

Opération **SERRES**

Etat de l'art des mesures de pollution et de trafic par capteur laser

Décembre 2010

Certifié
ISO 9001



Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Développement durable

F
F
I

Présent
pour
l'avenir



Ministère de l'Écologie,
du Développement durable,
des Transports et du Logement

www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr

Etat de l'art des mesures de pollution et de trafic par capteur laser

Version	Auteurs	Commentaires
1.0	V. Boucher, F. Greffier, C. Le Bastard, F. Bosc	Relecture

Affaire suivie par

Cédric Le Bastard – U46
Tél. : 02 41 79 13 05
Courriel : cedric.lebastard@developpement-durable.gouv.fr
Adresse postale : CETE de l'Ouest/Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers 23 avenue de l'Amiral Chauvin BP 20069 49136 Les Ponts de Cé Cédex

Référence Intranet

http://

Sommaire

1	LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE	6
1.1	EMISSIONS ANTHROPIQUES	6
1.2	EMISSIONS NATURELLES	7
1.3	MATIERE PARTICULAIRE : LES AEROSOLS	8
1.4	METEOROLOGIE ET POLLUTION	11
2	POLLUTION AUTOMOBILE	13
2.1	COMPOSITION DES GAZ D'ECHAPPEMENT	13
2.2	IMPACT SANITAIRE ET NORMALISATION	14
2.3	VEILLE SANITAIRE ET REGLEMENTATIONS EN MATIERE DE POLLUANTS	16
2.3.1	<i>L'organisation de la veille sanitaire</i>	16
2.3.2	<i>Normes de qualité de l'air</i>	17
3	MESURE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE GAZEUSE	19
3.1	MESURE DE L'OZONE	19
3.2	METHODES AUTOMATIQUES	19
3.2.1	<i>Absorption UV</i>	19
3.2.2	<i>Sondes électrochimiques et lidars</i>	19
3.3	MESURE DE DIOXYDE DE SOUFRE	20
3.3.1	<i>Propriétés du dioxyde de soufre</i>	20
3.3.1.1	<i>Photométrie de flamme (norme NF X 43-020)</i>	20
3.3.1.2	<i>Fluorescence UV (norme NF X 43-019)</i>	20
3.4	MESURE DE MONOXYDE DE CARBONE	21
3.4.1	<i>Propriétés du monoxyde de carbone</i>	21
3.4.2	<i>Mesure par absorption d'un rayonnement infrarouge</i>	21
3.5	MESURE DES HYDROCARBURES VOLATILS	22
3.5.1	<i>Propriétés des hydrocarbures volatils</i>	22
3.5.2	<i>Propriétés des hydrocarbures aromatiques polycycliques</i>	22
3.5.3	<i>Détection</i>	23
4	CARACTERISTIQUES DU LIDAR	24
4.1	PRINCIPE DU LIDAR	24
4.2	PRINCIPAUX MODES DE FONCTIONNEMENT	26
4.2.1	<i>Lidar rétrodiffusion</i>	26
4.2.2	<i>Lidar à absorption différentielle ou lidar DIAL</i>	26
4.2.3	<i>Lidar Doppler cohérent</i>	27
4.2.4	<i>Intérêts et avantages du lidar</i>	27
4.3	LIDAR ATMOSPHERIQUES POUR LES BESOINS DE L'ENVIRONNEMENT	28
4.3.1	<i>Besoins</i>	28
4.3.2	<i>Objectifs</i>	28
4.3.2.1	<i>Choix de la longueur d'onde</i>	30
4.3.2.2	<i>Choix des sources laser</i>	30
4.3.3	<i>Perspectives</i>	31
4.4	QUELQUES EXEMPLES DE LIDAR	32
4.4.1	<i>Le système lidar : Mirela</i>	32
4.4.1.1	<i>Objectifs</i>	32
4.4.1.2	<i>Description</i>	33
4.4.2	<i>Le Lidar de COPARLY</i>	35
4.4.3	<i>Le système Lidar IGN-SA</i>	36
4.4.4	<i>RALI : Lidar LNG</i>	39
4.4.5	<i>LIDAR COMMERCIAL</i>	41

5	CAPTEURS LASER POUR LE TRAFIC.....	42
5.1	CAPTEURS BORD DE VOIE.....	42
5.1.1	Détection, vitesse et longueur du véhicule	42
5.1.2	Estimation du positionnement latéral.....	42
5.1.3	Estimation de la largeur et la longueur des véhicules	43
5.2	CAPTEURS AEROPORTES : SUIVI DE TRAFIC	44
5.3	CAPTEURS EMBARQUES	44
5.3.1	Assistance au conducteur	44
5.3.2	Guidage de véhicule.....	45
6	CONCLUSION.....	46
7	REFERENCE	47

Table des illustrations

FIGURE 1 - EXEMPLE D' AEROSOLS : PARTICULES DE SUIE COLLECTEES SUR UN FILTRE	9
FIGURE 2 – EXEMPLE DE TAILLES CARACTERISTIQUES D' AEROSOLS	9
FIGURE 3 - MODELE DU SPECTRE GRANULOMETRIQUE DES AEROSOLS (JAENICKE (1993)).....	10
FIGURE 4 - ILLUSTRATIONS POLLUTION URBAINE	13
FIGURE 5 - PRINCIPE DU LIDAR ATMOSPHERIQUE [2]	24
FIGURE 6 - PRINCIPE DU LIDAR DIAL	26
FIGURE 7 - LIDAR POUR LA DETECTION DE POLLUANTS : OBJECTIFS, SOURCES, LASER, LONGUEUR D' ONDE	29
FIGURE 8 - SCHEMA DE PRINCIPE DE MIRELA.....	33
FIGURE 9 - LIDAR DISC, RETRODIFFUSION SUR UN AEROSOL	34
FIGURE 10 - SCHEMA DE LA PARTIE EMISSION D' UN LIDAR DIAL ELIGHT 510M	35
FIGURE 11 - LE LIDAR IGN-SA	37
FIGURE 12 - PRINCIPE DE LA MESURE LIDAR.....	38
FIGURE 13 - BOITIER DE DETECTION DU SYSTEME.....	38
FIGURE 14 - LIDAR COMMERCIALISE PAR LEOSPHERE [5]	41
FIGURE 15 - PRINCIPE A PARTIR DE BARRIERE LASER.....	42
TABLEAU 1 – COMPOSITION DES EMISSIONS AUTOMOBILES.....	13
TABLEAU 2 – IMPACTS SANITAIRES DE POLLUANTS	15
TABLEAU 3 – CONCENTRATIONS ATMOSPHERIQUES MOYENNES DES POLLUANTS REGLEMENTES	16
TABLEAU 4 – NORMES DE LA QUALITE DE L' AIR POUR COMPOSES POLLUANTS ANTHROPIQUES.....	18
TABLEAU 5 - PRINCIPAUX PHENOMENES DE DIFFUSION DANS UN LIDAR	25
TABLEAU 6 - POLLUANTS MESURES ET SENSIBILITE.....	35
TABLEAU 7 - CARACTERISTIQUES DU LIDAR ELIGHT 510M	36

Annexe

ANNEXE 1 – NORMES DE QUALITE DE L' AIR	48
----------------------------------------------	----

Introduction

Les mesures de pollution par LIDAR (Light Detection And Ranging) sont courantes depuis une vingtaine d'années. Cette technique permet des mesures sur de grandes distances (de l'ordre de quelques kilomètres) pour des applications atmosphériques mais aussi sur des distances moindres (quelques dizaines à centaines de mètres) pour des études d'impact plus locales comme l'influence d'une usine par exemple. Bien que ces mesures se démocratisent et que quelques rares matériels existent dans le commerce, la technique reste néanmoins complexe : il existe en effet différents types de LIDAR que nous détaillerons par la suite qui ont chacun des propriétés reliées à des applications spécifiques, et les équations associées ne sont pas triviales si l'on veut remonter à des concentrations d'éléments spécifiques.

D'autre part, il existe des capteurs de trafic à base de laser permettant de nombreuses mesures telles que la vitesse, la longueur, la catégorie, positionnement, ...

Aussi l'objet de ce rapport est de réaliser une étude prospective sur un dispositif permettant de réaliser simultanément et en temps réel des mesures de pollution et de paramètres de trafic. C'est pourquoi nous nous intéresserons tout d'abord aux polluants atmosphériques ainsi qu'à ceux que l'on peut rencontrer en bord de voie et aux moyens de les détecter aujourd'hui. La partie suivante décrit les différentes techniques LIDAR ainsi que leurs applications respectives. Enfin, nous exposerons brièvement les différentes techniques laser pour mesurer des paramètres du trafic.

Le problème revêt différents aspects :

Un aspect physique puisque les différents types de LIDAR utilisent des interactions lumière-matière différentes. Un aspect théorique pour expliciter ce que l'on mesure et en tirer des informations quantitatives sur la présence de polluants. Un aspect électronique et traitement du signal pour tout ce qui concerne la détection. De nombreuses interrogations sont sous-jacentes telles que : Quel doit être le positionnement du dispositif, quelle doit être la puissance du laser nécessaire, quelle est la représentativité géographique de la mesure, à partir de quelle densité de tel ou tel polluant obtient-on un signal significatif, à quelle longueur d'onde faut-il travailler, etc. Nous n'apporterons dans ce présent rapport que des débuts de réponse et nous nous focalisons ici sur la faisabilité d'une mesure locale de la pollution (ce qui nous semble être le point dur du problème), c'est-à-dire à l'échelle d'une voie de circulation. Les aspects comme la sécurité oculaire et le coût seront aussi investigués.

L'objectif à terme étant de posséder une vue assez claire sur les différents aspects (physique d'interaction du laser avec les polluants, équations associées, optique et électronique de détection) pour réaliser un cahier des charges servant de base à un sujet de thèse.

1 La pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique résulte d'un apport de gaz et de particules dans l'atmosphère. Ces émissions peuvent résulter de l'activité humaine, on parle alors d'émissions anthropiques, ou être naturelles [1]. S'agissant dans le cadre de l'opération SERRE de s'intéresser tout particulièrement à la pollution automobile, les émissions de polluants liées au trafic font l'objet dès que possible d'une attention particulière.

1.1 Emissions anthropiques

Les principaux polluants atmosphériques primaires et issus de l'activité humaine sont :

- l'oxyde de soufre SO₂
- les oxydes d'azote NO_x (NO et NO₂ principalement)
- le monoxyde de carbone CO
- le Plomb Pb
- les hydrocarbures (COV, Composé Organique Volatile)
- les particules PM

Ces polluants et leurs émissions sont réglementés.

L'ozone, O₃, polluant secondaire lui aussi réglementé, résulte de réactions photochimiques avec les polluants listés ci-dessus.

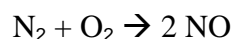
Oxyde de soufre

L'oxyde de soufre, SO₂, est une des principales sources de pollution atmosphérique. Son émission résulte de la combustion des combustibles fossiles, tels que le charbon et les fiouls lourds. 60% du SO₂ est émis par le charbon, 30% par les fiouls lourds et 10% par d'autres sources (raffinage, essence, etc.).

A titre d'exemple, 1,4g de SO₂ est émis dans l'atmosphère par kg d'essence consommée.

Oxydes d'azote

Le monoxyde d'azote NO est produit, lors des combustions à haute température, par la recombinaison des deux principaux éléments de l'air :



De petites quantités de NO₂ sont émises simultanément ainsi que des traces d'acide nitrique. Les émissions globales de NO_x (NO + NO₂) sont proches de celles du SO₂, et en constante augmentation, en raison de la forte augmentation du parc automobile. Dans tous les pays, les véhicules automobiles constituent la principale source d'oxydes d'azote.

Dans l'atmosphère, le NO s'oxyde en NO₂, en présence d'hydrocarbures et de lumière. On est donc toujours en présence d'un mélange de NO et NO₂ ce qui est à l'origine de la formation d'ozone, O₃.

Monoxyde de carbone

Le monoxyde carbone, CO, est un produit de combustion incomplète. Il est principalement émis par les véhicules à essence (75%). Les autres sources sont les équipements agricoles (7%), les processus industriels (9%), les incinérateurs de déchets (7%) et les avions (2%). Ce composé est très toxique, mais comme il s'oxyde dans l'air en CO₂, il ne constitue un réel danger que dans les espaces clos. Son effet néfaste peut cependant se faire sentir dans les espaces très fréquentés par les automobiles (exemple : ruelle encombrée et peu ventilée).

Plomb

Jusqu'à ces dernières années, la combustion de l'essence restait la plus grande source émettrice de plomb, Pb, dans l'atmosphère. Le plomb était présent dans l'essence, sous forme de tétraéthylplomb, qui est un antidétonant. Dans l'atmosphère, 75% du plomb est gazeux. 25% sont émis sous formes de particules dont près de la moitié se trouve sous forme de fines particules (< 0,5 µm) qui restent en suspension dans l'air.

La généralisation de l'essence sans plomb permet de diminuer régulièrement les émissions. Dans les pays industrialisés, le problème du plomb n'est donc plus d'actualité. Ceci n'est pas le cas dans les pays émergents où le plomb reste encore très utilisé.

Hydrocarbures

Plus de 40% des hydrocarbures présents dans l'atmosphère proviennent des véhicules. Ces composés primaires sont aussi appelés Composés Organiques Volatiles (COV). Ils sont à l'origine de la plupart des réactions atmosphériques et des fortes teneurs en ozone troposphérique (la troposphère s'étend du sol jusqu'à 12 km d'altitude).

Particules

Toutes les sources de pollution émettent des particules (PM). Celles-ci ont des tailles très variables. Les grosses particules (taille > 2,5 µm) ne sont pas dangereuses pour la santé car elles sont éliminées dans le système respiratoire. Les très fines particules le sont aussi. Les particules de taille comprise entre 0,2 et 2,5 µm sont inhalées et dangereuses pour la santé. Ces dernières représentent 3% de la masse totale des particules présents dans l'atmosphère (cf. 1.3. Les aérosols).

1.2 Emissions naturelles

Le bilan des émissions naturelles commence à être établi avec précision car des études récentes ont permis de préciser les flux des substances chimiques émises dans les différentes

régions du globe. Il est essentiel de bien connaître ces composés présents dans les régions non polluées afin de déterminer la chimie atmosphérique de base. Tout apport de polluants anthropiques est considéré comme une perturbation de cette chimie de base.

Composés soufrés

Le soufre naturel provient de trois sources :

- l'activité volcanique sous forme de SO₂
- le péttillement marin
- les émissions biogéniques (marines ou terrestres).

Les émissions soufrées conduisent le plus souvent à la formation de sulfates.

Composés azotés

Les sources naturelles d'azote sont les suivantes :

- combustion de la biomasse sous forme d'oxydes d'azote NO et NO₂
- injection d'ammoniac NH₃
- éclairs durant les orages produisant du NO
- dénitrification des sols émettant du N₂O

Monoxyde de carbone

Le monoxyde carbone provient de l'oxydation photochimique du méthane qui est l'hydrocarbure naturel le plus abondant. Il provient aussi des émissions directes par les plantes et de l'activité biologique des océans.

Particules

Cf. 1.3.

1.3 Matière particulaire : les aérosols

Les nombreuses molécules présentes dans l'atmosphère sont susceptibles d'interagir ensemble chimiquement afin d'en former de nouvelles. Elles peuvent également se rencontrer entre elles et s'agglutiner jusqu'à former des agrégats. Ce sont les premiers pas de la « nucléation » et de la formation des particules. Ces agrégats en suspension dans l'air sont communément appelés : aérosols. Ces aérosols ont des tailles qui varient de quelques nanomètres à une centaine de micromètres.

Globalement, plusieurs millions de tonnes d'aérosols sont émis chaque jour dans l'atmosphère par une grande multiplicité de sources. Celles-ci peuvent être d'origine naturelle :

- aérosols terrigènes (érosion éolienne des sols)
- cendres volcaniques
- poussières désertiques
- embruns marins
- corps organiques (bactéries, moisissures, pollens,...)

Ou d'origine anthropique :

- fumées d'industrie
- feux agricoles
- gaz d'échappement
- poussières chimiques et minérales

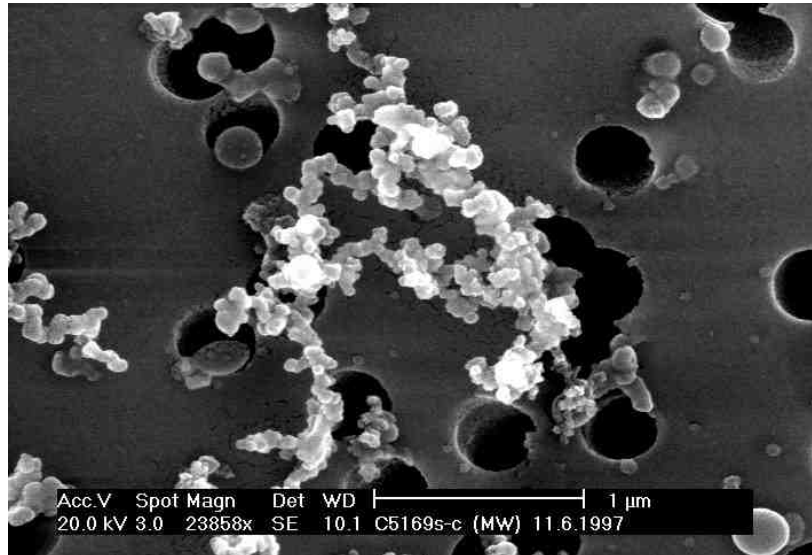


Figure 1 - Exemple d'aérosols : particules de suie collectées sur un filtre (les pores du filtre apparaissent sous la forme de grands points noirs)

Quelques exemples et tailles caractéristiques de certains aérosols sont donnés dans la figure suivante.

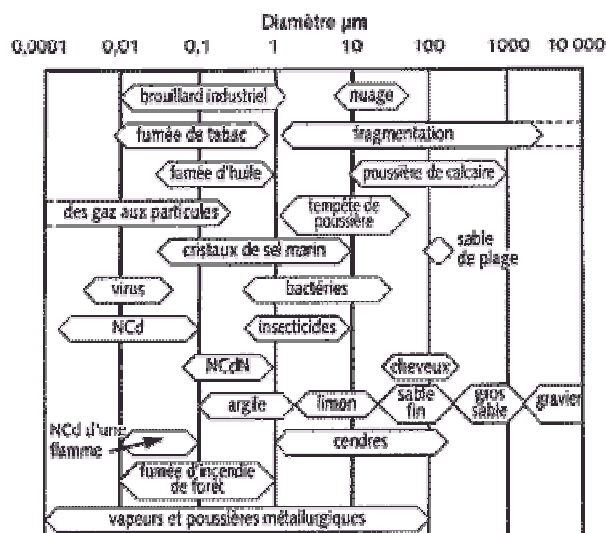


Figure 2 – Exemple de tailles caractéristiques d'aérosols

On remarque une coupure granulométrique assez nette à environ 2 µm.

Ci-après sont présentées différentes coupes granulométriques d'aérosols collectés en divers endroits.

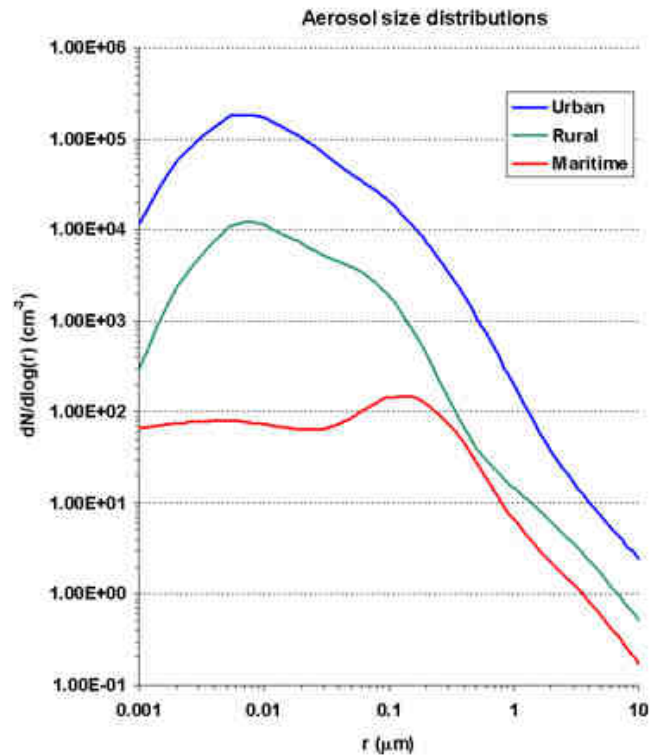


Figure 3 - Modèle du spectre granulométrique des aérosols (Jaenicke (1993))

Une classification a été mise en place pour distinguer les aérosols dont la taille est supérieure à $2,5 \mu\text{m}$ (les PM_{10}) de ceux dont la taille est inférieure à $2,5 \mu\text{m}$ (les $\text{PM}_{2,5}$).

Les PM_{10} sont constituées majoritairement de 6 composants différents :

- des matériaux terrigènes (oxydes d'aluminium, silice)
- du carbone organique
- du carbone élémentaire
- des sulfates d'ammonium
- des nitrates d'ammonium
- des éléments issus de l'érosion comme des embruns (HCl).

Ces particules proviennent de l'altération atmosphérique (sables, terres), de bris mécaniques (usures de la chaussée, pneumatiques ...) et de phénomènes de dissolution.

Les $PM_{2,5}$ sont les plus importantes dans la formation d'un brouillard de pollution (smog). Elles sont dites insédimentables car elles ne peuvent se déposer sous l'effet de la gravité. Elles sont extrêmement nombreuses et difficiles à quantifier. Elles sont essentiellement composées de suie et sont émises par le trafic routier et les fumées industrielles :

- Les particules diesel ont un diamètre aérodynamique moyen de $0.1 \mu m$. Elles sont constituées de résidus solides (suie), d'une partie soluble d'hydrocarbures imbrûlés (gazole et huile) et d'une fraction insoluble (sulfates et dérivés soufrés).
- Les particules reliées aux oxydes de soufre et d'azote sont extrêmement hygroscopiques. Elles sont la cause des smogs de Londres, Los Angeles ou encore Mexico.
- Les métaux lourds comme le plomb, utilisés comme additif aux supercarburants, mais aussi le zinc et le cadmium des usines d'incinération.
- Les microsuies ($0,05$ à $0,1 \mu m$), émises par la combustion du fuel, de l'essence, du kérosène et du gaz. Elles sont essentiellement carbonées mais peuvent aussi contenir du soufre selon le carburant.

1.4 Météorologie et pollution

Les concentrations et la distribution spatiotemporelle des polluants ne sont pas seulement déterminées par les sources et les transformations physicochimiques. Elles le sont aussi par des paramètres physiques qui relèvent de la dynamique atmosphérique.

Un épisode de pollution est observé lorsque :

- les émissions de polluants sont importantes
- la météo est favorable.

Il existe quatre situations météorologiques favorisant les phénomènes de pollution, listés ci-dessous par ordre d'importance décroissant :

- absence de pluies
- absence de vent ou vent faible
- couche d'inversion basse
- chaleur et lumière.

Présence de pluie

La présence de pluie (ou de neige, ou de brouillard) conduit toujours à une diminution de la pollution. Deux phénomènes de lessivage de l'atmosphère par les pluies contribuent à cette diminution :

- Incorporation des gaz dans le nuage : les gaz solubles, c'est le plus souvent le cas, se dissolvent dans les gouttes d'eau des nuages. En tombant, la pluie entraîne mécaniquement vers le sol les polluants.
- Lessivage des particules sous le nuage : la chute de la goutte d'eau « abat » les particules qui se trouvent dans la colonne d'air comprise entre la base du nuage et le sol.

Influence du vent

Le vent tend à disperser la pollution surtout en l'absence de relief. Plus le vent est fort, plus la pollution se disperse rapidement. En zone montagneuse, si les polluants rencontrent une barrière de montagne, la pollution peut alors retourner en arrière et revenir sur son site d'origine. Dans ce cas, il n'y a pas dispersion des polluants mais accumulation. C'est le cas des villes situées dans des cuvettes.

Couche d'inversion

Dans la couche de mélange, les polluants se diluent dans le volume atmosphérique délimité par la surface du sol et la hauteur de la couche de mélange. Dans les conditions normales, la hauteur de la couche de mélange s'étend du sol jusqu'à la troposphère libre. Dans certaines conditions météo, il se produit, en altitude, une inversion de température, et la masse d'air est « bloquée » par cette couche d'inversion qui agit comme un couvercle empêchant la dispersion verticale des polluants. L'air sous la couche d'inversion est plus froid et plus dense et ne peut se mélanger. Ainsi, suivant la hauteur de cette couche d'inversion, la hauteur de la couche de mélange peut diminuer, ce qui entraîne une réduction du volume de dilution des polluants et une augmentation de leur concentration atmosphérique.

Influence de la chaleur et de la lumière

La lumière et la température augmentent :

- la probabilité et la vitesse des réactions photochimiques
- les concentrations de radicaux oxydants.

Dans les deux cas, le temps de vie des espèces est raccourci. Les espèces primaires disparaissent plus vite mais les espèces secondaires, comme l'ozone, apparaissent plus rapidement. On sait que les épisodes d'ozone sont le plus souvent observés en été.

2 Pollution automobile

La pollution d'origine automobile est fortement impliquée dans la dégradation de la qualité de l'air dans les villes ou au voisinage des grands axes de circulations (RRN, autoroutes). L'automobile et plus généralement le transport terrestre motorisé (VL, PL, 2RM dans une moindre mesure) sont une source très importante d'émission de CO₂ et plus généralement de gaz responsables de l'effet de serre. Ils sont également à l'origine d'émissions de substances nocives pour la santé.



Figure 4 - Illustrations pollution urbaine

2.1 Composition des gaz d'échappement

En milieu urbain, périurbain, voir même en milieu rural, l'automobile est la principale cause de la pollution atmosphérique.

La composition (en %) des émissions automobiles est la suivante [1] :

Composé	%
N ₂	78
CO ₂	12
H ₂ O	5
CO	2
H ₂	2
O ₂	1
NO _x	0,1
COV	0,1

Tableau 1 – Composition des émissions automobiles

Malgré les faibles pourcentages d'oxydes d'azote (NO_x) et d'hydrocarbures (COV), ces émissions nocives représentent néanmoins des millions de tonnes chaque année. De plus, les gaz d'échappement contiennent les briques élémentaires qui vont conduire par réactions physicochimiques à la formation d'autres polluants.

Exemples :

- l'oxydation du NO en NO₂
- l'oxydation du méthane en CO
- l'oxydation des COV en aldéhydes
- la photolyse du NO₂ en ozone.

2.2 Impact sanitaire et normalisation

Les principaux polluants issus directement des gaz d'échappement d'un véhicule motorisé ou formés à partir de ces gaz sont listés dans le tableau ci-après. Leurs impacts à courts et longs termes sur la santé sont également évoqués.

Polluant	Symbole	Impacts sanitaires
Ozone	O ₃	<p>➔ A court terme L'ozone est un gaz agressif, fortement irritant pour les muqueuses oculaires et respiratoires. Il pénètre aisément jusqu'aux voies respiratoires les plus fines. Il peut ainsi entraîner des irritations du nez, des yeux et de la gorge, des altérations de la fonction pulmonaire, des essoufflements et une toux. Il exacerbe les crises d'asthme.</p> <p>➔ A long terme Mortalité, morbidité respiratoire, irritation des yeux.</p>
Sulfates	SO ₂	<p>➔ A court terme Ce gaz irritant peut entraîner des crises chez les asthmatiques, augmenter les symptômes respiratoires aigus chez l'adulte et l'enfant : gêne respiratoire, accès de toux ou crises d'asthme.</p> <p>➔ A long terme Mortalité, morbidité respiratoire et cardio - vasculaire.</p>
Nitrates	NO _x	<p>➔ A court terme Le dioxyde d'azote est un gaz irritant capable pénétrer profondément dans les poumons. Il altère l'activité respiratoire et augmente les crises chez les asthmatiques. Chez les plus jeunes, il favorise des infections microbiennes des bronches.</p> <p>➔ A long terme Morbidity respiratoire, irritation des yeux.</p>

Etat de l'art des mesures de pollution et de trafic par capteur laser

Monoxyde de Carbone	CO	<p>→ A court terme A forte dose, le monoxyde de carbone est un toxique cardio-respiratoire souvent mortel. A faible dose, il diminue la capacité d'oxygénation du cerveau, du coeur et des muscles. Sa nocivité est particulièrement importante chez les insuffisants coronariens et les foetus.</p> <p>→ A long terme Mortalité, morbidité cardiovasculaire.</p>
Particules et Aérosols	PM _{2,5} PM ₁₀	<p>→ A court terme Les plus grosses sont retenues par les voies aériennes supérieures. Les plus fines peuvent pénétrer profondément dans les poumons et transporter des composés toxiques. Elles augmentent le risque d'infections respiratoires aiguës chez l'enfant et renforcent des sensibilités allergiques ou des pathologies préexistantes. Une grande partie de cette pollution vient des moteurs diesels.</p> <p>→ A long terme Mortalité, morbidité respiratoire et cardio - vasculaire, cancers.</p>
Composés Organiques Volatiles (Hydrocarbures)	COV	Peu d'effets directs aux concentrations ambiantes exceptés pour les HAP.
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	HAP	Cancers.
Dioxines		Cancers.
Arsenic, Cadmium, Chrome, Nickel, Mercure, Plomb.	As, Cd, Cr, Ni, Hg, Pb	Cancers, morbidité neurotoxique.

Source : Ifen et DRASS

Tableau 2 – Impacts sanitaires de polluants

Pour les polluants réglementés, les concentrations atmosphériques moyennes sont les suivantes [1] :

Composé	zone rurale	zone urbaine	épisode de pollution
CO	200 ppb*	1000	5000
SO ₂	1 – 3 ppb	20	500
NO ₂	1 – 3 ppb	20	300
O ₃	10 ppb	100	200
COV	70 ppb	100	1000
Particules	5 µg.m ⁻³	variable	1500

* particule par billion (1 million de million)

Tableau 3 – Concentrations atmosphériques moyennes des polluants réglementés

Les critères de pollution sont relatifs aux concentrations limites et à la durée de l'exposition. Souvent on tient compte du nombre d'heures ou de jours par an où une concentration limite ne doit pas être dépassée.

2.3 Veille sanitaire et réglementations en matière de polluants

Le 30 décembre 1996, la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (LAURE) a reconnu le droit pour chacun de pouvoir respirer « un air qui ne nuise pas à sa santé ». Cette loi a permis à la France d'établir un plan de surveillance de la qualité de l'air, d'en définir les différents acteurs et également de fixer des seuils de polluants à ne pas dépasser.

2.3.1 L'organisation de la veille sanitaire

Cette organisation permet de relier chacune des phases de la chaîne de surveillance de l'air, de la prise de mesure des polluants, à la synthèse des résultats et l'information de la population.

Une quarantaine d'Associations Agréées pour la Surveillance et la Qualité de l'Air (AASQA) réalisent depuis le 1er janvier 2002 des mesures de pollutions de différents composés anthropiques. Ces associations sont agréées par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable du Transport et du Logement (MEDDTL) et récoltent quotidiennement des données à partir de stations de mesures réparties sur le territoire national. Cette base de données permet notamment l'élaboration de l'indice ATMO pour les agglomérations de plus de 100 000 habitants et de l'Indice de Qualité de l'Air simplifié (IQA) pour les agglomérations plus modestes. Ces indices permettent de caractériser de manière globale sur une échelle de 1 à 10 la qualité de l'air d'une agglomération.

Afin d'assurer la qualité et la cohérence des données mesurées, le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) propose son expertise et réalise également des développements techniques nécessaires à la surveillance de la qualité de l'air. Il est constitué de l'Institut National de l'Environnement et des Risques Industriels (INERIS) du Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE) et de l'Ecole des Mines de Douai.

Quant à l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), cette dernière assure la coordination technique du dispositif de surveillance et gère l'ensemble des données

issues de la veille sanitaire. A partir des recueils de données établis par les AASQA, le département Air de l'ADEME synthétise au niveau national les bulletins journaliers des indices de pollution (avec notamment l'indice ATMO).

Ces bulletins de qualité de l'air sont à l'usage de l'Etat et des pouvoirs publics, et permettent entre autre d'anticiper les pics de pollution.

Par ailleurs, les bulletins journaliers des indices ATMO sont consultables par la population sur le site internet de l'ADEME Buld'Air.

2.3.2 Normes de qualité de l'air

Le décret du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air précise les normes applicables sur les particules polluantes émises dans l'air. Afin de gérer les pics de pollution plus en amont, ce dernier élargit la liste des composés anthropiques étudiés. Il permet également de fixer des seuils de mesure d'informations et d'alerte pour chacune des particules observées.

La liste des polluants observés est composée de polluants primaires tels que le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote, les aérosols de taille supérieure à 2,5 µm (SO₂, NO₂, PM₁₀) et de polluant secondaire tel que l'ozone (O₃). A titre indicatif ces quatre composés sont utilisés pour établir l'indice ATMO.

Depuis cette année, le décret a élargi la liste de composés étudiés en incluant les aérosols de taille inférieure à 2,5 µm (PM_{2,5}). Ce même document a confirmé également les objectifs de qualité de l'air par la mention des polluants tels que l'oxyde de carbone (CO), les métaux lourds (plomb Pb, arsenic As, cadmium Cd, nickel Ni), le benzène (C₆H₆) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Le décret fixe des normes de qualité de l'air pour les composés anthropiques cités précédemment. Pour la plupart d'entre eux, il est ainsi établi quatre niveaux de concentration respectifs dans l'air ambiant: une valeur cible, un seuil d'information et de recommandation, un seuil d'alerte, et une valeur limite. Ces quatre valeurs permettent de fixer respectivement un objectif de qualité, un seuil à partir duquel l'information est donnée au public, un seuil à partir duquel un plan d'alerte est mis en place, et un seuil limite à ne pas dépasser.

Ces seuils sont calculés suivant des modes opératoires différents selon la composition du polluant et sont obtenus par le calcul de moyennes journalières, horaires, et annuelles. Les tableaux suivants sont extraits du tableau de synthèse figurant en **annexe 1**.

Etat de l'art des mesures de pollution et de trafic par capteur laser

	moyenne horaire			*	moyenne journalière									
valeur cible	SO₂	NO₂	O₃	←	PM₁₀	CO	C₆H₆	PM_{2,5}	Pb	As	Cd	Ni	HAP	→
moyenne µg/m ³	50	40	120		30	-	2	20	0,25	0,06	0,05	0,2	0,1	
	← moyenne horaire →				moyenne journalière									
seuil d'information et de recom- mandation	SO₂	NO₂	O₃	←	PM₁₀	CO	C₆H₆	PM_{2,5}	Pb	As	Cd	Ni	HAP	→
moyenne µg/m ³	300	200	180		50	-	-	-	-	-	-	-	-	
	← moyenne horaire →				moyenne journalière									
seuil d'alerte	SO₂	NO₂	O₃	←	PM₁₀	CO	C₆H₆	PM_{2,5}	Pb	As	Cd	Ni	HAP	→
moyenne µg/m ³	500	400	240		80	-	-	-	-	-	-	-	-	
	← moyenne horaire →				moyenne journalière	*	← moyenne annuelle →							
valeur limite	SO₂	NO₂	O₃	←	PM₁₀	CO	C₆H₆	PM_{2,5}	Pb	As	Cd	Ni	HAP	→
moyenne µg/m ³	350	200	-		50	10 000	5	25 **	0,5	-	-	-	-	

* moyenne des maxima journaliers

** objectif fixé pour 2015

Tableau 4 – Normes de la qualité de l'air pour composés polluants anthropiques

3 Mesure de la pollution atmosphérique gazeuse

3.1 Mesure de l'ozone

L'ozone est une espèce courante dans l'atmosphère libre, présent à des concentrations qui varient entre 40 – 50 ppbv en mars/avril et une trentaine de ppbv en juillet. Le minimum d'ozone en juillet provient du fait que, à cette saison, les précurseurs de l'ozone n'atteignent plus l'atmosphère libre car ils sont largement transformés dans les basses couches alors que la destruction photolytique de l'ozone est maximale. Au contraire, dans la basse troposphère en zone continentale, la concentration rurale d'ozone est maximale en été, 50 à 60 ppbv dans l'est de la France et minimale en hiver 10 à 20 ppbv. Dans le panache des sources, et dans certaines conditions en ville (stagnation, recirculation), les concentrations d'ozone peuvent en France atteindre plus de 100 ppbv, et parfois jusqu'à plus de 200. L'ozone réagit rapidement avec le sol, la végétation et les poussières, et est rapidement réduit par NO. En conséquence, la concentration d'ozone est généralement plus faible en centre ville qu'en périphérie. Elle est souvent nulle ou faible la nuit en plaine et pratiquement constante nuit et jour en altitude.

Son dosage correct suppose une implantation du point de mesure dégagé de tout obstacle et un entretien soigné de la ligne de prélèvement.

3.2 Méthodes automatiques

3.2.1 Absorption UV

On utilise l'absorption de O₃ dans l'UV (norme ISO 13964 et NF X 43-024). Comme dans toute méthode spectroscopique, il faut pouvoir s'affranchir des fluctuations d'intensité de la source de lumière et des interférences possibles. La technique standard aujourd'hui est souvent connue sous le nom de DASIBI, du nom de la compagnie qui a commercialisé un instrument longtemps considéré comme une référence.

3.2.2 Sondes électrochimiques et lidars

Pour les mesures d'ozone en ballon sonde, on a développé des sondes électrochimiques qui permettent de mesurer O₃ de façon fiable. Dans la basse atmosphère, leur utilisation est délicate car la vapeur d'eau, facteur à grande variabilité spatiale et temporelle, modifie la réponse du dispositif.

La mesure de l'ozone est un domaine d'application privilégié des techniques lidar.

3.3 Mesure de dioxyde de soufre

3.3.1 Propriétés du dioxyde de soufre

Le dioxyde de soufre SO_2 est un composé gazeux, acide faible, émis dans l'atmosphère lors de la combustion de produits contenant du soufre en plus ou moins grandes proportions : biomasse, pétrole, charbon. Il s'oxyde progressivement dans l'atmosphère et conduit, en présence d'eau, à l'acide sulfurique, responsable majeur de l'acidité atmosphérique et d'irritations respiratoires. SO_2 est un irritant respiratoire mais, aux concentrations atmosphériques usuelles, c'est surtout son dérivé d'oxydation, l'acide sulfurique, qui présente des risques environnementaux. La responsabilité de SO_2 dans la pollution atmosphérique est identifiée depuis plus de 50 ans et il a été mesuré depuis longtemps dans les atmosphères urbaines, par un indicateur indirect, "l'acidité forte". Aujourd'hui, il est mesuré de façon spécifique.

3.3.1.1 Photométrie de flamme (norme NF X 43-020)

Le principe de la méthode consiste à amener les molécules de SO_2 dans une flamme hydrogène air réductrice (brûleur alimenté par un excès d'hydrogène). Dans cette flamme, les réactions conduisent à la formation d'atomes libres de soufre, à la dimérisation et à l'excitation de la molécule de soufre. Le retour à l'état stable est accompagné d'une émission lumineuse centrée sur la longueur d'onde de 394 nm.

Le flux lumineux est proportionnel au carré de la concentration en SO_2 . Un filtre optique centré sur la longueur d'onde de 394 nm permet d'isoler la raie caractéristique du soufre et un tube photomultiplicateur convertit le flux lumineux en signal électrique.

Cette méthode a été utilisée dans les réseaux français de surveillance de la qualité de l'air dans les années 1980-1990 et a été ensuite remplacée par la fluorescence UV.

3.3.1.2 Fluorescence UV (norme NF X 43-019)

Le principe de la mesure repose sur la propriété de fluorescence dans l'ultraviolet de la molécule de SO_2 : celle-ci, préalablement excitée par un rayonnement UV, réémet, lors d'un mécanisme secondaire, une radiation caractéristique en revenant à son état initial. Dans les analyseurs commercialisés, l'échantillon d'air est aspiré dans une chambre de réaction dans laquelle il est irradié par un rayonnement ultraviolet dont la longueur d'onde est comprise entre 210 et 230 nm. La lumière UV de fluorescence, qui est dans la gamme de longueurs d'onde de 240 à 420 nm, est filtrée puis convertie en un signal électrique par un tube photomultiplicateur. Pour les teneurs en SO_2 observées dans l'air ambiant, l'intensité de la radiation de fluorescence est proportionnelle à la concentration en SO_2 .

C'est la méthode qui est actuellement utilisée par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air en France.

3.4 Mesure de monoxyde de carbone

3.4.1 Propriétés du monoxyde de carbone

Les émissions de monoxyde de carbone (CO) proviennent d'une combustion incomplète de matières organiques et, notamment, des combustibles fossiles (gaz, hydrocarbures, charbons). C'est un gaz très toxique d'autant plus dangereux qu'il est inodore. Les concentrations de CO dans l'atmosphère urbaine sont heureusement aujourd'hui très généralement au-dessous des seuils de toxicité aigue mais, même si l'évolution des teneurs est plutôt favorable depuis quelques années, les émissions automobiles sont encore à l'origine d'expositions quelquefois notables dans certains espaces clos (parcs de stationnement souterrains, bureaux en sous-sol...) et au cours des déplacements urbains, plus particulièrement dans les habitacles des véhicules automobiles. CO est ainsi un indicateur de pollution atmosphérique urbaine mesuré de longue date.

3.4.2 Mesure par absorption d'un rayonnement infrarouge

Le principe de la mesure repose sur l'absorption par la molécule de CO du rayonnement infrarouge aux environs de 4,6 μm (infrarouge moyen).

La mesure classique est de type différentiel et met en jeu deux faisceaux de rayonnement infrarouge, l'un de référence, l'autre de mesure. Ces deux faisceaux sont produits par une source unique équipée de 2 miroirs fixes ou d'un miroir tournant.

Le faisceau de référence traverse une cellule remplie d'un gaz neutre (azote, par exemple) où le rayonnement infrarouge n'est pas absorbé. L'autre faisceau traverse une cellule identique où circule l'air contenant le CO et où il est donc partiellement absorbé.

La spécificité est assurée par le détecteur constitué de 2 cellules contenant du CO pur soumises respectivement aux rayonnements des faisceaux de référence et de mesure. Les rayonnements des 2 faisceaux provoquent des accroissements de température différents selon qu'il s'agit du faisceau de référence ou de mesure. Cette différence est ensuite mesurée par un thermocouple ou par l'intermédiaire de la différence de pression résultante, soit grâce à un microdébitmètre soit grâce à une membrane qui joue le rôle de plaque de condensateur par rapport à une plaque fixe. Du fait de ce principe, la ligne de base des appareils est souvent sensible aux fluctuations de température. Les normes françaises NF X 43-012 (juillet 1974) et NF X 20-301 (janvier 1978) fixent les méthodes de dosage pour les prélèvements continus avec analyseur sur site et lorsque l'analyseur n'est pas au point de prélèvement.

3.5 Mesure des hydrocarbures volatils

3.5.1 Propriétés des hydrocarbures volatils

Les hydrocarbures volatils constituent une fraction essentielle des composés organiques volatils (COV) contenus dans l'air ambiant, ils peuvent être de structure linéaire, ramifiée, ou cyclique, saturés (alcalines, cycloalcanes) ou insaturés (aromatiques, alcènes, acéthyléniques, diènes...). Les espèces qui contiennent de 1 à environ 12 atomes de carbone sont présentes à l'état de gaz ou de vapeur. Au-delà de 12 atomes de carbone, les hydrocarbures sont principalement associés aux particules en suspension dans l'air ambiant. Dans les pays industrialisés, la combustion des fuels, les émissions de gaz naturel, les installations industrielles et chimiques, les émissions par les décharges et résidus constituent les principales sources anthropiques.

A l'échelle nationale, les émissions imputables aux activités humaines sont principalement dues au transport routier. Dans les agglomérations urbaines, les véhicules à essence sont les principaux émetteurs d'hydrocarbures (gaz d'échappement, évaporation des réservoirs et des organes de distribution du carburant). Les émissions par évaporation aux différentes étapes de la production, du stockage et de la distribution des produits pétroliers, ainsi que l'usage des solvants, sont aussi des sources importantes d'hydrocarbures.

L'élimination des hydrocarbures de l'atmosphère s'effectue le jour, principalement par les radicaux OH et l'ozone (alcènes), et la nuit par les radicaux nitrates. Les hydrocarbures ont une durée de vie qui s'échelonne, dans une plage très large, entre quelques heures et quelques mois. La plupart des composés à structure insaturée sont généralement plus réactifs que les paraffines. De ce fait, la distribution des hydrocarbures varie sensiblement selon le domaine étudié : rural, périurbain ou urbain.

Dans les agglomérations urbanisées, les principaux hydrocarbures aromatiques sont le toluène, les xylènes et le benzène : ils sont générés par la circulation automobile. L'échelle des teneurs est de l'ordre de 0,1 à 100 ppbv.

3.5.2 Propriétés des hydrocarbures aromatiques polycycliques

Les HAP sont des composés gazeux ou particuliers présentant de 3 à 10 cycles aromatiques, accolés les uns aux autres, à l'exception du naphthalène qui ne comporte que deux cycles et qui possède des propriétés particulières.

En atmosphère polluée, les HAP sont majoritairement présents (plus de 90 %) sur des particules submicroniques ($< 0,7 \mu\text{m}$) qui pénètrent profondément dans les poumons. En atmosphère de fond (océanique ou polaire), ils présentent souvent une distribution granulométrique bimodale avec un maximum centré vers $0,3 \mu\text{m}$ et l'autre vers $3 \mu\text{m}$. Cette bimodalité montre que les HAP se transportent sur de très longues distances. Le mode fin est associé à des sources assez proches, tandis que le mode grossier est associé à des sources souvent distantes de plus de 1 000 km. Tous les milieux de l'environnement sont pollués par les HAP : atmosphère, sols, sédiments, eaux de rivière, océans et glaces polaires. Les animaux

marins contiennent des concentrations importantes de HAP dans leurs tissus ; c'est le cas notamment des moules et des crustacés.

3.5.3 Détection

La détermination des concentrations des HAP est effectuée par une mesure du rayonnement de fluorescence émis par chaque HAP. En effet, tous les HAP sont fluorescents entre 260 et 450 nm, mais le maximum d'émission est différent pour chaque HAP. On peut le déterminer par enregistrement du spectre UV. On obtient les meilleurs résultats, c'est-à-dire un bon compromis entre la sélectivité et la sensibilité, en modifiant le couple de longueurs d'onde (longueur d'excitation λ_{exc} et longueur d'onde d'émission λ_{em} (on rappelle que $\lambda_{em} > \lambda_{exc}$). Pour cela, il faut disposer d'un fluorimètre possédant deux réseaux réglables indépendamment et permettant de changer rapidement l'une ou/et l'autre longueur d'onde. Il n'est pas utile de changer ce couple pour chaque HAP. Avec les couples de longueurs d'ondes suivants, on peut obtenir une très bonne sensibilité : $\lambda_{exc}/\lambda_{em} = 240/300$; $290/340$; $300/430$ et $360/510$ nm.

4 Caractéristiques du lidar

La télédétection par laser, notamment pour la mesure à distance des propriétés de l'atmosphère est un domaine de recherche actif et qui connaît un développement significatif en fonction des besoins croissants de contrôle et mesure pour l'environnement. On présentera dans ce condensé quelques techniques et applications des lidar. La première partie est consacrée à l'exposé des principes et des modes de fonctionnement essentiels des lidar. La deuxième partie décrit un exemple d'instrument destiné à la télédétection de produits toxiques. La troisième partie aborde le thème important du contrôle des pollutions atmosphériques.

4.1 Principe du lidar

Le principe utilisé est voisin de celui du radar, d'où le nom de Lidar (LIght Detection And Ranging) qui s'applique à la fois à l'instrument et à la méthode de télédétection correspondante [2]. Il s'agit d'une technique optique active de mesure à distance, par opposition aux techniques passives de télédétection d'une source de rayonnement naturel. Grâce à l'exploitation des propriétés de cohérence spatiale et temporelle spécifiques des sources laser, le lidar se différencie aussi des autres instruments de mesure à distance utilisant une source de lumière conventionnelle.

Un lidar comporte toujours un émetteur et un récepteur (**figure 5**). La source est un laser, généralement impulsionnel, émettant dans un domaine de transparence de l'atmosphère soit, typiquement, entre 0,3 et 10 μm .

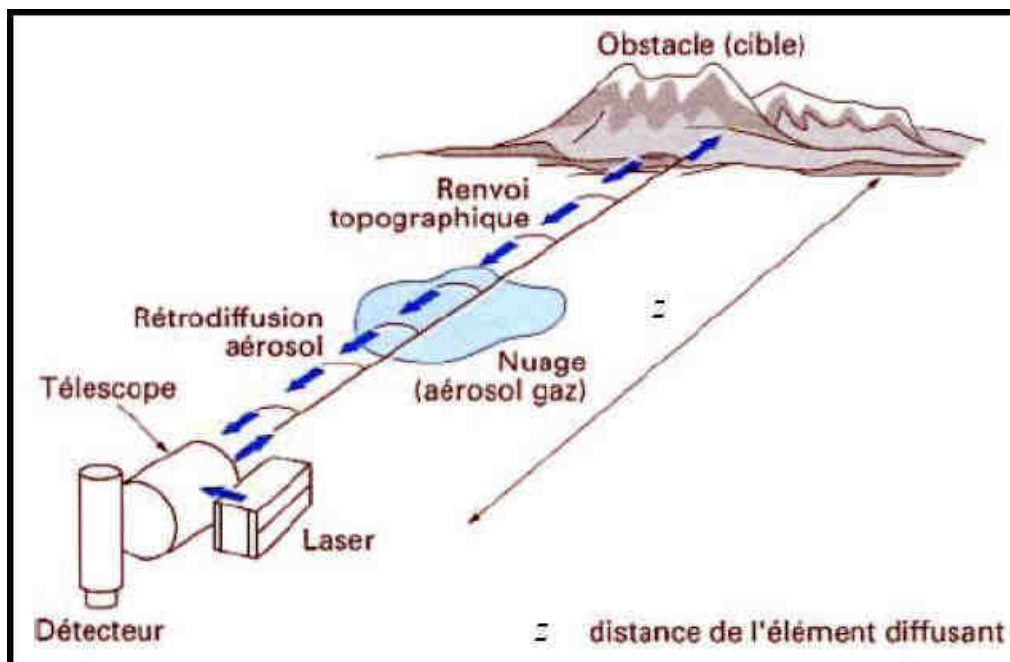


Figure 5 - Principe du lidar atmosphérique [2]

La propagation de l'impulsion laser dans l'atmosphère est suivie de la réception d'une fraction du rayonnement réémis :

- Soit par un obstacle ou une cible (lidar topographique)
- Soit par rétrodiffusion sur les constituants de l'atmosphère : molécules, aérosols, poussières (lidar atmosphérique).

Le lidar exploite les propriétés de l'interaction entre le rayonnement laser et les constituants de l'atmosphère. Les différents processus d'interaction tels que diffusion, absorption, voire fluorescence, vont conditionner les caractéristiques spectrales et d'intensité du rayonnement mesuré par le dispositif de réception (téléscope et détecteurs appropriés).

Le lidar fournit ainsi des informations sur la composition et la concentration des différents constituants de l'atmosphère en fonction des processus d'interaction sélectionnés. Les trois principaux phénomènes de diffusion mis en jeu dans un lidar sont présentés dans le **tableau 5**, qui fournit l'ordre de grandeur des sections efficaces correspondantes.

Processus	Caractéristiques	Section efficace de diffusion σ [cm ² / sr]
Diffusion élastique : • Mie • Rayleigh	λ émission = λ réception aérosols, poussières, atomes et molécules	10^{-10} 10^{-26}
Fluorescence	λ émission \neq λ réception atomes et molécules	10^{-24}
Diffusion Raman	λ émission \neq λ réception molécules	10^{-29}

Tableau 5 - Principaux phénomènes de diffusion dans un lidar

Equation lidar

L'expression de la distribution verticale du signal lidar rétrodiffusé est donnée par l'équation suivante pour un faisceau laser de longueur d'onde donné :

$$P(z) = K F_0 \beta(z) \frac{A}{z^2} \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz'\right]$$

- K est une constante instrumentale, prenant en compte les éléments optiques et électroniques qui composent la chaîne de traitement de l'énergie lumineuse rétrodiffusée ;
- F_0 représente l'énergie initiale du faisceau (en J.s⁻¹);
- A est l'aire du récepteur en m²;
- $\alpha(z)$ représente le coefficient d'extinction total (absorption+atténuation) à l'altitude z en m⁻¹;
- $\beta(z)$ représente le coefficient de rétrodiffusion à l'altitude z en m⁻¹sr⁻¹.

P a la dimension d'une puissance (J.s⁻¹ ou W).

4.2 Principaux modes de fonctionnement

Cette présentation générale permet de mettre en évidence plusieurs modes essentiels d'application du lidar.

4.2.1 Lidar rétrodiffusion

Dans ce cas, le facteur important est le coefficient de rétrodiffusion qui contient des informations sur la densité des éléments diffusants. Une version désormais répandue (lidar de Mie), utilisant une source laser Nd :YAG émettant à $1,064 \mu\text{m}$, permet de localiser et de mesurer la concentration des couches nuageuses ou de particules dispersées dans l'atmosphère (panaches de fumées, éruptions volcaniques ...).

D'autres versions plus élaborées ont aussi été développées :

- Le lidar Rayleigh pour mesurer la densité de l'atmosphère stratosphérique et permettant un calcul de profil de température.
- Le lidar Raman pour la mesure de la concentration d'un gaz particulier caractérisé par un décalage spectral donné entre émission et réception.

4.2.2 Lidar à absorption différentielle ou lidar DIAL

Dans ce cas, c'est le coefficient d'absorption atmosphérique α qui est le facteur intéressant. Ce coefficient varie avec la longueur d'onde selon les propriétés spectrales d'absorption de la substance chimique à détecter, sous forme d'aérosol ou de vapeur.

Le lidar DIAL utilise au moins deux longueurs d'ondes émises par la source laser : l'une située dans une bande d'absorption (λ_a) et l'autre non absorbée servant de référence (λ_0). Ce principe est illustré par la **figure 6**.

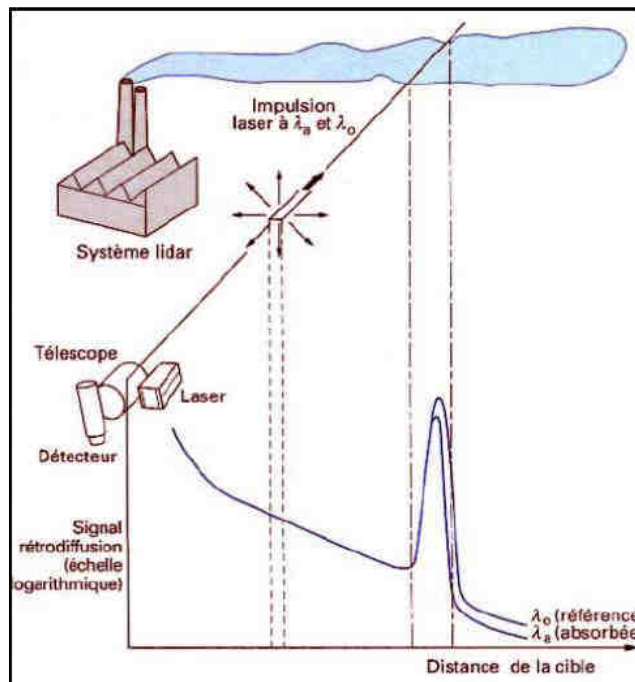


Figure 6 - Principe du lidar DIAL

La comparaison des signaux rétrodiffusés à une distance « z » pour chacune des deux longueurs d'ondes (émises quasi simultanément) fournit une information quantitative sur la concentration de la substance chimique dans la zone sondée par le faisceau laser. La méthode DIAL (Differential Absorption Lidar) est désormais largement exploitée pour la mesure de constituants à l'état de traces dans l'atmosphère et qui sont d'un grand intérêt pour l'environnement. C'est le cas des lidar DIAL pour le sondage de O₃ ou SO₂, qui utilisent des lasers émettant dans l'UV comme :

- Le laser à excimère XeCl à 308 nm
- Le laser Nd :YAG triplé (355 nm) ou quadruplé (266 nm) ainsi que d'autres transpositions de fréquences laser adéquates.

Ce type de lidar est devenu un instrument de mesure de l'atmosphère troposphérique et stratosphérique essentiel pour l'étude et le contrôle systématique de l'environnement. Il fournit la localisation spatiale des constituants, la mesure de leur concentration et un suivi à long terme des variations de ces grandeurs.

4.2.3 Lidar Doppler cohérent

Enfin, il faut mentionner un autre mode de fonctionnement important des lidar qui fait appel à la cohérence temporelle des sources laser (contrairement aux lidar incohérents décrits précédemment). Dans ce cas, on utilise une source laser monomode et stabilisée en fréquence. Le signal détecté est fourni par un interféromètre qui effectue le mélange cohérent entre l'amplitude du faisceau rétrodiffusé à distance et une petite fraction du faisceau laser émis. Cette technique, analogue à certaines techniques radar, est sensible au déplacement de fréquence par l'effet Doppler lié au mouvement des particules diffusantes : on obtient ainsi un instrument de mesure du vent ou un anémomètre.

Dans ce cas, on utilise le plus souvent des lasers CO₂ émettant vers 10 µm qui procurent la stabilité de fréquence et la puissance nécessaire dans un domaine de transparence atmosphérique infrarouge.

4.2.4 Intérêts et avantages du lidar

Le premier avantage du lidar est lié à la cohérence spatiale des lasers : la faible divergence et la brillance de ces sources permettent un sondage dans toutes les directions avec une excellente résolution spatiale et une bonne élimination du fond continu. On peut ainsi effectuer certaines mesures en plein jour ou dans de mauvaises conditions atmosphériques au moins pour des portées de l'ordre de 1 km (considérées comme modestes pour un lidar). Les techniques de mesure de temps de vol de l'impulsion laser conduisent à des mesures de distances très précises. Il est donc possible d'obtenir une cartographie 3D de paramètres atmosphériques « en temps réel » grâce à un seul instrument lidar bien équipé de moyens informatiques de traitement, stockage et présentation des données.

De même, un autre atout des lidar (associés aux outils informatiques) est la possibilité de mesurer en continu, qui autorise le contrôle des variations d'une grandeur mesurée et la surveillance d'un site étendu.

Un deuxième avantage essentiel des lidar tient à la multiplicité des possibilités de mesure offertes par les différentes techniques ou modes de fonctionnement précédemment décrits. Les lidar permettent des mesures atmosphériques de densités, de température, de vitesse de vents, ... Les qualités spectrales des sources lasers, y compris leur accordabilité, conduisent à des mesures spectroscopiques de haute résolution à distance et donc à la télédétection de

nombreuses substances chimiques, dans l'atmosphère troposphérique comme stratosphérique. Pour ces diverses raisons, les lidar deviennent des instruments importants répondant aussi bien à des objectifs scientifiques de connaissance de l'atmosphère qu'à des besoins de mesure et de contrôle de l'environnement. D'où la multiplication de réalisations et de projets de lidar, depuis les lidar au sol portables et mobiles, jusqu'aux instruments embarqués sur avion ou sur satellite.

4.3 Lidar atmosphériques pour les besoins de l'environnement

4.3.1 Besoins

Le contrôle des pollutions atmosphériques, notamment d'origine industrielle, suscite un besoin croissant d'instruments de mesure qui n'est que partiellement satisfait par les moyens de mesure optiques et non optiques existants.

Dans ce contexte, les techniques lidar, en particulier des lidar-DIAL, présentent des avantages uniques qui justifient les développements actuels :

- Capacité de détection multipolluant à l'état de traces, associée à leur localisation précise (3D) jusqu'à quelques kilomètres de distance
- Mesures quasi instantanées, en temps réel et hors de la zone de risque.

Les avantages des lidar peuvent être mis à profit dans une gamme d'applications répondant à des besoins importants pour l'environnement :

- Surveillance globale des sites industriels complexes par instrument unique
- Contrôle de sites de stockage contenant des produits dangereux
- Détection et localisation de fuites et d'émissions diffuses (zones industrielles, décharges, pipelines,...)
- Détection avec réponse rapide en cas d'accident et assistance en situation de crise
- Contrôle en continu des émissions en liaison avec les dispositions légales et normes de pollution

4.3.2 Objectifs

Il s'agit de développer des solutions répondant à un ensemble d'exigences en matière de :

- Performances
- Fonctionnalité
- Fiabilité
- Coût

Les besoins prioritaires concernent la mesure de polluants atmosphériques tels que les composés organiques volatiles (COV) les composants organochlorés, les substances toxiques ou soumises à contrôle des émissions.

Plusieurs conditions doivent être satisfaites :

- Sécurité (dont la sécurité oculaire)
- Simplicité d'exploitation et de mise en oeuvre
- Fiabilité élevée et maintenance réduite
- Fonctionnalité, autant que possible, dans toutes les conditions atmosphériques

En vue de ces objectifs, les principales limitations antérieures des lidar ont été liées à la complexité de ces instruments pour l'utilisateur, ainsi qu'à leur niveau de coût et de fiabilité. Les contraintes de coût et de fiabilité dépendent tout particulièrement des performances demandées à l'émetteur laser (puissance émise, cadence, caractéristiques spectrales,...). Des choix réalistes et des solutions nouvelles peuvent désormais être proposés, y compris pour les sources laser.

L'examen de la **figure 7** permet de sélectionner les longueurs d'onde adéquates.

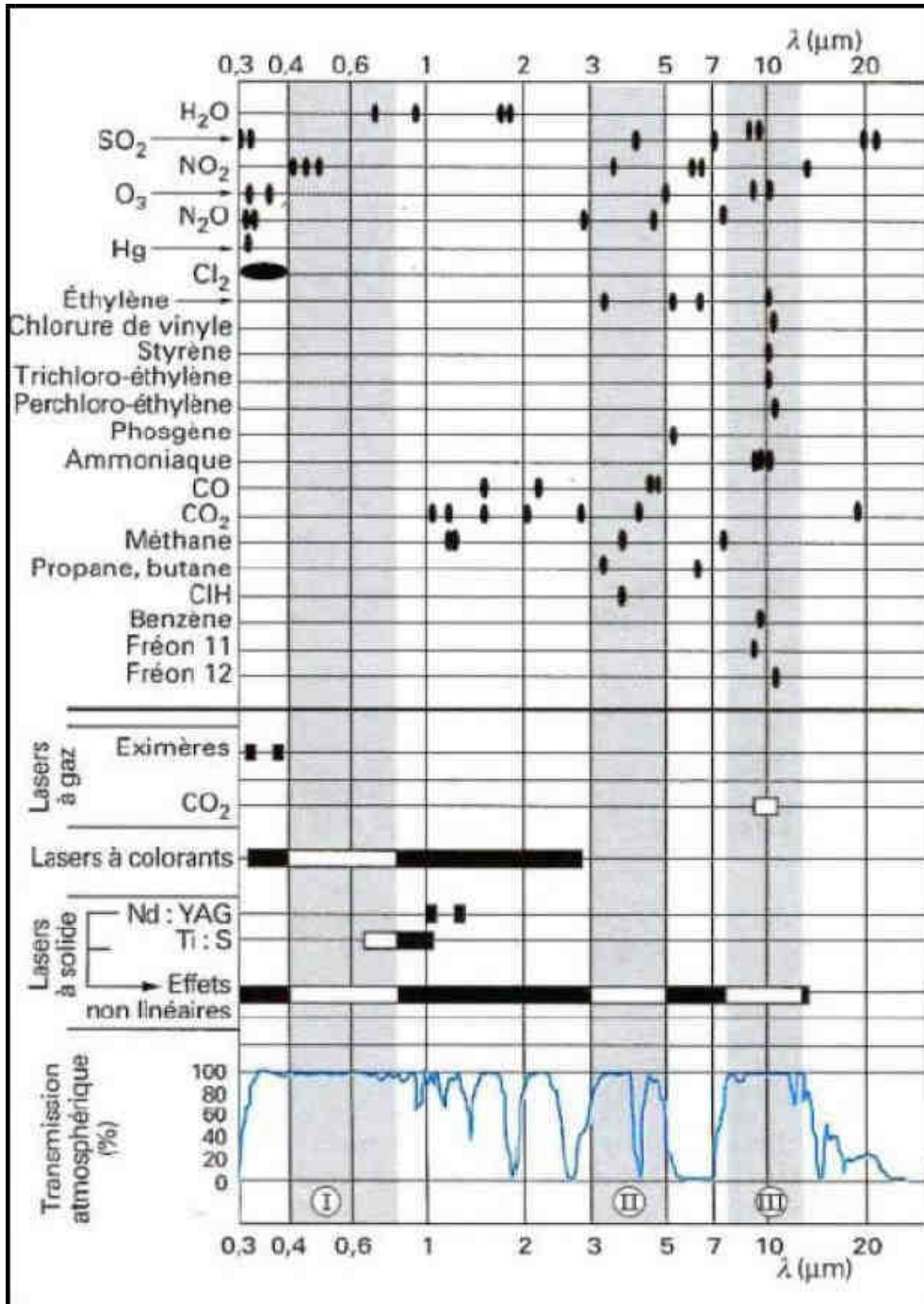


Figure 7 - Lidar pour la détection de polluants : objectifs, sources, laser, longueur d'onde

4.3.2.1 Choix de la longueur d'onde

La plupart des substances chimiques à détecter présentent des raies d'absorption dans le domaine infrarouge, notamment pour les COV, dans les régions spectrales de 3 à 5 μm et de 8 à 12 μm . De nombreux travaux de spectroscopie laser ont déjà été réalisés dans ce domaine pour diverses substances chimiques.

Les conditions de transparence atmosphériques et, simultanément, de sécurité oculaire conduisent d'ailleurs à privilégier les deux régions déjà citées :

- Fenêtre II : de 3 à 5 μm (sauf autour de 4,3 μm)
- Fenêtre III : de 8 à 12 μm et, dans une moindre mesure, la région 1,5 à 1,9 μm

4.3.2.2 Choix des sources laser

La **figure 7** présente schématiquement les longueurs d'onde des différents types de sources laser utilisées dans les lidar.

Les sources laser accordables dans les fenêtres infrarouges précédentes sont les plus intéressantes pour les lidar DIAL de mesure des pollutions atmosphériques.

Lasers à colorants

L'accordabilité est excellente mais leur fonctionnement, d'une fiabilité médiocre, est relativement limité au proche IR.

Lasers à CO₂

Plusieurs dizaines de raies sont disponibles, mais dans la région restreinte 9 à 11 μm . Les lasers à CO₂ ont été largement utilisés dans les lidar. Leur intérêt persiste pour des sources scellées et à faible puissance dont le coût et la fiabilité peuvent être attractifs.

Lasers à solides

Les progrès récents en matière d'accordabilité des lasers à solides ouvrent des possibilités essentielles pour le développement des lidar :

- Nouveaux matériaux solides accordables, dont le saphir dopé titane (700 à 950 nm)
- Oscillateurs paramétriques optiques (OPO)

A partir d'un laser Nd :YAG doublé en fréquence et d'un OPO à cristal BBO (Beta Barium Borate : $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$), on peut obtenir une source accordable couvrant le visible et l'infrarouge jusqu'à 3 ou 4 μm environ (produit commercial)

- Les méthodes de mélange de fréquences (somme et différence de fréquences) dans les cristaux non linéaires permettent de multiples combinaisons de diverses sources laser solides conduisant à l'accordabilité désirée dans l'IR

Par exemple, la différence de fréquence entre un laser Nd :YAG (1,064 μm) et un laser saphir dopé titane produit une émission entre 3 et 5 μm

Diodes laser

L'utilisation des diodes laser est également une solution d'avenir. Par exemple : lasers à semi-conducteurs dans le proche infrarouge jusqu'à 1,5 μm (cas du CH₄ à 1,66 μm) et diodes laser à sels de plomb vers 3 μm .

Malgré leur faible puissance et leur accordabilité limitée, les diodes laser ont des avantages considérables en matière de fiabilité, de compacité et de coût pour des systèmes de télédétection à courte distance.

4.3.3 Perspectives

Les lidar sont des instruments exploités depuis longtemps pour des applications à caractère scientifique.

Les préoccupations liées à l'environnement justifient un besoin de nouveaux outils de contrôle des pollutions atmosphériques, notamment d'origine industrielle.

Les avantages de la télédétection laser, en particulier les lidar DIAL dans l'IR, peuvent être mis à profit dans ce domaine sous réserve de satisfaire quelques exigences qui ont été exprimées.

Le concept système doit notamment évoluer selon les orientations suivantes :

- Choix d'un concept réaliste pour augmenter la fiabilité et diminuer le coût, par exemple : portées réduites, laser de plus faible puissance
- Système compact, transportable et facile d'emploi

4.4 Quelques exemples de lidar

4.4.1 Le système lidar : Mirela

4.4.1.1 Objectifs

Les principes précédents sont bien illustrés par le lidar Mirela destiné à l'identification et la mesure de substances toxiques. Le développement de cet instrument est réalisé par LASERDOT (groupe aérospatial). Il s'agit de détecter des toxiques dispersés dans l'atmosphère, sur des distances de quelques kilomètres :

- *Sous forme de vapeur* : les quantités sont mesurées par la méthode DIAL, en utilisant le signal rétrodiffusé soit par des particules atmosphériques, soit par une cible fixe
- *Sous forme d'aérosol (liquide)* : par la détermination du spectre de rétrodiffusion qui est spécifique de la nature chimique de l'aérosol considéré. Cette technique dénommée DISC (Differential Scattering) est analogue à la technique DIAL.

Les multiples capacités de ce lidar : DIAL-DISC, atmosphérique et topographique, conditionnent les choix techniques essentiels de l'instrument et notamment :

- La sélection du domaine spectral IR de 9 à 11 μm , bien adapté en termes de transparence atmosphérique, rétrodiffusion des aérosols et sécurité oculaire.
- L'utilisation d'une source laser agile en fréquence, capable d'émettre plusieurs dizaines de raies dans cette gamme (la fréquence de la source peut être balayée sur toute la largeur inhomogène de la transition excitée. La vitesse de balayage peut être de l'ordre du GHz/ μs . On ne parle plus d'accordabilité, mais d'agilité en fréquence).
- Une chaîne de détection de très grande dynamique
- Des moyens de traitement du signal adaptés à la quantité d'informations fournies.

Par ailleurs, la conception générale de type modulaire est guidée par des contraintes opérationnelles :

- Dispositif transportable
- Montage, réglage, mise en oeuvre rapide sur le terrain

4.4.1.2 Description

La maquette opérationnelle Mirela, répondant à ces objectifs, comporte plusieurs modules représentés sur le schéma synoptique de la figure suivante.

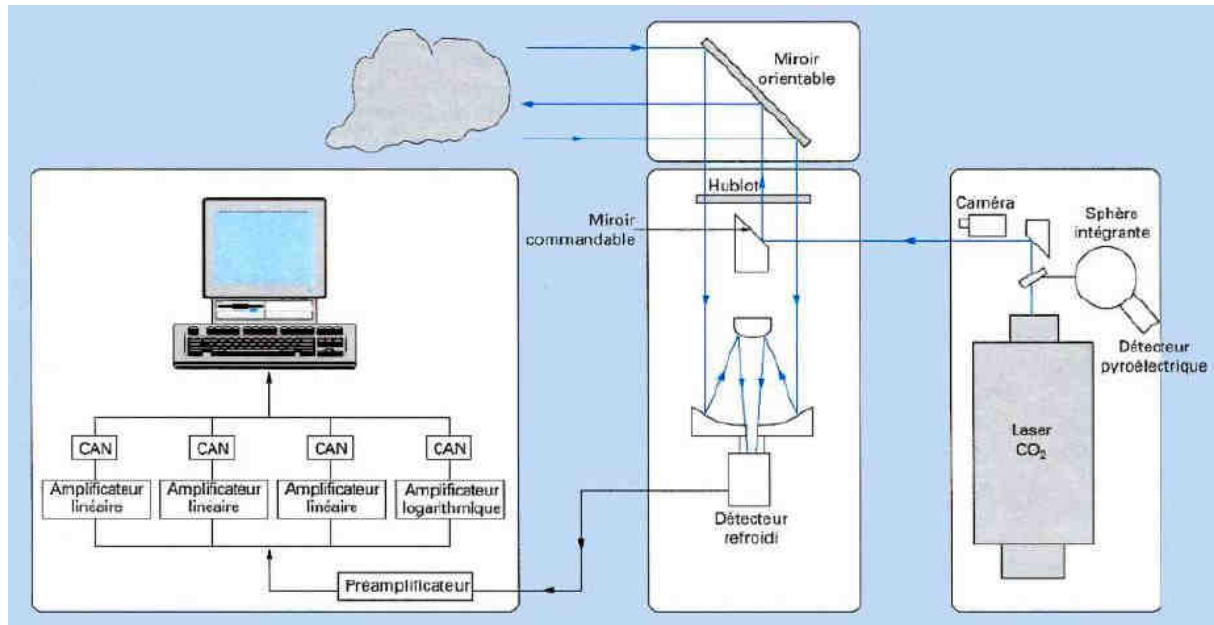


Figure 8 - Schéma de principe de Mirela

Module d'émission

L'émetteur est un laser CO₂ impulsionnel accordable et à grande cadence de répétition :

- Accordabilité : 9,2 à 10,8 μm par réseau et miroir galvanométrique
- Impulsions : 100 mJ à la cadence de 100 Hz
- Durée d'impulsion : < 200 ns

Ce laser est capable d'émettre une séquence quelconque de raies présélectionnées en fonction de la substance chimique à détecter. La puissance du laser est contrôlée par un détecteur pyroélectrique.

Module de réception

Un télescope de 300 mm de diamètre ouvert à F/2,5 et un concentrateur ont été choisis pour minimiser l'encombrement.

Dans ce domaine de longueur d'onde, on utilise un photodétecteur HgCdTe refroidi à 77 K. La détectivité spécifique permet d'obtenir une puissance équivalente au bruit de 10^{-8} W. Le balayage des différentes directions d'observation est réalisé par un miroir plan mobile coiffant le télescope. La tourelle support du miroir plan permet une précision de pointage de 3 mrad, des mouvements de 360° en azimut et 80° en site.

Electronique de détection et traitement du signal

Compte tenu des divers types de mesures, des différentes distances d'observation et des conditions atmosphériques, la dynamique des signaux optiques reçus est de $3 \cdot 10^4$. Ceci conduit à réaliser une chaîne électronique de détection originale ayant une linéarité de l'ordre de 90 dB.

Dans ce but, le signal est transmis en parallèle à deux amplificateurs distincts :

- Un amplificateur logarithmique qui transpose tous les signaux avec une dynamique restreinte compatible d'une numérisation sur 8 bits
- Une série d'amplificateurs linéaires qui fournissent la précision de mesure nécessaire
- Les opérations de prétraitement du signal sont effectuées par un ordinateur spécialisé.

Seule les informations utiles sont transmises à un ordinateur périphérique accessible à l'opérateur. Ce terminal est également utilisé pour effectuer les choix de configuration du laser (séquence des longueurs d'ondes émises) et piloter la tourelle.

Présentation des données

La figure suivante fournit un exemple de visualisation d'un résultat obtenu par rétrodiffusion sur un aérosol (DISC) :

- Le graphe (a) fait apparaître la variation du signal avec la distance (à une longueur d'onde donnée). Cette mesure de temps de vol de l'impulsion laser caractérise la distance du nuage, de l'ordre de 1,2 km.
- Le graphe (b) décrit la variation spectrale du signal rétrodiffusé pour plusieurs longueurs d'onde présélectionnées du laser CO₂ (ici 14 valeurs).

Cette réponse spectrale est spécifique du produit détecté et distincte de celle des interférents habituels, comme l'eau. On peut ainsi identifier une substance connue dont le spectre est gardé en mémoire. Un ordre de grandeur de la concentration du produit est également déduit de la réponse spectrale.

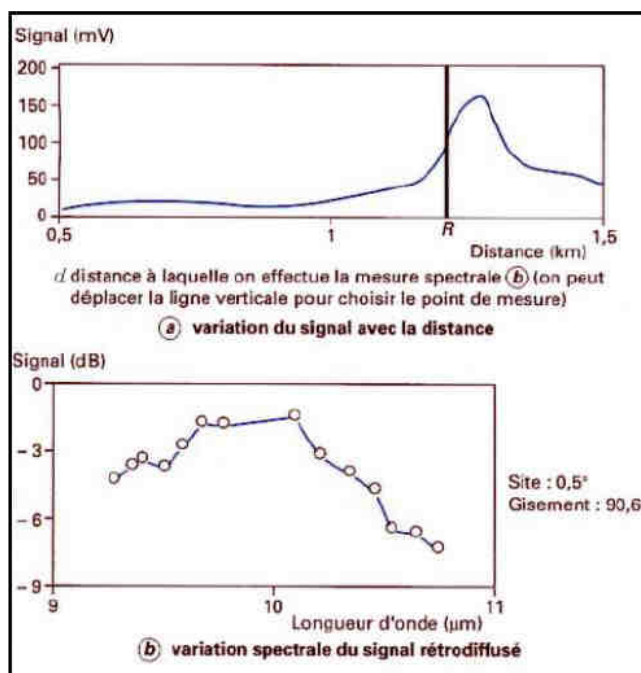


Figure 9 - Lidar DISC, rétrodiffusion sur un aérosol

4.4.2 Le Lidar de COPARLY

Le réseau de surveillance de la qualité de l'air COPARLY (Comité pour le contrôle de la Pollution Atmosphérique dans le Rhône et la région Lyonnaise), association régie par la loi de 1901, possède depuis le 1er Mars 1999 un laboratoire mobile construit par la société Elight laser Systems GmbH. Il s'agit d'une société allemande spécialisée dans la création de Laser accordables Ti :Saphir ainsi que de LIDAR DIAL.

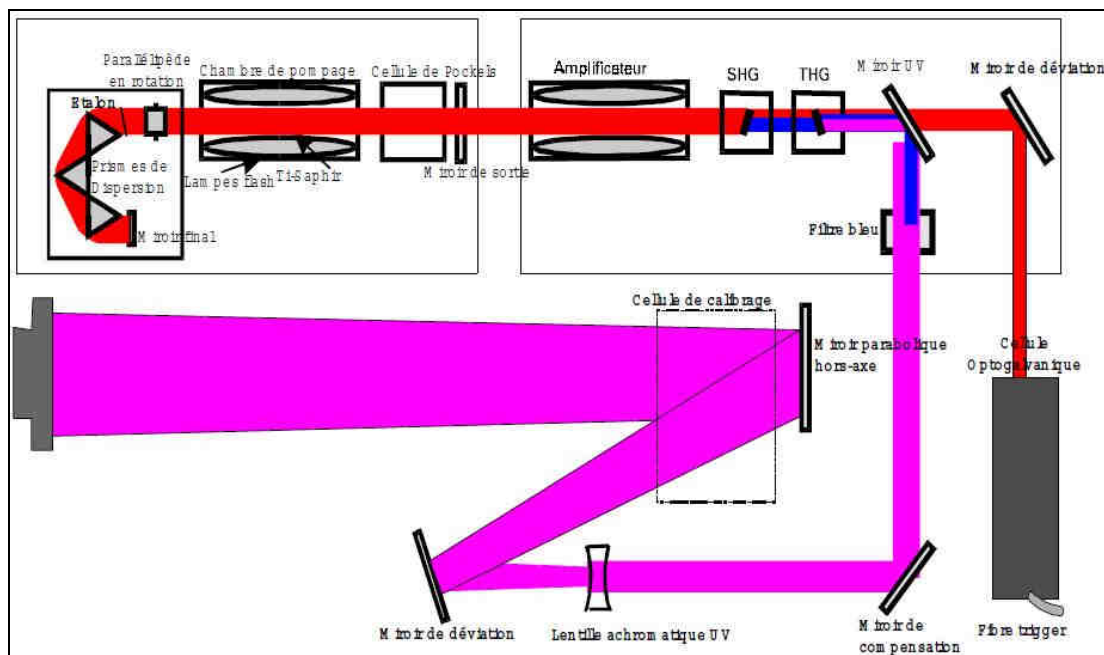


Figure 10 - Schéma de la partie émission d'un lidar dial elight 510M

Polluants mesurés et sensibilité (données fournies par le constructeur) :

Polluant	λ_{on} (nm)	λ_{off} (nm)	$\Delta\sigma^*$	énergie (mJ)	Sensibilité ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)**	Portée moyenne (km)***	Portée maximale (km)***
SO ₂	286.9	286.3	3.83	5	8	2.5	4
O ₃	282.4	286.3	9.92	5	2	2	4
NO ₂	398.3	397.2	1.15	25	18	3	5
Toluène	266.9	266.1	10.97	7	10	1.5	4
Benzène	259.2	257.9	16.55	7	10	1.5	4
Aérosols	397.5	397.5	0	25	0.05 km ⁻¹	2	5

Tableau 6 - Polluants mesurés et sensibilité

Tableau donné dans les conditions SDTP : 273,15°K et 101 325 Pa

(*) : Fourni à partir des analyses spectrales à une température donnée, elle est exprimée en 10-19.cm²

(**) : la sensibilité exprime la limite de détection, conformément à la norme VDI DIN 4210

(intégration spatiale sur 1000 mètres et intégration temporelle sur 15 minutes).

(***) : Déterminées lors des évaluations LIDAR, suivant la norme X20-300 appliquée aux instruments à long trajet optiques.

Type de LIDAR	DIAL (lidar à absorption différentielle)
Polluants détectés	SO ₂ , O ₃ , NO ₂ , Toluène, Benzène (µg/m ³ km) Aérosols (extinction)
Limite de détection conventionnelle (intégration sur 1km, selon VDI-DIN 4210)	SO ₂ : 8 µg/m ³ .km NO ₂ : 20 µg/m ³ .km Ozone 2 µg/m ³ .km Toluène: 10 µg/m ³ .km Benzène: 10 µg/m ³ .km Aérosols: 0.05 km ⁻¹
Portée conventionnelle (selon VDI-DIN 4210)	SO ₂ : 2200 m NO ₂ : 2500 m Ozone: 2100 m Toluène: 1700 m Benzène: 1600 m Aérosols: 3000 m
Point Opérateur de début de mesure	250 m
Résolution spatiale maxi	7.5 m
Résolution temporelle	La résolution temporelle est limitée par la précision désirée sur la mesure brute et par la limite de détection. Typiquement, les intervalles de temps entre chaque mesure se situent entre une minute et une heure. Lors d'un balayage, le temps de mesure dépend, en outre, du nombre d'angles de mesure (permettant d'obtenir ainsi une résolution angulaire plus ou moins précise). Un balayage de 90° dure environ 15 minutes. La norme VDI-DIN 4210 préconise des temps d'intégration caractéristiques : 1min et 15min. Les limites de détection ci-dessus sont données avec un temps d'intégration équivalent à 15min.

Tableau 7 - Caractéristiques du lidar elight 510M

4.4.3 Le système Lidar IGN-SA

Le Lidar IGN-SA [3] se compose :

- d'un laser de type Yag dont le faisceau émis, après passage dans des multiplicateurs, a une longueur d'onde de 355 nm,
- d'un télescope de type Cassegrain, de 30 cm de diamètre qui recueille les photons rétrodiffusés,
d'un canal externe, chargé de mesurer les signaux diffusés (Rayleigh-Mie) sans l'effet du système optique de réception,
- d'un boîtier d'acquisition qui filtre le signal reçu puis compte les photons récoltés, d'une chaîne informatique qui échantillonne et stocke les données, d'une chaîne de traitement.

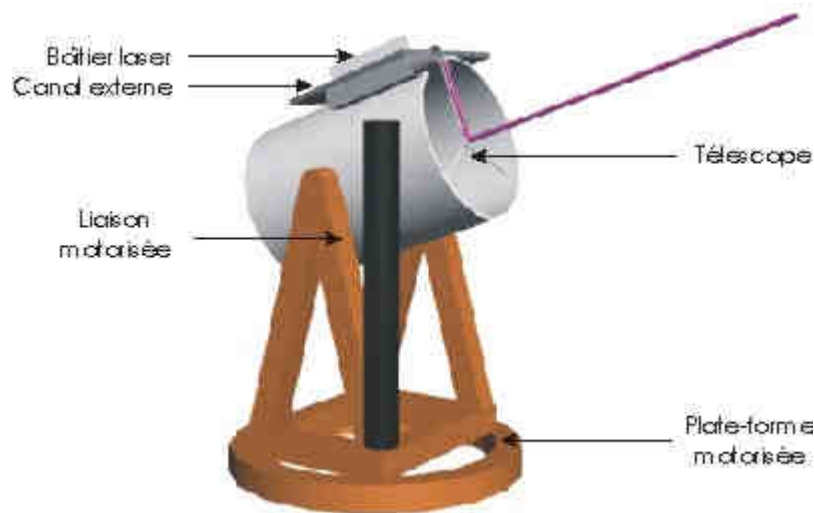


Figure 11 - Le Lidar IGN-SA

Principe de la mesure Lidar

Lors de la propagation de l'onde émise par le Lidar, on peut envisager deux types de diffusions par les composants rencontrés :

- Une diffusion élastique qui se produit sans échange d'énergie entre les photons incidents et la molécule rencontrée. Le photon est alors diffusé sans changement de fréquence. C'est le cas de la diffusion de Rayleigh (lorsque la taille du diffuseur est largement inférieure à la longueur d'onde utilisée) ou de celle de Mie (lorsque la taille du diffuseur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde utilisée).
- Une diffusion inélastique, beaucoup plus faible, appelée aussi diffusion Raman. Celle-ci est à l'origine d'un décalage de la fréquence de l'onde incidente. Les photons sont alors diffusés selon 2 fréquences : $\mu_0 + \mu_r$ (décalage vers les hautes fréquences - correspond aux raies anti-Stockes) et $\mu_0 - \mu_r$ (décalage vers les basses fréquences - correspond aux raies Stockes). Ce décalage de fréquence est caractéristique de la molécule rencontrée et permet donc de la discriminer.

Le Lidar IGN-SA fonctionne en mode Raman (2 canaux « internes »). Il peut fonctionner également en mode Rayleigh-Mie (un canal externe, fixé au télescope, et un « interne ») mais ce mode de fonctionnement n'est pas pleinement exploité actuellement. On s'intéresse aux photons récoltés pour les longueurs d'ondes $\lambda = 408$ nm (vapeur d'eau) et $\lambda = 387$ nm (azote, le rapport de mélange de l'azote dans l'air étant constant, on peut se limiter à sa mesure).

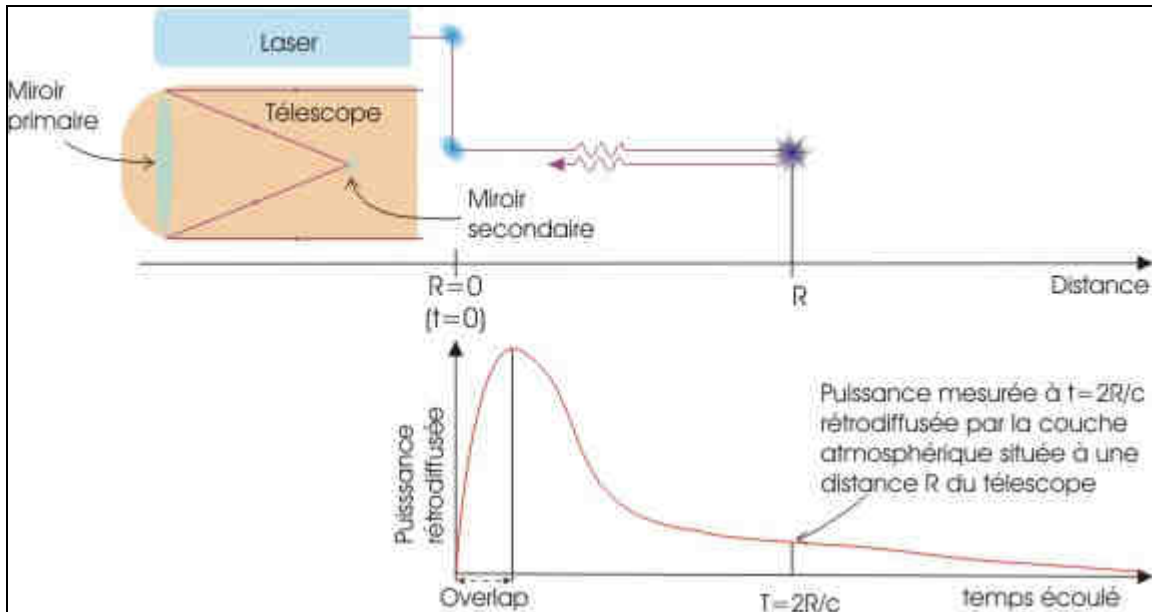


Figure 12 - Principe de la mesure Lidar

Le signal rencontrant les molécules de vapeur d'eau ou d'azote va être rétrodiffusé à leurs longueurs d'onde Raman respectives. Le télescope va alors récolter le signal rétrodiffusé. Ce signal est transmis via fibre optique au boîtier de détection. À l'intérieur de ce boîtier, les différentes longueurs d'onde qui nous intéressent vont être séparées, puis dirigées vers leur voie de détection respective.

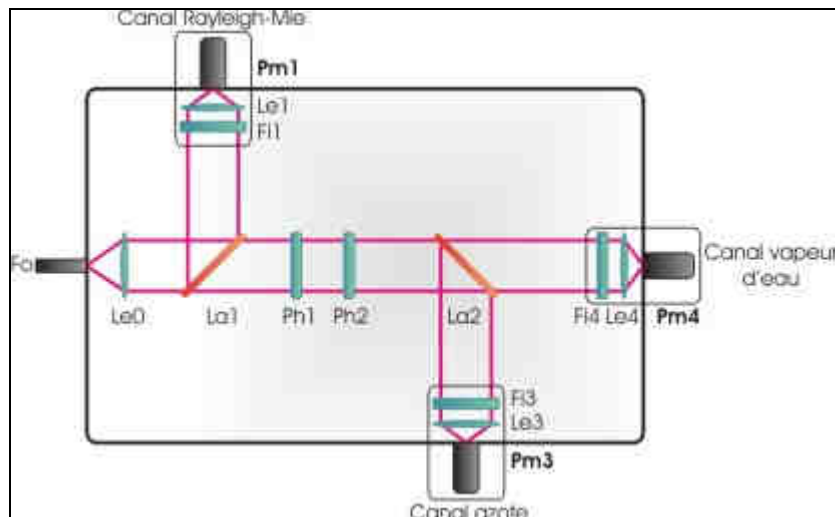


Figure 13 - Boîtier de détection du système

Trois photomultiplicateurs vont transformer les signaux reçus en impulsion électrique, et les transmettre à une chaîne de traitement. Les photomultiplicateurs des voies azote (voie 3) et vapeur d'eau (voie 4) fonctionnent en mode comptage de photon, nous permettant ainsi de détecter le signal Raman, malgré sa faible amplitude. Le photomultiplicateur de la voie Rayleigh-Mie (voie 1) fonctionne quant à lui en mode analogique (signal plus fort).

Les photons récoltés aux longueurs d'onde 387 nm et 408 nm vont être comptés par bins (portes) de 50 ns (correspondant à un pas de 7,50 m) pour chacun des Ntirs tirs et ce, pendant t secondes (durée d'un fichier d'enregistrement).

4.4.4 RALI : Lidar LNG

RALI [4] est une Plate-forme instrumentale aéroportée associant un radar Doppler et un lidar de rétrodiffusion pour l'étude des nuages.

LNG signifie LEANDRE 1 Nouvelle Génération et LEANDRE : Lidars aéroportés pour l'Etude des Aérosols, des Nuages, de la Dynamique, du Rayonnement et du cycle de l'Eau.

Spécifications scientifiques

Le lidar LNG est un lidar rétrodiffusion. Le principe du lidar consiste à envoyer une impulsion laser dans l'atmosphère. Les molécules, les particules d'aérosols, les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace présents sur le trajet du faisceau laser diffusent l'onde laser dans toutes les directions. Le télescope, dont l'axe optique est parallèle au trajet d'émission du laser, récupère le champ diffusé vers l'arrière (rétrodiffusion). En sortie du télescope, le signal rétrodiffusé est envoyé sur un détecteur. La détection est définie en fonction des paramètres atmosphériques à restituer.

Il doit répondre aux besoins scientifiques suivants :

- Etudes des aérosols, des nuages et des PSC (Polar Stratosphéric Cloud)
- Dynamique de la couche limite, interface surface/atmosphère, couche limite/troposphère libre
- Propriétés radiatives des aérosols et des nuages
- Pénétration de nuages d'épaisseur optique max de 2,5 à 3
- Forme des cristaux
- Résolution horizontale de 30 à 100 m et résolution verticale de 15 m

Caractéristiques techniques :

- 3 longueurs d'onde afin de déterminer le diamètre effectif des particules
- Canaux parallèle et perpendiculaire afin de définir la forme des particules reliée au facteur de dépolarisation
- Haute Résolution Spectrale permet d'accéder aux propriétés diffusantes des particules en s'affranchissant de l'inversion classique, elle permet aussi la mesure de vent radial.

Les longueurs d'onde :

355 nm :

En terme de sécurité oculaire, l'énergie maximale permise à 355 nm est 15000 fois plus important que celle à 532 nm : $EMP(355 \text{ nm}) - 15000 \times EMP(532 \text{ nm})$, on peut donc travailler à énergie plus forte et à champ réduit ce qui permet d'augmenter le rapport signal à bruit et de réduire les effets de la diffusion multiple.

532 nm et 1064 nm :

Ces longueurs d'ondes sont celles du lidar LEANDRE 1, elles permettent de réaliser des comparaisons entre les performances du LNG et de LEANDRE 1. Mais pour garder une distance de sécurité de 500 m en sortie de l'avion, le champ à ces longueurs d'onde sera large, donc sensible au phénomène de diffusion multiple. 532 et 1064 nm sont également les longueurs d'onde du lidar de CALIPSO, il faut donc garder ces longueurs d'onde pour valider le lidar LNG.

L'instrument

Emission	Laser, Afocal, Mesure d'énergie Miroir de renvoi laser
Réception	Miroir atmosphérique Télescope, Miroir de renvoi télescope Boîtier de détection Interféromètre
Electronique de détection	Interféromètre Boîtier de détection
Alignement	Primes de renvoi Miroir + CCD
Structure de base	Interface avion
Acquisition	Sicav
Electronique	Alimentation (28 V avion à 28 V CC) Commandes moteurs Contrôles paramètres lidar

L'émission

Laser	Asservissement monomode
Largeur spectrale	200 MHz, stabilité 12 MHz
Cadence	20 Hz
Longueur d'impulsion	6 ns
Energie	à 355 nm : 60 mJ à 532 nm : 10 mJ à 1064 nm : 80 mJ
Divergence plein angle en sortie	à 355 nm : 0,16 mrd à 532 nm : 4 mrd à 1064 nm : 6,5 mrd
Diamètre du faisceau	Entre 38,6 et 40,5 mm (super gaussien)

4.4.5 LIDAR COMMERCIAL



Figure 14 - LIDAR commercialisé par leosphere [5]

PERFORMANCES	ALS300
Rang min(full overlap) - max	0.15* to 12 km
Accumulation time (PBL)	10 s
Accumulation time (Cirrus)	30 s
Vertical resolution	1.5/15 m

Le prix : 107 550 € HT sans option. Garanti 1 an pièces et main d'oeuvre (170 000 € HT toutes options : module de dépolarisation, boîtier pour les modules électroniques, scanning module, module compteur de photon (soft), consommables (lampe flash, cartouche de deionisation), 1 an de maintenance, +1 an de garantie).

5 Capteurs laser pour le trafic

Différentes technologies « laser » sont déjà utilisées pour effectuer des mesures d'indicateurs de trafic tels que la détection, la vitesse, la longueur du véhicule, la classification et le suivi de véhicule. Dans la suite de ce document, nous réalisons une étude bibliographique sur cette technologie LASER pour estimer les paramètres « trafic » cités ci-dessus. Nous distinguons les LASER suivant leurs applications et surtout suivant leurs emplacements : capteurs bord de voie, capteurs aéroportés et capteurs embarqués.

5.1 Capteurs bord de voie

5.1.1 Détection, vitesse et longueur du véhicule

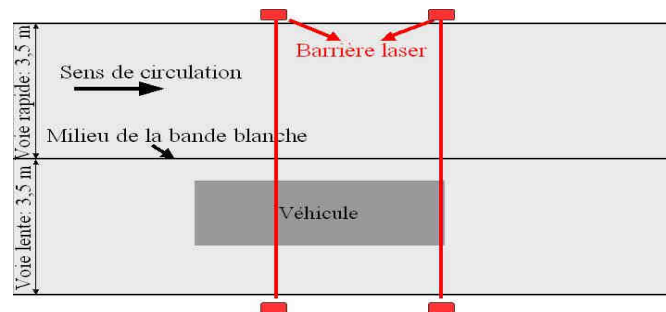


Figure 15 - principe à partir de barrière LASER

La détection de véhicules peut être réalisée par une barrière LASER tel que le montre la **figure 15**. Cette détection repose sur la coupure d'un faisceau infrarouge. Ce faisceau émis par une cellule émettrice est placé en face d'une cellule réceptrice (ou d'un miroir, dans ce cas la cellule réceptrice est située à côté de la cellule émettrice), laquelle enregistre le changement d'état lors de la présence d'un véhicule. Dans la situation où nous avons deux barrières LASER, nous pouvons estimer la vitesse (avant et arrière) et la longueur des véhicules (pour la discrimination VL/PL). Deux cellules disposées à x mètres l'une de l'autre permettent le calcul de la vitesse et de la longueur du véhicule. Le paramètre longueur peut ainsi permettre de distinguer les P.L. des V.L [6].

5.1.2 Estimation du positionnement latéral

Les barrières laser présentées ci-dessus avec « l'option télémètre » peuvent être utilisées pour mesurer le positionnement latéral des véhicules. Le LIDAR a déjà été utilisé pour mesurer le positionnement latéral des véhicules dans [7].

C'était un laser à balayage 2D (LMS 220 de chez Sick) qui calculait pour chaque angle de balayage (1°) le temps de parcours (et donc la distance (cm)) de l'objet le plus proche. Le LIDAR utilisé était celui du LIVIC. Il était réglé de façon à ce que les essieux des véhicules

circulant sur la voie lente passent dans le faisceau du laser. Ainsi, ce système fournissait la distance entre la roue avant droite des véhicules et le LIDAR.

La visualisation des essieux dépendait du type de véhicule et de sa position dans la voie. En général, la visualisation des essieux des poids lourds est plus facile que celle des véhicules dits "bas" (VL). Ce système fournissait 15 fois par seconde, 101 points de mesure (1 balayage). Les points de mesure sont donnés de -50° à $+50^\circ$ par rapport à l'axe du laser par pas de 1° . Dans cette expérimentation, l'origine du Lidar était située à 3,95 m du bord de la voie.

5.1.3 Estimation de la largeur et la longueur des véhicules

Un système de détection de véhicule non-intrusive à base de laser a été développé [8-10] pour mesurer d'une part le gabarit des véhicules en mouvement et d'autre part pour estimer les temps de parcours des véhicules. Le système de détection utilise deux lignes laser qui projettent la lumière vers le sol. La lumière réfléchiée est collectée et focalisée sur un réseau de photodiodes par un système optique. La présence d'un véhicule est détectée à partir de l'absence de réflexion de l'onde.

En plaçant deux paires identiques « laser-capteur » à une distance connue, la vitesse avant et arrière d'un véhicule peut être mesurée. Ce système de détection est capable de déterminer la longueur et la largeur des objets en mouvement en temps réel avec une haute résolution [9]. Cette information est utilisée pour différencier des objets similaires et donc peut être utilisée plus tard pour la ré-identification des objets individuels ou des groupes d'objets, offrant une véritable mesure de temps de parcours entre les sites de détection.

Ce système permet ainsi de mesurer une vitesse, une accélération, et la longueur du véhicule détecté. Le temps de parcours d'un véhicule peut aussi être estimé par la détection du véhicule au début de portion de route et par l'identification de ce même véhicule à la fin de cette même portion de route. Dans ce système, afin d'obtenir une grande résolution et une haute réflexion, la ligne laser doit être perpendiculaire au mouvement des véhicules. L'impulsion laser de ce système doit être stable en amplitude. Il possède une puissance crête de 20 W à 905 nm, avec une largeur d'impulsion de 15 ns. Il peut-être répété avec un taux maximal de 10 kHz. Les optiques générant la ligne produisent un faisceau avec un angle de $15-60^\circ$.

Pour ce système, une longueur d'onde de 905 nm a été choisie. La lumière infrarouge possède une bonne transmission dans le brouillard, donnant aux systèmes de meilleures performances dans une large gamme de conditions météorologiques. Cette longueur d'onde permet aussi de faire des mesures non-visibles pour les automobilistes.

En outre, l'intensité de la lumière du soleil autour de cette longueur d'onde possède un minimum local, donnant moins de bruit mesuré provoqué par le soleil. Avec l'hypothèse que ce laser soit situé par exemple à 6 m au-dessus de la chaussée, la ligne laser sera alors de 5 m de long et de 5 mm de large. Les articles [8-9] montrent que ce système laser donne de bons résultats sous des conditions routières réelles.

Un système similaire à celui présenté ci-dessus a aussi été proposé dans [11]. Ce système « Automatic Vehicle Dimension Measurement System (AVDMS) » est développé par l'Université de Victoria au Canada. Le AVDMS utilise les données « temps de vol » (ou temps de propagation) pour classer les véhicules en fonction de la longueur, de la largeur ou de la hauteur. Ce système est basé sur un capteur auto-détection électro-optique Schwartz [12 - 15].

Les systèmes de Schwartz, comme les LIDAR, sont entièrement dépendants des mesures temps de vol. Il y a quelques différences fonctionnelles entre le système développé par [11], système AVDMS et celui proposé par les auteurs de [8-10]. Par exemple, le système AVDMS détermine la portée ou la distance entre le détecteur et l'objet détecté tandis que le système proposé par [8-10] ne détermine pas cette distance. De plus, le détecteur laser « Schwartz » mesure la réflexion de l'onde laser sur le véhicule pour déterminer la taille, la forme et la «présence» du véhicule tandis que celui proposé par [8-9] mesure la réflexion de l'onde sur la chaussée. Ainsi, l'absence de réflexion sur la chaussée détermine la taille, la forme et la «présence» du véhicule.

5.2 Capteurs aéroportés : suivi de trafic

Le LIDAR est utilisé comme capteur aéroporté pour des applications de suivi de trafic. Les auteurs de la référence [16] proposent d'effectuer du suivi du trafic dans des zones urbaines à partir de données LIDAR aéroporté. Ces auteurs proposent des algorithmes permettant de détecter les véhicules. Cette application « LIDAR aéroporté » est aussi proposée dans [17] pour d'une part détecter des obstacles en mouvement et d'autre part pour estimer la vitesse de l'obstacle détecté lors de l'atterrissage des avions.

5.3 Capteurs embarqués

5.3.1 Assistance au conducteur

Le Lidar, IBEO ALASCA XT, et la caméra sont proposés dans la référence [18] pour détecter les véhicules. Ce papier traite de la fusion de données de LIDAR et de caméra. Dans ce cas, la caméra est à l'intérieur du véhicule et les 2 LIDAR utilisés sont posés sur le pare choc avant du véhicule.

Les auteurs de la référence [22] utilisent le même LIDAR (à 4 plans) que précédemment, pour détecter et suivre les piétons. Ils proposent d'améliorer les méthodes de traitement de détection et de suivi de piétons en prenant en compte un capteur à 4 plans. Le LIDAR est aussi placé dans ce cas à l'avant du véhicule.

De nombreuses recherches ont été réalisées pour fusionner les données LIDAR avec les vidéos [18,24]. Le LIDAR estime alors la distance et les contours des objets. Dans la référence [20], le LIDAR est à l'intérieur du véhicule. Il permet de mesurer la position, la taille de l'objet. Les auteurs de [20] proposent une méthode permettant de calculer la vitesse de l'objet à partir d'un LIDAR embarqué dans le véhicule. Il propose aussi des méthodes pour détecter, classer et suivre des objets (voitures, camions).

Enfin, les données LIDAR et RADAR peuvent être fusionnées pour améliorer le suivi d'objet. Les références [21] et [23] utilisent seulement des données LIDAR pour détecter, localiser, classer et suivre des objets en mouvement. Dans [21], le LIDAR, le LMS 291 de chez Sick, est placé sur le par-choc avant du véhicule.

5.3.2 Guidage de véhicule

Les auteurs de [19] proposent d'utiliser le LIDAR et des algorithmes de traitement pour faire du contrôle de guidage latéral de véhicule dans le cas où le système primaire de guidage latéral, ici deux magnétomètres (un à l'avant, l'autre à l'arrière du véhicule), est en échec ou partiellement en échec. Dans cet article, le LIDAR est placé sur le toit du véhicule et est utilisé pour mesurer la position latérale du véhicule par rapport au(x) véhicule(s) précédent(s).

6 Conclusion

Ce rapport étudie la faisabilité technique d'un dispositif de mesures simultanées du trafic et de la pollution. Il établit un état de l'art dans chacun des deux domaines que sont la mesure de pollution par LIDAR et les capteurs de trafic. Il tente de dégager des clefs de compréhension des techniques LIDAR et soulève des problématiques concrètes liées à la conception technique du dispositif.

Nous avons vu, dans la première partie sur la pollution, que différents composés sont représentatifs d'une pollution liée au trafic routier ($PM_{2,5}$, PM_{10} , NO_x , COV). La détection d'un ou plusieurs de ces composés peut renseigner sur la concentration des différentes familles de polluants. Cette détection peut se faire de façon très spécifique en utilisant les longueurs d'ondes et technologies adaptées mais celles-ci sont relativement complexes à mettre en œuvre au niveau optique et électronique, ainsi qu'en termes de traitement si l'on veut remonter à des concentrations de composés spécifiques..

Au vu des différentes interactions entre l'impulsion laser et les aérosols, celles qui produisent le plus fort signal (la rétrodiffusion la plus importante) sont les diffusions de Mie et Rayleigh : souhaitant travailler sur de courtes distances (par rapport à un LIDAR atmosphérique), on peut supposer que le signal le plus exploitable sera lié aux diffusions de Mie et Rayleigh. Mais cette hypothèse n'engage que la sensibilité spectrale du détecteur (pour une longueur d'onde excitatrice, on peut soit détecter à la même longueur d'onde et récolter les diffusions Mie et Rayleigh, soit détecter à d'autres longueurs d'ondes pour mesurer la fluorescence et la diffusion Raman qui sont beaucoup plus faibles). Concernant la source laser, la puissance n'est pas aujourd'hui définie et sera vraisemblablement liée au coût. Nous nous questionnons encore aujourd'hui sur la possibilité d'utiliser une diode laser dont la compacité et le coût sont des atouts majeurs. Le domaine de longueurs d'onde quant à lui, semble défini, il s'agit de la bande spectrale ultraviolet qui cumule deux avantages : la sécurité oculaire y est assurée et de nombreux polluants fluorescent dans cette gamme, ce qui laisse l'opportunité de développer un LIDAR Mie ou à fluorescence selon le type de détecteur choisi. Le signal reçu serait potentiellement lié aux $PM_{2,5}$ (Mie, Rayleigh), aux PM_{10} (Mie), au SO_2 , NO_2 , O_3 (Mie, fluorescence), tous les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (qui fluorescent entre 260 et 460 nm). Là encore, reste à savoir si le signal détecté sera bien représentatif de la pollution automobile et/ou si on peut le mettre en corrélation avec l'indice de la qualité de l'air (indice atmo).

Concernant le positionnement du dispositif, la mesure LIDAR nécessite une distance minimale de quelques dizaines de mètre. Aussi, dans l'idéal, la direction de l'impulsion laser devrait être parallèle au ruban routier (en bord de voie ou au dessus). L'implantation géométrique du dispositif nécessitera de se pencher précisément sur les phénomènes de turbulence liés à l'écoulement du trafic. En effet, il s'agira d'évaluer dans quelle mesure et à jusqu'à quelle altitude les polluants sont « agités » par les turbulences. Cependant, ces phénomènes pourraient également être porteurs d'information sur le nombre de véhicules, leur vitesse ainsi que leur catégorie. On peut imaginer obtenir ces mesures trafic en réalisant une image du nuage de fluorescence et en scrutant son intensité, sa forme et sa dynamique d'évolution. Une autre solution pour les mesures de trafic serait de dévier le faisceau laser qui sera alors périodiquement coupé par le flux routier.

Pour les études à venir, l'accent sera mis dans un premier temps sur la mesure de pollution qui nous semble être le noyau dur de cette problématique dans cette mesure couplée. Les premières réponses apportées ici devront être confirmées par des laboratoires spécialistes dans le domaine (IGN, CNRM, Laboratoires Universitaires,...). Des contacts seront aussi établis avec des fabricants de LIDAR afin d'établir un cahier des charges détaillé et proposer un sujet de thèse étoffé et approfondi pour démarrer le montage d'un prototype.

Référence

- [1] P. Masclet, « Pollution atmosphérique – Causes, conséquences, solutions, perspectives », TECHNOSUP, Ellipses, 211 pp., 2005.
- [2] J. Cornillault, « lidar de détection de pollution », Techniques de l'ingénieurs, E 4315, 1997.
- [3] <http://recherche.ign.fr/LOEM/>
- [4] <http://www.dt.insu.cnrs.fr/rali>
- [5] <http://www.leosphere.fr>
- [6] D. Stanczyk, A. Millot, S. Ott, "MTT, RADARR, Mise à niveau du système de mesure FRAO", Rapport CETE de l'Est, livrable n°0001, Pré dit SARI-première tranche, Septembre, 2005.
- [7] C. Le Bastard, P. Briand, P. Landais et B. Jacob, « Comparaison statistique de plusieurs systèmes de mesure du positionnement latéral des véhicules », Conférence Sécurité routière prévention des risques et aide à la conduite (PRAC), Paris 2010 ;
- [8] H. H. Cheng, B. D. Shaw, J. Palen, B. Lin, B. Chen and Z. Wang, « Development and Field Test of a Laser-Based Nonintrusive Detection System for Identification of Vehicles on the Highway », IEEE Trans. On Int. Trans. Syst., vol. 6, n° 2, June 2005, pp 147 -155.
- [9] H.H. Cheng, B.D. Shaw, J. Palen, J. E. Larson, X.Hu and K. V. Katwyk, "A real-time laser-based detection system for measurement of delineations of moving vehicles," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 6, pp. 170–187, Jun. 2001.
- [10] H. H. Cheng, B. D. Shaw, J. Palen, J. E. Larson, X. D. Hu, and V. K. Katwyk, "A real-time laser-based detection system for measurement of delineations of moving vehicles," in ASME 19th Computers in Engineering Conf., Las Vegas, NV, Sept. 12–15, 1999, paper DETC99/CIE-9072 .
- [11] G. A. Halvorson, "Automated real-time dimension measurement of moving vehicles using infrared laser rangefinders," M.S., Univ. Victoria, 1995.
- [12] R. A. Olson, R. L. Gustavson, R. J. Wangler, and R. E. McConnell II, "Active near-field object sensor and method employing object classification techniques," U.S. patent 5 321 490, 1994.
- [13] R. J. Wangler, R. L. Gustavson, R. E. McConnell II, and K. L. Fowler, "Intelligent vehicle highway system sensor and method," U.S. Patent 5 546 188, 1996.
- [14] R. J. Wangler, "Intelligent vehicle highway system sensor and method," U.S. Patent 5 757 472, 1998.
- [15] R. J. Wangler, "Intelligent vehicle highway system multi-lane sensor and method," U.S. Patent 5 793 491.
- [16] W. Yao, S. Hinz and U. Stilla, « Automatic Vehicle Extraction from airborne Lidar Data of Urban Areas using Morphological Reconstruction », IAPR Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing (PRRS 2008), 2008.
- [17] M. Smearcheck, A. Vadlamani and M.U. De Haag, « Detection of mobile runway obstacles using dual airborne laser scanners », IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference, 2008. DASC 2008.
- [18] L. Huang, M. Barth, « Tightly-Coupled LIDAR and computer Vision Integration for vehicle detection », IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 604 – 609, 3-5 June 2009

- [19] G. Lu and M. Tomizuka, « Vehicle following as backup control schemes for magnet-magnetometer-based lateral guidance », IEEE transactions on control systems technology ISSN 1063-6536, 2005, vol. 13, no2, pp. 274-285.
- [20] H. Cheng, N. Zheng, X. Zhang, J. Qin and H. van de Wetering, "Interactive road situation analysis for driver assistance and safety warning systems: Framework and algorithms," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 8, no. 1, pp. 157-167, Mar. 2007.
- [21] H. Zhao, M. Chiba, « A laser-Scanner-Based Approach Toward Driving Safety and traffic data Collection, IEEE Trans. On Intelligent Transportation syst., vol. 10, no. 3, september 2009, pp 534-546.
- [22] Gidel, S.; Checchin, P.; Blanc, C.; Chateau, T.; Trassoudaine, L.; « Pedestrian Detection and Tracking in an Urban Environment Using a Multilayer Laser Scanner », IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, issue 3, september 2010, pp 579 – 588.
- [23] F. Nashashibi and A. Bargeton, « Laser-based vehicle tracking and classification using occlusion reasoning and confidence estimation », 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 4-6.
- [24] S. Wender, K. Dietmayer, « 3D vehilce detection using a laser scanner and video camera », IET Intelligent Transport Systems, 2008, vol. 2, no. 2, pp 105-112.

ANNEXE

Annexe 1 – Normes de qualité de l'air

	Valeurs limites	Objectifs de qualité	Seuil de recommandation et d'information	Seuils d'alerte	Niveau critique
NO₂	En moyenne annuelle : depuis le 01/01/2010 : 40 µg/m ³ . En moyenne horaire : depuis le 01/01/2010 : 200 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 18 heures par an.	En moyenne annuelle : 40 µg/m ³ .	En moyenne horaire : 200 µg/m ³ .	En moyenne horaire : - 400 µg/m ³ dépassé pendant 3 heures consécutives. - 200 µg/m ³ si dépassement de ce seuil la veille, et risque de dépassement de ce seuil le lendemain.	
NO_x					En moyenne annuelle (équivalent NO ₂) : 30 µg/m ³ (protection de la végétation).
SO₂	En moyenne journalière : 125 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 3 jours par an. En moyenne horaire : depuis le 01/01/2005 : 350 µg/m ³	En moyenne annuelle : 50 µg/m ³ .	En moyenne horaire : 300 µg/m ³ .	En moyenne horaire sur 3 heures consécutives : 500 µg/m ³ .	En moyenne annuelle et hivernale (pour les écosystèmes) : 20 µg/m ³ .
Plomb	En moyenne annuelle : depuis le 01/01/02 : 0,5 µg/m ³ .	En moyenne annuelle : 0,25 µg/m ³ .			
PM₁₀	En moyenne annuelle : depuis le 01/01/05 : 40 µg/m ³ . En moyenne journalière : depuis le 01/01/2005 : 50 µg/m ³ à ne pas dépasser plus de 35 jours par an.	En moyenne annuelle : 30 µg/m ³ .	En moyenne journalière : 50 µg/m ³ .	En moyenne journalière : 80 µg/m ³ .	

Etat de l'art des mesures de pollution et de trafic par capteur laser

	Valeurs limites	Objectifs de qualité	Seuil de recommandation et d'information	Seuils d'alerte	Niveau critique
CO	Maximum journalier de la moyenne sur 8 heures : 10 000 µg/m ³ .				
Benzène	En moyenne annuelle : depuis le 01/01/2010 : 5 µg/m ³ .	En moyenne annuelle : 2 µg/m ³ .			
O₃		<p>Seuil de protection de la santé, pour le maximum journalier de la moyenne sur 8 heures : 120 µg/m³ pendant une année civile.</p> <p>Seuil de protection de la végétation, AOT 40* de mai à juillet de 8h à 20h : 6 000 µg/m³.h</p>	En moyenne horaire : 180 µg/m ³ .	<p>Seuil d'alerte pour une protection sanitaire pour toute la population, en moyenne horaire : 240 µg/m³ sur 1 heure</p> <p>Seuils d'alerte pour la mise en oeuvre progressive de mesures d'urgence, en moyenne horaire :</p> <p>1er seuil : 240 µg/m³ dépassé pendant trois heures consécutives ;</p> <p>2e seuil : 300 µg/m³ dépassé pendant trois heures consécutives ;</p> <p>3e seuil : 360 µg/m³.</p>	<p>Seuil de protection de la santé : 120 µg/m³ pour le max journalier de la moyenne sur 8h à ne pas dépasser plus de 25 jours par année civile en moyenne calculée sur 3 ans. Cette valeur cible est applicable à compter de 2010.</p> <p>Seuil de protection de la végétation : AOT 40* de mai à juillet de 8h à 20h : 18 000 µg/m³.h en moyenne calculée sur 5 ans. Cette valeur cible est applicable à compter de 2010.</p>

* AOT 40 (exprimé en µg/m³.heure) signifie la somme des différences entre les concentrations horaires supérieures à 80 µg/m³ (= 40 ppb ou partie par milliard) et 80 µg/m³ durant une période donnée en utilisant uniquement les valeurs sur 1 heure mesurées quotidiennement entre 8 heures et 20 heures.

Etat de l'art des mesures de pollution et de trafic par capteur laser

	Valeurs limites	Objectif de qualité	Valeur cible	Objectif de réduction de l'exposition par rapport à l'IEM 2011* , qui devrait être atteint en 2020	Obligation en matière de concentration relative à l'exposition qui doit être respectée en 2015												
PM_{2,5}	En moyenne annuelle : 28,5 µg/m ³ pour l'année 2010, décroissant linéairement chaque année pour atteindre 25 µg/m ³ en 2015.	En moyenne annuelle : 10 µg/m ³ .	En moyenne annuelle : 20 µg/m ³ .	<table border="1"> <tr> <th>Concentration initiale :</th> <th>Objectif de réduction :</th> </tr> <tr> <td><= à 8,5 µg/m³</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>8,5 à <13 µg/m³</td> <td>10%</td> </tr> <tr> <td>13 à <18 µg/m³</td> <td>15%</td> </tr> <tr> <td>18 à <22 µg/m³</td> <td>20%</td> </tr> <tr> <td>>= à 22 µg/m³</td> <td>Toute mesure appropriée pour atteindre</td> </tr> </table>	Concentration initiale :	Objectif de réduction :	<= à 8,5 µg/m ³	0%	8,5 à <13 µg/m ³	10%	13 à <18 µg/m ³	15%	18 à <22 µg/m ³	20%	>= à 22 µg/m ³	Toute mesure appropriée pour atteindre	20 µg/m ³ pour l'IEM 2015**.
Concentration initiale :	Objectif de réduction :																
<= à 8,5 µg/m ³	0%																
8,5 à <13 µg/m ³	10%																
13 à <18 µg/m ³	15%																
18 à <22 µg/m ³	20%																
>= à 22 µg/m ³	Toute mesure appropriée pour atteindre																

* IEM 2011 : Indicateur d'exposition moyenne de référence, correspondant à la concentration moyenne annuelle en µg/m³ sur les années 2009, 2010 et 2011.

** IEM 2015 : Indicateur d'exposition moyenne de référence, correspondant à la concentration moyenne annuelle en µg/m³ sur les années 2013, 2014 et 2015.

	Valeurs cibles* qui devraient être respectées le 31 décembre 2012
Arsenic	6 ng/m ³
Cadmium	5 ng/m ³
Nickel	20 ng/m ³
Benzo(a)pyrène **	1 ng/m ³

* Moyenne calculée sur l'année civile du contenu total de la fraction PM10.

** Le Benzo(a)pyrène est utilisé comme traceur du risque cancérigène lié aux Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques