

ANNEXE B

1 FONDEMENT THEORIQUE DE LA TECHNIQUE LIDAR AINSI QUE DU CALCUL DES CONCENTRATIONS EN GAZ DANS LA CELLULE

1.1 TECHNIQUE LIDAR-DIAL

La technique LIDAR consiste à émettre des impulsions laser dans l'atmosphère et à analyser le rayonnement rétrodiffusé (à la même longueur d'onde), en utilisant les propriétés d'absorption et de diffusion de la lumière par les particules (diffusion de Mie) et par les molécules (diffusion de Rayleigh).

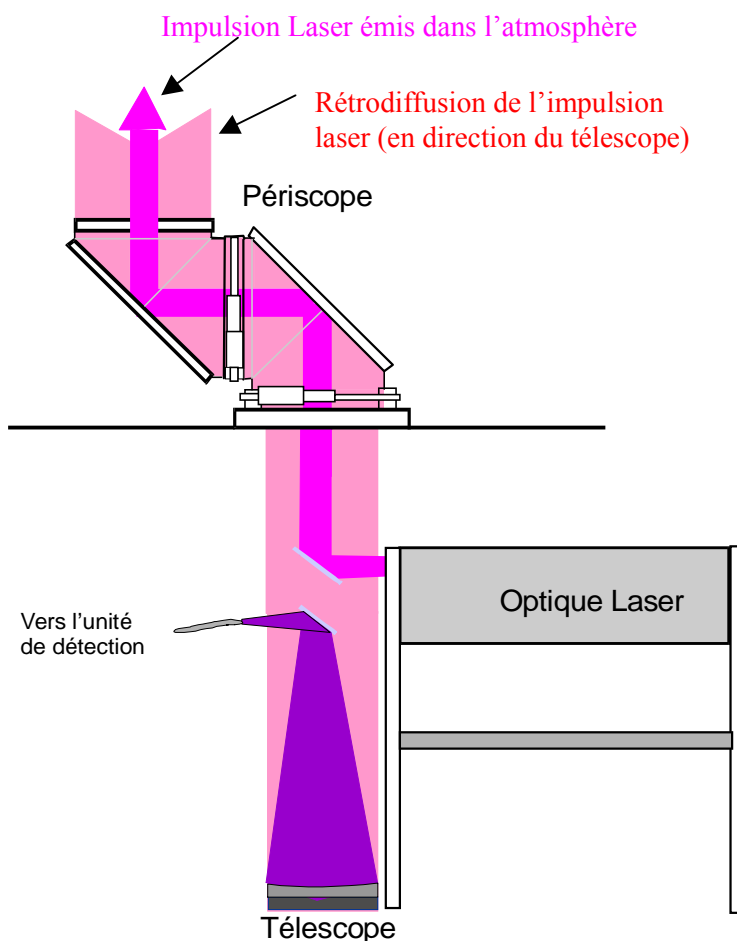


Schéma du principe LIDAR : Analyse en fonction du temps de la rétrodiffusion d'une impulsion lumineuse se propageant dans l'atmosphère.

Un télescope coaxial à la source collecte la fraction du rayonnement rétrodiffusée dans l'angle solide sous lequel il voit le point émetteur de l'espace et la transmet à un photodétecteur qui convertit les photons reçus en photo-électrons. Le signal électrique correspondant est en relation directe avec l'absorption du rayonnement par les molécules à analyser, par application de la loi Beer-Lambert. En utilisant un laser pulsé, le signal est détecté en fonction du temps, donc de la distance et permet ainsi d'accéder par le calcul à la répartition des concentrations le long de l'axe de tir jusqu'à une limite définie comme la portée du LIDAR.

Dans la pratique, on utilise l'absorption différentielle DIAL¹. La source laser émet simultanément dans l'atmosphère deux longueurs d'onde, l'une désignée par λ_{on} qui est fortement absorbée par le gaz considéré et l'autre par λ_{off} qui est faiblement absorbée et on détermine par différence la concentration du polluant recherché en fonction de la distance.

En balayant l'espace en azimut et en élévation, on obtient ainsi des profils de concentration en 3 dimensions.

L'instrument testé : LIDAR 510 M / ELIGHT est présenté ci-dessous. Il est équipé d'un laser Saphir-Titane pompé par lampes de haute énergie, doublé et triplé en fréquence. Un double oscillateur permet d'émettre les deux longueurs d'onde. A ce jour, il permet la mesure de 6 polluants : SO₂, O₂, NO, NO₂, toluène et benzène voir même le Para Xylène ainsi que le Styène.

1.2 OBTENTION DE LA CONCENTRATION EN FONCTION DE LA DISTANCE PAR LIDAR

L'étude de l'équation LIDAR appliquée à l'analyse en cellule nous permet de retrouver la formule de détermination de la concentration donnée par le constructeur.

Soit l'équation LIDAR ci-dessous exprimant la puissance réceptionnée en fonction de la distance (la puissance de l'écho renvoyée par la masse d'air se trouvant à la distance x)

$$I(x, \lambda_i) = \frac{c\Delta t}{2} I_0(\lambda_i) \frac{A\eta O(x)}{x^2} \beta(x) \exp\left\{-2 \int_0^x [\alpha(\xi) + N(\xi) \cdot \sigma(\lambda_i)] \cdot d\xi\right\}$$

avec

- c la vitesse de la lumière, exprimée en $m.s^{-1}$
- Δt la durée de l'impulsion laser, exprimée en s
- P_o la puissance moyenne de l'impulsion laser émise, exprimée en W
- A la surface du récepteur, exprimée en m^2
- η le rendement du récepteur
- $O(x)$ l'intégrale de simultanéité en fonction de la distance entre le faisceau d'émission et le champ optique du récepteur, exprimée en $sr.m^{-1}$
- $\beta(\theta=\pi, x, \lambda)$ le coefficient de rétrodiffusion, exprimé en $m^2.sr^{-1}$
- $N(x)$ est la densité de polluant à mesurer exprimée en m^{-3}
- $\sigma(\lambda_i)$ est la section efficace d'absorption du polluant recherché exprimé en m^2
- $\alpha(x)$ représente l'absorption atmosphérique à la position x , exprimée en m^{-1}

¹ DIAL = Differential Absorption Lidar Measurements

La technique DIAL se fonde sur l'envoi quasi-simultané de 2 impulsions laser émises à 2 longueurs d'onde différentes (λ_{on} et λ_{off}). On obtient alors 2 équations LIDAR du type de celle décrite ci-dessus. Une analyse du ratio de ces deux équations nous permet alors d'obtenir la concentration du polluant à la distance x :

$$C(x) = \frac{M}{2[\sigma(\lambda_1) - \sigma(\lambda_0)]} \cdot \frac{d}{dx} [\ln P(x, \lambda_0) - \ln P(x, \lambda_1)]$$

où M représente la masse moléculaire du polluant considéré. Et une analyse spectrale fournit les sections efficaces d'absorption aux deux longueurs d'onde.

Finalement on obtient alors $C(x)$, la concentration du polluant considéré en fonction de la distance, exprimée en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ à température réelle.

L'équation ci-dessus est utilisée dans le cadre de l'évaluation du LIDAR lorsque l'on recherche sa portée ou bien encore la limite de quantification. En effet lorsque les 2 longueurs d'onde sont identiques la concentration doit être égale à zéro, quelle que soit la distance. Le décalage traduit donc un offset sur la mesure et l'étude de l'évolution du rapport Signal/Bruit en fonction de la distance fournit la portée du système.

1.3 PORTEE DU LIDAR ET LIMITE DE DETECTION OPTIMALE

La limite de détection est définie comme la valeur la plus petite de la grandeur d'état qui peut être distinguée d'un état zéro avec une certitude (convenue) de 95%. On désigne ainsi sous le terme de limite de détection L_{Det} , la valeur de concentration qui permet de reconnaître lors d'une mesure, avec une probabilité de 95%, que la substance recherchée existe sans qu'une concentration puisse cependant être indiquée. Elle est donc définie par la mesure de la "concentration zéro". La concentration ainsi calculée fluctue autour de la valeur zéro, en cas de bon réglage du Lidar, et d'autant plus que l'intervalle de moyennage de profondeur choisi est court. Si l'on désigne la différence standard calculée à partir de ce profil par $\sigma_{95\%}$, la limite de détection est donnée, en prenant en considération le facteur Student $t_{95\%}$ par la relation suivante:

$$L_{Det} = t_{95\%} \cdot \sigma_{95\%}$$

La limite de détection optimale d'un système pour un intervalle de moyennage défini est le minimum de la fonction qui décrit la limite de détection en fonction de la distance.

La portée est définie comme la distance à laquelle, pour une résolution en profondeur constante, la limite de détection dépasse, pour la première fois, le **décuple** de la limite de détection optimale.

Afin que les indications pour différents systèmes de mesure ne s'appuient pas sur différentes constellations de paramètre rendant ainsi les données difficilement comparables, on définit par convention une portée conventionnelle X_{conv} et une limite de détection conventionnelle L_{conv} .

- La portée conventionnelle X_{conv} pour un polluant est la portée qui peut être atteinte pour une visibilité météorologique ≥ 30 km et une durée de mesure de 15 minutes. Pour les mesures dans l'UV, la concentration d'ozone doit être $\leq 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

- La limite de détection conventionnelle L_{conv} pour un polluant est la limite de détection qui est déterminée via l'intervalle de moyennage de profondeur $1/2 L_{conv}$ jusqu'à $3/2 L_{conv}$. La distance L_{conv} , destinée à définir la limite de détection conventionnelle, est de 1000 m lorsque la durée de mesure s'élève à 15 minutes, selon la norme DIN en vigueur. La limite de détection conventionnelle correspond ici à la l'incertitude de mesure du système.

Note : la limite de quantification est égale à 2 fois la limite de détection, d'après la norme X20-300.

1.4 OBTENTION DE LA CONCENTRATION DANS LA CELLULE PAR TECHNIQUE LIDAR

L'équation ci-dessus ne nous permet pas d'évaluer la concentration en gaz dans la cellule. Pour cela nous allons modifier le système LIDAR en insérant une cellule le long du faisceau laser et en analysant la puissance laser à la sortie. On observe alors la décroissance de la puissance laser lors de la traversée de la cellule, qui est régie par la loi de Beer-Lambert :

$$P(R, \lambda) = P_0(\lambda) e^{-\int_0^R \alpha(r, \lambda) \cdot dr}$$

Cette cellule est remplie d'une concentration connue de gaz à mesurer. Une concentration connue de gaz est générée en flux continu dans la cellule. L'extinction à la sortie d'une cellule de longueur L est donc :

$$\alpha(L, \lambda) = C_{\text{gaz}}(L) \cdot \sigma_{\text{gaz}}(\lambda)$$

$\sigma_{\text{gaz}}(\lambda)$ est la section efficace d'absorption du gaz, donnée à partir des analyses spectrales.

Nous supposons également que la concentration en gaz d'essai (Toluène et Benzène) est constante à l'intérieur de la cellule de longueur L et nulle en dehors :

$$P(L, \lambda) = P_0(\lambda) e^{-\alpha(\lambda) \cdot L}$$

Une mesure de puissance en entrée de cellule permet de connaître les intensités émises $P_0(\lambda_{\text{off}})$ et $P_0(\lambda_{\text{on}})$.

En reprenant l'équation LIDAR on constate alors que l'intensité initiale envoyée est celle en sortie de cellule, donc dans notre cas :

$$I(x, \lambda_i) = \frac{c \Delta t}{2} P_0(\lambda_i) \exp(-2 \cdot N_{\text{cellule}} \cdot \sigma(\lambda_i) \cdot L) \frac{A \eta O(x)}{x^2} \beta(x) \exp\left\{-2 \int_0^x [\alpha(\xi) + N(\xi) \cdot \sigma(\lambda_i)] \cdot d\xi\right\}$$

En étudiant le ratio entre les 2 longueurs d'onde de la technique DIAL on obtient alors :

$$\frac{I(x, \lambda_{\text{on}})}{I(x, \lambda_{\text{off}})} = \frac{P_0(\lambda_{\text{on}})}{P_0(\lambda_{\text{off}})} \exp(-2 \cdot N_{\text{cellule}} \cdot \Delta \sigma \cdot L) \exp\left\{-2 \int_0^x [N(\xi) \cdot \Delta \sigma] \cdot d\xi\right\}$$

En observant maintenant ce ratio entre d'une par une cellule plein et d'autre part une cellule vide, on obtient finalement l'équation de calcul de la concentration dans la cellule, fournie par le constructeur :

$$C_{Cellule}^{Gaz} = \frac{-M_{Molaire}^{Gaz}}{N_A \cdot 2 \cdot \Delta\sigma \cdot L} \left(\ln \left(\frac{I(\lambda_{on}) \cdot P_0(\lambda_{off})}{I(\lambda_{off}) \cdot P_0(\lambda_{on})} \right)_{Cellule_Pleine} - \ln \left(\frac{I(\lambda_{on}) \cdot P_0(\lambda_{off})}{I(\lambda_{off}) \cdot P_0(\lambda_{on})} \right)_{Cellule_Vide} \right)$$

Cette concentration est naturellement exprimée en $\mu g.m^{-3}.km$, mais peut également être exprimée en $ppb.km$, compte tenu des conditions de température et de pression existantes dans la cellule. Dans notre situation, la température est de 308°K et la pression est approximativement égale à la pression atmosphérique (la cellule est mise en très légère surpression afin d'éviter toute entrée d'air extérieur). Dans ce cas, la conversion entre un résultat exprimé en $\mu g.m^{-3}.km$ ou bien en $ppb.km$ se fait suivant la formule suivante :

$$X_{ppb} = C_{\mu g.m^{-3}} \cdot \frac{V(T, P)}{M_{Mol}^{Gaz}} \quad \text{avec} \quad V(T, P) = 8.32 \cdot \frac{T^{Kelvin}}{P^{Pa}}$$

où la Masse molaire du gaz doit être exprimée en $\mu g.Mol^{-1}$ et le Volume en m^3 .

Il est intéressant de revenir plus en détail sur le choix des unités de mesure de la concentration pour un polluant donné. L'analyse théorique précédente montre que les résultats LIDAR sont naturellement exprimés en $\mu g.m^{-3}.km$. Une vérification peut être aisément faite en étudiant l'équation d'obtention de la concentration sur un fondement dimensionnel :

$$C(x) = \frac{M}{2[\sigma(\lambda_1) - \sigma(\lambda_0)]} \cdot \frac{d}{dx} [\ln P(x, \lambda_0) - \ln P(x, \lambda_1)] = \frac{M}{2\Delta\sigma} \cdot \frac{d}{dx} [\ln P(x, \lambda_0) - \ln P(x, \lambda_1)]$$

Une section efficace d'absorption est liée à la surface en contact : $[\Delta\sigma] = [L^{-2}]$

La masse moléculaire est $M = \frac{M_{Mol}}{N_{AVogadro}} : [M]$

La dérivée d'une grandeur sans dimension est $[\frac{d}{dx} \ln] = [L^{-1}]$

Finalement on obtient bien : $[C(x)] = [M.L^{-3}]$ soit donc ici des $\mu g.m^{-3}$, donc indépendamment des conditions de température et de pression du gaz porteur (de l'atmosphère).