à proposer une méthodologie d'étalonnage sur site qui tienne compte de ces contraintes. Pour ce faire, nous avons choisi de nous orienter sur l'utilisation de cellules scellées comme outils d'étalonnage multi-points des DOAS.

L'étude a été menée à bien avec le dioxyde de soufre (SO₂) et le monoxyde d'azote (NO) où le protocole d'étalonnage et sa comparaison avec les techniques actuellement utilisées ont fourni de bons résultats.

En revanche, l'étalonnage pour les polluants BTX n'a pu être réalisé car les contraintes afférentes à l'utilisation de ces gaz n'étaient pas compatibles avec l'état de sécurité actuel de la galerie utilisée pour les essais DOAS. De même, de premiers essais ont été réalisés pour le polluant NO₂ qui ont fourni des résultats très peu concluants pour plusieurs raisons et notamment compte tenu de la réactivité du NO₂ en présence d'un rayonnement lumineux qui rend délicate l'utilisation de ce gaz de manière statique.

L'intégralité de cette étude figure en annexe A de ce document.

2. PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS

2.1 PROTOCOLE DE CALIBRAGE

L'exploitation des DOAS par les réseaux de surveillance est rendue difficile compte tenu de la lourdeur actuelle du protocole qui impose l'utilisation sur site de cylindres de gaz haute teneur et haute pression. En effet, l'étalonnage de l'appareil consiste à simuler des concentrations de polluants en cellule de longueur réduite par rapport au trajet optique. La cellule de calibration est ainsi remplie avec un gaz étalon (SO₂, NO_x ou O₃) de concentration C₀ à une pression P_{cellule}. La concentration réelle C_{équivalente} sur toute la longueur L du trajet optique est donnée par la formule suivante :

$$C = C_0 * (P_{cellule} / P_{atm}) * (\ell / L) \quad (1)$$

Avec C₀ : concentration en SO₂, NO_x ou O₃ dans la cellule (en ppm)

P_{cellule} : pression à l'intérieur de la cellule (en bar)

P_{atm} : pression atmosphérique (1 atm = 1,013 bar)

ℓ : longueur de la cellule (quelques mètres)

L : longueur du trajet optique (une centaine de mètres)



Photo 1 : Anciennes cellules d'étalonnage de l'INERIS

Sur la base de l'équation précédente, afin de réaliser un étalonnage il est donc nécessaire de changer la concentration détectée par le récepteur en modifiant la pression interne à la cellule, en changeant la concentration en gaz dans la cellule ou bien encore en changeant sa longueur. Jusqu'à ce jour, les AASQA ainsi que l'INERIS, qui utilisent des cellules de longueur fixe à pression ambiante sont alors contraints d'utiliser plusieurs cylindres de gaz ou bien d'utiliser des diluteurs soniques. Si cette technique est réalisable dans la galerie de l'INERIS, elle devient délicate sur des sites où les accès sont difficile (toits d'immeubles) voire impossibles sur certains sites (zone aéroportuaire, établissement recevant du public).

Afin de proposer une solution adaptée aux contraintes des AASQA, nous avons envisagé une technique d'étalonnage reposant sur une modification de la pression interne dans une cellule c'est à dire l'application d'une pression différente à l'intérieur de la cellule comme méthode de variation de la concentration équivalente enregistrée par le DOAS.

2.2 DESCRIPTION TECHNIQUE DE LA CELLULE SCLEE

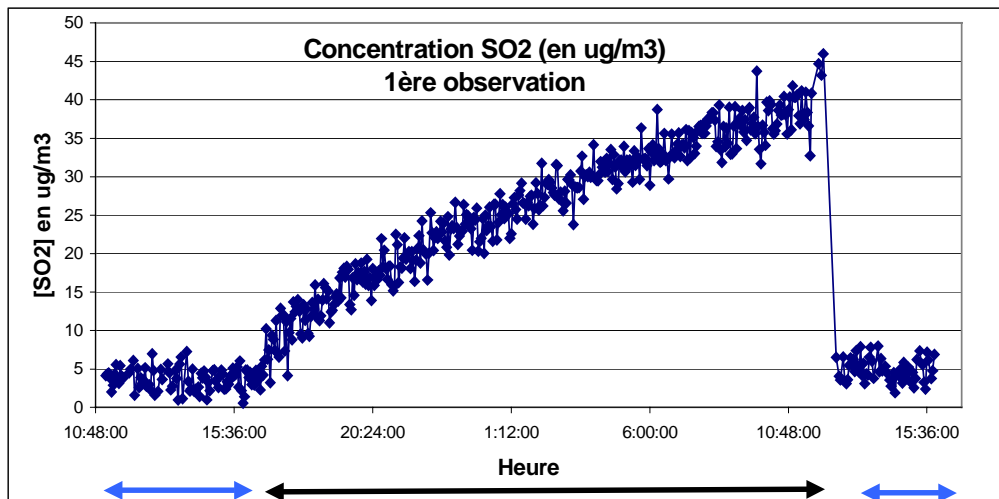
L'INERIS a fait réaliser une cellule pour calibrage d'analyseur DOAS par son atelier. Il s'agit d'une cellule scellée pouvant recevoir différents gaz jusqu'à 6 bars de pression et équipée d'un système de positionnement. Elle se présente sous la forme d'un cylindre en acier inox, ses dimensions sont : 32,6 cm de longueur, pour un diamètre de 13 cm. Afin de laisser passer le faisceau de la lampe (le passage libre est de 8 cm de diamètre), les parois latérales sont des fenêtres en silice fondue à face parallèles. Son volume de 1,367 L, pour un poids de 12 Kg.



Photo 2 : Première version de la cellule scellée

2.3 ETUDE DE LA REACTIVITE DE LA CELLULE

Nous avons souhaité dans un premier temps évaluer l'influence de la cellule sur les gaz présents, avec comme finalité la réalisation d'une cellule scellée totalement inerte. Nous avons constaté que, une fois passivée, la cellule n'a plus d'effet direct sur le gaz. Ainsi, en balayant la cellule suffisamment longtemps, celle-ci a été débarrassée de toutes les impuretés, les sites potentiels d'adsorptions ont été remplis et le SO_2 est devenu stable dans la cellule : après passivation de la cellule, le gaz SO_2 ne présente plus de réactivité temporelle suffisamment importante pour influencer le protocole d'étalonnage (0,8 % par jour). De même, nous avons constaté un phénomène de relargage de SO_2 avec le temps où le relargage correspond à la libération de gaz qui était initialement adsorbé sur les parois de la cellule. Ce phénomène a été observé alors que la cellule remplie d'azote était placée dans le faisceau du DOAS : la concentration en SO_2 a augmenté linéairement avec le temps, comme le montre la figure ci-dessous (détail en annexe A).





 Cellule remplie de N₂ placée dans le faisceau
 Faisceau seul (la cellule est retirée du faisceau)

Figure 1 : Evolution de [SO₂] en fonction du temps, phénomène de relargage

Afin de s'affranchir de ce phénomène, nous avons choisi de téflonner l'intérieur de la cellule avec une couche de Téflon® noir (car le blanc risque de gêner la mesure optique du DOAS en raison de réflexions multiples à l'intérieur de la cellule).

2.4 ETUDE DE LA STABILITE DES GAZ EN PRESENCE DE FLUX LUMINE

Nous avons évalué la stabilité des gaz présents dans la cellule scellée lorsque celle-ci est placée dans le trajet optique du DOAS : étude de la réactivité des gaz en présence de rayonnement lumineux UV-VIS intense. Nous avons pu montrer que le SO₂ et le NO dans une matrice d'azote, sont stables et ne possèdent pas de réactivité photo-chimique. En revanche, nous avons mis en évidence que le NO₂ possède une très forte réactivité photo-chimique, interdisant l'utilisation de gaz en configuration statique, dans l'étalonnage des instruments à long trajet optique.

2.5 ETUDE DE LA LINEARITE DES DOAS A L'AIDE D'UNE CELLULE SCHELLEE

Après avoir étudié la réactivité de la cellule et la stabilité du gaz, nous avons utilisé la cellule scellée afin d'effectuer un étalonnage du DOAS pour les polluants NO et SO₂. Nous avons obtenu les deux résultats suivants (détail en annexe A):

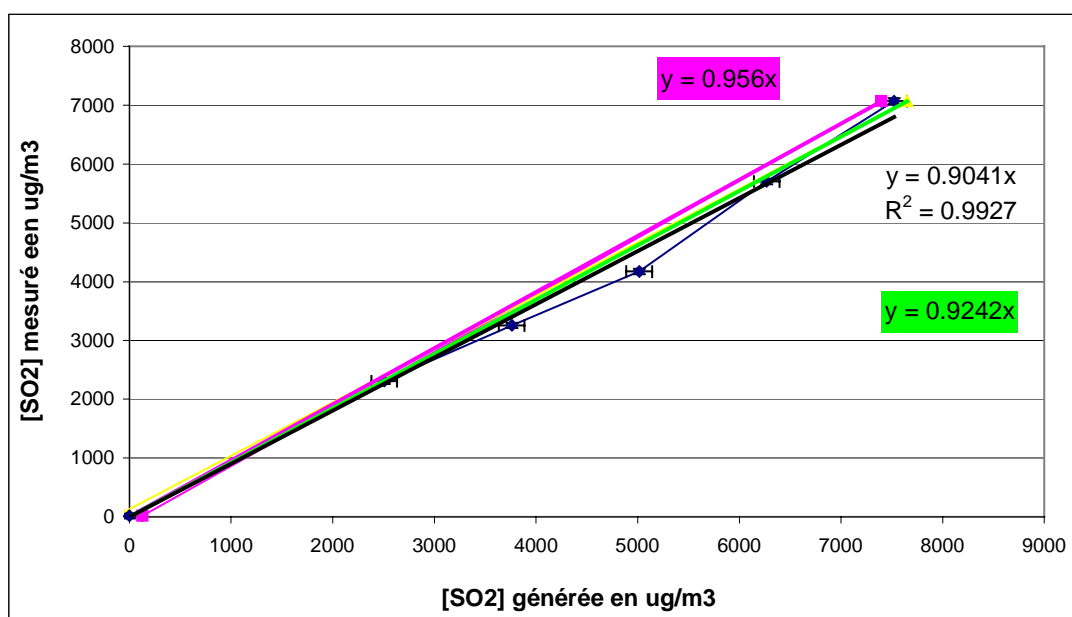


Figure 2 : linéarité de la réponse DOAS pour le gaz SO₂

On observe que les résultats sont tout à fait concluants et notamment pour le SO₂ :

$$[\text{SO}_2]_{\text{mesurée}} = (0,90 \pm 0,02) * [\text{SO}_2]_{\text{générée}} \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Ainsi, la cellule scellée de SO₂ peut être utilisée comme outil d'étalonnage des DOAS sur site.

2.6 CELLULE SCHELLEE MULTI-GAZ

Afin de rendre l'étalonnage sur site le plus aisé possible, il serait par ailleurs souhaitable de minimiser le nombre de cellules utilisées. Par ailleurs, la linéarité a été réalisée pour le NO et le SO₂, sur la base d'une importante dynamique. Afin de réduire cette dynamique et de minimiser le nombre de cellules, il pourrait être intéressant de constituer un mélange de différents gaz (SO₂, NO, NO₂, BTX) avec chacun une pression partielle définie. En changeant la pression totale de la cellule, on modifie ces pressions partielles, et donc la concentration enregistrée par le DOAS pour chaque polluant. Par ailleurs, ce mélange « multigaz » permettrait de descendre la pression partielle de chaque polluant présent, et ainsi d'accéder à des niveaux de concentrations plus proches des valeurs seuils actuelles, ce qui améliorera la valeur de l'ordonnée à l'origine lors des étalonnage (mis en évidence sur la linéarité obtenue pour le polluant NO).

3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude avait pour but de définir une nouvelle méthodologie de calibrage. Nous voulions savoir s'il était possible de faciliter le protocole de calibrage des appareils de type DOAS. En effet, le calibrage initial de ce type d'appareil nécessite du matériel important (bouteilles de gaz, cellules d'analyse de plusieurs mètres de long), dont les dimensions ne sont pas adaptées à un déplacement sur le terrain (surtout lorsque les appareils à étalonner se situent sur les toits des immeubles, avec une simple échelle pour y accéder). Ainsi, pour que ces appareils fonctionnent correctement et fournissent des valeurs de concentrations en polluants exactes, une nouvelle cellule de calibrage a été créée. Les dimensions réduites et la conception en acier inox de cette cellule doivent permettre cet étalonnage. Cette étude a donc consisté à tester le comportement de cette cellule afin de s'assurer que le protocole de calibrage fonctionne : étude de la stabilité du gaz dans la cellule (pour vérifier que la cellule est inerte) puis dans un second temps, étude de la stabilité du gaz quand la cellule est placée dans l'alignement du faisceau du DOAS (l'énergie apportée par le rayonnement de la lampe n'allait-il altérer les gaz à l'intérieur de la cellule ?).

L'étude a été menée à bien avec le dioxyde de soufre (SO_2) et le monoxyde d'azote (NO) où le protocole d'étalonnage et sa comparaison avec les techniques actuellement utilisées ont fourni de bons résultats. Les perspectives pourraient être intéressantes, avec la mise en circulation d'une cellule scellée multi-gaz (NO , SO_2 , BTX) qui serait adaptée à chaque DOAS, par ajustement des pressions partielles des différents gaz présents.

Néanmoins, nous avons également mis en évidence certaines améliorations nécessaires (téflonnage de la cellule) ainsi que des limitations afférentes à cette technique : les premiers essais réalisés pour le polluant NO_2 ont fourni des résultats très peu concluants compte tenu de la réactivité du NO_2 en présence d'un rayonnement lumineux, rendant délicate l'utilisation de ce gaz de manière statique.

Nous allons donc, dès les prochains jours, lancer des nouveaux tests sur la réactivité de la cellule afin de vérifier l'optimisation qui en a été faite et confirmer ainsi sa capacité à être mise en circulation dans les AASQA pour l'étalonnage sur site des DOAS concernant les polluants NO et SO_2 .

RETOUR D'EXPERIENCE SUR L'UTILISATION DES DOAS : CAMPAGNE EN ZONE AEROPORTUAIRE

1. PREAMBULE

Cette synthèse a été rédigée en accord avec l'ONERA*, donneur d'ordre d'une campagne de mesure en zone aéroportuaire dans le cadre du programme AIRPUR, ainsi que ADP associé à ce projet.

Cette synthèse s'intéresse ici uniquement au fonctionnement des DOAS lors de cette campagne de mesures effectuée en zone aéroportuaire.

2. CADRE DE L'ETUDE ET OBJECTIFS :

Les objectifs principaux des campagnes de mesure organisées dans le cadre du projet de recherche fédérateur AIRPUR consistent à améliorer la compréhension des processus physiques et chimiques de pollution de l'air en milieu aéroportuaire et notamment de permettre une prévision numérique fiable de la distribution des polluants : mesures des indices d'émissions réels des moteurs aéronautiques, mesures de la distribution et de la variation temporelle des polluants potentiellement rencontrés en milieux aéroportuaires.

Dans le cadre du projet « AIRPUR », l'INERIS a mené, pour le compte de l'ONERA, une campagne de mesures du 6 octobre 2004 au 21 octobre 2004, sur une plate-forme aéroportuaire de la région parisienne et notamment réalisées les actions suivantes :

- Installation d'un DOAS en zone de chargements et de déchargements des passagers (stationnement des aéronefs sur les terminaux principaux).
- Réalisation de mesures de poussières PM10, PM2.5, PM1 et TSP sur de nombreux sites de la zones aéroportuaire.
- Réalisation d'une campagne de mesures des aldéhydes sur différents sites de la zone aéroportuaire (prélèvements et analyses des aldéhydes linéaires C1 à C10).

* RICHARD RAMAROSON
ONERA, Instrumentation and Sensing Department
29, avenue de la Division Leclerc, 92322 Châtillon Cedex
Tel : +33 1 46 73 47 34, Fax : +33 1 46 73 41 48
Email : richard.ramaroson@onera.fr

3. PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS PAR LE DOAS :

3.1 POLLUANTS MESURES ET CONFIGURATION DU SITE

Le DOAS a été installé sur deux sites distants de 322 m et configuré pour un suivi en continu, des polluants NO, NO₂, SO₂, O₃, BTX, HONO, HCHO, NH₃, PAN, Phénol avec une intégration temporelle de 3 minutes.

Les polluants mesurés par notre instrument sont les suivants :

Polluants	Formule	Sensibilité Constructeur	Sensibilité INERIS ou JRC-ISPRA
Ozone	O ₃	3.8 µg.m ⁻³ / 300m	1 à 2 µg.m ⁻³ / 300m
Dioxyde de soufre	SO ₂	0.8 µg.m ⁻³ / 300m	0.8 à 2 µg.m ⁻³ / 300m
Monoxyde d'azote	NO	1.9 µg.m ⁻³ / 300m	5 à 8 µg.m ⁻³ / 300m
Dioxyde d'azote	NO ₂	3.0 µg.m ⁻³ / 300m	5 à 8 µg.m ⁻³ / 300m
Benzène	C ₆ H ₆	5.0 µg.m ⁻³ / 300m	3 à 6 µg.m ⁻³ / 100m
Toluène	C ₇ H ₈	5.0 µg.m ⁻³ / 300m	5 à 7 µg.m ⁻³ / 100m
m Xylène	C ₈ H ₁₀	4.4 µg.m ⁻³ / 300m	3 à 6 µg.m ⁻³ / 100m
Acide nitreux	HONO	3.0 µg.m ⁻³ / 300m	Non évalué
Formaldéhyde	HCHO	2.3 µg.m ⁻³ / 300m	Non évalué
Phénol	C ₆ H ₅ -OH	0.3 ppbV/ 500m	Non évalué
Ammoniac	NH ₃	3.5 ppbV/ 250m	Non évalué

3.2 CONTROLE QUALITE DES MESURES DOAS ET POLLUANTS SURVEILLES

Un étalonnage de l'instrument a été réalisé dans la galerie de l'INERIS préalablement à la campagne de mesure pour les polluants NO, NO₂, SO₂ et O₃ : évaluation de l'offset et de la linéarité de la réponse. Pour ces polluants, nous avons donc proposé une mesure en continu de la concentration, exprimée en µg.m⁻³ aux conditions standards de température et de pression. Bien que n'ayant pu effectuer un calibrage complet pour tous les autres gaz susceptibles d'être mesurés par notre DOAS, faute de moyens disponibles, nous avons néanmoins effectué un réglage de l'offset pour les polluants BTX, PAN, HCHO, NH₃, HONO. Nous avons donc proposé un suivi en continu de ces polluants sans pouvoir garantir la linéarité de la réponse de l'instrument.

Le tableau ci-après fournit la synthèse des polluants mesurés ou suivis et l'utilisation à des fins d'identification ou de quantification des concentrations rencontrées lors de la campagne de mesure.

Polluant	Etalonnage INERIS			Utilisation des données		Incertitudes
	Réglage de l'offset	Réglage de la réponse	Méthode utilisée	Mode de surveillance	utilisation des données	
Ozone	Oui	Oui 2004	Générateur HT	Mesure	Quantitatif	< 2 µg.m ⁻³
NO	Oui	Oui 2004	Gaz étalon	Mesure	Quantitatif	< 8 µg.m ⁻³
NO ₂	Oui	Oui 2004	Gaz étalon	Mesure	Quantitatif	< 8 µg.m ⁻³
SO ₂	Oui	Oui 2004	Gaz étalon	Mesure	Quantitatif	1 à 2 µg.m ⁻³
Benzène	Oui	Oui 2003	Gaz étalon	Suivi/mesure	Quantitatif	< 5 µg.m ⁻³

Toluène	Oui	Oui 2003	Gaz étalon	Suivi/mesure	Quantitatif	< 5 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Xylène	Oui	Oui 2003	Gaz étalon	Suivi/mesure	Quantitatif	< 5 $\mu\text{g.m}^{-3}$
HCHO	Oui	Non	Pas de générateur	Suivi	Qualitatif	5 à 10 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Phénol	Oui	Non	Pas de générateur	Suivi	Qualitatif	1 à 2 $\mu\text{g.m}^{-3}$
NH ₃	Oui	Non	Pas de générateur	Suivi	Qualitatif	1 à 2 $\mu\text{g.m}^{-3}$
HONO	Oui	Non	Pas de générateur	Suivi	Qualitatif	3 à 10 $\mu\text{g.m}^{-3}$
PAN	Oui	Non	Pas de générateur	Suivi	Qualitatif	1 à 2 $\mu\text{g.m}^{-3}$

La qualification permet de décrire l'apport d'une pollution vis à vis d'un niveau de fond, tandis que la quantification permet d'évaluer précisément la dynamique temporelle de la concentration d'un polluant donné. On notera qu'aucun étalonnage complet n'a pu être réalisé pour les polluants PAN, HONO, NH₃, Phénol et HCHO faute de méthodes disponibles à l'heure actuelle. Néanmoins, nous envisageons de mettre en place une méthodologie d'étalonnage du polluant HCHO en collaboration avec le LISA. Elle nous permettra d'effectuer une quantification en continu de ce polluant lors d'une éventuelle prochaine campagne de mesures.

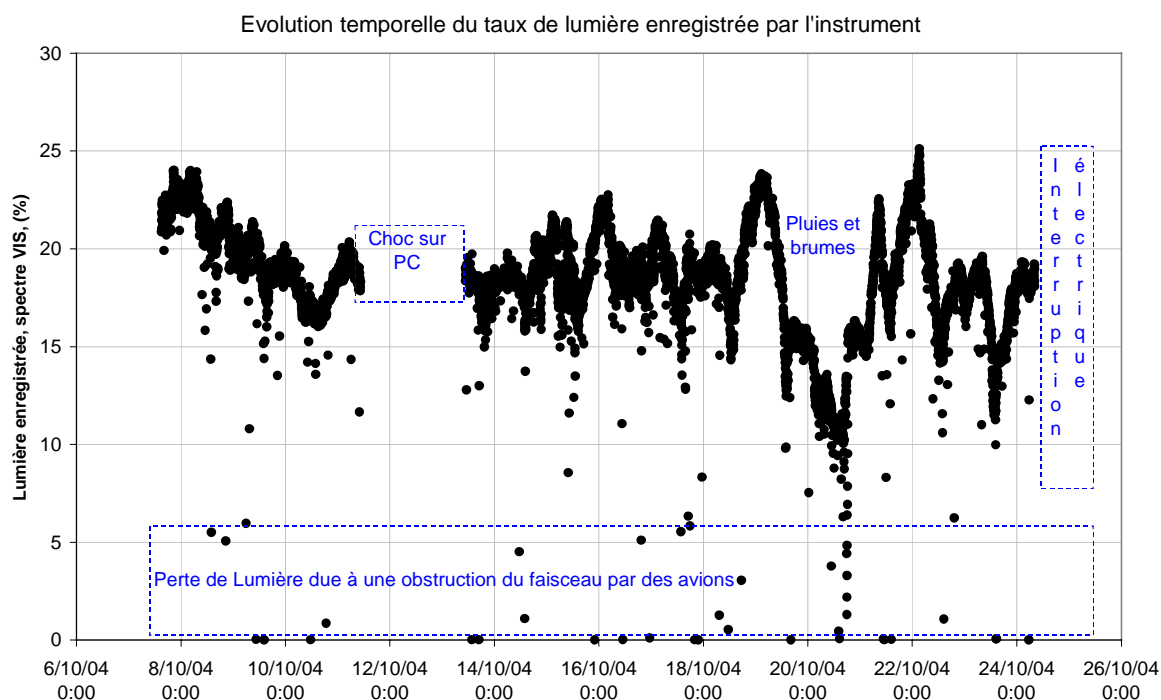
3.3 TAUX DE FONCTIONNEMENT DU DOAS

Lors de cette campagne de mesures et compte tenu de la configuration des sites, aucune perte d'alignement n'a été constatée. En revanche, nous avons eu deux incidents entre le 6 octobre, date de son installation et le 28 octobre, date de sa désinstallation :

- mise en défaut de l'unité d'acquisition lors de l'intervention des électriciens de ADP sur le site du récepteur : erreur d'écriture sur le disque du PC d'acquisition, issue très vraisemblablement d'un choc. Aucune donnée enregistrée du 11 octobre 10h33 au 13 octobre 10h45. Cet incident a été responsable d'une perte de 15% des données enregistrées durant la période de la campagne de mesure,
- arrêt de l'alimentation générale du site du récepteur à partir du 24 octobre 2004 08h18 locale. Cet incident étant survenu après la période de la campagne de mesure, il n'a pas été comptabilisé dans le calcul du taux de fonctionnement,

Par ailleurs, certaines mesures n'ont pu être enregistrées lorsque des avions se trouvaient dans le trajet optique (l'empennage arrière coupait le faisceau). Ces obturations du faisceau optique par les avions, ont été responsables d'une perte d'environ 3 % des données enregistrées durant la période de la campagne de mesure. La visualisation du taux de fonctionnement de l'appareil peut être effectuée par un suivi du taux de lumière enregistré par le récepteur du DOAS. En effet, si ce taux varie fortement, il peut traduire une perte d'alignement de l'appareil et donc un dysfonctionnement majeur.

La figure ci-dessous montre le taux de lumière enregistré sur toute la période de mesure.



Suivi temporel du taux de lumière enregistré par le DOAS, qui traduit son degré d'alignement

On observe nettement l'absence de données du 11 au 13 octobre qui a été décrite précédemment. De même, on observe, de temps en temps, une chute brutale du taux de lumière durant quelques minutes, traduisant un obstruction du faisceau par un objet (avion).

Ainsi, le taux de fonctionnement a été supérieur à 75% pour la plupart des polluants considérés et les pertes de données n'étaient pas liées à l'instrument ou à son installation. En revanche, compte tenu des réglages standards du logiciel de traitement alors que le trajet optique est long et induit une forte absorption du signal, un très faible taux de données est disponible à l'heure actuelle concernant le polluant HCHO. L'INERIS est actuellement en concertation avec le constructeur de cet appareil afin de modifier la configuration logiciel, ce qui nous permettra d'obtenir un taux de fonctionnement bien supérieur lors de cette campagne.

De très intéressants résultats préliminaires ont été obtenus, mettant en évidence une corrélation étroite entre l'activité aéroportuaire présente sur la zone de mesures et plusieurs polluants suivis de manière qualitative ou quantitative. De même, les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence une absence de corrélation pour certains polluants alors que les hypothèses et suppositions initiales l'établissaient. Néanmoins, il s'agit de résultats préliminaires qui doivent être mis en correspondance avec l'ensemble des mesures réalisées durant cette campagne.

ASSISTANCE TECHNIQUE SUR L'UTILISATION DES DOAS DANS LES AASQA

Au cours de l'année 2004 nous avons réalisé une assistance technique auprès de plusieurs associations agréées de surveillance de la qualité de l'air : COPARLY et AIRMARAIX dans le cadre d'une aide technique et d'un support à l'installation sur site et AIRAQ, et AMPSEL, dans le cadre d'une aide à l'optimisation du rendu opérationnel de leur instrument comme décrit ci-dessous.

1. AMPASEL

Suite aux dysfonctionnements majeurs constatés sur leur appareil de type OPSIS et décrits dans le rapport INERIS-DRC-03-45795-AIRE-910-EFR sur la synthèse annuelle des instruments à long trajet optique pour l'année 2003, nous avons émis une note technique mettant en évidence l'impossibilité pour AMPASEL d'utiliser son DOAS dans l'état actuel. Nous avons également convenu, avec AMPSEL et NEREIDES de réaliser une évaluation des performances de l'appareil une fois les réparations effectuées : changement du moteur et du réseau du spectromètre, changement de la lampe ainsi qu'une maintenance générale rigoureuse. Ces réparations étant en cours, l'appareil devrait être évalué à l'INERIS courant février 2005. Par ailleurs, nous allons fournir une assistance à AMPASEL au cours du premier trimestre 2005, visant à définir et optimiser le site d'installation de leur instrument.

2. AIRAQ

Cette association agréée de la surveillance de la qualité de l'air en région aquitaine, a installé à Arcachon un DOAS de type SANOA afin d'effectuer, couplé à un analyseur de type TEOM PM10, un suivi de l'indice de la qualité de l'air dans cette ville.

Afin d'optimiser le rendu opérationnel de l'instrument et la qualité des données, nous avons effectué différentes actions et notamment réalisé un calibrage sur site de leur instrument. En effet, dans le cadre de la mise en circulation du calibrateur d'ozone haute teneur de l'INERIS, nous avons réalisé une formation du personnel assurant la maintenance et le suivi de cet instrument. Cela nous a permis de confirmer la qualité de mesures enregistrées durant cette année, mais également de confirmer les correspondances ou divergences mises en évidence lors de phases de comparaisons des mesures avec un laboratoire mobile. Cette assistance a ainsi permis, d'une part, de valider l'ensemble des mesures obtenues et notamment les mesures d'ozone enregistrées durant l'été 2004 et, d'autre part, de confirmer l'apport indéniable de mesures à long trajet optique en atmosphère localement hétérogène.

ASSISTANCE TECHNIQUE SUR L'UTILISATION DES LIDAR

1. UTILISATIONS DES LIDAR COMMERCIALISES PAR LA SOCIETE ELIGHT LASER SYSTEM GMBH

L'INERIS a été sollicité par COPARLY, l'ADEME et la Direction Ecologie Urbaine de la Ville de Lyon, afin d'effectuer une synthèse technique sur l'utilisation qui est faite des LIDAR commercialisés par la société ELIGHT LaSER SYSTEM GmbH. Ces trois organismes ont notamment souhaité que l'INERIS lui fournisse des informations relatives aux points suivants :

- Utilisation d'un LIDAR : potentialités de cet instrument dans le cadre de partenariats, d'activités de recherche ou dans le cadre de prestations pour le compte d'industriels.
- Fonctionnement d'un LIDAR 510M : rendu opérationnel de cet instrument
- Evolution technique des LIDAR : apport d'une modification de la source laser utilisée
- Evaluations du LIDAR 510M réalisées par l'INERIS
- Réponses relatives à des points particuliers du rapport de COPARLY

Une note technique globale, qui figure en annexe de ce document, a été réalisée par l'INERIS et diffusée aux différents acteurs concernés.

1.1 SYNTHESE SUR L'UTILISATION DES LIDAR ELIGHT

Une enquête a été réalisée auprès des différents organismes européens détenteurs de LIDAR ELIGHT : 12 organismes dont 3 français, pour 13 instruments délivrés entre 1992 et 2003. Elle visait à définir l'utilisation qui était faite de ces instruments, leur degré d'opérationnalité ainsi que les différents dysfonctionnements rencontrés. Lors de cette enquête, 44 études ont été recensées entre 1997 et 2004

Le diagramme ci-après fournit, pour chaque année, la répartition (en % et en nombre) des études réalisées depuis 1997, regroupées selon différents objectifs : recherche appliquée, recherche et développement, métrologie, commercial, support ou bien encore communication.

On constate qu'en 1997 et 1998 les LIDAR étaient principalement utilisés à des fins de compréhension des phénomènes atmosphériques et d'évaluation des performances. En revanche, dès 1999 et de manière très nette en 2004, son utilisation s'est largement diversifiée, tout en conservant une base très solide orientée sur la recherche appliquée.

Répartition suivant le cadre de l'étude, évolution annuelle en nombre

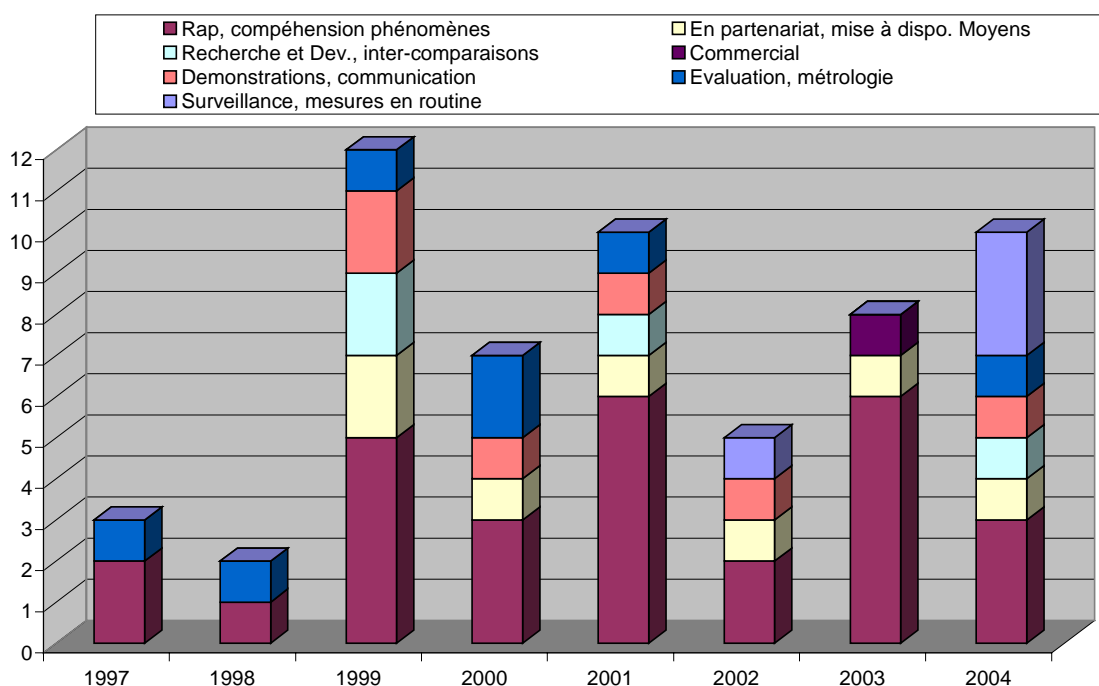


Diagramme de répartition de l'utilisation qui est faite des instruments LIDAR ELIGHT, sur la base des données fournies par chaque utilisateur, soit donc 44 études référencées, évolution annuelle en nombre d'études.

Ainsi, sur la base des 6 dernières années, nous pouvons effectuer les constatations suivantes :

- L'activité principale des LIDAR se situe dans le domaine de la recherche appliquée et repose sur la documentation de la stratification atmosphérique et la dynamique des polluants gazeux ou particuliers associés.
- Une diversification de son utilisation est apparue depuis 1999, avec, outre l'activité principale décrite ci-dessus, une utilisation à part égale entre des missions de communication, des activités métrologiques (évaluation, développement) et des missions de mesures en routine (observation de la qualité de l'air).
- Cette diversification a été rendue possible par une modification du système : tentative de stabilisation du laser Ti:Sa entre les générations 1 et 2, puis enfin transformation de l'unité laser par un système plus fiable, autorisant une plus grande autonomie de son utilisation.
- L'activité commerciale et notamment auprès des industriels, reste très marginale. Les différentes missions prospectives engagées par l'INERIS ont permis de constater que l'offre LIDAR ne semblait pas réellement correspondre à leurs besoins actuels : les polluants mesurés actuellement par LIDAR ne sont pas des polluants posant des problèmes particuliers aux industriels qui sont plutôt demandeurs d'une caractérisation des COV, du CO₂, du CO, des poussières ou bien encore de certains composés très spécifiques. Seules les applications en zone de stockage (BTX) ou les mesures sur des torchères (SO₂, NO₂) seraient susceptibles de les intéresser actuellement. C'est pour cette raison que l'INERIS a engagé un projet de recherche spécifique, visant à augmenter la liste des polluants pouvant être mesurés par LIDAR.

1.2 SYNTHÈSE SUR LE CARACTÈRE OPÉRATIONNEL DES LIDAR ELIGHT

Sur la base du retour d'expérience détenu par l'INERIS à ce jour, nous pouvons conclure sur le caractère opérationnel de ces instruments :

- Les LIDAR 510M sont des outils d'investigation des phénomènes pertinents pour la compréhension de la pollution locale ou régionale, mais ne sont pas aptes à effectuer des mesures en routine sur de longues périodes. Par ailleurs, sur l'ensemble des systèmes 510M commercialisés, seuls celui de Dunkerque et celui de Pragues/Bayreuth sont utilisés ce jour dans le cadre de recherches appliquées.
- Les LIDAR « profilers » d'ozone qui reposent sur un couplage entre un laser Yag de moyenne puissance (Brillant B) ou de forte puissance (Continuum) couplés à des cellules de Raman, sont des outils opérationnels tant pour la compréhension des phénomènes, que pour la réalisation de mesures en routine sur de longues périodes.
- Les LIDAR UV11 sont des outils opérationnels tant pour la compréhension des phénomènes, que pour la réalisation de campagnes de mesures sur de longues périodes.

Ainsi, on constate que les activités de mesures en routine sont réalisées avec des LIDAR reposant sur un laser Yag Continuum. Néanmoins, si l'activité des mesures en routine s'est largement développée, il s'agit d'une surveillance des phénomènes atmosphériques et non pas une surveillance réglementaire dans le cadre des missions des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air.

1.3 AVENIR DES LIDAR ELIGHT SUITE A LA MISE EN CESSATION D'ACTIVITE DE LA SOCIETE

La société ELIGHT LASER SYSTEM GMBH, qui a fourni 3 LIDAR en France (INERIS, COPARLY et l'université du Littoral Côte d'Opale-ULCO) a été mise en cessation d'activité courant août 2004, ce qui n'est pas sans conséquence sur nos LIDAR actuels.

En effet, sur les 3 LIDAR ELIGHT français, deux reposent sur un laser fabriqué par ELIGHT (COPARLY et ULCO). Or, comme décrit dans la note technique présente en annexe de ce document, la principale source de dysfonctionnements des LIDAR ELIGHT était liée à la technologie laser utilisée : instabilité des laser reposant sur une technologie Ti :Sa. Cette mise en cessation d'activité va donc imposer d'internaliser les éventuelles réparations sur ces instruments ou de mettre en place des collaborations étroites avec des organismes ayant déjà effectués cette internalisation comme par exemple les équipes de Prague/Bayreuth ou bien encore en partenariat avec une université qui connaisse l'instrument et son fonctionnement.

En revanche, l'incidence de cette mise en cessation d'activité devrait être plus réduite concernant le LIDAR de l'INERIS dans la mesure où le laser utilisé n'est pas commercialisé par ELIGHT mais par CONTINUUM (EXCEL TECHNOLOGY), ayant une représentation au niveau national.

Ainsi, dans le cas du LIDAR de l'INERIS, ELIGHT a joué principalement le rôle d'assembleur, leur contribution technique n'étant intervenue que sur les conceptions des cartes électroniques et des outils logiciels, pour lesquels des relais internes ou par d'autres sociétés devraient pouvoir être assurés.

Enfin, certaines activités de la société ELIGHT LASER SYSTEM GMBH pourraient être reprises pour permettre la fourniture de LIDAR commerciaux à faible coût : commercialisation de LIDAR appliqués à la surveillance du plafond nuageux, la dynamique de la couche limite et le suivi de la visibilité atmosphérique.

2. ASSISTANCE AUX DEVELOPPEMENTS DE LIDAR COMMERCIAUX

L'INERIS a été contacté à plusieurs reprises par la société LEOSPHERE ainsi que le CEA-LSCE (laboratoire partenaire de LEOSPHERE), afin de proposer une méthodologie d'évaluation des nouveaux instruments LIDAR en cours de commercialisation.

LEOSPHERE est une Startup nouvellement créée sous la tutelle financière et scientifique du département de valorisation du CEA, dans le cadre de sa mission de dissémination des connaissances et de valorisation des compétences : valoriser les compétences du CEA-LSCE (Patrick Chazette) sur la mise en place de LIDAR à faible coût appliqués à la surveillance de la dynamique atmosphérique ainsi qu'à l'étude de la charge en aérosols.

Par ailleurs, plusieurs autres sociétés pourraient proposer la commercialisation de ce type de LIDAR en 2005 :

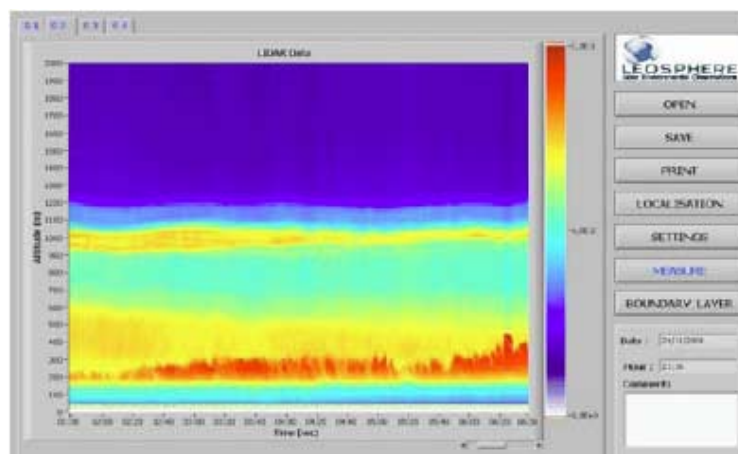
- CAML CE-370-2 commercialisé par CIMEL (France),
- Télémètre modifié IR commercialisé par DEGREANES (France)
- EASY LIDAR commercialisé par LEOSPHERE (France),
- 20CT25K Télémètre modifié commercialisé par VAISALA (Suède),
- LB LIDAR commercialisé par RAYMETRICS (Grèce)
- CEILOMETER devant être commercialisé par la société IENOPTICS (Allemagne)

Ces différents instruments en cours de commercialisation, bien qu'ayant des approches technologiques différentes, proposent toutes le suivi en continu de la hauteur de la couche limite, du plafond nuageux et de l'extinction atmosphériques (visibilité).

2.1 DESCRIPTION DU LIDAR COMMERCIALISE PAR LEOSPHERE



Aperçu du « EASY LIDAR » commercialisé par la société LEOSPHERE



Résultats typiques montrant l'évolution temporelle de la hauteur de la couche limite, enregistrée durant une journée, avec une intégration temporelle de l'ordre la seconde.

Ce LIDAR a été développé récemment, en collaboration avec un laboratoire mixte CEA-CNRS : le Laboratoire des Science, du Climat et de l'Environnement (P. Chazette). Par ailleurs, LEOSPHERE bénéficie du soutien de plusieurs partenaire régionaux (Ville de Paris et Région Ile de France), nationaux (ministère délégué à la recherche, ADEME, CEA, CNRS) et européens (Fond social européen, ESA).

En annexe B figure la documentation constructeur de ce lidar.

Les principaux paramètres mesurés par ce LIDAR, de 75 m à 12 km sont :

- Le suivi temporel de la hauteur de la couche limite avec une résolution spatiale de l'ordre de 15 mètres,
- Le suivi temporel de la hauteur du plafond nuageux, avec une résolution spatiale de 3.5 mètres,
- La détection de particules submicroniques (>100nm) et le suivi temporel du profil vertical de concentration en aérosols, après étalonnage de l'instrument (connaissance préalable ou mesure de la section efficace d'un mélange de polluants), avec une incertitude de l'ordre de 20%,
- le suivi temporel de la visibilité atmosphérique, exprimée en km, avec une incertitude de l'ordre de 20%,
- une résolution temporelle maximale de 1 seconde ainsi qu'une portée de 10 km.

Ses principaux points forts sont les suivants :

- Le suivi bi et tri-dimensionnel de panaches polluants pour un budget inférieur à 60 K€.
- Système en sécurité oculaire au regard de la norme NF EN-60825-1 ainsi que ses différents amendements (niveau d'énergie 10 fois inférieur au seuil établi par la norme).
- Fréquence de maintenance réduite : pas de désalignement, source laser robuste
- Faible compétence nécessaire du personnel car le système est automatisé, pilotable par PC, et délivre une information formatée pour le besoin opérationnel (hauteur de couche limite par exemple)

- Portée instrumentale très large : vision en champ proche (75m) et supérieure à 10 km, comme le montre le résultat ci-dessus décrivant la dynamique temporelle du plafond nuageux, enregistrée durant une journée,
- Faible encombrement (taille réduite) et facilité d'utilisation par la mise en place d'une interface homme-machine adaptée
- Evolutivité du système qui pourra accueillir des modules permettant la discrimination des particules par taille ou caractéristiques, le profil d'humidité, sans changer de système.

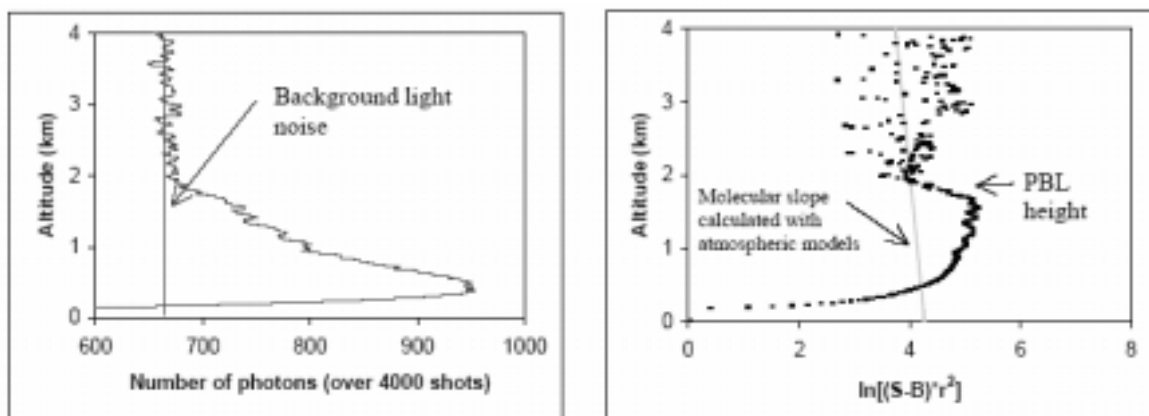
Ses principales limitations ou points faibles au regard des différents instruments disponibles, sur la base des informations dont nous disposons à ce jour, pourraient être les suivantes :

- L'absence d'un large réseau d'utilisateurs compte tenu de la récente mise au point de cet instrument ; limitation qui pourrait être compensée par le haut degré de technicité et de compétence des constructeurs ou de ses partenaires,
- Un manque de recul permettant de confirmer la stabilité de cet instrument et la fréquence des maintenances nécessaires ; Néanmoins, le choix du mode d'émission et de réception de cet instrument qui repose sur l'utilisation de lentilles, devrait en toute rigueur garantir une forte stabilité de l'alignement du système.
- Une portée instrumentale qui devra être confirmée, d'autant plus que la dynamique proposée, de 75 m à 10 km, nécessite une unité de détection optimisée et délicate à configurer,
- Une sensibilité associée à la mesure de la hauteur de la couche limite qui devra être évaluée.

2.2 DESCRIPTION DU LIDAR COMMERCIALISE PAR CIMEL



Aperçu du CAML C3-370-2, micro-LIDAR nuages et aérosols



profil LIDAR obtenu le 13 avril 2001 avec une intégration temporelle d'environ 2 minutes

Ce LIDAR a été développé récemment, en collaboration avec deux départements du CNRS : le Laboratoire d'Optique Appliqué de Lille (O. Boucher) et le Laboratoire d'Aéronomie de Paris (J. Pelon) En annexe C figure la documentation constructeur de ce lidar.

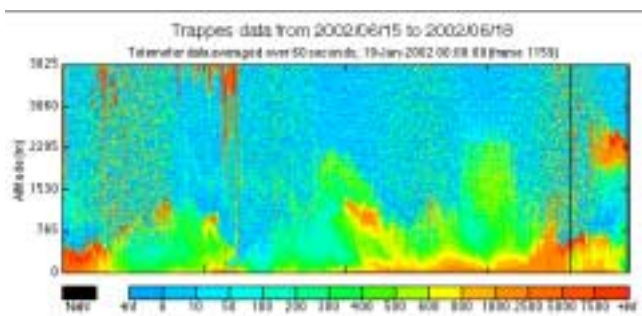
Les principaux paramètres mesurés sont :

- Le suivi temporel de la hauteur de la couche limite, comme le montre la figure ci-dessus, sans pour autant pouvoir définir la sensibilité instrumentale à ce jour,
- le suivi temporel de la hauteur du plafond nuageux, avec une résolution spatiale de quelques mètres, sans que la portée puisse être définie à ce jour,
- une résolution temporelle maximale de quelques secondes (fichier élémentaire) et optimisée de quelques minutes.

Ses principales limitations ou points faibles au regard des différents instruments disponibles, sur la base du peu d'information dont nous disposons à ce jour, pourraient être les suivantes :

- L'absence d'un large réseau d'utilisateurs compte tenu de la récente mise au point de cet instrument ; limitation qui pourrait être compensée par le haut degré de technicité et de compétence des constructeurs ou de ses partenaires,
- Un manque de recul permettant de confirmer la stabilité de cet instrument et la fréquence des maintenances nécessaires ; Néanmoins, le choix du mode d'émission et de réception de cet instrument qui repose sur l'utilisation de lentilles, devrait en toute rigueur garantir une forte stabilité de l'alignement du système.
- Une portée instrumentale et une sensibilité qui devront être évaluées.

2.3 DESCRIPTION DU LIDAR COMMERCIALISE PAR VAISALA SA



Aperçu du télémètre modifié VAISALA et résultats typiques de suivi de la hauteur de la couche limite enregistrée en 2002 à Trappes en collaboration avec Météo-France

Ce LIDAR, aussi appelé télémètre modifié, a été développé en 2002, sur la base de la modification d'un appareil existant : le télémètre de nuage. Son optimisation a été réalisée en collaboration avec Météo-France et notamment avec Marcel Zéphoris, Hubert Holin et Franck Lavie de la Direction des Systèmes d'Observation / DOE - Trappes.

Les principaux paramètres mesurés sont :

- Le suivi temporel de la hauteur de la couche limite avec une résolution spatiale de l'ordre de 15 mètres,
- Le suivi temporel de la hauteur des nuages, avec une résolution spatiale de 15 mètres,
- le suivi des zones de pré-condensation compte tenu des longueurs d'ondes utilisées,
- une portée de 7,5 km, où la portée est définie par la distance à partir de laquelle, à intégration spatiale constante de 1 000 m, l'écart type instrumental associé devient supérieur à 10 fois l'écart-type minimal (généralement obtenu entre 500-1500 m),
- une résolution temporelle maximale de quelques minutes (fichier élémentaire) et optimisée de 60 minutes,

Ses principaux points forts sont les suivants :

- Haute fiabilité et fréquence de maintenance réduite garantissant des mesures en continue sur plusieurs mois,
- Faible compétence nécessaire du personnel,
- Système approuvé par l'administration fédérale de l'aviation (FAA),
- Large réseau d'utilisateurs avec plus de 1 500 appareils installés.

Ses principales limitations possibles, sur la base des informations dont nous disposons à ce jour, pourraient être les suivantes :

- Une influence du rapport de mélange sur la portée de l'instrument,
- Une difficulté à obtenir, à terme, la charge en aérosols, compte tenu de la forte influence de la vapeur d'eau sur les profils enregistrés,
- Un manque de recul permettant de confirmer la stabilité de cet instrument et la fréquence des maintenances nécessaires ; Néanmoins, le choix du mode d'émission et de réception de cet instrument qui repose sur l'utilisation de lentilles, devrait en toute rigueur garantir une forte stabilité de l'alignement du système.
- Une portée instrumentale et une sensibilité qui devront être évaluées.

2.4 AUTRES CONSTRUCTEURS DE LIDAR A FAIBLE COUT, DEDIES A LA SURVEILLANCE DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE

Il existe plusieurs autres sociétés européennes proposant des LIDAR ayant des fonctionnalités identiques à ceux décrits ci-dessus. On citera notamment :

- La société allemande ELIGHT LASER SYSTEM GMBH qui est en cessation d'activité à ce jour, avait lancé en 2003-2004 la commercialisation de plusieurs prototypes de LIDAR à faible coût en sécurité oculaire. Ces prototypes ont été utilisés durant plusieurs mois par le département allemand de météorologie (DWD) avec des résultats suffisamment encourageants pour effectuer une très large commercialisation courant 2005.
- La société grecque RAYMETRICS qui commercialise plusieurs types de LIDAR et notamment un LIDAR appliqué au suivi de la hauteur du plafond nuageux et de la couche limite atmosphérique. Néanmoins, ce système qui n'est pas actuellement en sécurité oculaire, n'est pas détaillé ici ne pouvant pas être utilisé comme instrument de mesure autonome.

2.5 EVALUATION DES PERFORMANCES DES APPAREILS

Suite à une forte demande de certains des constructeurs ci-dessus, il est apparu important de réaliser une évaluation complète de ces différents instruments commerciaux et notamment :

- d'en définir les caractéristiques métrologiques au regard des méthodes de références actuelles concernant certains paramètres physiques tels que la dynamique de la hauteur de la couche limite ou bien encore la visibilité atmosphérique. Cela implique notamment d'évaluer la sensibilité de ces instruments et donc leur capacité à évaluer la hauteur d'une couche limite dense ou diluée,
- d'évaluer la capacité d'intégration de tels outils en réseau de mesure opérationnel (répétabilité, reproductibilité, compatibilité des paramètres mesurés, autonomie, fréquence des maintenances, compétences nécessaires).

Ces actions ne pourraient être envisagées qu'au travers d'une étude de leur rendu opérationnel en tant qu'outils d'assimilation de modèles 3D chimiques et dynamiques pour les paramètres considérés (hauteur de la couche limite, suivi du plafond nuageux) dans le cadre de projets d'études spécifiques. Dans une seconde étape, d'autres paramètres pourraient être évalués avec notamment une mise en comparaison des profils verticaux de concentrations en aérosols au regard de méthodes de référence (Gravimétrie) ou de techniques couramment utilisées (TEOM, MP101M). Un projet devrait être élaboré dans ce sens au cours du premier trimestre 2005.

LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation précise	Nb/N°pages
A	Etalonnage sur site des instruments à long trajet optique de type DOAS : utilisation de cellules scellées	27 (22p)
B	Note technique de l'INERIS relative au fonctionnement et à l'utilisation des LIDAR commercialisés par ELIGHT	50 (28p)
C	Brochure commerciale de la société LEOSPHERE présentant le système EASY LIDAR	79 (2p)
D	Brochure commerciale de la société CIMEL présentant le système CAML CE-370-2	82 (1p)
E	Brochure commerciale de la société VAISALA présentant son système LIDAR	84 (2p)
F	Compte rendu de la réunion technique DOAS entre EPLF, COPARLY et INERIS	87 (6p)

**ANNEXE A : ETALONNAGE SUR SITE DES INSTRUMENTS A
LONG TRAJET OPTIQUE DE TYPE DOAS : UTILISATION DE
CELLULES SCHELLES**

Etalonnage sur site des instruments a long trajet optique de type DOAS : utilisation de cellules scellées

Introduction :

L'INERIS, dans le cadre de sa mission d'assistance auprès des AASQA, avait programmé la réalisation d'une étude de faisabilité sur l'utilisation de cellules scellées comme support d'étalonnage des instruments DOAS sur site. En effet, si l'étalonnage de l'ozone est actuellement opérationnel (calibrateur d'ozone en circulation dans les AASQA), ce dernier reste problématique pour les autres polluants car il repose sur l'utilisation de cylindres de gaz haute pression et haute teneur. Or, la certification de ces teneurs (environ 1 000 ppm) est délicate et leur utilisation peut s'avérer impossible sur certains sites, compte tenu des moyens d'accès disponibles (échelle, trappe) ou des contraintes de sécurité afférentes. Nous avons donc cherché à proposer une méthodologie d'étalonnage sur site qui tienne compte de ces contraintes. Pour ce faire, nous avons choisi de nous orienter sur l'utilisation de cellules scellées comme outils d'étalonnage multi-points des DOAS.

L'étude a été menée à bien avec le dioxyde de soufre (SO₂) et le monoxyde d'azote (NO) où le protocole d'étalonnage et sa comparaison avec les techniques actuellement utilisées ont fourni de bons résultats.

En revanche, l'étalonnage pour les polluants BTX n'a pu être réalisé car les contraintes afférentes à l'utilisation de ces gaz n'étaient pas compatibles avec l'état de sécurité actuel de la galerie utilisée pour les essais DOAS. De même, de premiers essais ont été réalisés pour le polluant NO₂ qui ont fourni des résultats très peu concluants pour plusieurs raisons et notamment compte tenu de la réactivité du NO₂ en présence d'un rayonnement lumineux qui rend délicate l'utilisation de ce gaz de manière statique.

Description du principe d'étalonnage des DOAS

1.1. Protocole de calibrage

1.1.1 Principe d'étalonnage des DOAS

L'exploitation des DOAS par les réseaux de surveillance est rendue difficile compte tenu de la lourdeur actuelle du protocole qui impose l'utilisation sur site de cylindres de gaz haute teneur et haute pression. En effet, l'étalonnage de l'appareil consiste à simuler des concentrations de polluants en cellule de longueur réduite par rapport au trajet optique. La cellule de calibrage est ainsi remplie avec un gaz étalon (SO₂, NO_X ou O₃) de concentration C₀ à une pression P_{cellule}. La concentration réelle C_{équivalente} sur toute la longueur L du trajet optique est donnée par la formule suivante :

$$C = C_0 * (P_{\text{cellule}} / P_{\text{atm}}) * (l / L)$$

(1)

- Avec C_0 : concentration en SO₂, NO_x ou O₃ dans la cellule (en ppm)
 P_{cellule} : pression à l'intérieur de la cellule (en bar)
 P_{atm} : pression atmosphérique (1 atm = 1,013 bar)
 l : longueur de la cellule (quelques mètres)
 L : longueur du trajet optique (une centaine de mètres)



Photo 2 : Anciennes cellules d'étalonnage de l'INERIS

Sur la base de l'équation précédente, afin de réaliser un étalonnage il est donc nécessaire de changer la concentration détectée par le récepteur en modifiant la pression interne à la cellule, en changeant la concentration en gaz dans la cellule ou bien encore en changeant sa longueur. Jusqu'à ce jour, les AASQA ainsi que l'INERIS, qui utilisent des cellules de longueur fixe à pression ambiante sont alors contraints d'utiliser plusieurs cylindres de gaz ou bien d'utiliser des diluteurs soniques. Si cette technique est réalisable dans la galerie de l'INERIS, elle devient délicate sur des sites où les accès sont difficile (toits d'immeubles) voire impossibles sur certains sites (zone aéroportuaire, établissement recevant du public).

Type	B5	B11	B20	B50
Diamètre (mm)	150	180	200	230
Hauteur (mm)	620	750	1250	1680
Poid à vide (kg)	7	10,4	35	75

Tableau 1 : Dimensions des différentes bouteilles de gaz (Air Liquide)

Afin de proposer une solution adaptée aux contraintes des AASQA, nous avons envisagé une technique d'étalonnage reposant sur une modification de la pression interne dans une cellule c'est à dire l'application d'une pression différente à l'intérieur de la cellule comme méthode de variation de la concentration équivalente enregistrée par le DOAS.

1.1.2 Protocole d'étalonnage par cellule scellée, moyens mis en œuvre

Pour réaliser ces travaux, l'INERIS bénéficie d'un lieu tout à fait adapté : une galerie souterraine de 110 mètres de long équipée :

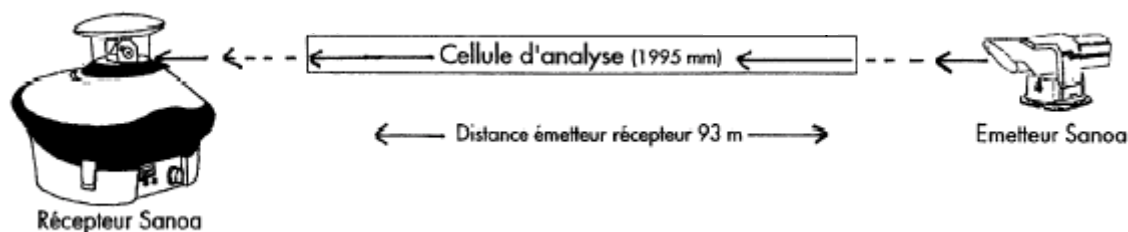
- d'extracteurs d'air,
- d'analyseurs haute concentration de SO₂, NO_x et O₃,
- d'un générateur d'ozone haute concentration,
- de capteurs de mesures physiques,
- de stations d'acquisition et de matériel informatique.



Photo 3 : Galerie souterraine de l'INERIS

Description du principe d'étalonnage par cellule scellée

Le schéma général d'un banc d'étalonnage DOAS est le suivant :



Où, à partir du signal enregistré par le récepteur, le DOAS est capable de remonter à la concentration en gaz dans la cellule : $C_{\text{mesurée}}$.

L'étalonnage de l'appareil consiste donc à faire coïncider cette valeur avec la valeur théorique de la concentration ($C_{\text{générée}}$: connue par la formule (1)). En traçant la « Concentration mesurée » en fonction de « Concentration générée », on obtient une droite d'étalonnage qui a théoriquement une pente égale à 1 et une ordonnée à l'origine égale à zéro.

Description technique

L'INERIS a fait réaliser une cellule pour calibrage d'analyseur DOAS par son atelier. Il s'agit d'une cellule scellée pouvant recevoir différents gaz jusqu'à 6 bars de pression et équipée d'un système de positionnement. Elle se présente sous la forme d'un cylindre en

acier inox, ses dimensions sont : 32,6 cm de longueur, pour un diamètre de 13 cm. Afin de laisser passer le faisceau de la lampe (le passage libre est de 8 cm de diamètre), les parois latérales sont des fenêtres en silice fondue à face parallèles. Son volume de 1,367 L, pour un poids de 12 Kg.



Photo 4 : Première version de la cellule scellée

Il a été prévu 4 entrées sur cette cellule : une entrée et une sortie pour le gaz (remplissage et vidange) ainsi que deux piquages permettant de poser un manomètre (contrôle de la pression) et une prise de température.

Cette cellule est en inox 316L et a été conçue pour fonctionner sous une pression de 6 bars, avec différents produits tels que : NO, NO₂, SO₂, BTX, ozone...

Enfin, l'inertage de la cellule, qui a pour but d'enlever toute réactivité des polluants gazeux avec l'air ambiant, est effectué avec de l'azote.

1.1. Description de l'étude de faisabilité : étude de compatibilité

1.1.1 Test d'étanchéité

Il faut tout d'abord s'assurer de la bonne étanchéité de la cellule. Ainsi, chaque fenêtre est enserrée par deux Joints PTFE (PolyTétraFluoroEthylène : souvent appelé Téflon®). Cet assemblage « Joint + fenêtre + Joint » est tenu par 12 vis et confère ainsi à la cellule son étanchéité. L'atelier a été chargé de faire ce test : la cellule a été soumise à une épreuve hydraulique à 10 bars, puis à une épreuve d'étanchéité avec de l'azote à 9 bars (soit 1.5 fois la pression d'utilisation normale) durant 24 heures. La construction de la cellule de calibrage a été achevée mi-mai.

1.1.2 Test de stabilité du gaz dans la cellule

Après s'être assuré que la cellule ne fuit pas, il faut étudier son comportement lorsqu'on la remplit de gaz : les parois vont-elles réagir avec le gaz ? Ce dernier va-t-il être dégradé après un séjour prolongé dans la cellule ?

Afin de s'assurer que la cellule est véritablement inerte, on remplit la cellule de gaz de concentration connue (bouteille étalon) à 6 bars ($C_{t=0}$). La concentration dans la cellule est de nouveau vérifiée après 24 heures ($C_{t=24h}$). Le test de stabilité du gaz sera jugé concluant si $C_{t=0} = C_{t=24h}$.

1.1.3 Test de stabilité du gaz dans le faisceau du DOAS

Enfin, un dernier point dont il faut s'affranchir : le gaz va-t-il être détérioré après plusieurs heures de séjour dans le faisceau laser du DOAS ? En effet, pour le calibrage, la cellule est placée dans le faisceau, il faut vérifier que le gaz ne va pas réagir suite au rayonnement UV. Le protocole expérimental est le même que précédemment, sauf que cette fois, la cellule remplie de gaz est placée dans le faisceau pendant 24 heures. Pour cette expérience, on aura une double vérification : une mesure directe donnée par le DOAS (il faut s'assurer que la valeur donnée par le DOAS toutes les 3 minutes est constante) et une mesure avec un analyseur de gaz haute teneur (à $t = 0$ et à $t = 24h$).

Etude comportementale de la cellule et test de compatibilité

1.1. vérification de la stabilité du gaz SO₂

Ces expériences ont pour but de vérifier que la concentration en SO₂ reste constante dans la cellule au cours du temps et notamment durant toute la phase de l'étalonnage. Or, pour mesurer une concentration, il est possible d'utiliser un analyseur SO₂ Haute Teneur (0-1000 ppm) ou un analyseur Basse Concentration (0-1000 ppb) via un canal de dilution adapté.

Sachant que la cellule utilisée a un volume $V_{\text{cellule}} = 1,367$ litres, en remplissant la cellule à 6 bars, tout se passe comme si l'on avait un volume équivalent de : $1,367 * 6 = 8,202$ litres. Dans la cellule, nous avons des concentrations haute teneur (1000 ou 400 ppm suivant la bouteille utilisée).

En toute logique, il suffirait d'utiliser un analyseur Haute Teneur comme outil de surveillance de la stabilité de la concentration dans la cellule. Or, un tel analyseur utilise 4 L/min avec une pression en entrée de 2 bars. Un tel montage ne permettrait de disposer que d'un volume utile de $1,367 * 4 = 5,468$ l, ce qui autorise une analyse durant 82 secondes, temps bien trop insuffisant pour une réelle vérification de la stabilité du gaz.

Bien que plus complexe à réaliser, nous avons opté pour l'utilisation d'un analyseur environnemental précédé d'un diluteur à buses soniques, appareil qui permet d'obtenir un rapport de dilution différent selon les voies sollicitées. Le diluteur utilisé, de type quaternaire, possède deux voies d'entrée pour le gaz à diluer (A et B) et deux voies d'entrée pour le gaz vecteur (ici : du gaz zéro, dans les voies C et D). La « grille de dilution » est fournie par le constructeur (au moment de chaque étalonnage annuel de l'instrument) et nous indique, par exemple, que : B1 + C donne un rapport de dilution de (1 / 986), ou encore, que A1 + C + D donne un rapport de dilution de (1 / 752).

Buses soniques	Débits des buses soniques (ml/min)	Rapports des dilutions
B1+C+D	7502,170	1480,01
B1+D	4996,739	985,74
A1+C+D	7507,079	752,42
B1+C	4996,739	495,27
A1+D	5001,647	501,31
B2+C+D	7516,692	383,69
B2+D	5011,261	255,80
A1+C	2515,409	252,12
A2+C+D	7542,953	164,51
B2+C	2525,022	128,89
A2+D	5037,5217	109,87

Tableau 3 : Concentrations obtenues avec le mélangeur à buses soniques M-CE12703

L'expérience se déroule en 5 étapes :

- Calibrage de l'analyseur (calibrage du zéro avec de l'azote)
- Balayage de la cellule avec de l'azote pour qu'il n'y ait plus aucune trace d'oxygène,
- Balayage avec du SO₂ (1000 ppm à 6,5 bars) afin d'obtenir une valeur stable C₀,
- Fermeture de la cellule à 6,5 bars,
- 24 heures plus tard : ouverture de la cellule pour mesurer la concentration en SO₂ et voir s'il y a une différence avec C₀.

1.2. Expériences

La cellule, le ou les diluteurs et l'analyseur sont placés en série car ainsi, la cellule peut être remplie de N₂ (pour son nettoyage entre deux expériences) ou de SO₂ (pour l'expérience en elle-même). Le contenu de la cellule peut également soit circuler dans le diluteur (arrivée du gaz en voie B) soit être envoyé à la purge (lors du nettoyage de la cellule).

Dans le diluteur, le mélange « Air Zéro + Gaz Cellule » se fait avec le facteur de dilution choisi (ici : B1 + D → 1 / 986).

Ce mélange a également deux possibilités : partir à la purge ou passer dans l'analyseur SO₂ pour être mesuré. Entre le diluteur et l'analyseur, on crée une fuite supplémentaire pour s'assurer qu'il n'y a pas de surpression en entrée d'analyseur (ce qui risquerait d'endommager l'appareil).

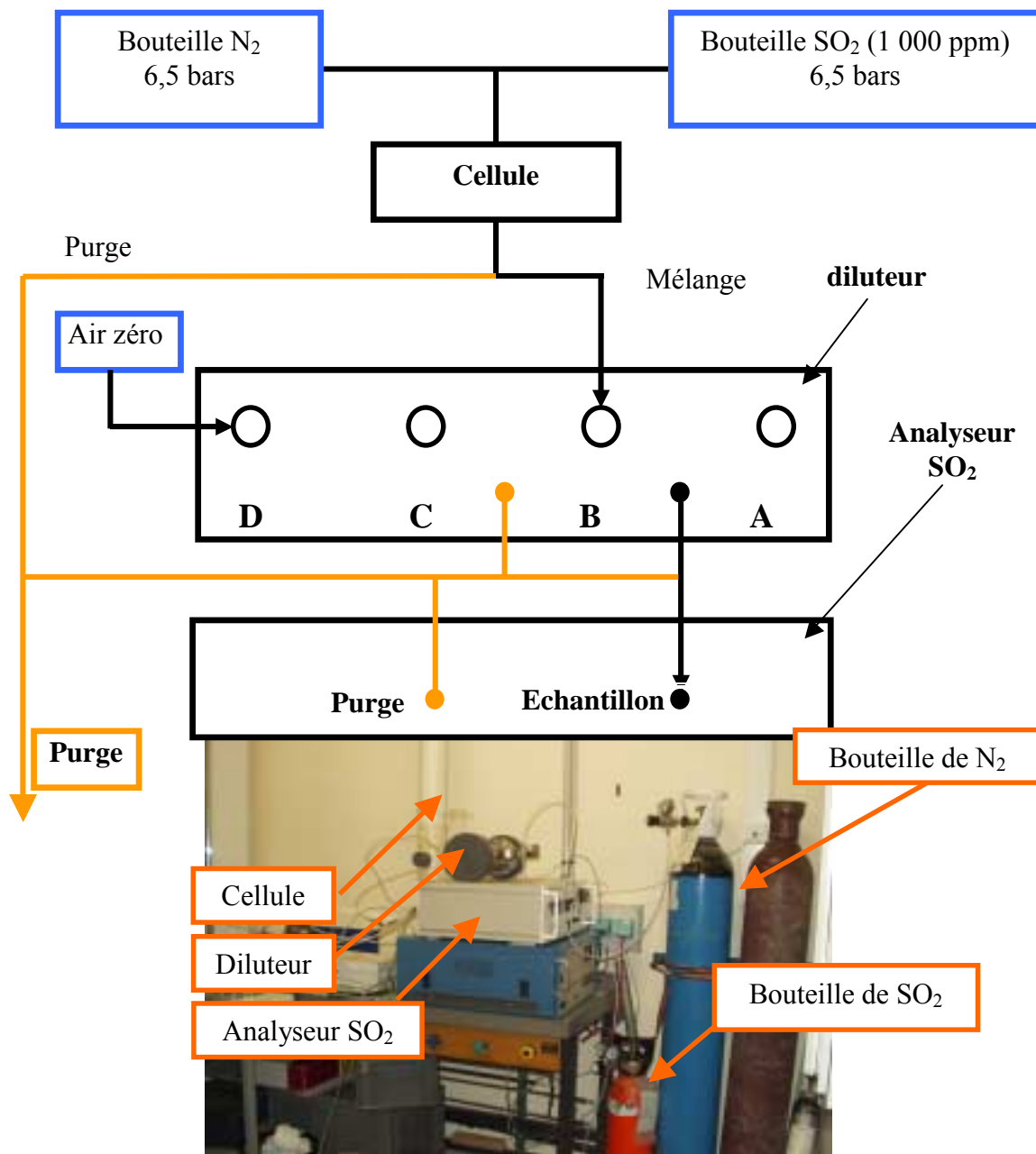


Photo 5 : Montage expérimental

Les données sont récupérées grâce à un logiciel d'acquisition (AOIP), ce qui permet d'avoir une valeur de concentration toutes les minutes.

1.3. Des premiers résultats peu encourageants.

Nous avons effectué une première série de tests, qui ont fourni des résultats peu encourageant :

- Lors du balayage de la cellule avec du SO_2 à 1000 ppm et après stabilisation nous avons obtenu une concentration de : 750 ± 3 ppb.
- On effectue une mesure de la concentration après 24h : $C_{24h} = 700 \pm 4$ ppb.

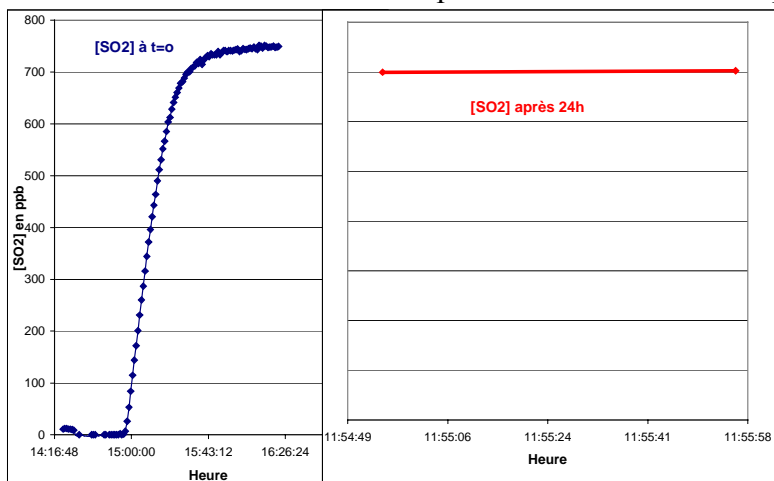


Figure 5 : Concentration SO_2 à $t = 0$ et à $t = 24$ h

Problème de fuite.

Les fuites ont été localisées au niveau des vis enserrant les lentilles. Les joints en Téflon®, qui supportent mal les serrages et desserrages successifs, ont alors été remplacés par des joints en Viton® qui, de par leur malléabilité plus grande que le PTFE, épousent mieux le contour des fenêtres lors du vissage.

Chute de la concentration, après dilution, de 750 ppb à 700 ppb .

Il semble donc que la cellule elle-même ait un impact sur la concentration en SO_2 . Afin de confirmer cette première constatation, nous avons mis en œuvre une seconde série de tests pour étudier les éventuels effets de passivation de la cellule.

1.4. Etude de la réactivité du SO_2 après passivation de la cellule

Plusieurs séries de tests ont été réalisées afin d'évaluer si la cellule avait un effet immédiat sur la concentration en SO_2 : la simple circulation de SO_2 dans la cellule entraîne-t-elle un changement de concentration ?

Puis, nous avons testé l'effet de la cellule à plus long terme (24 heures, 48 heures, etc...) : la concentration en gaz est-elle modifiée suite à un séjour prolongé de plusieurs heures dans la cellule ?

Nous avons fait passer du SO₂ dans la cellule, puis le diluteur, puis l'analyseur [expériences (3) et (5) (cf. Figure 6)]. Puis dans un second temps, nous avons fait passer directement le SO₂ dans le diluteur et l'analyseur [expérience (6) (cf. Figure 6)]. Le seul facteur qui change est donc bien dans ce protocole, la présence, ou non, de la cellule.

Entre C₃ et C₅, il y a eu l'étalonnage. La valeur lue par l'analyseur a été multipliée par 1,05 (210/200 = 1,05). En multipliant C₃ par ce coefficient, on ne retrouve pas C₅ (430*1,05 = 452 ppb pour 490 ppb). L'augmentation n'est donc pas entièrement dû au réglage de l'analyseur. On en déduit que, même si la cellule a un effet (phénomène d'adsorption des parois ou encore diffusion à travers les joints) sur le gaz, cet effet diminue au fur et à mesure que celle-ci est balayée. Il était donc normal d'aboutir à une stabilisation de la cellule, une fois les parois passivées.

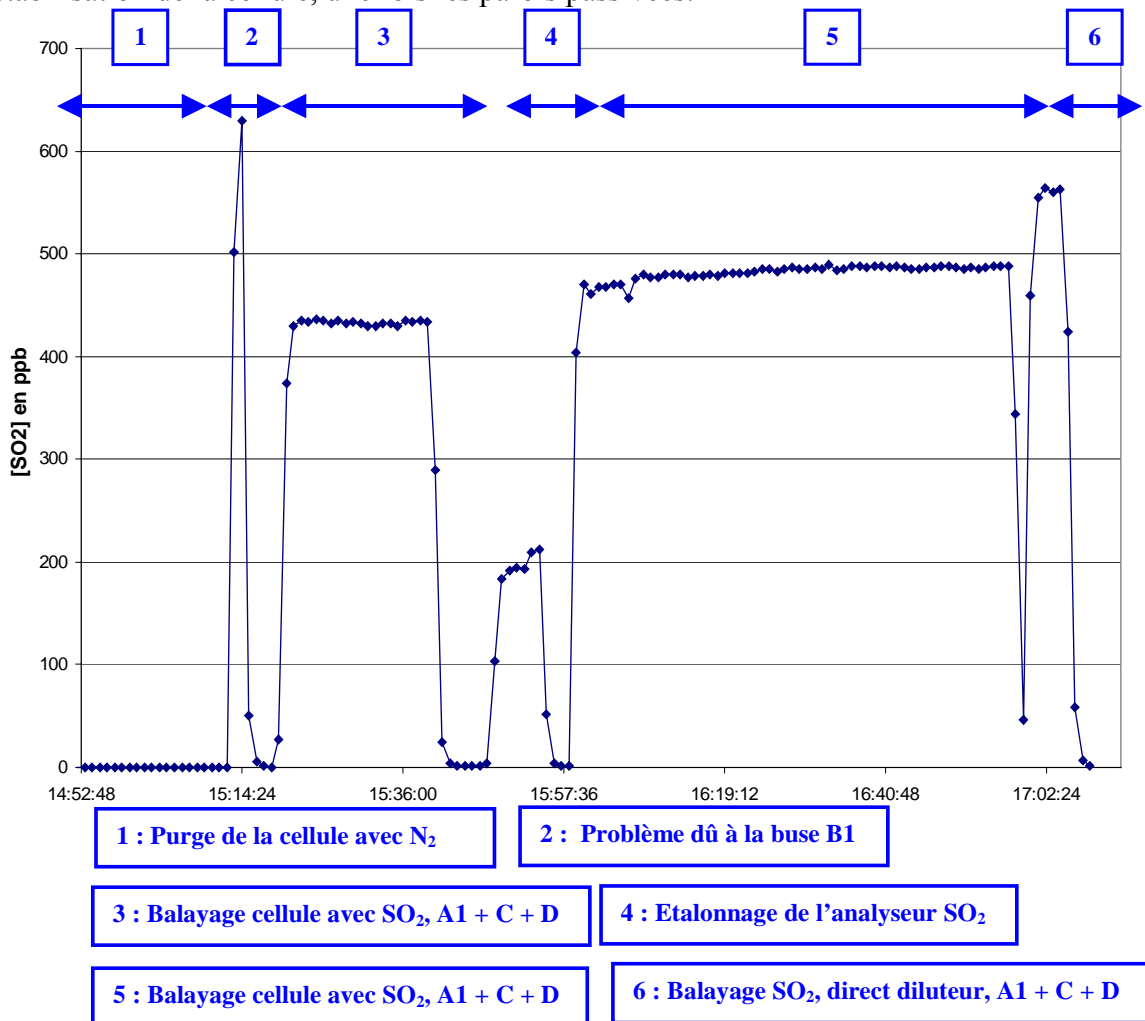


Figure 6 : Evolution de [SO₂] durant la première série de tests

1 ^{er} essai		2 ^{ème} essai		3 ^{ème} essai	
Tps dans la cellule (h)	Conc. SO ₂ en ppb	Tps dans la cellule (h)	Conc. SO ₂ en ppb	Tps dans la cellule (h)	Conc. SO ₂ en ppb
0	487	0	588	0	581
22	466	23	585	23	573
89	437	83	569	47	565
96	440	105	567	144	549
120	432			168	546
137	431			192	548
164	422			360	528

Tableau 7 : Concentration SO₂ en fonction du temps de séjour du gaz dans la cellule

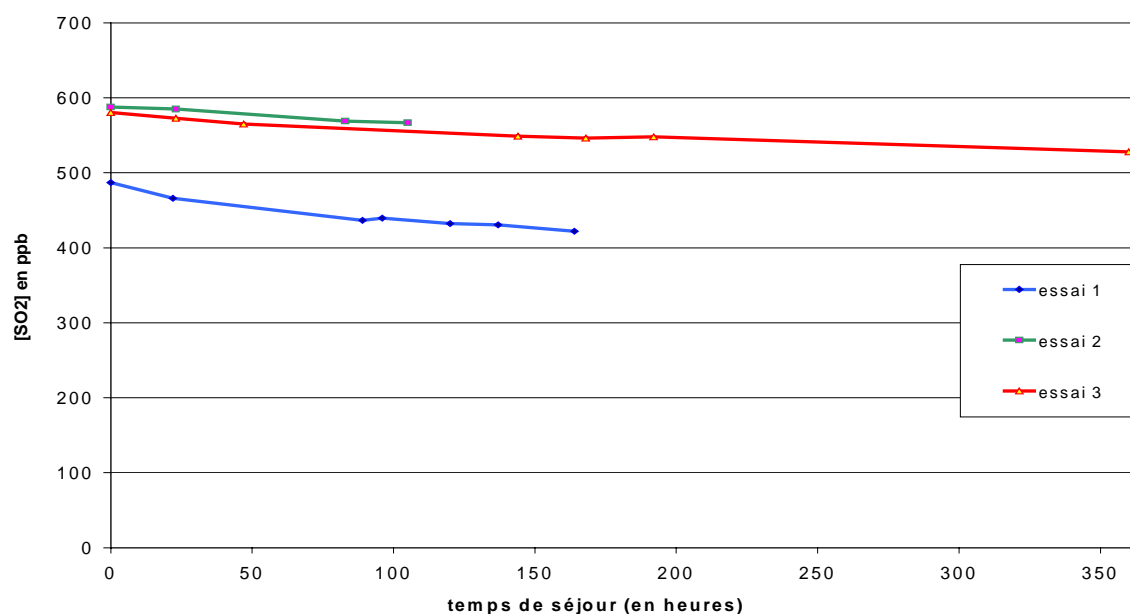


Figure 8 : Evolution de [SO₂] (en ppb) en fonction du temps de séjour dans la cellule

Nous pouvons tout d'abord conclure que, une fois passivée, la cellule n'a plus d'effet direct sur le gaz. En effet, lors de la première série de tests (le 10 juin), nous avons : $C_{\text{SO}_2+\text{cellule}} = 490$ ppb et $C_{\text{SO}_2 \text{ seul}} = 560$ ppb. Cependant, après plusieurs jours de fonctionnement de la cellule, nous avons observé une égalité entre ces deux concentrations. En balayant la cellule suffisamment longtemps, celle-ci a été débarrassée de toutes les impuretés, les sites potentiels d'adsorptions ont été remplis et le SO₂ est devenu stable dans la cellule.

Nous avons le même phénomène pour le comportement du SO₂ à long terme dans la cellule. Dans le premier essai, la concentration en SO₂ varie de 11 % en 96 heures, dans le second, la variation est de 4 % et dans le troisième, elle est de 6 % en 144 heures. On tend ainsi vers une stabilisation avec une variation temporelle de l'ordre de 5%. Mais 5% sur 144 heures correspond à 0.8% sur une journée, ce qui est négligeable dans le processus d'étalonnage qui nous intéresse. De plus, cette stabilisation peut être optimisée par téflonnage interne des parois, action qui vient d'être réalisée.

Finalement, après passivation de la cellule, le gaz SO₂ ne présente plus de réactivité temporelle suffisamment importante pour influencer le protocole d'étalonnage (0,8 % par jour).

1.5. Résultats obtenus pour le NO

De la même manière que dans la cas du SO₂, nous avons également testé la réactivité de la cellule en présence de NO. La seule différence vient du fait que, n'ayant pas le matériel nécessaire pour réaliser le montage de dilution puis d'analyse du NO, l'étude est entièrement basée sur les résultats du DOAS.

Influence du flux lumineux du DOAS sur la mesure

1.1. Stabilité du mélange SO₂ + NO, droite de calibrage

Un mélange de SO₂ et de NO a été réalisé. Nous avons déjà vu que la concentration détectée par le DOAS était fonction de la concentration initiale du gaz, de la pression et de la longueur du trajet optique :

$$C = C_0 * (P_{\text{cellule}} / P_{\text{atm}}) * (\ell / L)$$

Comme on a un mélange, la concentration de chaque gaz est proportionnelle à sa pression partielle. En modifiant la pression (la pression de la cellule est diminuée de bar en bar), on génère des concentrations différentes qui sont détectées par le DOAS. Le DOAS ayant été préalablement étalonné, en traçant « Concentration mesurée par le DOAS » en fonction de « Concentration générée », on doit théoriquement retrouver une droite avec une pente égale à 1 et passant par l'origine. Cela signifie que ce protocole peut effectivement servir à étalonner l'appareil sur le terrain.

Calculs réalisés pour déterminer la concentration théorique générée dans la cellule :

Long. trajet (en mètres)	100
--------------------------	-----

Long. Cellule (en mètre)	0.248
--------------------------	-------

P. totale = 6.5 bars	P. totale = 6.5 bars
Pression partielle 6.5 bars	Pression partielle 1.00 bars

Polluant	Conc. initiale (ppm)
NO2	100
NO	88.1
SO2	390
O3	200
Benzène	100
Toluène	100
Xylène	100

Polluant	M. moléc (g/mol)	1 ppm = ? mg/m3	conc. (ppb)	conc. (ug/m3)	conc. (ppb)	conc. (ug/m3)
NO2	46	1.88	1612	3033	248	467
NO	30.01	1.23	1420	1743	218	268
SO2	64.06	2.62	6287	16472	967	2534
O3	48	1.96	3224	6329	496	974
Benzène	78.11	3.19	1612	5150	248	792
Toluène	92.14	3.77	1612	6075	248	935
Xylène	106.16	4.34	1612	6999	248	1077

$[SO_2]_{\text{générée}} \text{ (ppb)} = 390 \text{ (ppm)} * (6,5 / 1) * (0,248 / 100) * 1000$

$[SO_2]_{\text{générée}} \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)} = 6\ 287 \text{ (ppb)} * 2,62 \text{ (mg/m}^3\text{)}$

Tableau 8 : tableau de conversion des concentrations

1.2. Résultats

1.2.1 Stabilité des gaz dans la cellule

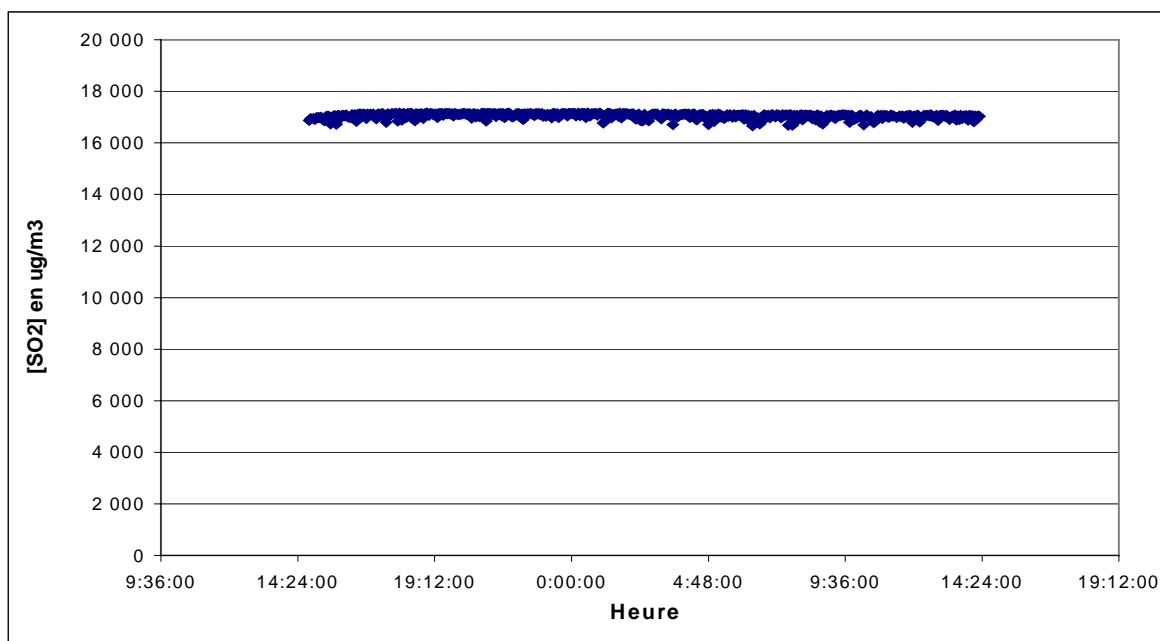


Figure 10 : Evolution de la concentration SO₂ (en ug/m³) sur 24 heures : du jeudi 8 au vendredi 9 juillet

On obtient une valeur de la concentration : $[\text{SO}_2]_{\text{DOAS}} = (17\,050 \pm 200) \mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir de cette valeur, il est possible de remonter à la concentration dans la cellule en utilisant la même formule que précédemment :

$$P_{\text{SO}_2} * (0,248 / 100) * [\text{SO}_2]_{\text{cellule, ppm}} * 1000 * 2,62 = [\text{SO}_2]_{\text{DOAS, } \mu\text{g}/\text{m}^3}$$

Soit : $[\text{SO}_2]_{\text{cellule, ppm}} = 404 \pm 4 \text{ ppm}$. En théorie, dans la cellule, nous avons $390 \pm 20 \text{ ppm}$ de SO_2 (concentration de la bouteille utilisée), soit un écart de 4% entre les deux valeurs. Donc, aux incertitudes près, non seulement la concentration en SO_2 est stable, mais celle-ci est bien égale à la concentration initiale de la « bouteille mère ».

Parallèlement à ces résultats, nous avons analysé la stabilité temporelle du gaz présent dans la cellule. Nous avons introduit du gaz SO_2 dans la cellule et initialement mesuré une concentration : $[\text{SO}_2]_{t=0} = 574 \text{ ppb} (\pm 2\%)$. Après 24 heures, nous avons mesuré : $[\text{SO}_2]_{t=24\text{h}} = 569 \text{ ppb} (\pm 2\%)$, soit une variation de 1%. Ces deux premières expériences laissent à penser que la concentration en SO_2 reste stable dans la cellule, même lorsque celle-ci est placée dans le faisceau de la lampe du DOAS.

L'ensemble de cette expérience a été réitérée afin de confirmer les résultats. On obtient les résultats suivants :

- La concentration en SO_2 mesurée par le DOAS est constante sur des durées de plusieurs heures, $[\text{SO}_2]_{\text{DOAS}} = (18\,000 \pm 300) \mu\text{g}/\text{m}^3$ (remarque : la concentration équivalente dans la cellule serait alors de 426 ppm, soit écart de 9% avec la valeur théorique de la bouteille)
- La concentration mesurée par l'analyseur est constante avec le temps : $[\text{SO}_2]_{t=0} = 580 \text{ ppb} (\pm 2\%)$ et $[\text{SO}_2]_{t=24\text{h}} = 575 \text{ ppb} (\pm 2\%)$, soit une variation de 1% entre les deux valeurs.

Ces résultats sont bien en accord avec les premiers trouvés. On conclue donc que le SO_2 est stable dans la cellule même lorsque celle-ci est placée dans le faisceau de la lampe.

Nous avons effectué les mêmes expériences avec le NO .

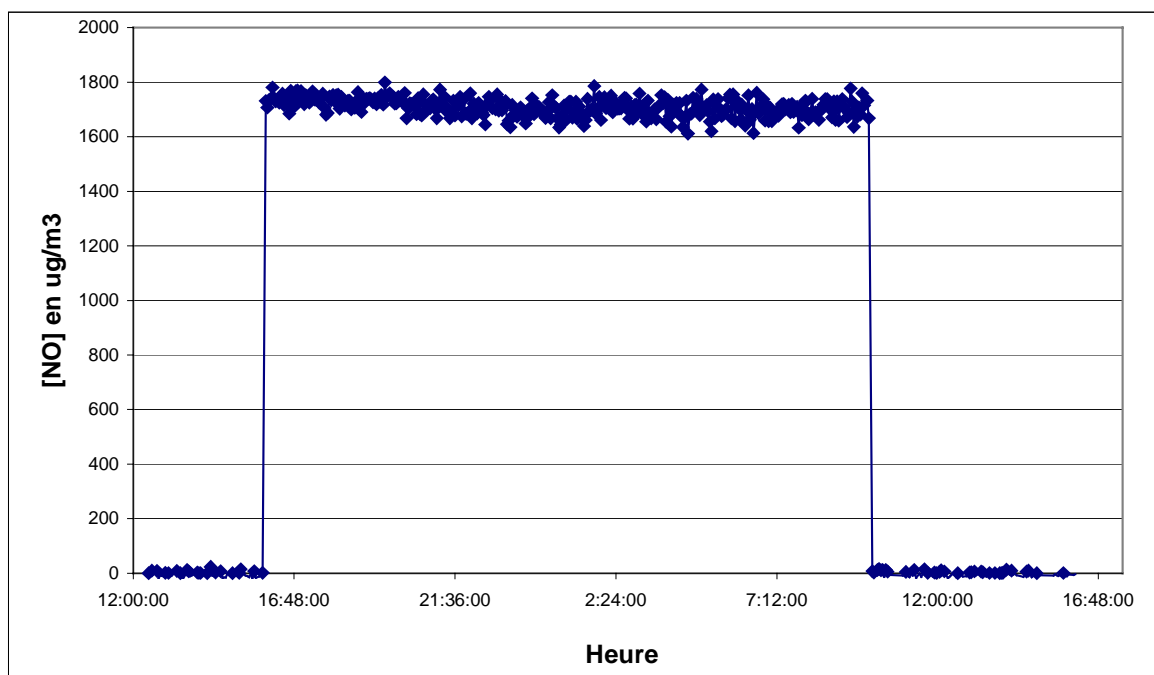


Figure 11 : Evolution de la concentration NO (en ug/m3) sur 18 heures

On obtient une valeur de la concentration :

- $C(\text{à } t = 0) = 1\,732 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec un écart type de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- $C(\text{après } 20 \text{ h dans le faisceau}) = 1\,670 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec un écart type de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Soit $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de différence, cette valeur est inférieure à l'incertitude, on peut donc considérer que ces deux valeurs sont égales : le NO est stable dans la cellule

Comme précédemment pour le SO_2 , on peut remonter à la concentration dans la cellule en utilisant la même formule :

$$P_{\text{NO}} * (0,248 / 100) * [\text{NO}]_{\text{cellule, ppm}} * 1000 * 1,23 = [\text{NO}]_{\text{DOAS, } \mu\text{g}/\text{m}^3}$$

Soit : $[\text{NO}]_{\text{cellule, ppm}} = 86 \pm 3 \text{ ppm}$. En théorie, dans la cellule, nous avons $88 \pm 4 \text{ ppm}$ de NO (concentration de la bouteille utilisée), soit un écart de 2% entre les deux valeurs. Les résultats sont bien cohérents.

On en déduit donc que le NO est également stable dans la cellule.

Une fois évaluée la stabilité de ces deux gaz, nous avons également cherché à évaluer la stabilité du NO_2 dans la cellule. Néanmoins, nous avons obtenu des résultats très peu encourageants car nous avons constaté une destruction rapide du NO_2 en présence de rayonnement lumineux. Des essais sont actuellement en cours visant à combiner SO_2 et NO_2 afin d'utiliser le gaz SO_2 comme élément filtrant les rayonnements lumineux incidents susceptibles de dissocier le NO_2 .

Etude de la linéarité des DOAS a l'aide d'une cellule scellée

Pour cette expérience, un mélange de SO₂ et de NO a été constitué (P_{SO₂} = P_{NO} = 3 bars). Puis nous avons fait varier la pression à l'intérieur de la cellule et enregistré la concentration mesurée par le DOAS. On obtient les résultats suivants :

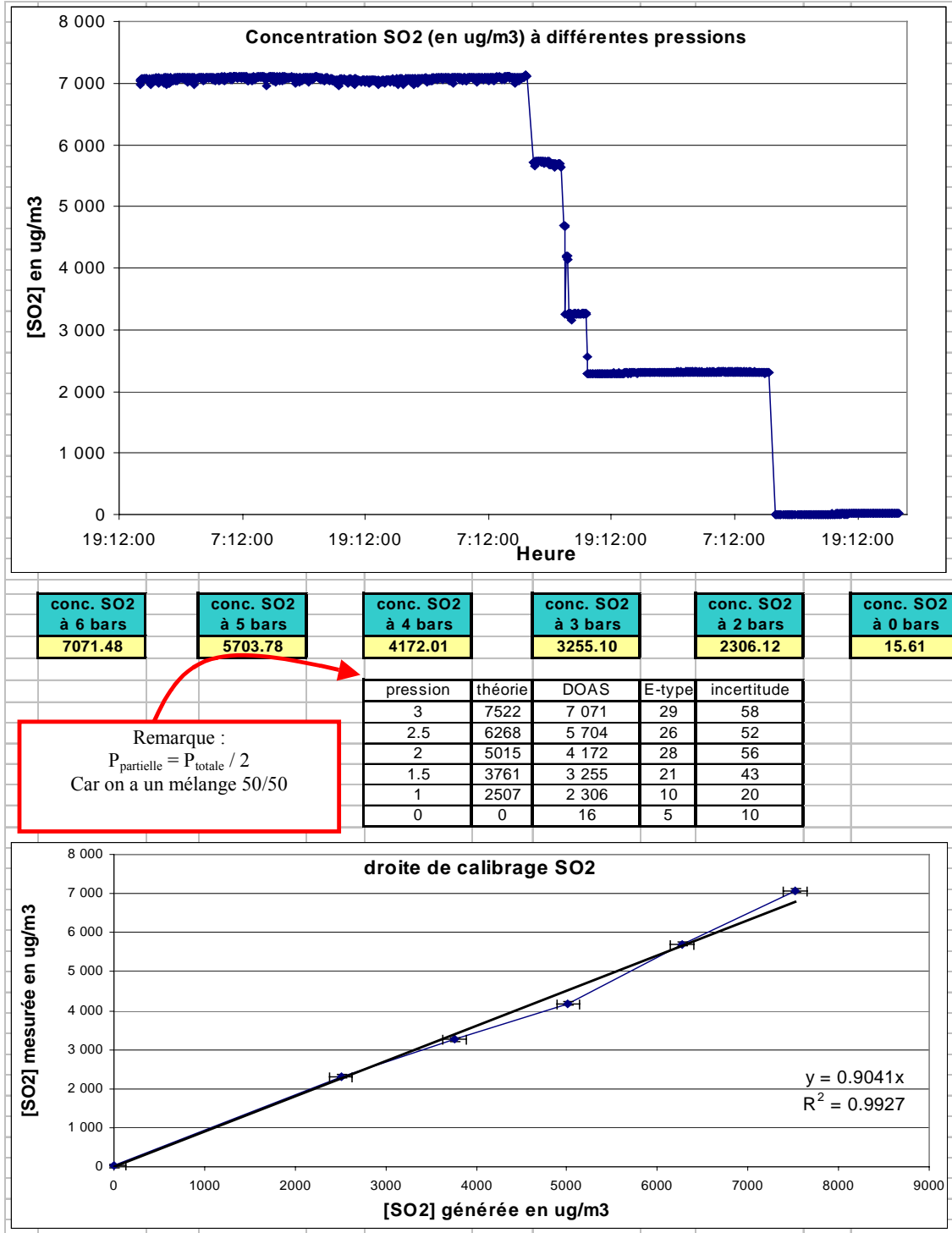


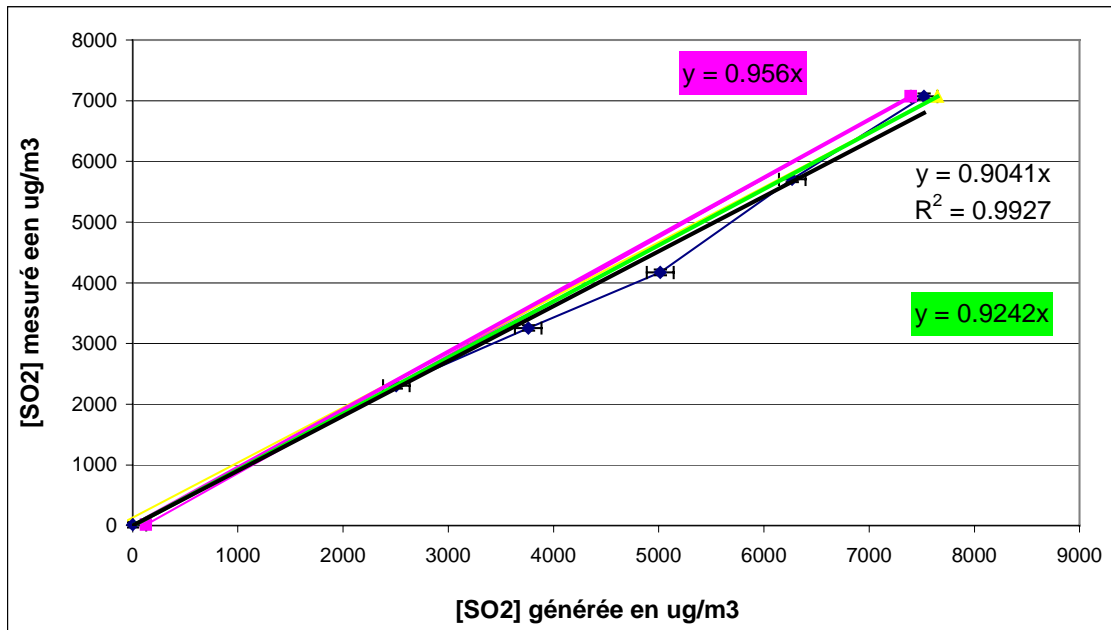
Figure 12 : Mesures DOAS : SO₂ (du vendredi 16 au mardi 20 juillet)

L'équation de la droite est : $[\text{SO}_2]_{\text{mesurée}} = 0,9041 * [\text{SO}_2]_{\text{générée}}$.

L'incertitude sur la concentration générée provient principalement de la lecture du manomètre, l'analyseur ayant été raccordé par ailleurs. On estime que l'on fait une erreur de $\pm 0,05$ bar, soit $127 \mu\text{g}/\text{m}^3$ concernant le gaz SO_2 .

L'incertitude sur la concentration mesurée provient de l'appareil DOAS. En supposant que l'incertitude est égale à deux fois l'écart-type, on trouve une incertitude relative de 1%.

La plus grande source d'incertitude est donc celle liée à la lecture du manomètre à aiguille. On trace les droites de pente extrême.



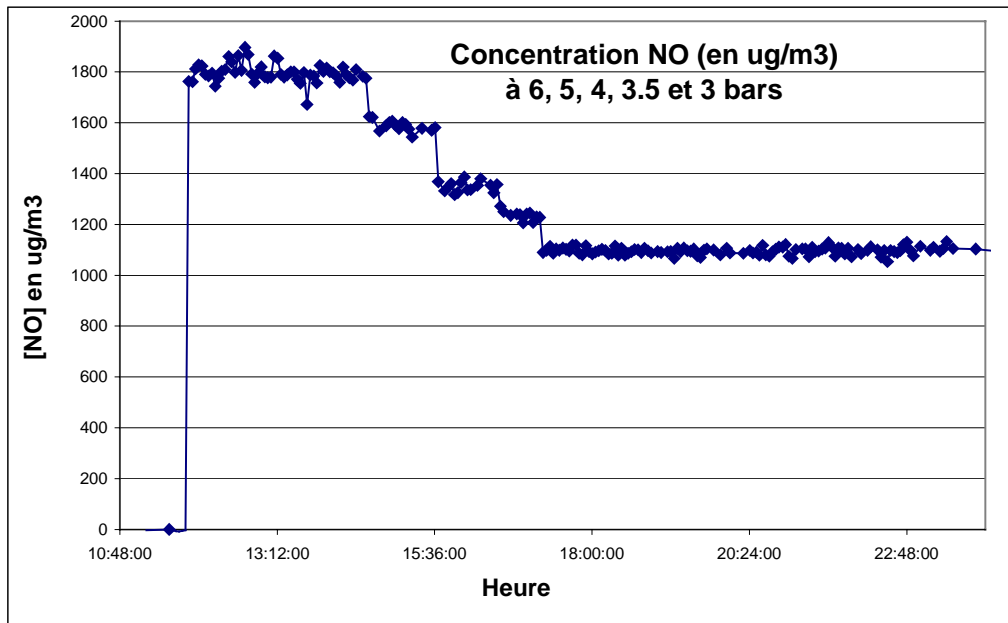
	théorie	DOAS
pente max	7522-127	7071
	127	16
pente min	7522+127	7071
	-127	16

Figure 13 : linéarité de la réponse DOAS pour le gaz SO_2

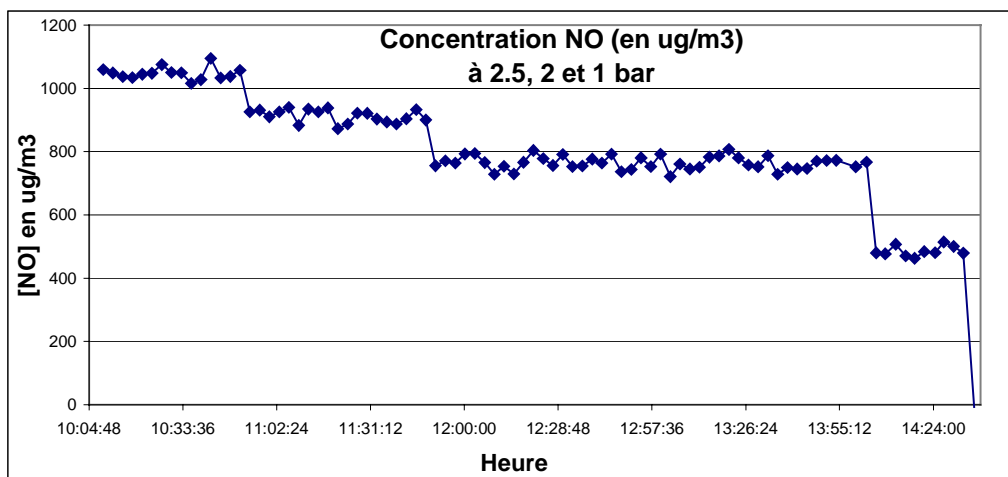
On a donc : $a_{\text{max}} = 0,96$ et $a_{\text{min}} = 0,92$, soit une incertitude absolue égale à $0,02$.

En définitive : $[\text{SO}_2]_{\text{mesurée}} = (0,90 \pm 0,02) * [\text{SO}_2]_{\text{générée}} \mu\text{g}/\text{m}^3$

On effectue la même expérience pour le monoxyde d'azote. Mais cette fois, il y a uniquement du NO dans la cellule. On obtient les résultats suivants :



6 bars	5 bars	4 bars	3.5 bars	3 bars
1 796.94	1 582.73	1 348.39	1 230.41	1 092.88



2.5 bars	2 bars	1 bar
912.90	764.72	485.94

Figure 14 : Mesures DOAS : NO (du vendredi 23 au lundi 26 juillet)

L'incertitude sur la concentration générée peut provenir de la lecture du manomètre. On estime que l'on fait une erreur de $\pm 0,05$ bar, soit $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ concernant le gaz NO. L'incertitude sur la concentration mesurée peut provenir de l'appareil DOAS : en supposant que l'incertitude est égale à deux fois l'écart-type, on obtient une incertitude relative de 7%, soit $126 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette incertitude instrumentale est ici bien supérieure à l'incertitude sur la concentration générée. Nous utiliserons donc cette incertitude dans la construction des droites de linéarité concernant le gaz NO.

pression	Théorie	DOAS	E-type	incertitude	
				absolue	relative
6	1612	1797	36	73	4%
5	1344	1583	17	35	2%
4	1075	1348	21	42	3%
3.5	941	1230	14	29	2%
3	806	1093	19	38	4%
2.5	672	913	21	42	5%
2	537	765	21	42	6%
1	269	486	17	33	7%

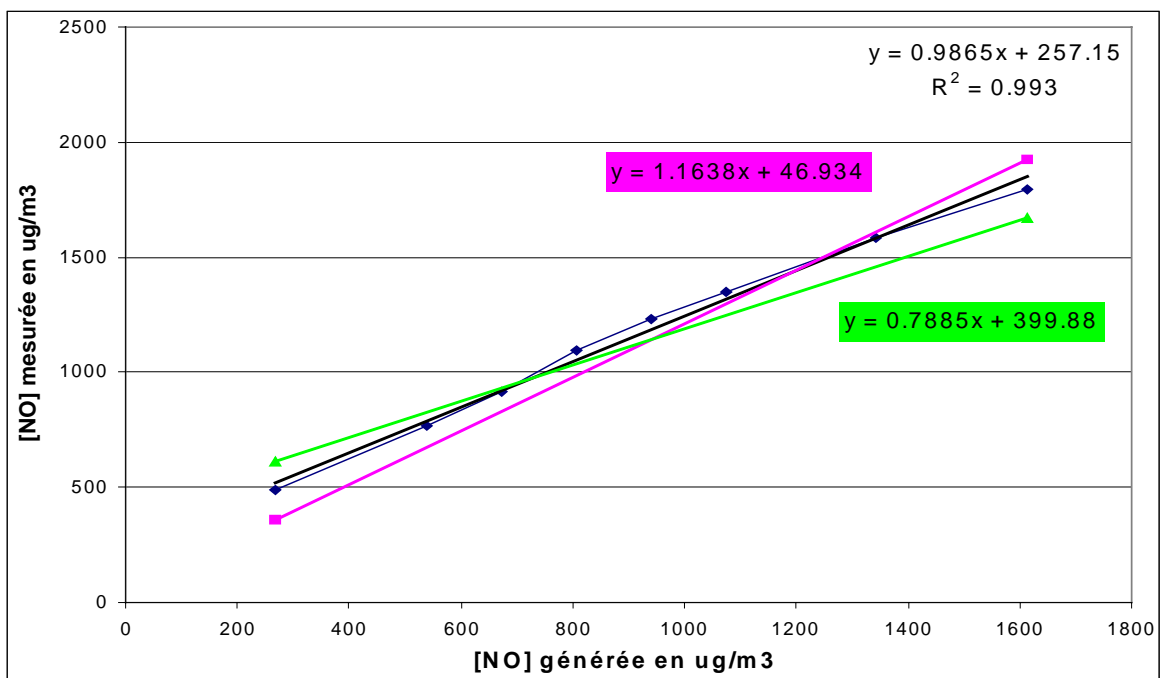
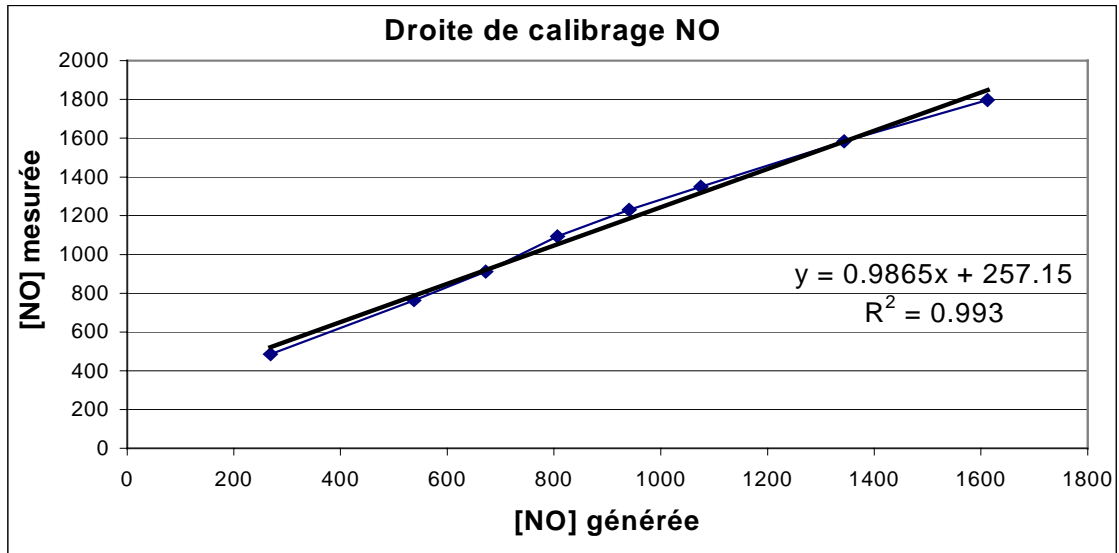


Figure 15 : linéarité de la réponse DOAS pour le gaz NO

En effectuant les mêmes calculs que pour le SO₂, on obtient alors les incertitudes suivantes dans le cas du gaz NO :

- Incertitude absolue sur la pente : 0,18765 ug/m³
- Incertitude absolue sur l'ordonnée à l'origine : 176.473 ug/m³

L'équation de la droite de linéarité est alors, pour le NO :

$$[\text{NO}]_{\text{mesurée}} = (0,99 \pm 0,19) * [\text{NO}]_{\text{générée}} + (257 \pm 176) \mu\text{g}/\text{m}^3$$

On observe que les résultats sont tout à fait concluants, que ce soit pour le SO₂ ou le NO :

$$[\text{SO}_2]_{\text{mesurée}} = (0,90 \pm 0,02) * [\text{SO}_2]_{\text{générée}} \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$[\text{NO}]_{\text{mesurée}} = (0,99 \pm 0,19) * [\text{NO}]_{\text{générée}} + (257 \pm 176) \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Ces premières mesures montrent que la cellule de calibrage a parfaitement joué son rôle pour ces deux gaz.

Les problèmes soulevés

1.1. Passivation et relargage de SO₂

Le relargage correspond à la libération de gaz qui était initialement adsorbé dans les parois de la cellule. Ce phénomène a été observé alors que la cellule remplie d'azote était placée dans le faisceau du DOAS. La concentration en SO₂ a augmenté. En traçant l'évolution de la concentration en SO₂ en fonction du temps, on obtient les courbes suivantes :

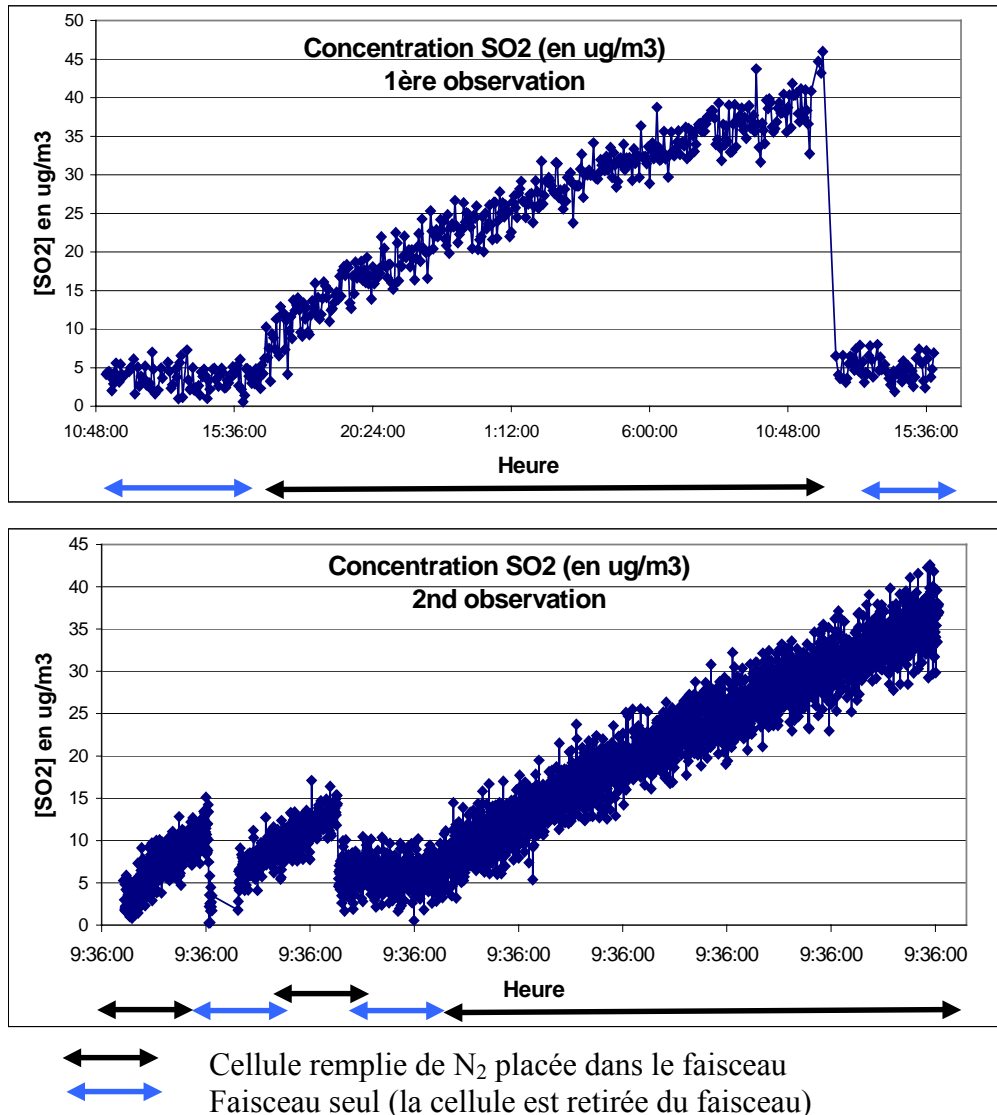


Figure 16 : Evolution de [SO₂] en fonction du temps, phénomène de relargage

Entre chaque phase où la cellule est placée dans le faisceau, celle-ci est purgée à l'azote afin d'éliminer le dioxyde de soufre produit. L'expérience a été reproduite plusieurs fois afin d'évaluer la quantité de SO₂ dégagée. On a cherché notamment à définir si ce phénomène s'atténue au cours du temps.

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant.

Temps écoulé (h) *	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
10	29	8	8	10	2
20	45	11	12	13	6
24			14	14	6
4				21	10
96				31	16
t_{infini} **				119	35

* durée où la cellule est dans le faisceau (les deux premiers tests se sont déroulés sur moins de 24h)

** temps au bout duquel la concentration est constante

Tableau 8 : évolution du relargage de SO_2 dans la cellule ($[\text{SO}_2]$ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

- (1) Du 20 au 21 juillet (2) Du 26 au 27 juillet (3) Du 27 au 28 juillet
 (4) Du 29 juillet au 27 août (5) Du 27 août au 7 septembre

Ce phénomène de relargage nous permet de conclure que les parois internes de la cellule ne sont pas inertes. Au début des expériences, on pensait que la faible diminution de la concentration était due à une réaction avec des impuretés présentes dans la cellule, éliminées lors de la stabilisation de la concentration. En fait, ce sont les parois elles-mêmes qui réagissent avec le gaz. Une fois que celui-ci est arrivé à saturation dans les parois, il n'y a plus eu de réaction (concentration stabilisée).

Inversement, quand il n'y pas de SO_2 dans la cellule (mais de l'azote ou du dioxyde d'azote), on observe un relargage du gaz qui était stocké dans les parois. Le relargage de SO_2 dans la cellule s'atténue au cours du temps (cf. tableau précédent), en effet, grâce aux purges successives, le SO_2 produit est extrait des parois et éliminé de la cellule.

Afin de s'affranchir de ce phénomène, nous avons choisi de téflonner l'intérieur de la cellule : du Téflon® noir, car le blanc risque de gêner la mesure optique du DOAS en raison de réflexions multiples à l'intérieur de la cellule, comme le montre la figure ci-dessous.



cellule scellée recouverte de Téflon noir dans sa partie interne, avec des joints en silicone et équipée d'un mesureur de pression digital

1.2. Cellule scellée multi-gaz

Afin de rendre l'étalonnage sur site le plus aisé possible, il serait souhaitable de minimiser le nombre de cellules utilisées. Par ailleurs, la linéarité a été réalisée pour le NO et le SO₂, sur la base d'une importante dynamique. Afin de réduire cette dynamique et de minimiser le nombre de cellules, il pourrait être intéressant de constituer un mélange de différents gaz (SO₂, NO, NO₂, BTX) avec chacun une pression partielle définie. En changeant la pression totale de la cellule, on modifie ces pressions partielles, et donc la concentration enregistrée par le DOAS pour chaque polluant. Par ailleurs, ce mélange « multigaz » permettrait de descendre la pression partielle de chaque polluant présent, et ainsi d'accéder à des niveaux de concentrations plus proches des valeurs seuils actuelles, ce qui améliorera la valeur de l'ordonnée à l'origine lors du calibrage. Mais pour cela, il reste à régler différentes questions.

Tout d'abord, afin d'avoir une connaissance précise de la concentration générée, il faut parfaitement connaître la pression dans la cellule. Le manomètre actuel est un manomètre à aiguille, donc peu précis. Il est prévu d'installer un manomètre digital qui permettra de déterminer la pression à 0,01 bar près.

Ensuite, pour faire le mélange souhaité, il faut s'assurer que les gaz seront stables dans la cellule. L'étude a été faite pour le SO₂ et le NO, mais qu'en est-il des autres (NO₂ et BTX) ? Nous savons d'ores et déjà qu'il y aura un problème avec le NO₂, en effet, celui-ci détruit totalement le Viton® [2] dont les joints sont faits. Il faut donc trouver une autre matière compatible avec ce gaz (et les autres). Des tests vont être effectués avec des joints en silicone qui devraient théoriquement être inertes. Par ailleurs, le NO₂ réagit en présence de flux lumineux ce qui impose l'utilisation de filtres interférentiels centrés sur la gamme spectrale d'analyse. Or ces filtres interférentiels seraient incompatibles avec la mesure des autres polluants présents dans cette cellule de calibrage.

Enfin, lors du mélange « SO₂ + NO », le DOAS n'a pas pu mesurer la concentration en NO tant que le SO₂ était trop concentré (ce dernier absorbe une trop grande partie du rayonnement et empêche la mesure du NO). Il va donc falloir faire de nouveaux tests pour savoir à partir de quelle concentration de SO₂, le DOAS peut mesurer le dioxyde d'azote, ce qui permettra de définir une pression partielle maximale en SO₂ dans le cas d'une cellule scellée multi-gaz.

conclusions et perspectives

Cette étude avait pour but de définir une nouvelle méthodologie de calibrage. Nous voulions savoir s'il était possible de faciliter le protocole de calibrage des appareils de type DOAS. En effet, le calibrage initial de ce type d'appareil nécessite du matériel important (bouteilles de gaz, cellules d'analyse de plusieurs mètres de long), dont les dimensions ne sont pas adaptées à un déplacement sur le terrain (surtout lorsque les appareils à étalonner se situent sur les toits des immeubles, avec une simple échelle pour y accéder). Ainsi, pour que ces appareils fonctionnent correctement et fournissent des valeurs de concentrations en polluants exactes, une nouvelle cellule de calibrage a été créée. Les dimensions réduites et la conception en acier inox de cette cellule doivent permettre cet étalonnage. Cette étude a donc consisté à tester le comportement de cette cellule afin de s'assurer que le protocole de calibrage fonctionne : étude de la stabilité du gaz dans la cellule (pour vérifier que la cellule est inerte) puis dans un second temps, étude de la stabilité du gaz quand la cellule est placée dans l'alignement du faisceau du DOAS (l'énergie apportée par le rayonnement de la lampe n'allait-il altérer les gaz à l'intérieur de la cellule ?).

L'étude a été menée à bien avec le dioxyde de soufre (SO_2) et le monoxyde d'azote (NO) où le protocole d'étalonnage et sa comparaison avec les techniques actuellement utilisées ont fourni de bons résultats. Les perspectives pourraient être intéressantes, avec la mise en circulation d'une cellule scellée multi-gaz (NO , SO_2 , BTX) qui serait adaptée à chaque DOAS, par ajustement des pressions partielles des différents gaz présents. Néanmoins, nous avons également mis en évidence certaines améliorations nécessaires ainsi que des limitations afférentes à cette technique :

Les premiers essais réalisés pour le polluant NO_2 ont fourni des résultats très peu concluants pour plusieurs raisons et notamment compte tenu de la réactivité du NO_2 en présence d'un rayonnement lumineux qui rend délicate l'utilisation de ce gaz de manière statique.

Nous avons constaté un effet de passivation de la cellule pour le polluant SO_2 et donc, un relargage de ce gaz. Afin de limiter cet effet, nous avons recouvert de Téflon l'intérieur de la cellule.

Enfin, nous avons modifié les joints d'étanchéité de la cellule au profit de joint Silicone, permettant une bonne étanchéité ainsi qu'une réactivité faible de ce matériau.

Néanmoins, faute de temps disponible et compte tenu des modifications entreprises, nous venons de récupérer cette cellule, ce qui ne nous permet pas de fournir à l'heure actuelle des résultats sur la réduction de ces effets de passivation.

Nous allons donc, dès les prochains jours, lancer des nouveaux tests sur la réactivité de la cellule, puis réaliser un gaz étalon composé de NO , SO_2 et BTX ayant des pressions partielles spécifiques.

**ANNEXE B : REPONSES TECHNIQUE DE L'INERIS SUR
L'UTILISATION ET LE FONCTIONNEMENT DES LIDAR
CONSTRUITS PAR LA SOCIETE ELIGHT LASER SYSTEM GMBH**

RAPPORT DE COPARLY

Historique et bilan du LIDAR :

Réponse technique de l'INERIS

Cadre général

Les demandes de renseignements de COPARLY, l'ADEME ou le DEU de Lyon ne concernent que les LIDAR commercialisés par la société ELIGHT LASER SYSTEM GmbH. Les systèmes LIDAR considérés sont les suivants, par ordre croissant de date d'acquisition :

- LIDAR Ozone/Aérosols FU Charité
Laser utilisé : Titane-Saphire Elight de 1^{ère} génération
Propriétaire : Université Libre de Berlin (FU)
Responsable : Prof. Ludger Wöeste et K. Stelmasyk
Mode de fonctionnement : fixe, sur le toit de l'hôpital « Charité » de Berlin
Année d'acquisition : 1992-1995
- LIDAR 510M Graz
Laser utilisé : Titane-Saphire Elight de 1^{ère} génération
Propriétaire : Université technique de Graz –Autriche
Responsable : Prof. L. Windholtz
Mode de fonctionnement : mobile
Année d'acquisition : 1995
- LIDAR 510M Warsaw
Laser utilisé : Titane-Saphire Elight de 2^{ème} génération
Propriétaire : Université de Varsovie –Pologne
Responsable : Prof. Kristof Ernst et anciennement Kamil Stemasyk
Groupe Lidar : S. Chudzynski, T. Staciewicz, A. Czyzewski
Mode de fonctionnement : mobile
Année d'acquisition : 1996
- LIDAR 510M BTU-Cottbus
Laser utilisé : Titane-Saphire Elight de 2^{ème} génération
Propriétaire : Université Technologique de Cottbus -Allemagne (BTU)
Responsable : Prof. D. Möeller
Mode de fonctionnement : mobile
Année d'acquisition : 1997
- LIDAR 510M Coparly
Laser utilisé : Titane-Saphire Elight de 3^{ème} génération
Propriétaire : Réseau agréé de surveillance COPARLY – France (Coparly)
Responsable : Alexandre Thomasson
Mode de fonctionnement : mobile
Année d'acquisition : 1999

- LIDAR 510M Prague / Bayreuth
 Laser utilisé : Titane-Saphire Elight de 3^{ème} génération
 Propriétaire : Lidar SRO- Rep. Tchèque et Univ. Bayreuth-Allemagne
 Responsable : A. Cerny (SRO) et M. Schroeter (Bayreuth)
 Mode de fonctionnement : mobile
 Année d'acquisition : 2000

- LIDAR 510M Dunkerque
 Laser utilisé : Titane-Saphire Elight de 4^{ème} génération
 Propriétaire : Université du Littoral -France
 Responsable : MDC Hervé Delebarre
 Mode de fonctionnement : mobile
 Année d'acquisition : 2001

- LIDAR 510M INERIS (1^{er} LIDAR INERIS)
 Laser utilisé : Titane-Saphire Elight de 4^{ème} génération
 Propriétaire : INERIS - France
 Responsable : Emeric Frejafon
 Mode de fonctionnement : mobile
 Année d'acquisition : 2001
 Détruit en 2001, à la suite d'un incendie

- LIDAR Profiler d'Ozone Wales
 Laser utilisé : Nd :Yag Continuum / 8020
 Propriétaire : Université de Wales – Grande Bretagne (Wales)
 Responsable : Prof. G. Vaughan
 Mode de fonctionnement : remorque mobile, implémenté dans EARLINET
 Année d'acquisition : 2002

- LIDAR UV11 INERIS
 Laser utilisé : Nd :Yag Continuum 9020 + OPO GWU
 Propriétaire : INERIS - France
 Responsable : Emeric Frejafon
 Mode de fonctionnement : mobile
 Année d'acquisition : 2003

- LIDAR UV11 Carthagène
 Laser utilisé : Nd :Yag Continuum 8020 + OPO GWU
 Propriétaire : Organisme d'étude de la qualité de l'air (Carthagène) - Espagne
 Responsable : José Moreno
 Mode de fonctionnement : mobile
 Année d'acquisition : 2003

- LIDAR Profiler d'Ozone Valladolid
 Laser utilisé : Nd :Yag Brillant B + Cellule Raman
 Propriétaire : Univ. De Valladolid, faculté des sciences - Espagne
 Responsable : Prof. M. L. Sanchez
 Mode de fonctionnement : unité transportable (caisson)
 Année d'acquisition : 2003

Il s'agit d'un LIDAR venant en remplacement du LIDAR 510M initialement délivré à Valladolid en 1996 et n'ayant jamais fonctionné réellement.

- LIDAR Profiler de Potenza

Laser utilisé : Nd :Yag

Propriétaire : IMAA-CNR, Centre national de recherche scientifique - Italie

Responsable : Prof. G. Pappalardo et A. Amodeo

Mode de fonctionnement :

Année d'acquisition :

Aucun retour d'information à ce jour

Utilisation d'un LIDAR : potentialités de cet instrument dans le cadre de partenariats, d'activités de recherche ou dans le cadre de prestations pour le compte d'industriels.

Les tableaux ci-dessous fournissent une synthèse non exhaustive des principales études réalisées par chaque détenteur de LIDAR produit par ELIGHT. Il est établi sur la base des informations détenues par l'INERIS à ce jour. Il correspond à la traduction française des informations recueillies auprès de chaque propriétaire. Ces réponses sont jointes dans les annexes de ce document.

La colonne « cadre » différencie les travaux réalisés dans un cadre :

- Com : commercial,
- EP : de partenariats, c'est à dire la fourniture de mesures, la mise en commun d'instruments, sans réelle participation à l'utilisation qui est faite des données,
- RAp : recherche appliquée, c'est à dire la réalisation de mesures à des fins de traitement spécifique des données ou plus largement ou bien comme support de compréhension des phénomènes atmosphériques ; la finalité n'étant pas la mesure proprement dite mais plus largement l'utilisation qui en est faite,
- DEm : démonstration ou communication,
- R&D : recherche et développement, c'est à dire l'étude de faisabilité d'un mesurage, le développement de l'outil pour la mesure de nouveau polluant, la réalisation d'algorithmes spécifiques, de module de couplage, la mise en comparaison avec d'autres outils et l'étude des écarts entre différentes méthodes de mesurage,
- Eval : évaluation d'instrument lidar, l'étude des incertitudes, le développement de protocoles de calibrage,
- Sur : surveillance, c'est à dire la réalisation de mesures en routine.

LIDAR 510M BTU Cottbus						
Année	Etude réalisée	Cadre	Partenaires ou projet associé	Rapports disponibles	Publications	Posters / oral
1997	NO ₂ urbain Athènes	Rap	STAARTE			
1997	SO ₂ urbain Berlin	Rap	Recherche amont balance S ⁴ -S ⁶			
1997	Evaluation SO ₂ INERIS	Eval	INERIS, LCSQA	LCSQA		
1998	O ₃ péri-urbain Berlin, comparaisons O ₃	Rap, Eval	BERLIOZ	ESCOMPTE		
1999	O ₃ urbain Paris, comparaisons O ₃	Rap, R&D	INERIS, LCSQA	LCSQA, BCRD	2	4
1999	comparaisons O ₃	R&D	OLAK, IFU, FU...			2
2000	Evaluation BTX	Eval	ELIGHT			1
2001	O ₃ Marseille, comparaisons O ₃	Rap, R&D	ESCOMPTE		1 Escompte	2 Escompte
2005-	Appareil en vente					

LIDAR 510M Prague / Bayreuth						
Année	Etude réalisée	Cadre	Partenaires ou projet associé	Rapports disponibles	Publications	Posters / oral
2001	O ₃ en vallées Bavière	RAp			2	
2002	Localisation d'émissions ponctuelles	RAp			2	
2003	Couplage LIDAR – SODAR	RAp			1	
2004	Interreg IIIA frontière Bavière – Rep. Tchèque	RAp				
2005	Upgrade Lidar vers technologie stable	R&D	Recherche de partenaires			

LIDAR UV11 INERIS						
Année	Etude réalisée	Cadre	Partenaires et projet associé	Rapports disponibles	Publications	Posters / oral
2001 (1)	O ₃ , NO ₂ , Aérosols, dynamique atmosphère	Rap	Dunkerque ESCOMPTE	BCRD LCSQA ESCOMPTE	> 3	> 6
2003 (2)	Etude Ozone et dynamique atmosphère	Rap	INTERREG ASPA	LCSQA ASPA	0	0
2003	O ₃ , NO ₂ , Aérosols, dynamique atmosphère	Rap, Com	LSCE, LGGE POVA	POVA BCRD	1 POVA 1 INERIS	1 POVA 2 INERIS
2004	Faisabilité de mesure des bactéries dans l'air	R&D	Carthagène BCRD 03 Ineris	BCRD	0	0
2004	Semaine de l'environn., fête de la science	Dem	Picardie, CC-Creil			2
2004	Evaluation lidar, cellule de calibrage	Eval	Elight BCRD 03 Ineris	En cours	1 en 2005	1 en 2005
2004	Couplage Lidar-modèle 3D continental	R&D Sur	BCRD 04 Ineris PROMOTE, GEMS,....	Etude engagée 1 en 2005		

(1) : étude réalisée à l'aide du premier LIDAR INERIS 510M, puis avec le LIDAR 510M de Dunkerque.

(2) : étude réalisée à l'aide d'un profiler LIDAR ELIGHT, dans l'attente du LIDAR UV11 INERIS.

Ce LIDAR UV11 INERIS vient en remplacement d'un premier LIDAR 510M acquis en 2001 et ayant été détruit par un incendie durant la campagne ESCOMPTE 2001. Les circonstances de cet incendie n'ont pu être clairement établies, le LIDAR n'étant pas en fonctionnement, mais en mode veille, lors de l'incendie (seule l'alimentation principale, la climatisation et un PC portable étaient branchés).

LIDAR 510M Dunkerque						
Année	Etude réalisée	Cadre	Partenaires ou projet associé	Rapports disponibles	Publications	Posters / oral
2001	O ₃ , NO ₂ , Aérosols Marseille	Rap	ESCOMPTE	ESCOMPTE LCSQA, BCRD	> 3	> 6
2003-2004	NO ₂ , SO ₂ industriel	Rap, EP		Rapports de campagne		
2001-2003	Dynamique des gaz et aérosols	Rap	Plan Etat Région	Rapports d'étude		
2003-2006	O ₃ , NO ₂ , Aérosols Littoral Nord	Rap	INTERREG III transmanche	Rapport de campagne		

LIDAR 510M COPARLY						
Année	Etude réalisée	Cadre	Partenaires ou projet associé	Rapports disponibles	Publications	Posters / oral
1999	SO ₂ industriel	Rap	ADEMEDIIX	ADEME, COPARLY		
1999	Etude Lyonnaise O ₃	Rap	ELO, ELF, UCBL	ELO, COPARLY	1	3
1999	Etude Grenoble O ₃	EP	ASCOPARG	ASCOPARG, COPARLY		1
1999-2000-2001	En ville sans ma voiture	Dem	Villeurbanne	COPARLY		
1999-2000	Evaluation NO ₂ , O ₃ , BTX	Eval	INERIS	LCSQA		
2000	Essais mesure O ₃ hiver	Rap	ATMO Auvergne			
2000-2001	Mesure O ₃ , NO ₂ hiver	EP	POVA	POVA, COPARLY		
2000-2002	Cartographie lyonnaise	Sur	COPARLY, ECL			
2002	Mesure O ₃ Clermont	EP	ATMO Auvergne			
2004	Essai de remise en fonctionnement	Rap	Stage LASIM (Université Lyon1)	COPARLY		

LIDAR 510M Carthagène						
Année	Etude réalisée	Cadre	Partenaires ou projet associé	Rapports disponibles	Publications	Posters / oral
2003	Suivi émission SO ₂ , BTX	RAp	Industriels Ville de Murcia			1
2003	Etude O ₃ nocturne	RAp				1
2003-2007	Spatialisation en zone côtière	RAp	REN 2003-01997 Minist. Sci. Tech.			

S'agissant d'un département d'analyse de l'atmosphère et notamment des émissions industrielles, l'utilisation qui en est faite est essentiellement dans un cadre de recherche appliquée.

LIDAR 510M Valladolid						
Année	Etude réalisée	Cadre	Partenaires ou projet associé	Rapports disponibles	Publications	Posters / oral

Aucune campagne réalisée avec le LIDAR 510M (1996-1999). Aucune information précise ne permet d'établir clairement si cette absence d'utilisation était due à des problèmes techniques ou bien à des moyens humains insuffisants ou insuffisamment formés. Selon ELIGHT, les compétences requises au fonctionnement de l'appareil étaient insuffisantes. Il s'agit donc d'un nouveau LIDAR Profiler d'O₃ reçu en Sept. 2003. Plusieurs difficultés techniques n'ont pas permis d'engager de réelles campagnes, compte tenu du sous-dimensionnement du laser utilisé, comme décrit dans les paragraphes suivants. Cet instrument a été utilisé par l'INERIS pour la campagne INTERREG Strasbourg en 2003, qui a confirmé le sous-dimensionnement de la technologie laser utilisée (Laser Brillant de faible puissance ou alors qu'il était nécessaire d'installer, au minimum, un laser de type Brillant B ou, idéalement, un laser Continuum 8020 ou 9020).

LIDAR 510M Potenza						
Année	Etude réalisée	Cadre	Partenaires ou projet associé	Rapports disponibles	Publications	Posters / oral
2004-2004	Dynamique urbaine et industrielle des gaz et aérosols	RAp	MURST			
2004-	Mesures en routine	Sur	AERONET			

Aucun retour d'enquête à l'heure actuelle, mais il semble que cet instrument soit utilisé en routine dans le cadre du réseau EARLINET.

LIDAR 510M Wales						
Année	Etude réalisée	Cadre	Partenaires ou projet associé	Rapports disponibles	Publications	Posters / oral
2004-2007	Inclusion d'O ₃ en basse troposphère	RAP	Programme de recherche Wales			
2004-2007	Structure de la couche limite	RAP	Programme de recherche Wales			
2004-2007	Transformation cellule Raman gaz en cristaux	R&D	Programme de recherche Wales			
2004-	Mesures en routine	Sur	Aberystwyth			

Les tableaux ci-dessus montrent que l'utilisation du LIDAR est faite principalement dans le cadre d'activités de recherche appliquée et notamment comme support de compréhension des phénomènes atmosphériques. Le diagramme synthétique ci-dessous permet de faire ressortir cette dominance.

Répartition % sur 44 études référencées entre 1996 et 2004

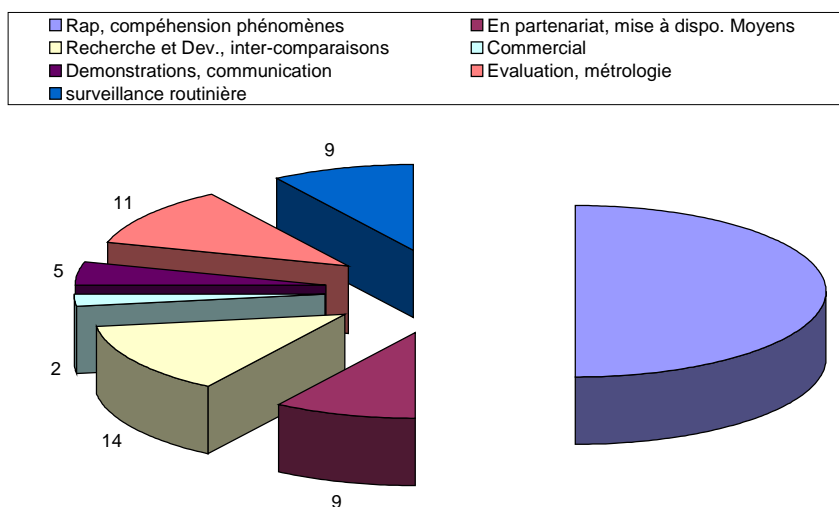


Diagramme de répartition de l'utilisation qui est faite des instruments LIDAR ELIGHT, sur la base des données fournies par chaque utilisateur, soit donc 44 études référencées.

Le retour d'expérience sur les 44 études référencées entre 1996 et 2004 montre que cet instrument est essentiellement utilisé pour des activités de recherche appliquées où la principale utilisation qui en est faite repose sur la documentation de la stratification atmosphérique et la dynamique des polluants gazeux ou particuliers associés (22 études sur 44 référencées). Cela tend ainsi à montrer, comme le souligne Dunkerque, qu'il s'agit d'un outil opérationnel d'investigation des phénomènes pertinents pour la compréhension de la pollution locale ou régionale. En dehors de cette application, l'utilisation qui en est faite repose, à part égale, entre des études en partenariat (4 études), en temps qu'outil de surveillance (4 études), des évaluations métrologiques (5 études) et enfin des développements métrologiques (6 études). Néanmoins, cette première analyse est effectuée indépendamment d'éventuelles évolutions annuelles.

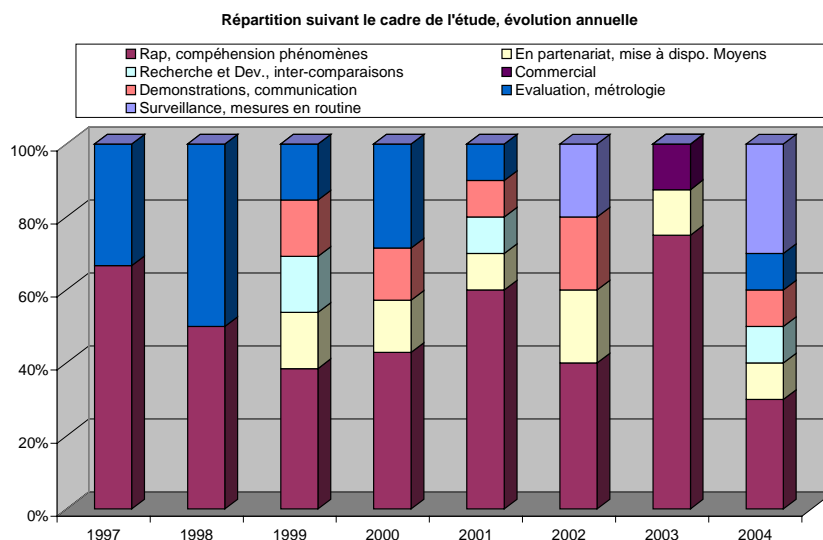


Diagramme de répartition de l'utilisation qui est faite des instruments LIDAR ELIGHT, sur la base des données fournies par chaque utilisateur, soit donc 44 études référencées, évolution annuelle en %.

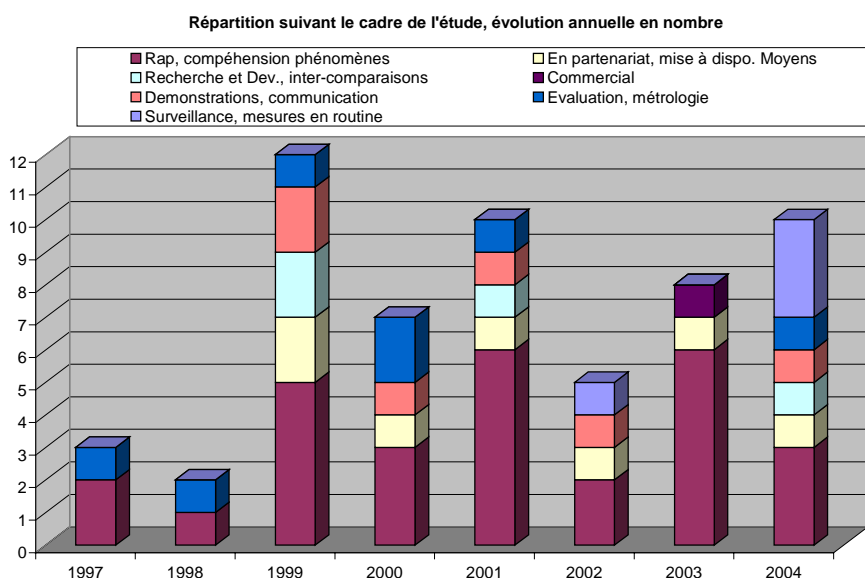


Diagramme de répartition de l'utilisation qui est faite des instruments LIDAR ELIGHT, sur la base des données fournies par chaque utilisateur, soit donc 44 études référencées, évolution annuelle en nombre d'études.

Les deux diagrammes précédents fournissent, pour chaque année, la répartition (en % et en nombre) des études réalisées depuis 1997, regroupées par cadre commun. On constate qu'en 1997 et 1998 les LIDAR étaient principalement utilisés à des fins de compréhension des phénomènes atmosphériques et d'évaluation des performances. En revanche, dès 1999, son utilisation s'est largement diversifiée, tout en conservant une base très solide orientée sur la recherche appliquée. Ainsi, sur la base de ces 6 dernières années, on constate, hormis la recherche appliquée, une utilisation à part relativement égale entre la communication, l'évaluation et la mise à disposition de moyen ; les applications commerciales restant par ailleurs très marginales. De même, on constate une récente montée en puissance des mesures routinières, qui représente 30% de l'utilisation qui en est faite pour l'année 2004.

Or, cette diversification a été rendue possible par une modification du système : tentative de stabilisation du laser Ti:Sa entre les générations 1 et 2, puis enfin transformation de l'unité laser par un système plus fiable, autorisant une plus grande autonomie de son utilisation.

Ainsi, sur la base des 3 diagrammes précédents, nous pouvons effectuer les constatations suivantes :

- L'activité principale des LIDAR se situe dans le domaine de la recherche appliquée et repose sur la documentation de la stratification atmosphérique et la dynamique des polluants gazeux ou particuliers associés.
- Une diversification de son utilisation est apparue depuis 1999, avec, outre l'activité principale décrite ci-dessus, une utilisation à part égale entre des missions de communication, des activités météorologiques (évaluation, développement) et des missions de mesures en routine.
- L'activité commerciale et notamment auprès des industriels, reste très marginale. Les différentes missions prospectives engagées par l'INERIS ont permis de constater que l'offre LIDAR ne semblait pas réellement correspondre à leurs besoins actuels : les polluants mesurés actuellement par LIDAR ne sont pas des polluants posant des problèmes particuliers aux industriels qui sont plutôt demandeurs d'une caractérisation des COV, du CO₂, du CO, des poussières ou bien encore de certains composés très spécifiques. Seules les applications en zone de stockage (BTX) ou les mesures sur des torchères (SO₂, NO₂) seraient susceptibles de les intéresser actuellement. C'est pour cette raison que l'INERIS a engagé un projet de recherche spécifique, visant à augmenter la liste des polluants pouvant être mesurés par LIDAR.

Fonctionnement d'un LIDAR 510M : rendu opérationnel de cet instrument

1.1. Pannes rapportées par les différents utilisateurs

Le tableau ci-dessous tente de fournir une synthèse, certainement non exhaustive, des principales pannes et dysfonctionnements rencontrés par chaque détenteur de LIDAR produit par ELIGHT. Il est établi aux vus des informations détenues par l'INERIS à ce jour. Il correspond à la traduction en français, des informations recueillies auprès de chaque propriétaire.

Lidar	Type	Cavité laser	Cristaux optiques	Module HT ⁽¹⁾	électricité générale	Banc optique	Refroidiss Laser	Climat véhicule	Electro-nique	Software	Etat général
BTU-Cottbus	510 M (V2)			3/laser	1/foudre	1/stabilité	1/electron.	Puissance faible	1/licel	Quelques bugs	Non utilisé
Prague/Bayreuth	510 M (V3)	>2	1/consommable	3/laser	0	0	1 (garantie)	0	1/diode laser	0	utilisé mais modif en cours ⁽¹⁾
Coparly Lyon	510 M (V3)	7/laser 2/calibrage	0	3 (+ 1 EDF)	2 (dont 1 EDF)	4	1 (chiller)	Puissance & isolation faibles	3	peu	Instable, en panne
ULCO Dunkerque	510 M V4	0	0	1/tyratron	0	0	Manques Puissance	Manques Puissance	1/licel 1/optoelectr.	0	Stable
Valladolid	Yag B+ Raman	1/SHG	1/ laser yag brill	0	0	1/transpo rt	0	0	0	Quelques bugs	instable
Wales	Yag C-8020+ Raman	0	1/ laser Yag 8020	0	0	0				Quelques bugs	Stable, en activité
Carthagène	Yag C-8020+ OPO	0	0 : laser Yag 8020	0	0	0	0	0 : caisson isotherme	0	Quelques bugs	Stable, en activité
INERIS	Yag C-9020+ OPO	0	0 : laser Yag 9020	0	0 : transfo. intégré	0	0	0 : caisson isotherme	1/licel	Quelques bugs	Stable, en activité

(1) : les équipes de Prague et Bayreuth sont aptes à effectuer en interne cette réparation.

En reprenant le tableau ci-dessus d'une manière plus détaillée, on note, dans le cas du LIDAR COPARLY, les problèmes suivants :

- cavité laser : 3 en 1999, 1 en 2000, 1 en 2001, 1 en 2002, 1 en 2003
7 problèmes liés directement à la cavité optique Ti :Sa
- calibrage du Ti:Sa (cellule Galvatron) : 1 en 2002 et 1 en 2003
2 problèmes, dont 1 lié à l'usure de la pièce
- Alimentation électrique générale : 1 en 1999 (EDF), 1 en 2001 (groupe élect),
2 problèmes dont 1 lié à la fourniture EDF en électricité
- Refroidissement : 1 en 2001 (eau dé-ionisée du chiller)
1 problème de refroidissement lié à la maintenance (COPARLY).
- Module HT (bloc d'alimentation du laser Ti :Sa) : 1 en 1999 (EDF), 1 en 2003,
1 en 2004
2 problèmes sur le module HT + 1 problème lié au problème d'alimentation générale avec EDF

- Électronique : 1 en 2000 (carte chiller), 1 en 2001 (carte galvatron), 1 en 2002 (fibre optique)
3 problèmes liés à l'électronique du système

- Banc optique : 1 en 1999, 1 en 2000, 1 en 2001 et 1 en 2002
4 problèmes liés à la stabilité du banc optique

Ainsi, on constate donc :

- 11 problèmes liés au laser et à la technologie Ti :Sa (cavité laser + calibrage + module HT) : 52%
- 5 problèmes électroniques ou électriques : (24%) dont 2 (10%) indépendants du laser
- 5 problèmes liés au principe du Lidar (banc optique, refroidissement) : 24%

1.2. Conclusion sur le caractère opérationnel des lidar Elight

D'une manière générale, le tableau des pannes ci-avant permet de faire ressortir une très forte liaison entre la technique laser utilisée et les dysfonctionnements rencontrés :

- on constate que tous les LIDAR utilisant une technique TI :Sa, ont souffert de nombreux problèmes liés à cette technologie. Plus précisément, l'ensemble des LIDAR 510M de première, deuxième et troisième génération fait ressortir de gros problèmes liés au module HT du Ti :Sa ou à la cavité optique. Les LIDAR de quatrième génération (Dunkerque, 1^{er} LIDAR INERIS) ont souffert de problèmes liés à la cavité optique, mais n'ont pas constaté de problèmes répétés liés au module HT.
- Le LIDAR de technique Yag Brillant (Valladolid) est instable car le laser utilisé est sous dimensionné (il aurait été préférable d'utiliser un laser Brillant B, ou idéalement, un laser Continuum). En effet, il a été montré que le laser Brillant B, couplé à un OPO, était beaucoup plus stable, comme constaté lors des différentes campagnes de longues durées réalisées (ESCOMPTE, Berlin, USA).
- Les Lidar de technique Yag Continuum (UV11 INERIS, UV11 Carthagène et Profiler d'Ozone Wales) n'ont pas encore souffert de problèmes autres que software (problème de bug des logiciels de pilotage, ce qui n'est pas surprenant compte tenu de la nécessaire transformation de tous les logiciels afin de basculer de la technique Ti :Sa à la technique Nd :Yag).

Ainsi, sur la base du retour d'expérience détenu par l'INERIS à ce jour, nous pouvons conclure sur le caractère opérationnel ou non de ces instruments :

- Les LIDAR 510M sont des outils d'investigation des phénomènes pertinents pour la compréhension de la pollution locale ou régionale, mais ne sont pas aptes à effectuer des mesures en routine sur de longues périodes. Par ailleurs, sur l'ensemble des systèmes 510M commercialisés, seuls celui de Dunkerque et celui de Pragues/Bayreuth sont utilisés ce jour dans le cadre de recherches appliquées.
- Les LIDAR « profilers » d'ozone qui reposent sur un couplage entre un laser Yag de moyenne puissance (Brillant B) ou de forte puissance (Continuum) couplés à des cellules de Raman, sont des outils opérationnels tant pour la compréhension des phénomènes, que pour la réalisation de mesures en routine sur de longues périodes.
- Les LIDAR UV11 sont des outils opérationnels tant pour la compréhension des phénomènes, que pour la réalisation de mesures en routine sur de longues périodes.

Ainsi, on constate que les activités de mesures en routine sont réalisées principalement avec des LIDAR reposant sur un laser Yag Continuum. Néanmoins, si l'activité des mesures en routine s'est largement développée, il s'agit en fait d'une surveillance des phénomènes atmosphériques et non pas une surveillance réglementaire, c'est à dire dans le cadre des missions des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air. En effet, cette activité réglementée nécessite la fourniture en continu de mesures validées et étalonnées périodiquement, avec des taux de fonctionnement devant être supérieurs à 75%. Or, comme décrit par la suite, les dysfonctionnements présents dans ces appareils ne permettent pas d'en faire des outils de surveillance réglementaire.

Evolution technique des LIDAR : apport d'une modification de la source laser utilisée

1.1. Principales évolutions techniques apportés aux LIDAR ELIGHT

Comme le montre la liste des LIDAR vendus par ELIGHT et leur date d'acquisition, la principale évolution entre les LIDAR 510M et leur successeurs (UV11 et profiler d'ozone, mais également sur les prototypes de LIDAR aérosols en cours) est sur le remplacement du laser Titane :Saphir par différents laser Néodyme:Yag (Continuum 8020, Continuum 9020, Brillant B). Ces derniers sont plus stables et possèdent une maintenance réduite pour deux raisons essentielles :

- Le Nd :Yag est commercialisé à plusieurs centaines d'exemplaires par an par plusieurs constructeurs (Continuum/Excel, Spectra Physic, Quantel,...) , contrairement au TI :Sa qui était vendu à moins de 2 unités/an et ce, uniquement par ELIGHT. Ainsi, la stabilité de l'optique associée (cristal laser, miroirs, mécaniques a acquis un stade de développement et d'optimisation bien plus avancé.
- Le Nd :Yag étant principalement destiné à des activités industrielles (découpe) et médicales (ablation, épilation...), leur niveau de maintenance a été optimisé en conséquence : facilité de réalisation par un personnel non spécialiste des lasers, peu de consommables.

Ainsi, cette évolution de la technique laser a permis d'accéder à des outils plus stables, ne nécessitant pas de personnel présent constamment et permettant ainsi une utilisation en mode autonome. Pour information, des essais de mesures à long terme ont été réalisés par les profiler d'ozone :

- ESCOMPTE 2001 : mesure en continu durant 1 mois, Rapport ESCOMPTE
- Berlin 2002 : mesure en continu durant 1 an, Rapport ELIGHT ;
- USA 2003 : mesure en continu durant 6 mois, Rapport ELIGHT

Il est à noter que ces trois campagnes de longues durées ont été réalisées avec des profilers d'ozone reposant sur le couplage entre un laser Nd:Yag Brillant B et des cristaux optiques non-linéaires (OPO).

En conclusion, il apparaît donc :

- que les LIDAR ELIGHT 510M doivent être utilisés par du personnel compétent présent en permanence dans l'instrument car ils reposent sur des lasers Ti :Sa, comme le soulignent les responsables des LIDAR de Dunkerque ou BTU-Cottbus. Le retour d'expériences fait, par ailleurs, apparaître de nombreux dysfonctionnements liés en partie à ce type de laser et/ou aux compétences techniques insuffisantes des utilisateurs.
- que le LIDAR Profiler d'Ozone reposant sur le couplage entre un laser Brillant et une cellule Raman nécessite des optimisations afin de devenir autonome, comme le souligne l'équipe de Valladolid, mais que cette optimisation repose essentiellement sur l'augmentation de la puissance laser, comme le montre d'autres utilisateurs de Lidar fonctionnant sur cette technologie.

Que les LIDAR UV11 ainsi que le LIDAR Profiler d'Ozone reposant sur des laser Nd :Yag de fortes puissances (Continuum 8020 ou 9020), peuvent fonctionner de manière autonome sur de longues périodes, comme le soulignent les équipes de l'INERIS, de Wales et de Carthagène.

1.2. Possibilités offertes au LIDAR COPARLY

D'une manière générale, les principales possibilités qui sont offertes au LIDAR COPARLY sont les suivantes, commentées par l'INERIS sur ses aspects techniques :

- Conserver son système tel qu'il est et mettre des moyens humains dédiés. Cette solution pourrait être envisagée si les maintenances préventives et curatives du système pouvaient être effectuées par l'utilisateur ou bien au travers d'une collaboration étroite avec Dunkerque et/ou Prague/Bayreuth. Il faudrait notamment que COPARLY puisse être à même de gérer les éventuelles pannes sur le terrain, ce qui nécessite un personnel formé dédié en permanence sur l'instrument. Compte tenu de la récente mise en liquidation judiciaire de la société ELIGHT, cette solution est délicate à réaliser car nécessite un transfert de connaissance important de ELIGHT vers COPARLY : gestion des pannes, gestion de la maintenance, connaissance exacte de chaque élément qui compose le système afin d'en effectuer l'éventuel remplacement. Cette action nécessiterait plus encore des moyens humains dédiés.
- Utiliser son système en partenariat avec une université qui connaisse l'instrument et son fonctionnement. Cette solution serait sans aucun doute la plus judicieuse à court terme car elle permettrait une gestion en temps partagé de l'instrument, mais également de sa maintenance. Par ailleurs, un laboratoire spécialisé en optique et notamment en LIDAR de cette technologie permettrait de garantir un degré d'autonomie important suite à la fermeture de ELIGHT. En revanche, cela ne peut être rendu possible que sur la base d'un projet commun où l'université aurait l'utilité d'un tel instrument car ce partenariat doit être basé sur des projets scientifiques construits et des objectifs ambitieux. Enfin, si cette hypothèse était engagée, cela impliquerait bien évidemment la gestion en commun des études et du planning d'utilisation. Par ailleurs, rien ne permet de conclure à ce jour qu'une telle collaboration, si elle se mettait en place, ne nécessiterait pas une modification préliminaire de l'instrument.
- modifier son système actuel et le transformer en instrument monopolluant autonome. Cette solution permettrait de transformer le LIDAR actuel en un instrument autonome monopolluant Ozone. Pour cela, il faudrait, d'une part, remplacer le système actuel de génération des longueurs d'onde UV (Ti :Sa associé à des cristaux doubleur et tripleur de fréquence) par un autre système plus fiable et nécessitant un maintenance réduite (laser Nd :YAG de forte puissance, associé à un OPO ou bien associé à une cellule de Raman). Il faudrait également modifier les logiciels de contrôle du LIDAR. Bien que les parties émission, réception et acquisition soient identiques entre tous les LIDAR, cette solution à un coût qui ne pourra pas être compensé par la vente du laser actuel. On obtiendrait alors un LIDAR Ozone et couche limite autonome, sans maintenance lourde. Néanmoins, de nombreux exemples montrent qu'avoir un outil opérationnel n'est pas suffisant pour une utilisation comme outil de surveillance réglementaire car il est également nécessaire d'y associer des moyens humains et financiers afin d'en assurer la maintenance et le suivi périodique.
- vendre son LIDAR ou le donner. La vente d'un LIDAR ELIGHT reste très difficile à réaliser car, outre le laser Ti :Sa où la demande est faible, le reste de l'instrument est composé de pièces optiques qui ne peuvent intéresser que quelques utilisateurs. De même, donner un tel système n'a d'intérêt que s'il peut être utilisé par le nouveau propriétaire. Ce dernier ne pourrait donc être qu'un spécialiste des LIDAR, ayant déjà été formé à cet instrument et dont il aurait l'utilité.

Evaluation des instruments LIDAR 510M

Nous avons souhaité préciser les différents résultats obtenus lors des évaluations des LIDAR 510M, afin que les destinataires de cette note puisse quantifier son degré d'adéquation au regard du cahier des charges initialement établi et notamment des caractéristiques fournies par le constructeur, à savoir ELIGHT Laser System GmbH.

Le rapport LCSQA relatif aux actions menées en 2002, résume les principales spécificités des LIDAR 510M. Les caractéristiques et performances ont été obtenus en utilisant les LIDAR 510M de BTU-Cottbus et COPARLY. Ci-dessous un extrait de ce rapport.

Rapport LCSQA INERIS-DRC-02-39199-AIRE-803-Efr (fiche LCSQA 2002) P. 13- 16.

Les différentes évaluations effectuées par l'INERIS entre 1996 et 2001 ont permis de montrer la faisabilité d'un mesurage de l'Ozone, du SO₂, du NO₂ et du Toluène à l'air ambiant, alors que dans le cas du Benzène, le seuil de quantification s'avère de l'ordre de grandeur de la concentration en Benzène généralement rencontrée à l'air ambiant. Ces essais nous ont également amenés à effectuer des calculs de la valeur théorique d'interférence de l'Ozone sur le Toluène. Enfin, il est à noter que les différentes évaluations qui ont été menées sur 4 appareils LIDAR de 1996 à 2001, ont mis en évidence des spécifications sensiblement différentes d'un appareil à l'autre issues des avancées technologiques entreprises. Ainsi par exemple, l'amélioration importante sur la stabilité de l'appareil (à la source de son fonctionnement en mode autonome) a permis de réduire les limites de détections : en stabilisant le laser, on a réduit les phénomènes de décalage en longueur d'onde qui contribuent à l'augmentation de la limite de détection d'un polluant donné.

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

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

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

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

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

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

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

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

Fin de l'extrait du rapport LCSQA.

Références sur l'utilisation LIDAR en sites industriels

L'INERIS a souhaité préciser quelles étaient les utilisations possibles des LIDAR sur sites industriels. Le rapport LCSQA des actions menées en 2001 : INERIS DRC-01-27090-AIRE-800a-EFr, pages 25 à 30, décrit la méthodologie et évalue les coûts de campagne associés à la caractérisation de panaches industriels. Nous avons traité de deux situations particulières : le suivi de panache et la surveillance des émissions d'un site de stockage.

Extrait du Rapport

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 multipolluants 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 multipolluants
- 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 quotidiennes, en privilégiant des conditions météorologiques dominantes et où le panache est très stable.
- Polluants mesurés : SO₂ et NO₂ pour les LIDAR angulaires 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.

Fin de l'extrait du Rapport.

De même, les LIDAR de Dunkerque et de Carthagène ont également effectué des campagnes de mesures en site industriel, comme décrit pages 5 et 6 de ce document. Toutes ces campagnes ont été réalisées à titre gratuit par les équipes engagées.

On retiendra néanmoins que cette utilisation des LIDAR en sites industriels, reste une activité marginale.

Précision concernant les dysfonctionnements du LIDAR COPARLY

A la demande de l'ADEME, nous fournissons enfin quelques éléments techniques relatifs aux dysfonctionnements détaillés dans le rapport de COPARLY « historique et bilan du LIDAR de COPARLY 1999-2003 », auquel les numéros de page ci-dessous font référence.

Page 9 : les instabilités laser qui se sont déroulées durant la campagne ELO en 1999, ont entraîné moins de 6 heures de perte de données sur une campagne qui a duré 72 heures (< 8%), mais le laser a dû être réparé à la suite.

Page 10 : la destruction du boîtier haute tension est liée à l'utilisation d'une source électrique ayant un neutre flottant au lieu d'un neutre à la terre. Ce problème d'alimentation est très contraignant car, en France, le neutre est en général flottant, afin d'éviter des arrêts intempestifs des instruments : la tension délivrée fluctue mais, en relatif Phase-Neutre, on conserve toujours 220V. Dans notre cas, il ne faut surtout pas que le neutre fluctue, car, après transformation en haute tension on peut alors obtenir une tension négative.

Pour éviter cela, l'INERIS utilise un Transformateur isolant : transforme du 400V triphasé 64A + terre + neutre quelconque en 400V triphasé 32A + Neutre + terre. Le coût de ce transformateur monté sur un chariot est d'environ 5 000 € pour un encombrement d'environ 1 m³ et 80 Kg.

Néanmoins, il nous semble que ELIGHT a installé sur le LIDAR COPARLY un testeur de phase et de neutre, qui permet de mettre en défaut le système si la tension n'est plus correcte. Ce module, doit prévenir toute destruction du module haute tension. Ainsi, toutes les destructions du module de haute tension qui sont postérieures à la campagne Grenoble, ne sont pas issues d'un problème de servitude électrique mais résultent de dysfonctionnements internes au module Haute-Tension (problèmes résolus par ELIGHT et leur fournisseur).

Page 11 : un pré-chauffage de 2 heures est tout à fait normal. Il peut par ailleurs être légèrement réduit (1 heure) par l'utilisation du module de chauffage des cristaux lors du transit vers le site de mesure. L'organisation à deux personnes nous semble nécessaire à plus d'un titre : contraintes de sécurité lors d'interventions sur le toit du camion (travail en hauteur), lors des réglages laser ou des interventions électriques

ANNEXE 1 :
Rapport d'enquête LIDAR Dunkerque ULCO

Salut Emeric,

Ci-joint la lettre que j'ai envoyée à Jean-Pierre Wolf.
Je n'ai matériellement pas le temps de te faire un tableau.
Tu trouveras les infos que tu cherches dans la lettre et dans la liste de références ci-jointe.

Pour les problèmes : beaucoup de problèmes liées à la clim qui a été sous dimensionnée et au refroidissement, quelques problèmes avec la haute tension (thyatron), quelques problèmes électroniques (cartes d'acquisition, système opto-électronique), quelques problèmes avec le système de commutation de cristaux.

Cher collègue,

Le laboratoire de physico-chimie de l'atmosphère s'est engagé dans le projet d'acquisition du lidar dans un cadre régional. Le financement nous a été accordé après une expertise conduite par la région Nord-Pas de Calais. Il a consisté en un apport du fonds européen de développement régional (FEDER) pour moitié, le reste étant financé, à parts égales, par la région Nord-Pas de Calais, l'université du littoral et le fonds de développement du littoral (FODEL). La construction de l'appareil a été confiée à la société allemande Elight à la suite d'un appel d'offres européen et le lidar de l'université du littoral a réalisé ses premières mesures en Mai 2001.

Actuellement, le lidar est exploité presque exclusivement dans un cadre de recherche. La dotation CNRS de notre laboratoire ne permet bien sûr pas d'assurer les frais de fonctionnement de l'instrument. Cependant, le lidar est un instrument de pointe qui nous permet de trouver notre place dans les programmes actuels de recherche, auxquels notre activité est intimement liée.

Au niveau national, nous avons participé en Juin-Juillet 2001 (donc peu après la réception de l'instrument) à la campagne ESCOMPTE en collaboration avec l'INERIS. La couverture temporelle de cette campagne a été excellente puisque nous disposons de mesures d'ozone de manière quasi-continue pendant toutes les périodes d'observation intensive et quelques journées annexes de mesure, soit une quinzaine de journées au total. Après traitement, les mesures ont été introduites dans la base de données en juin 2002. Cependant, elles constituent une base de données très riche que nous exploitons maintenant plus avant. En effet, les mesures lidar nous ont permis d'accéder à la dynamique spatio-temporelle de la basse troposphère de manière très fine et ainsi, de comprendre certains mécanismes atmosphériques qui jouent un rôle dans les épisodes de pollution photochimique de Marseille. Une thèse sera soutenue sur ce sujet avant la fin de l'année et nous avons publié ces résultats dans le numéro spécial de la revue « Atmospheric Research » consacré à Escompte. Il me semble important de comprendre qu'il s'agit là d'un travail de longue haleine : la durée d'exploitation et d'interprétation des campagnes est à la mesure de la documentation impressionnante accumulée au cours des événements de pollution photochimique. Ce travail est facilité par notre participation au groupe de travail « Mesoscale transport and dilution » d'ESCOMPTE , et aux programmes de recherche « ESCOMPTE-PRIMEQUAL2-PREDIT-PNCA » et PATOM.

Au niveau régional, nous avons participé, pour la période 2000-2003, au programme de recherche sur la « qualité de l'air en milieu urbain et industriel » dans le cadre du contrat de plan état-région de la région Nord-Pas de Calais. Ce programme régional se poursuit

actuellement dans le cadre de l'institut de recherche en environnement industriel. Au niveau européen, nous participons en ce moment au programme européen franco-britannique INTERREG III « Centre interrégional d'études sur l'environnement : caractérisation, physico-chimie, transport et impacts de polluants dans l'environnement des régions transmanche ». Nous avons aussi développé un partenariat industriel mais les collaborations industrielles restent marginales.

Cette activité est gérée par une petite équipe composée d'un ingénieur de recherche (dont c'est l'activité principale) chargé des aspects techniques de l'instrument (nettoyage des optiques, remplacement des lampes flash, maintenance...), d'un maître de conférences qui développe les projets de recherche, manage les programmes de recherche et assure le financement, et d'un doctorant. J'espère que cette équipe (trop petite à mon goût...) grossira avec le temps pour exploiter pleinement les campagnes déjà réalisées et développer de nouveaux projets. En pratique, nous avons choisi en général de travailler sur des projets très ciblés. En effet, le coût de fonctionnement de l'instrument ne permet pas une utilisation continue sur de longues durées et il est nécessaire de bien définir les événements de pollution que l'on souhaite documenter. De cette manière, le fonctionnement a pu être assuré à partir des programmes de recherche. En ce sens, le lidar est avant tout un outil d'analyse d'événements de pollution atmosphérique, comme nous l'a montré l'expérience ESCOMPTE.

Il faut insister ici sur le fait que le lidar est un instrument scientifique très pointu et réellement exceptionnel.

La gamme de polluants mesurables est assez large pour aborder les pollutions d'origine urbaine et/ou industrielle. La métrologie du lidar est maintenant bien validée soit au cours d'expériences avec une cellule (voir les mesures de l'INERIS), soit au cours de campagnes de terrain au cours desquelles la comparaison avec d'autres instruments de nature différente a été très concluante (voir la campagne de Paris ou la validation des instruments au cours de l'exercice ESCOMPTE). Par ailleurs, la mesure de l'extinction donne des informations sur la stratification de la basse troposphère et en particulier sur la couche limite, dont la connaissance est un élément important (sinon indispensable) de compréhension des épisodes de pollution.

L'automatisation des acquisitions et de l'optimisation du système permet de réaliser les mesures de manière quasi-continue avec une résolution de 1 à 2 mn pour chaque tir lidar et d'une demi-heure pour chaque scan. La durée d'acquisition d'un scan est en général inférieure aux constantes de temps des événements rencontrés dans l'atmosphère. Ceci permet d'observer en 3D, l'évolution de l'atmosphère et des polluants avec une résolution temporelle suffisante pour accéder à la fois à la dynamique de la basse troposphère et à la dynamique des polluants. L'observation est extrêmement importante car les phénomènes physico-chimiques en jeu sont nombreux et complexes. En ce qui concerne par exemple la dynamique atmosphérique, la stratification de l'atmosphère et son évolution sont difficilement prévisibles par modélisation avec une résolution suffisante, en particulier en présence de singularités géographiques (mer, relief, atmosphère urbaine...). Si les mesures lidar sont accompagnées de mesure de vent en altitude, le lidar devient alors un puissant outil d'investigation des phénomènes pertinents pour la compréhension de la pollution locale ou régionale. Je dois dire que chaque nouvelle campagne nous apporte son lot de «surprises atmosphériques». Quand les phénomènes atmosphériques sont compris, il est plus aisé de choisir le modèle et non l'inverse soit en un mot : mesurer.

Il reste à souhaiter que la technique lidar étende encore ses possibilités dans les années à venir, en offrant de mesurer les COV simultanément et sans interférences et en donnant plus d'information sur les aérosols.

Amicalement.

Hervé Delbarre.

ANNEXE 2 : Rapport d'enquête LIDAR Bayreuth

Dear colleagues,

since 2000 we are successfully using a new (not second hand) Lidar 510M (i.e. Ti:Sapphire laser and its amplifier) in cooperation with our Czech partners lidar s.r.o. (i.e. alexandr.cerny@hotmail.com, pavelberger@hotmail.com in the emails above). Nevertheless, several main problems occurred right from the start:

? laser cavity:

- whole laser systems needs frequent alignment by ourselves (alignment of pockels cell, SHG/THG, galvatron, mirrors, ...); supplied alignment software does not work reliably
- several flash lamps broke during system usage or were badly manufactured (one even got a hole)
- we had to glue the laser rod to metal bushings repeatedly

? laser power supply:

- we had to repair the power supplies three times and are now able to do it at our own

? electronics:

- several fuses had to be renewed a couple of times
- we got two short circuits by leaking laser pump chambers destroying mainly diodes within the electronics, so we had to replace them

? laser cooling unit:

- leakages in pump chambers occurred due to misplaced o-rings and hair cracks in the ceramics; we repaired ceramics with silicone

? secondary cooling unit of the all system:

- only one malfunctioning during warranty period

? crystals:

- we had to change the crystals THG/SHG twice: once they had to be renewed and once we were able to clean them
- weakening crystal heating, so we dismantle crystals when not in use and keeping them under dry conditions

The mean usage of our system is about 200 hours per year. At the moment we are using the system within an INTERREG IIIA project analyzing air quality at the Bavaria-Czech borderland. For former other usage, see:

M. Schröter, A. Obermeier, D. Brüggemann, O. Klemm (2002): Application of a ground-based lidar for studies of the dynamics of ozone in a mountainous basin, *Environmental Science and Pollution Research* 9, 381-384

M. Schröter, A. Obermeier, M. Plechschmidt, D. Brüggemann, O. Klemm (2003): Remote Monitoring of Air Pollutant Emissions from Point Sources by a Mobile Lidar/Sodar System, *Journal of the Air & Waste Management Association* 53, 716-723

J. Keder, M. Strizik, P. Berger, A. Cerny, P. Engst, I. Nemcova (2004): Remote sensing detection of atmospheric pollutants by differential absorption LIDAR 510M/SODAR PA2 mobile system, *Meteorology and Atmospheric Physics* 85, 155-164

Since we expect increasing problems with the system while it is getting older, we are very much interested in upgrading technical parts. Maybe there are also possibilities for common funded projects regarding new achievements in measurement technology or data analysis.

If we can help any lidar users with our knowledge about the Elight Lidar 510M system, please feel free to contact us.

Best regards,

Marc Schroeter

Diplom-Geoökologe University of Bayreuth Chair of Technical Thermodynamics and Transport Processes

Universitätsstr. 30 95440 Bayreuth, German

tel.: +49 921 557167

fax: +49 921 557165

e-mail: marc.schroeter@uni-bayreuth.de

URL: <http://www.ltt.uni-bayreuth.de>

ANNEXE 3 : Rapport d'enquête LIDAR Wales

At 11:48 04/11/2004 +0100, you wrote:

>** High Priority **

>** Reply Requested When Convenient **

>

>Dear Elight Lidar users,

>As you might know, ELIGHT is now about to close definitely.

>In parallel, the LIDAR from COPARLY have serious problems and INERIS

>was asked by our french env. ministry to find solutions. Moreover, one

>of the solution could be to change the laser technology.

>For this, I am making a short overview of Elight Lidar usage, in order

>to make a clear view about ELIGHT Lidar technology.

>Can you then reply to this short email

>

>-Can you give me the characteristics of your system:

> laser used ? Tisa or Yag (precise model)

Continuum 8020 laser

> is it mobile (510M or UV11), transportable (profiler) or a system

>fixed at one unique site?

profiler on a trailer

> year of acquisition ? and was it a new or a 2nd hand system?

nov 2002, new system

>- Can you give me a rough idea of your usage

> For each year, what are you doing with your instrument and what is

>the project associated ? do you have reports ref and publications ref

>associated.

> Year actions reserach, collaboration or

>customer Associated project if existing

>reports publications posters/oral

We use the lidar on field campaigns (1-2 months a year) and also at Aberystwyth for more routine studies. We haven't published anything yet.

>- Can you give me a rough idea of problems occurred with your system ?

> - laser cavity (number of problems occurred):

> - laser power supply (number of problems occurred):

> - electronics (number of problems occurred):

> - cooling unit of the laser (number of problems occurred):

> - cooling unit of the all system (number of problems occurred):

> - cristals (number of problems occurred):

The problems are so many it would take pages to document them. Briefly, the laser as supplied had hot spots in the beam which destroyed optics. This had to be fixed by Continuum. We have had to replace windows and crystals in the laser, and many mirrors. There have been a myriad of software problems: the system is very complex and is not fault-tolerant.

We do however have a system now which works reasonably well, and although it doesn't meet the specification of measuring ozone up to 5 km we are using it and getting good signals

Best Wishes
Geraint vaughan

ANNEXE 4 : Rapport d'enquête LIDAR Valladolid

Dear colleague,

First of all, thank you for your e-mail.

Elight delivered a LIDAR 510 M to the Centro de Tecnología Láser in Valladolid, CTL, in, I think, 1996. In 1999, the CTL (it already does not exist) transferred this system to my University. During the time in which the equipment was in our hands it had numerous problems of all type (cooling unit, electronic, flashlamp explosions, software, misalignment...). In fact it never worked. As a result of this situation, in January 03 the Rector of our University signed an agreement with the Company basically addressed:

- a.. To take away the Lidar 510 M from our University.
- b.. To built and deliver us a new ozone profiler in September 03. The commitments of Elight included checking the new system during a sampling campaign to be performed during 4 weeks before being delivered to our University in order to assure a reliable behaviour of this equipment.

The "new" ozone profiler delivered, O3P-RCV model, never worked properly either, although we obtained some interesting and promising results. Unfortunately, Elight was unable to fully develop this technology, even during the extended warranty period agreed. Our reduced experience of this system only allows us to say that seems to have a good potential. Certainly, we have no doubts that the profiler technology is much more reliable than the Lidar 510 M that we had. The profiler is not installed in a van, despite we have a Master Renault where the Lidar was initially installed. Our main future interest is to have a mobile (or transportable) system.

Our current situation of the profiler is also very difficult since, in addition of the serious unsolved technical problems, we never received either sufficient technical information or the sources of the software. Some of the optical components of the profiler delivered are on a second hand. This is especially true for the telescope and the FHG crystal. The software itself (exe version) has also problems.

The ozone profiler has a YAG laser, Brilliant, from Quantel. In order to try to overcome the operational problems we are also looking for solutions, and just to begin, those related to the FHG crystal. Up to now we contacted the Spanish representative of Quantel and are waiting for its news.

I strongly believe that looking for another company could be a satisfactory solution, and probably the only one, to solve the technical problems of some (or all) the former Elights users. If you plan and/or follow some future initiative do not hesitate contact us.

Best regards,
María Luisa Sánchez
Full Professor of Applied Physics
University of Valladolid, Spain

ANNEXE 5 : Rapport d'enquête LIDAR Carthagène

Hi Emerick,

Finally, what afraid us happened. I am sure that they knew about this when we were in Berlin during May. Now our unit works very well, I hope this situation will continue. Anyway, I believe that Derk will help us under any inconvenience that may occur.

I have answered all your questions, I hope this is what you want, if you need anything else, please let me know. Did you think anything about the inter-reg project? Now I feel more confidence with the unit. Please keep in touch.

Sincerely

Sele

-Can you give me the characteristics of your system:
laser used ?

* Nd-YAG. Continuum 8020

is it mobile (510M or UV11), transportable (profiler) or a system fixed at one unique site?

* UV 11

year of acquisition ? and was it a new or a 2nd hand system?

* New

Can you give me a rough idea of your usage

* At this time we are fulfilling a project concerning the transport of ozone during the night around our area. The objective is understand why we have rise in the values of ozone concentrations during the night at some locations in the surroundings of Cartagena.

* Another interest is focused on the detection of fugues or leakages from industrila facilities of certain pollutants, specially BTX and SO2.

For each year, what are you doing with your instrument and what is the project associated ? do you have reports ref and publications ref associated.

* We have the system since February 2004, we have presented a preliminary result of our research on fugues and leakages during the 22th ILRC, held in Matera (Poster).

* We have also sent a contribution to the AWMA conference to be held in Minnesota in June 2005.

* We are know participating in a project (REN 2003-01997) funded by the Ministry of Science and Technology.

Can you give me a rough idea of problems occured with your system ?

- laser cavity (number of problems occured):
- laser power supply (number of problems occured):
- electronics (number of problems occured):
- cooling unit of the laser (number of problems occured):
- cooling unit of the all system (number of problems occured):
- cristals (number of problems occured):

* Our unit works almost every Thursday to gain data for the ozone project we are involved. I have not suffered any of the above mentioned problems. I have had some difficulties with minor details as temperature stabilization of the crystals, but when they are stable the system has very little deviations.

ANNEXE 6 :
Rapport d'enquête LIDAR BTU Cottbus

Dear Emeric,

I believe that you are more familiar with our lidar than me. As you may be know it was in the last 3 years belong with Elight and permanent maintained by Dirk Weidauer.

We habe no idea for any further use. If you need it completely or spare parts, please let me know. Probably we are planning to re-install the lidar from the van (last one we like to use....).

greetings

Detlev

Prof. Dr. Detlev Möller
Lehrstuhl für Luftchemie und Luftreinhaltung /
Dept. Atmospheric Chemistry and Air Quality
Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus /
Brandenburg Technical University

Volmerstraße 13 - D-12489 Berlin (Germany)

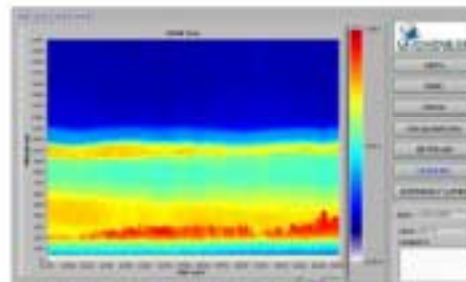
e-mail: moe@btu-lc.fta-berlin.de
homepage: <http://www.luft.tu-cottbus.de>

**ANNEXE C : LIDAR COMMERCIALISE PAR LA SOCIETE
LEOSPHERE**

EASY LIDAR™ PARTICULES

EASY LIDAR™

- Plug and Play
- Compact
- Modulaire
- Logiciel convivial
- Sécurité oculaire
- Sans assistance



EVOLUTION DE LA HAUTEUR DE COUCHE LIMITE



IP65



PARAMETRES MESURES

De 75 m à 12 km / Tous les 3,5m / Temps réel (1 image/s)	Résolution
Concentration massique d'aérosols en µg/m3 (étalonnage requis)	+/- 20% est.
Evolution de la couche limite atmosphérique	+/- 15m
Base des nuages	+/- 3,5m
Sommet des nuages semi-transparents	+/- 3,5m
Profil vertical des couches d'aérosols (> 100nm)	+/- 3,5m
Distribution verticale des propriétés optiques de l'atmosphère	+/- 20%
Echelle de visibilité	+/- 20%
Structure dynamique de l'atmosphère (cellules convectives, ondes de gravité)	

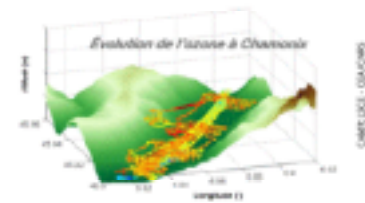
Informations techniques

LASER	
Fréquence	20 Hz, Classe 1M (EN60825-1)
DETECTION	
Portée	75m à 12km (36200 ft)
Résolution spatiale	3,5 m
Résolution temporelle	1s
Poids	9,8 kg + 75kg (cooler et aim.)
Dimensions	45cm (h) x 28cm (w) x 18cm (d)
TOMOGRAPHIE	
Résolution	1/10°
Limites angulaires	360° azimuthal 0°-90° zenithal
CONDITIONS D'UTILISATION	
Températures limites	-10° à 55 °C
Humidité	Jusqu'à 100% RH
ELECTRICITE	
Alimentation	230 /110 VAC
Consommation	500W max.
Protection mécanique	IP65

Domaines d'application

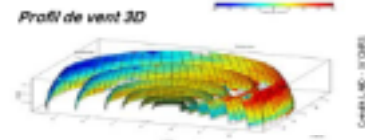
Qualité de l'air (intérieur et atmosphère)

- + Mesures de la distribution spatio-temporelle des aérosols.
- + Profils d'ozone.
- + Discrimination des types de particules.
- + Identification des zones polluantes à partir d'un film en 2D.
- + Contrainte et validation des modèles de prédiction.
- + Études d'impact pré/post implantation (aéroports, usines).
- + Prévention et détection des accidents industriels.
- + Suivi de la cinétique de décontamination des grands halls.



Énergie éolienne (Résolution 10cm/s - Portée 150m)

- + Mesures de potentiel éolien d'un site sur une année
- + Impact des turbulences et des profils verticaux sur la courbe de puissance.
- + Aide à la prévision court-terme



Météorologie et climat

- + Suivi d'aérosols naturels et de nuages dans la troposphère et leur étude climatique.
- + Connaissance des paramètres optiques de l'atmosphère pour la validation des modèles de transfert radiatif.

Transports

- + Trafic aérien : détection au sol des turbulences de sillages et cisaillements de vent.
- + Transport terrestre : surveillance des infrastructures linéaires et complexes (résistance au vent, érosion, pollution, visibilité).

Nos métiers



© LEOSPHERE, all rights reserved

Leosphere et le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CEA/CNRS) ont co-développé une **gamme de solutions lidar** répondant à la demande des industriels et associations à la recherche de systèmes compacts et plug-and-play permettant des analyses 3D en air intérieur et dans l'atmosphère (Easy Lidar™).



LEOSPHERE
Lidar Environmental Observations

Paris Innovation
5 rue d'Uzès
75002 Paris
France

www.lidar.fr

Phone : (33) 1 40 13 53 28
Fax : (33) 1 40 13 53 01
E-mail : info@leosphere.fr

**ANNEXE D : LIDAR COMMERCIALISE PAR LA SOCIETE CIMEL
ELECTRONIQUE**

CAML™ : Micro Lidar Nuages Aérosols

Les LIDAR (Light Detection And Ranging) à rétrodiffusion sont des systèmes clés dans la détermination de la distribution spatiale et des propriétés optiques des aérosols et des nuages. Ces informations sont fondamentales dans de nombreuses applications de laboratoire ou de terrain liées à la météorologie et à l'environnement.

Le nouveau Micro-Lidar Nuages Aérosols Cimel

C'est dans ce cadre que Cimel Electronique a développé son nouvel instrument, CAML™, en collaboration avec le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

Le CAML™ CE 370-2, est un Lidar rétrodiffusion portable, autonome et respectant le critère de sécurité oculaire. Ce système permet d'évaluer directement le profil en altitude des nuages et des aérosols et de déterminer les propriétés optiques et dynamiques des aérosols et des nuages. Ce nouveau système est prévu pour être léger, facile à transporter et à utiliser. Une option supplémentaire inclut un système robotisé permettant des visées multi-angulaires.

Spécifications du CAML™ CE 370-2

Emetteur	Laser : Nd:YAG, SHG 532 nm
Longueur d'onde	532 nm
Energie par impulsion	4 µJ
Fréquence	5 kHz
Durée d'impulsion	< 1 ns
Ouverture	314 cm ²
Champ (angle total)	55 µrad
Bande passante du filtre	0.5 nm
Détecteur	APD
Mode de détection	Photon counting
Temps d'acquisition	> 0.8 s
Résolution verticale	15 m
Taille (diamètre x hauteur)	220 x 1000 mm
Poids	12.5 kg



Principales caractéristiques

- Sécurité oculaire
- Alignement intrinsèque
- Bonne sensibilité
- Bonne résolution temporelle et verticale
- Contrôlé par ordinateur (MS Windows OS)
- Connexion à travers un port USB
- Compact et portable



CIMEL Electronique

www.cimel.fr

172, rue de Charonne – 75011 PARIS – Tel. (+33) 143.487.933 – Fax. (+33) 143.486.261

ANNEXE E : LIDAR COMMERCIALISE PAR LA SOCIETE VAISALA

**ANNEXE F : COMPTE RENDU DE LA REUNION TECHNIQUE
EPFL-COPARLY-INERIS RELATIVE AUX DOAS 2000 TEI
RECEMMENT ACQUIS PAR COPARLY**

INERIS/DRC/AIRE		Meeting Date: 23/01/04
Emeric FREJAFON		Reference DRC-04-55270-AIRE-184-Efr.doc
		Version N° 2

Report of the meeting between
INERIS – COPARLY – EPFL
on DOAS 2000 TEI instrument
2004 January 23rd, EPFL- Switzerland

Notes and Report : Emeric FREJAFON (INERIS-LCSQA) Tuesday, March 09, 2004	Approval : Alexandre THOMASSON (COPARLY) Thursday, March 11, 2004
Meeting participants : Emeric Frejafon (INERIS-LCSQA) Emeric.frejafon@ineris.fr / +33 3 44 55 63 13 Alexandre Thomasson (COPARLY) athomasson@atmo-rhonealpes.org / +33 4 72 14 54 20 Rodrigo Jimenez (EPFL) rodrigo.jimenez@epfl.ch / + 41 (21) 693-3189	Readers : Martine RAMEL (LCSQA) Martine.ramel@ineris.fr Frédéric BOUVIER (COPARLY) Fbouvier@atmo-rhonealpes.org

Context of the meeting

- In year 2001, COPARLY had bought a “DOAS 2000” manufactured by Thermo Environmental Instruments (TEI). This system was evaluated by INERIS in June and December 2001 (ref: INERIS-DRC-01-27091-AIRE-798-Efr/Nbo/Afi.doc). The results of the 1st evaluation had shown huge variations of the response for all measured pollutants (SO₂, NO₂, O₃), and during the 2nd evaluation (after TEI’s resolutions) there were still problems, especially regarding O₃ concentration (because of TEI’s calibration cell).
- INERIS and COPARLY had realized a DOAS campaign in ambient air, on the Lyon-Saint-Exupéry airport, from Dec. 2002 to Jan. 2003 (ref: INERIS-DRC-AIRE-03-49795-762-EFr V3.doc), using 3 DOAS, including the DOAS 2000 TEI from COPARLY, and 2 spot monitors. Results obtained had shown the following problems with the DOAS 2000 TEI :
 - NO₂ and Ozone results: the comparison between DOAS and spot monitor fits better if you compare DOAS results in ppb and analyzer concentrations in µg.m⁻³, which means an error by approximately a factor 2 (see Annexes - Graph 1).
 - Data ratio validation: several instabilities of the PC (break with “Windows 98” system) occurred for about 30% of the total time and the validated (usable) data of the DOAS 2000 TEI represent only 50% of the measurement campaign.
 - Signal losses: it seems that the light intensity on the receiver decreased very fast (due to mechanical instabilities?) and was automatically corrected by increase of the photomultiplier (see Annexes - Graph 2). This had an effect on the signal/noise ratio, producing incalculable concentrations with the TEI software.

INERIS/DRC/AIRE		Meeting Date: 23/01/04
Emeric FREJAFON		Reference DRC-04-55270-AIRE-184-Efr.doc Version N° 2

- ❑ COPARLY wants to install his instrument as soon as possible, but needs relevant and coherent results in comparison with the air quality network, and validated data ratio at least better than 75% as for all instruments used in French Air quality networks.
- ❑ INERIS wants to optimize DOAS installation in all Air Quality networks as plan in his LCSQA work for 2004.
- ❑ EPFL seems to be relevant in the COPARLY DOAS 2000 TEI data expertise, as they were using the system for a long time.

Meeting highlights

- ❑ E.Frejafon (INERIS) and A.Thomasson (COPARLY) had exposed to R.Jimenez (EPFL) the problems occurred with the DOAS 2000 TEI till now, and especially results obtained during the Lyon-Saint-Exupéry airport DOAS campaign.
- ❑ EPFL had checked the data treatment: a comparison was made between results obtained with the TEI software (commercial version) and a program developed by R.Jimenez with “MatLab” (see Annexes - Graph 3). This comparison had shown that TEI software needs corrections to improve the data treatment and concentration calculation.
- ❑ EPFL had checked the raw signal characteristics and tried to understand the reasons for signal losses or noises, making the evaluation of the concentrations difficult.
- ❑ Several solutions were discussed

Summary of EPFL check up

- ❑ PpbV to $\mu\text{g.m}^{-3}$ conversion factor: data treatment is not made on reference absorption cross sections but on reference spectra recorded in the TEI company, obtained for a certain Pressure and Temperature which are different from standard values and also different from real measurement conditions. **According to EPFL, it might be more relevant to realize data treatment on standard absorption cross sections** (like EPFL MatLab program), especially if meteorological conditions are different from those present during these reference spectra records (high altitude, low temperature...).
- ❑ Spectrometer bias : using the 254 nm Hg line periodically can increase the DOAS data quality. It can help to check the span and the spectrometer resolution. **According to EPFL, making a periodic Hg lamp spectra can optimize the spectrometer response regarding to the reference spectra.**
- ❑ DOAS data evaluation: results obtained during the Lyon-Saint-Exupéry airport campaign have a lot of noise. We have 10^{-3} of residual absorption fraction within 3 min time integration, which is too much : we should have such absorption fraction within 3 sec time integration. **Such bad result might come from several sources: too many vibrations due to shelter bad configuration, T° stability, electromagnetic noise (low isolated electric connections),...**

INERIS/DRC/AIRE		Meeting Date: 23/01/04
Emeric FREJAFON		Reference DRC-04-55270-AIRE-184-Efr.doc Version N° 2

- ❑ Signal obtained during the whole campaign has too low intensity : it is recorded on 10V scale whereas, **according to EPFL, it should be more relevant to record it on 5V scale or to increase the PM voltage.** Sometimes, we obtained signal absorption fraction in the same range of residual absorption fraction, producing then “strange” data (corresponding to noise).
- ❑ Signal loss was sometimes around 1% per hour which is definitely too much. **According to EPFL, losses should be in the range of 1% per day or less.**
- ❑ The PMT voltage vary automatically, and this can strongly amplify the noise. **According to EPFL, it shall be more relevant to fix the PMT voltage to a certain value.**
- ❑ Data treatment : comparing the TEI software (reference spectra method) with the EPFL MatLab program (cross sections method) and the COPARLY’s spot analyzer results, we can notice that, for ozone measurement (see Annexes - Graphs 4 and 5) :
 - $TEI_commercial_soft_results = 0.92 * EPFL_matlab_prog_results + 15 \mu g.m^{-3}$
 - $TEI_commercial_soft_results = 1,2 * COPARLY_analyzer_results + 20 \mu g.m^{-3}$
- ❑ Using an “Old” TEI software modified by R.Jimenez (reference spectra method without lamp calibration), we’ve found results almost equal to the MatLab program (see Annexes – Graph 6).
 - This can explain the difference between the new TEI commercial software and EPFL Matlab results: **in order to have same results we have to cancel the lamp calibration process.**
 - **It seems that the reference spectra used are good** because the 2 methods (reference spectra and cross sections) give approximately the same results. But we have to keep in mind that meteorological conditions were not so different from those present in TEI company during the reference spectra records (especially, comparable pressure).
 - This problem (lamp calibration) can explain also the difference between DOAS and analyzer: if the intensity decreases, the PMT voltage increases, then the noise increases and offset or span problems can appear.
 - **Finally it seems that commercial software might be modified by at least implementing Hg lamp calibration instead of DOAS actual lamp calibration, and maybe also by using cross section curve instead of reference spectra.**

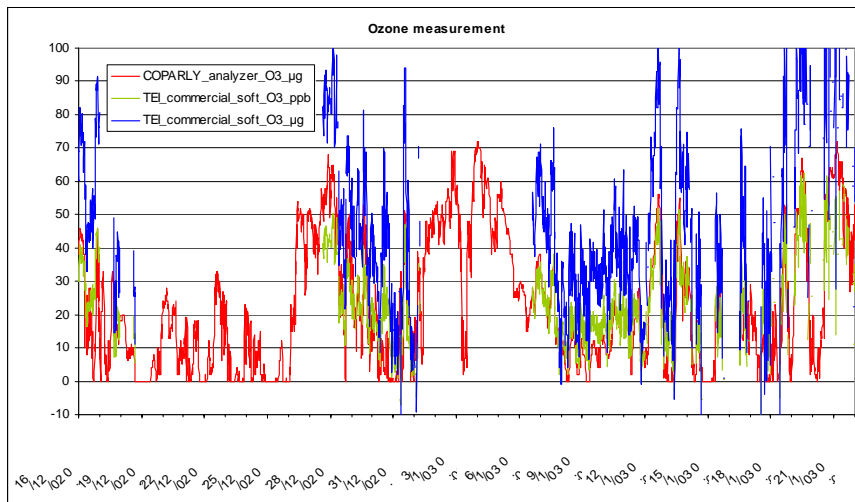
Meeting resolutions

- ❑ EPFL will try to check the other data obtained with the COPARLY’s instrument during the Lyon-Saint-Exupéry airport DOAS campaign (NO₂, SO₂, benzene and toluene)
- ❑ EPFL will send to COPARLY a good version of data treatment software in order to make a parallel evaluation.
- ❑ COPARLY needs to install his DOAS as soon as possible and has to check if data obtained still suffer of poor quality. **COPARLY, INERIS and EPFL agreed that the only way to understand how this instrument works and how relevant are the data is to install and run the DOAS, in order to make further tests.**

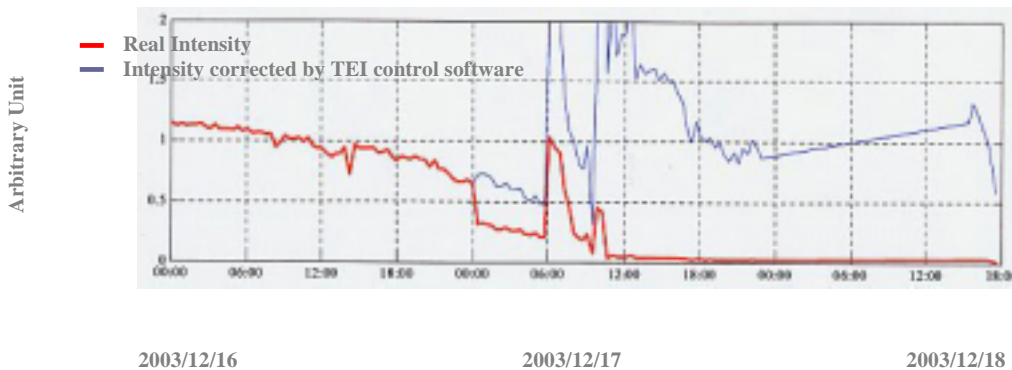
INERIS/DRC/AIRE		Meeting Date: 23/01/04
Emeric FREJAFON		Reference DRC-04-55270-AIRE-184-Efr.doc Version N° 2

- ❑ INERIS will help COPARLY and other Air Quality Networks to install their DOAS with the aim (in a short time scale) of including such systems in the air quality French “ATMO index”.
- ❑ Based on the tests of this meeting and eventual further experiments, **R.Jimenez had been chosen as the expert to discuss with TEI in order to help them to find a relevant commercial solution for the DOAS 2000 TEI software control and data treatment.**
- ❑ COPARLY wishes to install and run his DOAS 2000 in his Air Quality Network as soon as possible. **This implies constructor modifications on the system (based on R.Jimenez comments) and support from TEI (or his French distributor MEGATEC) and INERIS to optimize and validate the place where the DOAS will be installed, and to align and run the system. A quick installation would give more data and could help to improve and validate the changes in real time.**

Annexes - Graphs



Graph1 : O₃ concentrations calculated with TEI software in ppb and in $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ compared to spot analyzer

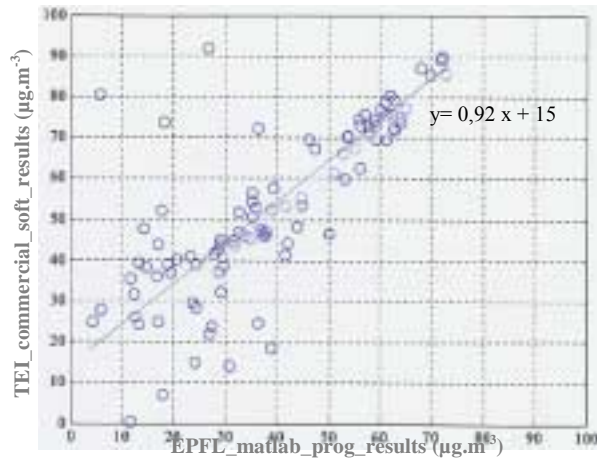


Graph 2 : Intensity of the DOAS

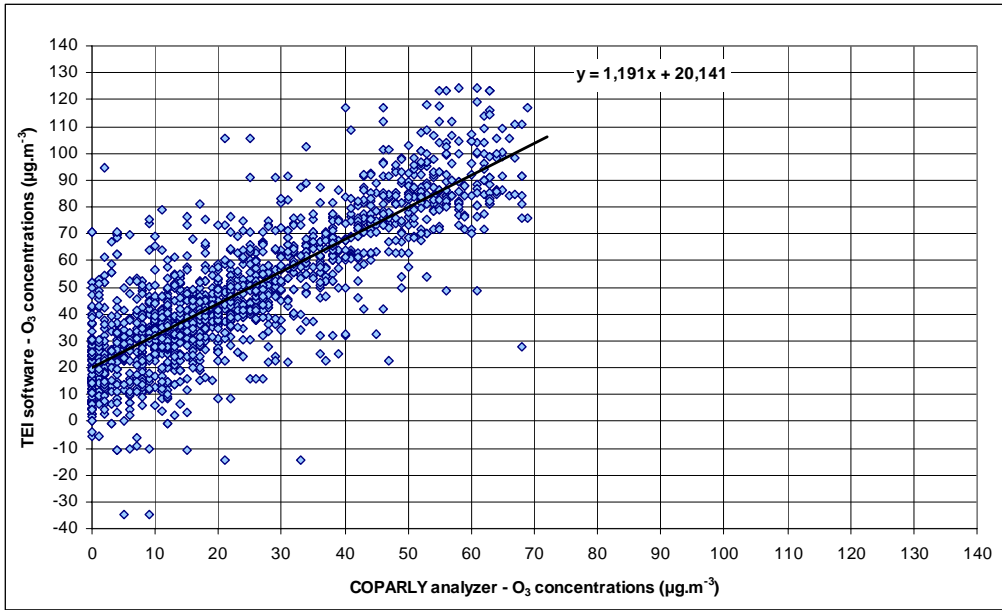
INERIS/DRC/AIRE		Meeting Date: 23/01/04
Emeric FREJAFON		Reference DRC-04-55270-AIRE-184-Efr.doc
		Version N° 2



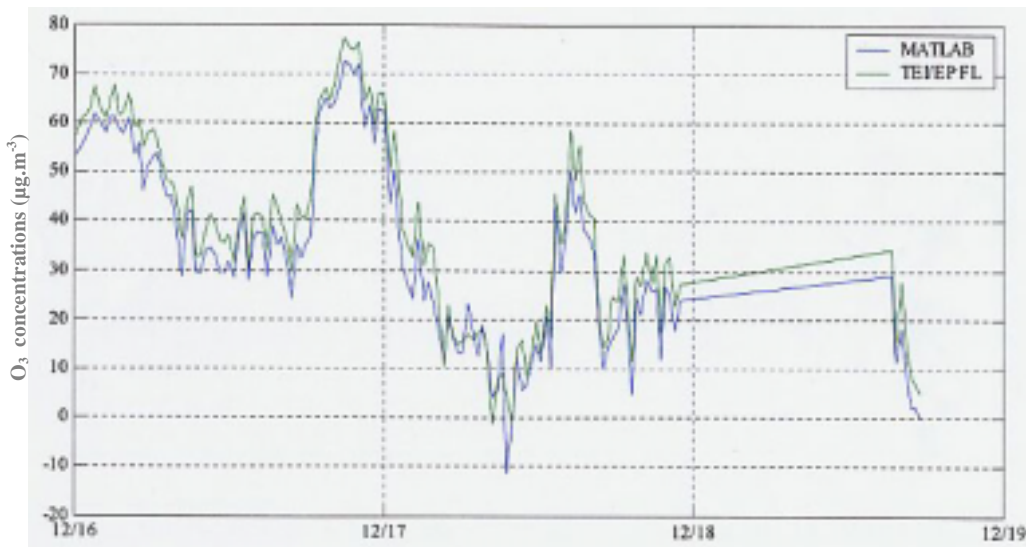
Graph 3 : O₃ concentrations calculated with EPFL and TEI programs, compared to analyzer results



Graph 4 : Comparison between TEI software and EPFL MatLab program (O₃ calculation)



Graph 5 : Comparison between TEI software O₃ calculation and spot analyzer results



Graph 6 : Comparison between EPFL program (MATLAB) and “old” TEI software modified by EPFL (TEI/EPFL)