

Cours 3 : Le LIDAR

Introduction

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 lidars.

La première partie est consacrée à l'exposé des principes et des modes de fonctionnement essentiels des lidars. 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.

1. Caractéristiques du lidar

1.1 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. 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 1). La source est un laser, généralement impulsionnel, émettant dans un domaine de transparence de l'atmosphère soit, typiquement, entre 0,3 et 10 μm .

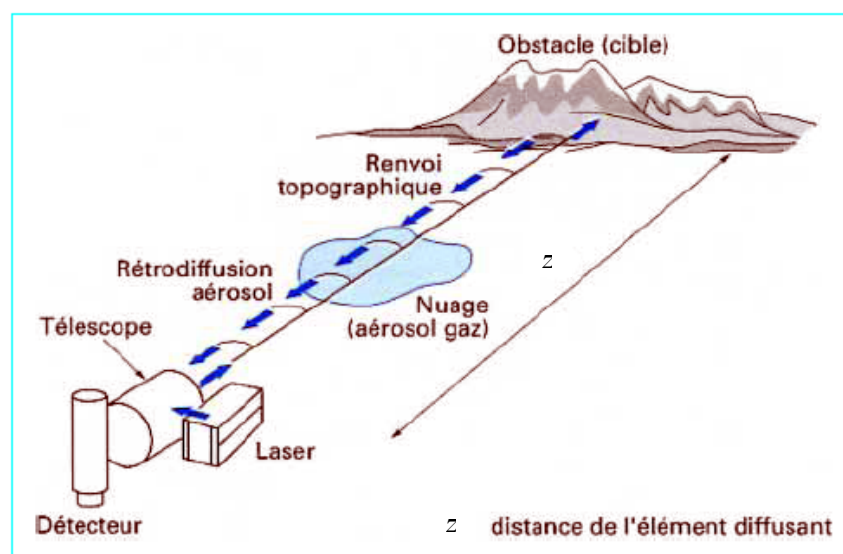


Figure 1 : Principe du lidar atmosphérique (J. Cornillault CILAS)

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 1, 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 réception = λ émission Particules : aérosols, poussières, atomes et molécules	10^{-10} 10^{-26}
Fluorescence	λ réception \neq λ émission Atomes et molécules	10^{-24}
Diffusion Raman	λ réception = λ émission Molécules	10^{-29}

Tableau 1 : Principaux phénomènes de diffusion dans un lidar

1.2 Détermination des équations d'un lidar atmosphérique

La figure 2 représente la rétrodiffusion d'un faisceau sur une couche d'épaisseur dz à une altitude z .

Figure 2 : Détection du signal rétrodiffusé



Deux coefficients interviennent dans le calcul de la lumière diffusée :

α est le coefficient d'absorption de l'atmosphère. Nous le considérerons comme constant et indépendant de l'altitude.

$\beta(z)$ est le coefficient de retrodiffusion de l'atmosphère à l'altitude z . $\beta(z)$ est la proportion de lumière diffusée vers l'arrière (en sens opposé à celui du faisceau incident) par unité d'angle solide et par unité de longueur d'élément diffusant. Ainsi, on écrit la puissance diffusée dans un angle solide $d\Omega$ par tranche d'épaisseur dz :

(1)

A : Surface d'entrée du télescope de réception

T: Durée de l'impulsion laser

c : Vitesse de la lumière dans le vide

Un faisceau qui traverse un milieu absorbant suit la loi de Beer-Lambert, on peut écrire :

(2)

Dans le cas du lidar, il faut considérer un trajet aller/retour :

(3)

En considérant les équations (1) et (3), on peut écrire la puissance arrivant sur le détecteur au foyer du télescope en fonction de l'altitude z , est égale à :

(4)

$\beta(z)$ est proportionnel au nombre de molécules par unité de volume $n(z)$:

(5)

σ représente la section efficace de diffusion (voir tableau 1)

$n(z)$ le nombre de molécules par unité de volume est fonction de l'altitude, on écrit :

(6)

On peut aussi exprimer P_0 en fonction de l'énergie du laser :

(7)

Avec (5)(6)(7), l'expression (4) devient avec $P_r(z)$ en [W] :

(8)

1.3 Principaux modes de fonctionnement

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

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 μm , 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.

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 3.

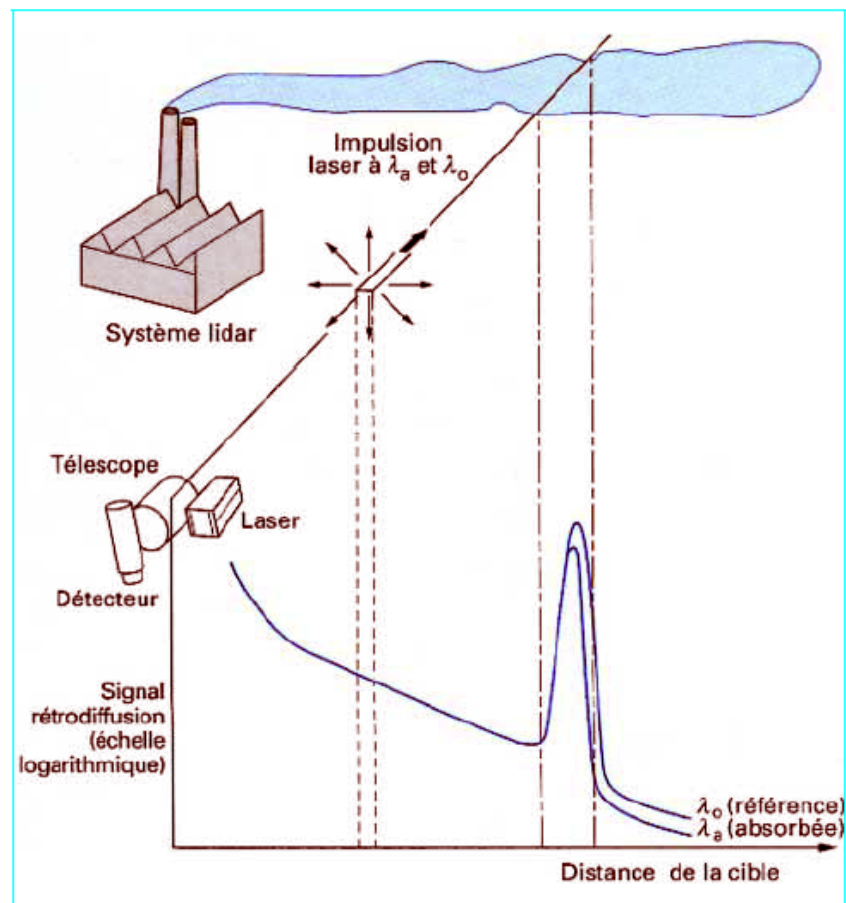


Figure 3 : Principe du lidar DIAL

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 eximère 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.

Lidar Doppler cohérent

Enfin, il faut mentionner un autre mode de fonctionnement important des lidars qui fait appel à la cohérence temporelle des sources laser (contrairement aux lidars 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.

1.4 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 lidars (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 lidars tient à la **multiplicité des possibilités de mesure** offertes par les différentes techniques ou modes de fonctionnement précédemment décrits.

Les lidars 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 lidars 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 lidars, depuis les lidars au sol portables et mobiles, jusqu'aux instruments embarqués sur avion ou sur satellite.

2. Présentation d'un système lidar : Mirela

2.1 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.
- 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

2.2 Description

La maquette opérationnelle Mirela, répondant à ces objectifs, comporte plusieurs modules représentés sur le schéma synoptique de la figure 4.

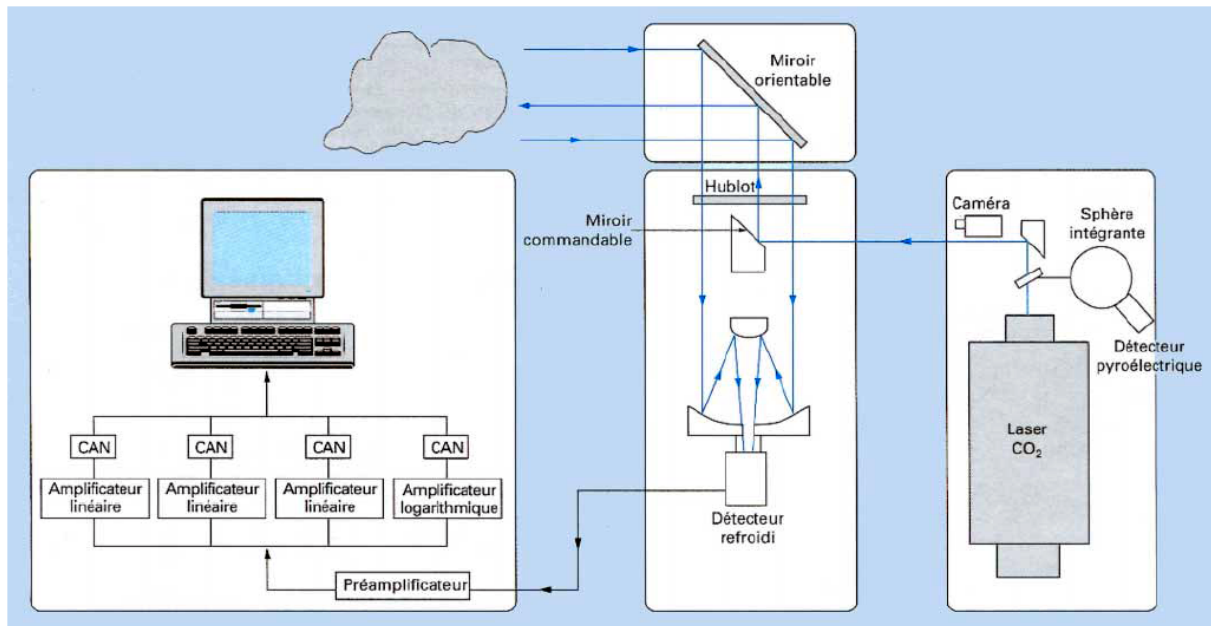


Figure 4 : Schéma de principe de Mirela

Module d'émission

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

- 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 5 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.

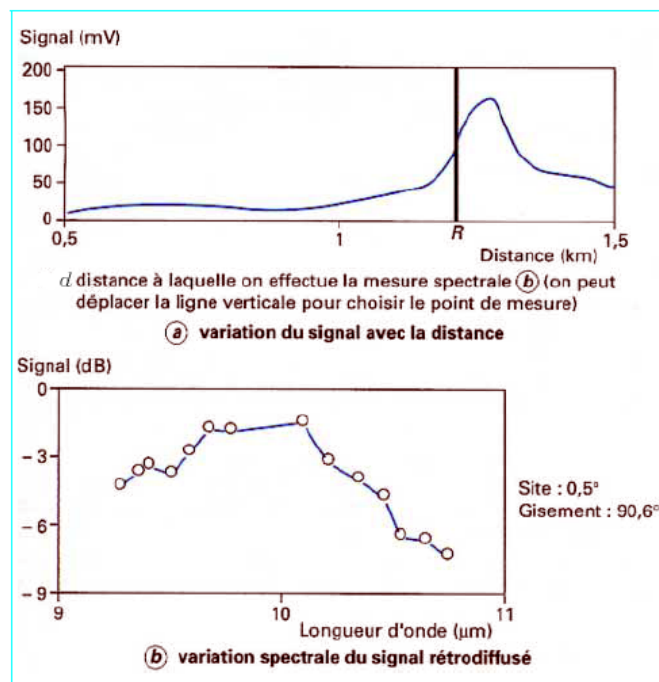


Figure 5 : Lidar DISC : rétrodiffusion sur un aérosol

3. Lidars atmosphériques pour les besoins de l'environnement

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 lidars, en particulier des lidars-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 lidars 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

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 œuvre
- Fiabilité élevée et maintenance réduite
- Fonctionnalité, autant que possible, dans toutes les conditions atmosphériques

En vue de ces objectifs, les principales limitations antérieures des lidars 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 6 permet de discuter quelques orientations d'avenir.

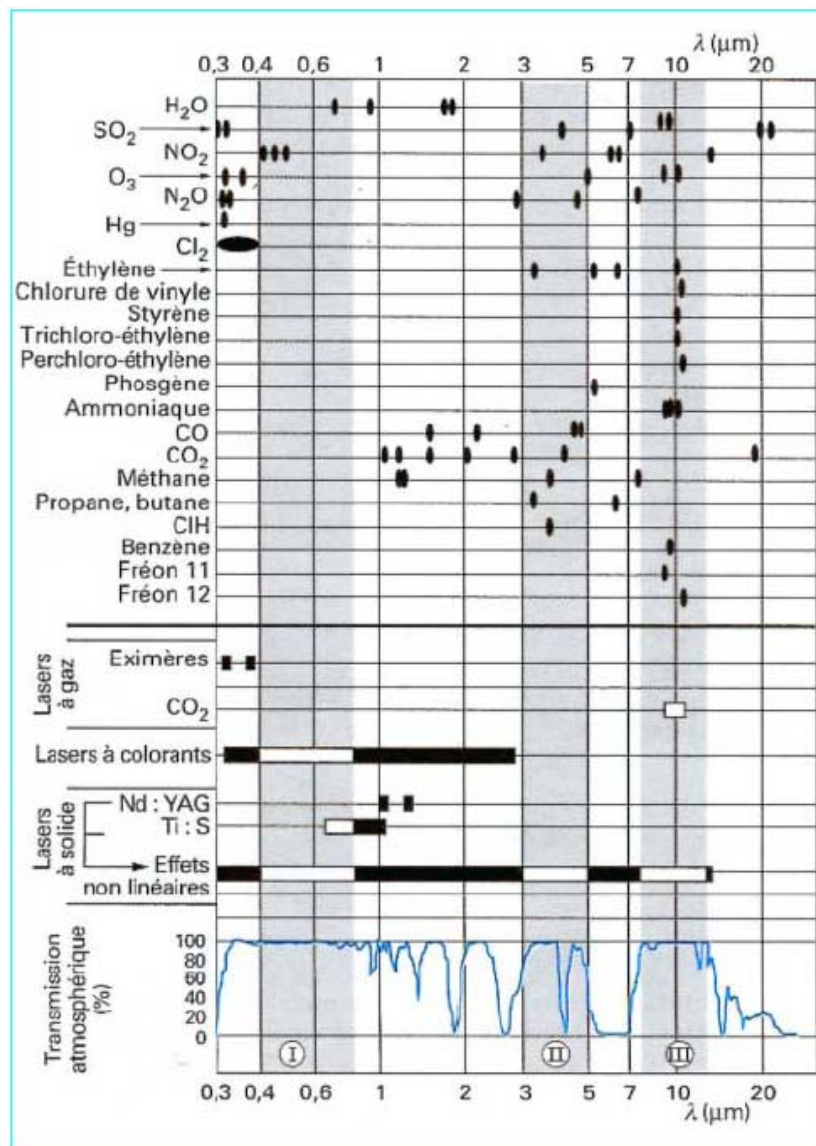


Figure 6 : Lidar pour la détection de polluants : objectifs, sources, laser, longueur d'onde

3.3 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

3.4 Choix des sources laser

La figure 6 présente schématiquement les longueurs d'onde des différents types de sources laser utilisées dans les lidars.

Les sources laser accordables dans les fenêtres infrarouge précédentes sont les plus intéressantes pour les lidars 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 lidars. 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 lidars :

- 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. Conclusion

Les lidars 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 lidars 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, transportables et faciles d'emploi
- Exploitation de nouvelles possibilités techniques en matière :
 - de sources laser accordables
 - d'outils informatiques de traitements, exploitation des données et interface avec l'utilisateur

TD Lidar

Soit un lidar atmosphérique ayant les caractéristiques suivantes :

Emetteur : Laser Nd :YAG déclenché doublé en fréquence émettant à la longueur d'onde de 532 nm.

Energie par impulsion : 200 mJ

Durée d'impulsion : 10 ns

Récepteur : Photodétecteur Silicium

Télescope $\varnothing = 200\text{mm}$

On se propose d'analyser le signal de retour (courbe de puissance sur le détecteur en fonction du temps) sachant que le lidar pointe vers un nuage de polluant (NO_2) se trouvant à une altitude comprise entre $z_B=8\text{ km}$ et $z_H=9\text{ km}$ ($e = z_H - z_B = 1\text{km}$).

On donne :

Pour l'atmosphère claire et dégagée :

$$k=0,142\text{ km}^{-1}$$

Nombres de molécules par unité de volume au niveau du sol :

$$n_0=2,4 \cdot 10^{25}\text{ cm}^{-3}$$

$$\sigma_0=5 \cdot 10^{-28}\text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$$

Coefficient d'absorption :

$$\alpha_0=0,1\text{ km}^{-1}$$

Pour le nuage de NO_2 :

$$k=0,142\text{ km}^{-1}$$

Produit du nombres de molécules par unité de volume par la section efficace dans le nuage :

$$n_N \cdot \sigma_N=200\text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Coefficient d'absorption dans le nuage :

$$\alpha_N=1\text{ km}^{-1}$$

1. A partir de la relation (8) du cours, établir les relations :
 - a. Puissance reçue en fonction du temps lors de la propagation de l'impulsion dans l'atmosphère avant le nuage.

b. Puissance reçue en fonction du temps lors de la propagation de l'impulsion dans le nuage.

c. Puissance reçue en fonction du temps lors de la propagation de l'impulsion dans l'atmosphère après le nuage

2. Tracer la courbe de la puissance sur le détecteur en fonction du temps entre 0 et 60 μs

Pour $z=1\text{km}$ ($t=$ _____)

Pour $z = 4\text{km}$ ($t=$ _____)

Pour $z = 8\text{km}-\epsilon$ ($t=$ _____)

Pour $z = 8\text{km}+ \epsilon$ ($t=$ _____)

Pour $z = 9\text{km}$ ($t = \quad$)

Pour $z = 10\text{km}$ ($t = \quad$)