

RAPPORT

DEPARTEMENT
LABORATOIRE ET
CECP D'ANGERS
(DLRCA)

Groupe :
46 – Exploitation et
Sécurité Routières
ERA 17 – Vision

DECEMBRE 2012

DEVELOPPEMENT D'UN LIDAR POUR MESURER LA POLLUTION DUE AU TRAFIC ROUTIER



Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement
de l'Ouest

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

Sommaire

| | |
|---|----|
| Sommaire | 2 |
| INTRODUCTION | 3 |
| I- DIFFUSION DE LA LUMIÈRE PAR LES AÉROSOLS | 4 |
| 1) Les Aérosols | 4 |
| 2) Interaction aérosols-lumière | 4 |
| 2-1 Atténuation de la lumière par les aérosols | 4 |
| 2-2 Diffusion élastique par les aérosols | 6 |
| II- LE LIDAR A RETRODIFFUSION | 8 |
| 1) Définition | 8 |
| 2) Le fonctionnement du LIDAR à rétrodiffusion..... | 8 |
| 3) L'équation LIDAR | 10 |
| 4) Composition du LIDAR à rétrodiffusion..... | 11 |
| III- PARTIE EXPERIMENTALE | 13 |
| 1) Les configurations du système LIDAR..... | 13 |
| 1-1 Le LIDAR à rétrodiffusion de type monostatique..... | 13 |
| 1-2 Le LIDAR à rétrodiffusion de type bistatique | 19 |
| 2) Utilisation d'un amplificateur optique à fibre | 20 |
| 2-1 utilisation d'un amplificateur de puissance | 21 |
| 2-2 utilisation du laser coherent vector | 22 |
| 3) Etude de l'influence des aérosols sur le signal LIDAR..... | 26 |
| CONCLUSION | 28 |
| BIBLIOGRAPHIE et SITOGRAPHIE..... | 29 |
| ANNEXE (figures, images et équations)..... | 30 |

INTRODUCTION

Principalement générés par l'homme, les polluants sont une cause majeure de la dégradation de l'environnement, mais ils présentent aussi un risque pour la santé de l'homme. En effet, les gaz comme le CO₂, N₂O, H₂O, CH₄, O₃ contribuent à l'augmentation de l'effet de serre. C'est principalement les aérosols en suspension dans l'air, notamment les particules de taille inférieure à 10 µm (appelées PM₁₀), qui sont nocives pour l'homme et peuvent aggraver ou favoriser l'apparition de certaines maladies.

Dans les villes, les véhicules en circulation contribuent de façon significative à l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère. L'équipe Vision du Département Laboratoire et CECP d'Angers (DLRCA), désire réaliser un appareil qui permet de mesurer en temps réel la concentration des polluants dus au trafic routier. En outre, l'équipe étudie la possibilité de coupler à cet appareil un système permettant de détecter et si possible reconnaître les véhicules. Une étude bibliographique a été réalisée l'année passée regroupant les différentes technologies existantes ainsi que les applications liées au trafic et à la mesure de pollution. Des contacts ont été pris avec des laboratoires du domaine : CERE (Centre d'enseignement et de recherche en environnement atmosphérique), LASIM de Lyon (Laboratoire de Spectrométrie Ionique et Moléculaire), ainsi que des industriels (société Leosphere, Cimel).

Dans cette étude, le choix du système de mesure s'est porté sur un LIDAR à rétrodiffusion (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) dont le principe est celui du radar où l'émetteur est un laser. Ce genre de système est portable, permet de détecter la présence d'aérosols par télédétection (i.e. sans prélever d'échantillon) et permet des mesures rapides (de l'ordre de quelques secondes voire moins selon les catégories d'aérosols). Le LIDAR à rétrodiffusion fonctionne à partir de la diffusion de la lumière par les particules à détecter : l'interaction lumière-aérosols fournit des informations sur le type de particule et leur concentration. Dans une première partie, nous rappellerons le comportement de la lumière en interaction avec les aérosols. Puis, pour comprendre le système de mesure, nous décrirons le fonctionnement et la composition du LIDAR à rétrodiffusion. Pour finir, la partie expérimentale permettra d'exposer les différentes configurations possibles et leurs résultats associés.

Avant de construire le LIDAR à rétrodiffusion dans le but de mesurer la concentration en aérosols dans l'air, il est nécessaire de comprendre son fonctionnement pour réaliser différents prototypes et exploiter les différents résultats.

I- DIFFUSION DE LA LUMIÈRE PAR LES AÉROSOLS

L'atmosphère naturelle est composée majoritairement de diazote et de dioxygène. Bien que l'on retrouve en quantité négligeable des gaz comme le CH₄ et CO₂ qui contribuent fortement au réchauffement climatique, il existe aussi dans l'atmosphère des éléments appelés aérosols qui jouent un rôle majeur dans la pollution atmosphérique.

1) Les Aérosols

Le mot « Aérosol » désigne un ensemble de particules solides ou liquides dont la taille est comprise entre 1nm et 100µm. Ce sont des particules qui ont une durée de vie dans l'atmosphère de l'ordre de la semaine. Leurs masses sont si petites et leurs vitesses de chutes si négligeables qu'elles ont tendance à rester en suspension dans l'air. Les aérosols ont des origines diverses. Ils proviennent de sources naturelles comme l'érosion des sols, éruption volcaniques ou incendie de forêts, mais une autre partie provient de rejets industriels et routiers. On distingue parmi les aérosols les poussières désertiques, gouttelettes d'eau, pollens, cendres, particules sulfuriques provenant des industries ou des volcans, et enfin les petites particules de pneus de voitures et de suie résultant de la combustion incomplète de carburant automobile (notamment le diesel).

En outre, les aérosols ont des propriétés physico-chimiques spécifiques qui produisent des effets différents lorsqu'ils interagissent avec la lumière. En effet, quand la lumière traverse un milieu contenant des aérosols, la puissance des rayons lumineux incidents est modifiée selon les caractéristiques physico-chimiques de ces particules (comme la taille, l'indice de la particule).

2) Interaction aérosols-lumière

2-1 Atténuation de la lumière par les aérosols

L'atténuation de l'énergie lumineuse par les aérosols est l'un des moyens efficaces qui permet de distinguer les molécules des particules ou de distinguer les particules entre elles. Cette atténuation de la lumière dépend de deux facteurs: l'absorption et la diffusion.

- L'absorption est la capacité d'une molécule ou d'une particule à absorber une partie de la lumière qu'elle rencontre. Cette atténuation dépend du nombre d'aérosols (notée n_i) présents dans le milieu d'interaction et de la section efficace d'absorption de l'aérosol (notée $\sigma_{abs,i}$). Le coefficient d'absorption (α_{abs}) est la grandeur physique reliée à l'absorption. Il est défini par l'équation (E1).

$$\alpha_{abs}(\lambda) = \sum_i n_i \sigma_{abs,i}(\lambda) \quad (E1)$$

- λ étant la longueur d'onde de la lumière.

- La diffusion est la déviation des rayons lumineux lorsque ceux-ci rencontrent soit un atome, une molécule, une particule ou un milieu différent (dioptre). Lorsqu'un faisceau lumineux est diffusé, la déviation des rayons se fait dans toutes les directions ou dans une direction privilégiée en fonction de l'élément avec lequel le faisceau incident interagit. On distingue deux grands types de diffusion : une élastique et une inélastique, dont la différence dépend de l'énergie lumineuse diffusée. Pour un rayon lumineux incident de fréquence ν_1 , on parle de diffusion inélastique si la fréquence ν_2 du rayon diffusé par un aérosol est différente de celle du rayon incident (fréquence ν_1). On reconnaît dans cette catégorie les diffusions Raman, Brillouin, Stokes ou anti-Stokes. En revanche, on parle de diffusion élastique si la fréquence ν_2 du rayon diffusé par l'entité ne diffère pas de celle du rayon incident. Dans cette catégorie on reconnaît la diffusion de Mie ou celle de Rayleigh et c'est précisément ces deux dernières qui feront l'objet de nos mesures.

Ainsi l'atténuation de la lumière par les aérosols dépend de la taille et de la nature des aérosols et est liée coefficient d'extinction (α) qui est la somme du coefficient d'absorption et celui de diffusion.

2-2 Diffusion élastique par les aérosols

La diffusion élastique se fait sans échange d'énergie, seule l'intensité lumineuse varie. Le pourcentage de l'intensité diffusée est relié au coefficient de diffusion. Comme pour l'absorption, il dépend du nombre de particules (n_i) et de la section efficace de diffusion ($\sigma_{dif,i}$) et il est défini par l'équation (E2).

$$\alpha_{diff}(\lambda) = \sum_i n_i * \sigma_{diff,i}(\lambda) \quad (E2)$$

L'évolution de l'intensité diffusée par un aérosol peut se calculer selon la théorie de Mie ou de Rayleigh et dépend de la longueur d'onde de la lumière, de la taille et l'indice de réfraction des aérosols. Ces théories ont des solutions analytiques pour des particules sphériques ou de forme simple. Aussi nous approximerons les aérosols à des sphères. Une étude théorique précédente a permis de montrer, respectivement dans le graphique 1 et le graphique 2, comment se répartit l'intensité diffusée par un aérosol et l'évolution de la section efficace de diffusion en fonction de la taille de ce dernier [1]. Certains paramètres comme la longueur d'onde (λ) du rayon lumineux incident ou l'indice complexe de réfraction (n' et n'') de la particule ont été fixés de manière à observer les variations présentées dans les graphiques ci-dessous. Nous avons fixée $\lambda=1,55\mu\text{m}$, $n'= 1,4$ et $n''= 0$.

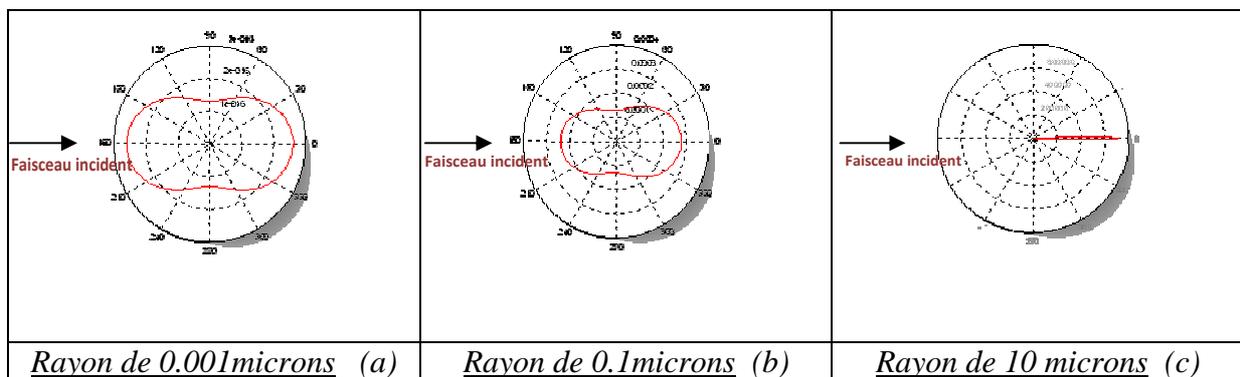


Figure I-1: fonction de phase normalisée

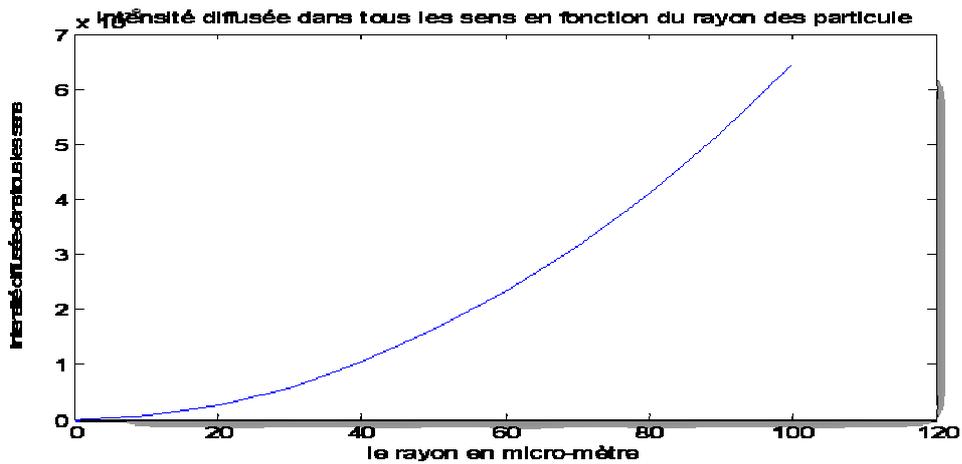


Figure I-2: évolution de la section efficace de diffusion en fonction du rayon de la particule

Dans la figure I-1, on voit bien que la répartition spatiale de l'intensité diffusée varie en fonction du rayon de la particule. Plus le rayon de la particule est grand plus la diffusion se fait dans le sens de propagation de l'onde incidente. Quand le rayon de la particule diminue la diffusion s'opère de façon uniforme dans le sens opposé et le sens de propagation de l'onde incidente (on tend vers la diffusion de Rayleigh qui est isotrope. Voir figure I-a). En effet, la théorie de Mie explique que pour des particules de rayon inférieur à 10 fois la longueur d'onde incidente la diffusion se fait de façon quasi-uniforme. Elle tend à s'amplifier dans le sens de propagation du rayon incident lorsque la taille de la particule est supérieure à la longueur d'onde. Dans la figure I-2 la section efficace de diffusion augmente très rapidement avec la taille de la particule. On constate par exemple que la section efficace de diffusion est multipliée par 10 quand la particule passe d'un rayon de 20 à 40 μm . Ce qui signifie que plus la particule est grosse, plus la diffusion est importante.

En outre, on différencie la diffusion totale de la rétrodiffusion. Cette dernière est la diffusion qui se fait dans le sens opposé au sens de propagation du faisceau incident. Elle est utilisée par le LIDAR à rétrodiffusion (notre système de mesure) pour récupérer l'information sur la concentration des aérosols et elle est définie par le coefficient de rétrodiffusion (noté β). Comme le coefficient de diffusion totale, le coefficient de rétrodiffusion évolue selon la taille de la particule diffusante.

II- LE LIDAR A RETRODIFFUSION

1) Définition

Le LIDAR à rétrodiffusion est un appareil dont le fonctionnement est similaire au RADAR. La différence avec ce dernier est qu'il utilise la lumière pour faire de la télédétection ou de la télémétrie. Il existe différents types de LIDAR dont l'utilité diffère les uns des autres. On distingue parmi les LIDAR, le LIDAR Doppler qui détermine le mouvement des particules diffusantes (mesure du vent), le LIDAR DIAL qui utilise deux longueurs d'ondes différentes pour mesurer un composé particulier, le LIDAR Raman qui, comme son nom l'indique, utilise la diffusion Raman pour caractériser les espèces chimiques rencontrées. Enfin le LIDAR à rétrodiffusion quant à lui utilise la diffusion de Mie pour mesurer à distance les propriétés de l'atmosphère. Généralement utilisé en météorologie, il servira dans cette étude à déterminer la concentration et la répartition des aérosols dans l'air et notamment à proximité de voies de circulation.

2) Le fonctionnement du LIDAR à rétrodiffusion

Le principe de fonctionnement du LIDAR à rétrodiffusion est présenté dans l'image I-1. Un système d'émission envoie sous forme d'impulsion un faisceau lumineux, monochromatique, directif et cohérent en direction du milieu à étudier. Quand le faisceau de lumière rencontre des aérosols, la diffusion renvoyée en direction de l'appareil (rétrodiffusion élastique) est récupérée par le module de détection du LIDAR.

Une caractéristique du système de mesure est sa résolution (Δz) selon l'axe horizontal. Elle dépend de la largeur temporelle à mi-hauteur dt de l'impulsion lumineuse incidente. Ainsi on retrouve Δz à l'aide de l'équation E3 (c étant la vitesse de la lumière).

$$\Delta z = \frac{dt \cdot c}{2} \quad (E3)$$



Image I-1: Fonctionnement du LIDAR à rétrodiffusion. Image récupérée du site web de l'IGN [2]

Certains paramètres comme la distance z entre la portion d'aérosols mesurée et le LIDAR peuvent être retrouvés directement. La distance z est proportionnelle au temps de vol (t) de l'impulsion (le temps que met l'impulsion pour parcourir l'aller retour LIDAR-Aérosols). On peut retrouver la distance z à l'aide de l'équation (E4) présentée ci-dessous (voir l'explication dans le schéma I-1).

$$z = \frac{t \cdot c}{2} \quad (E4)$$

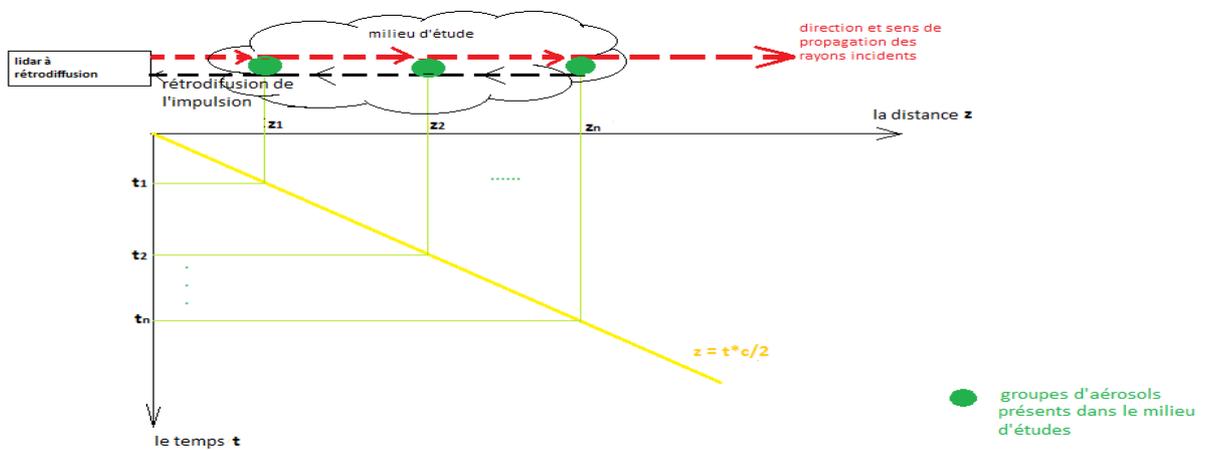


Schéma I-1: mesure de la distance à l'aide du temps de vol

Le signal récupéré par le LIDAR est alors une succession de pics qui contiennent de l'information sur les aérosols présents dans l'atmosphère. Pour extraire ces informations, il est nécessaire de s'intéresser à l'équation LIDAR qui explicite la répartition des aérosols dans le milieu d'étude.

3) L'équation LIDAR

L'équation LIDAR (E5) est l'expression du bilan radiométrique qui relie le signal reçu par le LIDAR aux variables atmosphériques. Elle est fonction des paramètres géométriques de l'appareil, des caractéristiques de l'impulsion émise par le LIDAR et des propriétés optiques des aérosols. L'équation LIDAR est alors définie telle que:

$$P(z) = \frac{k \cdot P_0 \cdot \beta(z) \cdot e^{-2 \cdot \int_0^z \alpha(z') \cdot dz'}}{z^2} \quad (E5)$$

Avec:

- $P(z)$ est la puissance reçue par le LIDAR en fonction de la distance z .
- P_0 puissance crête de l'impulsion.
- $\beta(z)$ est le coefficient de rétrodiffusion des particules diffusantes du milieu d'étude.
- $\int_0^z \alpha(z') \cdot dz'$, représente l'épaisseur optique qui est une caractéristique de l'opacité d'une tranche de l'atmosphère.
- k est une constante qui dépend de la composition du système et qui sera explicitée par la suite.

En annexe figure A-1, le lecteur peut retrouver une simulation de l'évolution de $P(z)$ pour $\beta = 1,9575 \cdot 10^{-4} m^{-1} Sr^{-1}$, $\alpha = 10^{-3} m^{-1} Sr^{-1}$ valeurs trouvées dans la littérature.

La puissance $P(z)$ reçue par le LIDAR varie en $1/z^2$. Elle est aussi proportionnelle à la puissance émise P_0 et à la quantité de lumière rétrodiffusée β . Enfin, cette puissance décroît de façon exponentielle selon l'extinction de l'atmosphère α . Dans cette équation trois paramètres sont inconnus et restent à déterminer : k , $\beta(z)$ et $\alpha(z)$. Pour retrouver ces inconnues, il est nécessaire d'effectuer une inversion de l'équation LIDAR.

On réécrit l'équation (E5) telle que:

$$S_0 = \ln(P(z) \cdot z^2) = K \cdot \beta(z) \cdot e^{(-2 \cdot \int_0^z \alpha(z') \cdot dz')} \quad (E6)$$

- K une constante qui est proportionnelle à P_0 . On définit cette constante telle que:

$$K = k \cdot P_0.$$

Une méthode simple pour inverser l'équation LIDAR consiste à prendre le log de S_0 de l'équation E6, on obtient ainsi:

$$L(z) = \ln(S_0) = \ln(K) + \ln(\beta(z)) - 2 \int_0^z \alpha(z') \cdot dz' \quad (E7)$$

On peut ainsi dériver $L(z)$ par rapport à z :

$$\frac{dL(z)}{dz} = \frac{1}{\beta(z)} \frac{d\beta(z)}{dz} - 2 \cdot \alpha(z) \quad (\text{E8})$$

Si on considère l'atmosphère comme un ensemble de zones homogènes, $\beta(z)$ est alors considéré comme constant dans chacune de ces zones. Ainsi on réécrit (E8) telle que :

$$\frac{dL(z)}{dz} = -2 \alpha(z) \quad (\text{E9})$$

On déduit de cette équation que l'extinction est la valeur absolue de la dérivée de L par rapport à z . En annexe figure A-2, on trace l'évolution de $\frac{dL(z)}{dz}$ avec $L(z)$ qui correspond à la $P(z)$ simulée en annexe figure A-1.

Cette hypothèse est valable pour une atmosphère pure (constituée uniquement de molécules (N_2 , O_2 ...)), en revanche elle n'est pas justifiée pour des grosses particules comme des particules de pneus, les poussières ou du brouillard. Pour résoudre l'équation (E5) dans le cas des aérosols en général, on utilisera la méthode d'inversion de Klett [3] qui est plus complexe mais s'affranchit de l'hypothèse d'homogénéité.

4) Composition du LIDAR à rétrodiffusion

Le LIDAR à rétrodiffusion est constitué de trois parties principales. Tout d'abord le système d'émission qui permet d'envoyer dans l'atmosphère un faisceau lumineux. Il est composé d'un laser impulsionnel de longueur d'onde $1,550 \mu m$. Dans le cadre de notre étude, le laser que l'on utilise est un laser fibré qui délivre des impulsions à la fréquence $\nu = 5 \text{ kHz}$ avec une énergie par impulsion $E = 40 \mu J$, soit une puissance moyenne $P_m = 200 \text{ mW}$, pour une largeur à mi-hauteur de l'impulsion $dt = 40 \text{ ns}$. La résolution du système est donc $\Delta z = 6 \text{ m}$ pour une puissance crête $P_0 = 1 \text{ kW}$.

Généralement positionné près du système d'émission, on retrouve le système de collection. Il est composé soit d'un télescope, soit d'un système de lentilles qui servent à collecter la lumière rétrodiffusée. C'est un grand miroir concave (diamètre de 203 mm) dans le cas d'un télescope et une grande lentille convergente (diamètre de 145 mm) dans le cas du système de lentille qui permet de focaliser les rayons rétrodiffusés en direction d'un capteur. Enfin la détection se fait via un capteur, ici une photodiode à avalanche en InGaAs de diamètre $d = 0,2 \text{ mm}$. Elle est sensible aux longueurs d'ondes comprises entre 950 et 1650 nm. On utilise un filtre interférentiel pour ne détecter que la rétrodiffusion provenant du laser. Pour $\lambda = 1,550 \mu m$, la sensibilité du détecteur est de 9 A.W^{-1} et le gain du

détecteur est de $0,9 \cdot 10^6 \text{ V.W}^{-1}$. La bande passante du détecteur est de **50 MHz** et son impédance de sortie est de **50 Ω** .

Le capteur renvoie alors l'information reçue vers un système d'acquisition qui dans notre cas est composé d'un oscilloscope et d'un ordinateur. L'oscilloscope permet de récupérer le signal acquis tandis que l'ordinateur effectue les calculs présentés dans la partie 3 (équation LIDAR).

La disposition des différentes parties qui composent le LIDAR à rétrodiffusion et les composants utilisés influent de façon significative sur la constante " k " de l'équation LIDAR. Cette constante est définie telle que:

$$k = \frac{G \cdot e \cdot q \cdot r_{CE} \cdot \lambda \cdot R_c \cdot m \cdot A \cdot g(z)}{2 \cdot h}$$

On reconnaît dans cette équation d'une part les caractéristiques du détecteur:

- G le gain du photodétecteur.
- q le rendement quantique du détecteur.
- r_{CE} l'efficacité de collection du détecteur.
- R_c la résistance de charge du détecteur.

D'autre part des caractéristiques liées à la géométrie de l'appareil:

- A l'aire de collection optique.
- $g(z)$ le facteur de recouvrement (il est lié à la géométrie de l'appareil).

Et pour finir des constantes ou des valeurs fixées comme:

- h la constante de Planck.
- e la charge de l'électron.
- λ la longueur d'onde d'émission.
- m le facteur d'efficacité optique.

Ce facteur k est en général mesuré expérimentalement lors du calibrage de l'appareil.

III- PARTIE EXPERIMENTALE

Les différentes manipulations effectuées dans ce chapitre ont pour objectif de trouver la configuration du système LIDAR qui nous retourne la décroissance en $1/z^2$ du signal rétrodiffusé par les molécules de l'atmosphère, de maximiser le rendement de l'appareil, et enfin d'observer le comportement du signal reçu par le prototype lorsque l'on place de la fumée dans son champ de vision.

1) Les configurations du système LIDAR

Connaissant le fonctionnement du LIDAR à rétrodiffusion, on choisit d'utiliser comme système de collection l'ensemble de lentilles pour avoir plus de liberté dans la configuration de l'appareil. Ce système est constitué d'une grande lentille convergente (noté **L2**) de diamètre égale à 145 mm et de focale $f_2=330\text{mm}$. Elle récupère la lumière rétrodiffusée et la focalise vers une lentille divergente **L3** de focale $f_3=-50\text{mm}$ qui, placée à la distance $d_{23}=280\text{mm}$, collimate la lumière émanant de **L2** vers le système d'acquisition (principe de la lunette de Galilée).

1-1 Le LIDAR à rétrodiffusion de type monostatique

1-1-a) première configuration du LIDAR à rétrodiffusion de type monostatique

Le LIDAR à rétrodiffusion de type monostatique est une configuration du système qui permet de superposer l'axe de propagation des faisceaux lumineux émis par l'appareil à l'axe de réception des rayons rétrodiffusés par l'atmosphère. Une lame séparatrice permet de séparer les rayons entrant et sortant. Pour des rayons lumineux à $\lambda = 1,550 \mu\text{m}$, la lame transmet environ 78% du rayon incident quand elle est positionnée à 45° de la direction de propagation du rayon incident.

On réalise alors le montage d'un LIDAR à rétrodiffusion de type monostatique présenté dans la figure ci-dessous.

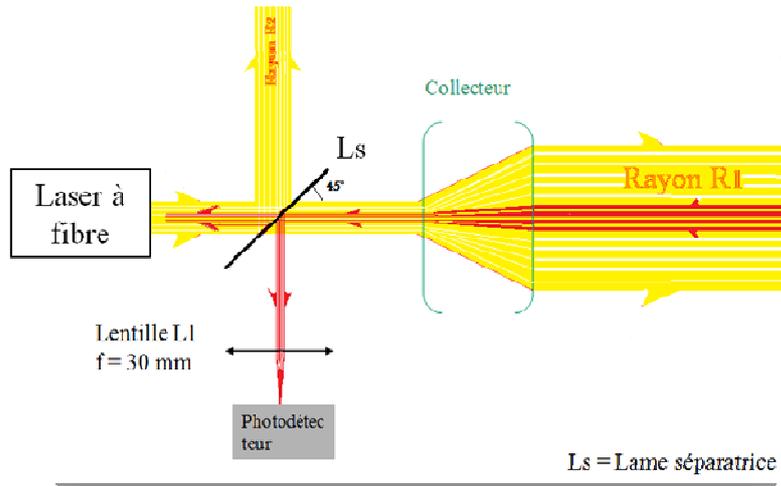


Schéma I-4: montage d'un LIDAR à rétrodiffusion de type monostatique.

Le laser à fibre, placé dans l'axe optique du système de lentilles, envoie un faisceau lumineux rectiligne vers la lame (**Ls**) grâce à un collimateur. Lorsque les rayons lumineux rencontrent **Ls**, positionnée à 45° de l'axe de propagation des rayons, les trois quarts de l'intensité sont transmis tandis que le reste est dévié et perdu. A la sortie de la lame, le faisceau lumineux transmis est envoyé dans le système de lentille qui joue le rôle d'agrandisseur (environ x6). Cela permet d'augmenter la taille du faisceau et d'en réduire d'autant la divergence. La collection de la rétrodiffusion se fait par le même système. A la sortie de la lentille L3, le faisceau est dévié par la lame vers le système d'acquisition.

Comme premier test, le prototype est tout d'abord orienté vers un immeuble afin de voir si la configuration permet de récupérer un écho.



Image I-2: photo de l'immeuble visé par le LIDAR

On observe le signal suivant:

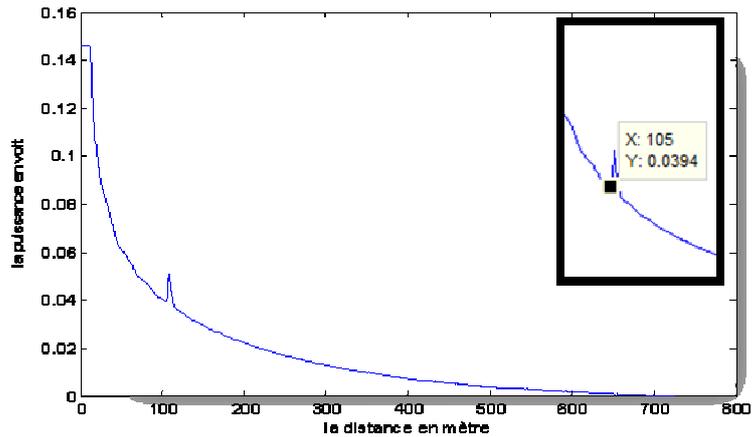


Figure I-3: évolution de la puissance reçue par le LIDAR en fonction de la distance

On observe sur cette figure un signal décroissant qui laisse apparaître un pic positionné à 105m. Lorsque l'on oriente l'appareil dans le vide le pic disparaît, on en déduit alors que ce pic montre la présence de l'immeuble et que la distance correspond à la distance prototype-immeuble. A l'aide d'un télémètre, on a vérifié cette distance et on obtient bien 105m, ce qui confirme nos mesures, notamment le top de départ de l'impulsion. Outre le pic, le signal présente une décroissance rapide vers zéro et l'on suppose que cette décroissance est due à l'atténuation des molécules de l'air. Pour le vérifier on oriente l'appareil dans la direction des nuages afin de récupérer uniquement la diffusion émanant des molécules de l'air. On récupère ainsi le signal (voir figure I-4) traité sur Matlab.

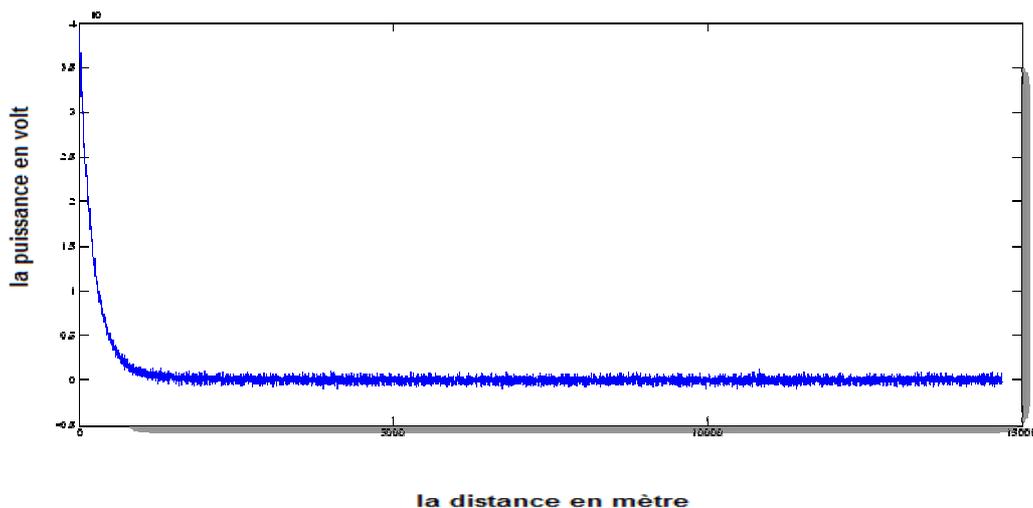


Figure I-4: l'évolution de la puissance reçue par le photodétecteur en fonction de la distance

Le signal reçu décroît rapidement jusqu'à s'annuler. A première vue la décroissance semble décrire l'atténuation du faisceau laser par les molécules de l'atmosphère.

D'après la théorie, le signal de diffusion des molécules de l'air décroît proportionnellement à $1/z^2$. On recherche donc avec Matlab l'hyperbole qui se rapproche le plus du signal reçu. Cette dernière décroît proportionnellement à $1/z^4$, ce qui signifie que l'atténuation du signal reçu par l'appareil ne suit pas l'évolution théorique de l'équation LIDAR. Ceci est confirmé en calculant la fonction $L(z)$ dont la pente est proportionnelle au coefficient d'extinction.

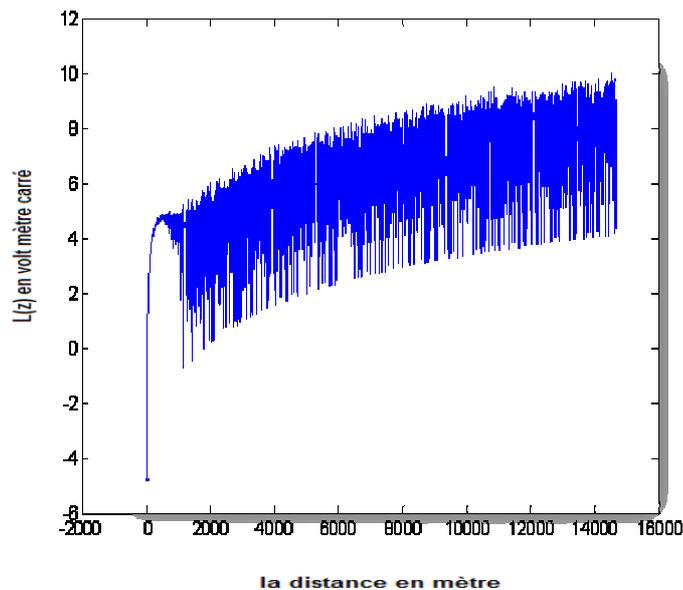


Figure I-5: l'évolution de $L(z)$ en fonction de la distance

Dans la figure I-5, on constate dans les premiers mètres que $L(z)$ est une droite qui croît rapidement en moins de 100 m. Dans les mètres qui suivent, la courbe est fortement bruitée et elle augmente plus lentement. L'évolution de cette courbe montre que la dérivée de $L(z)$ est strictement positive, en conséquence le coefficient d'extinction est négatif. Ce résultat ne coïncide pas avec la réalité, car cela signifie que le coefficient d'extinction tend à amplifier l'intensité incidente et non à le diminuer. L'interprétation de ces deux calculs nous conduit à la conclusion suivante : bien que le prototype permette de récupérer la distance d'objets placés dans son axe de visée, le signal récupéré par l'appareil ne décrit pas la diffusion du faisceau laser par les molécules de l'air. On suppose que ce signal est la superposition d'échos des rayons lumineux **R1** et **R2** (voir Schéma ci-après).

Pour le vérifier, on fait passer un objet devant **R2** et on observe à l'oscilloscope l'influence du passage de l'objet sur le signal. On constate que le signal reçu par le détecteur augmente considérablement à chaque passage de l'objet. En effet contrairement à ce que l'on pensait, lorsque le rayon **R2** rencontre des éléments dans sa trajectoire, il diffuse et/ou réfléchit une partie des photons vers le système d'acquisition. Étant donné que la puissance reçue par le capteur est très faible, on ne peut pas négliger l'influence de **R2**. Pour remédier à ce problème, il va falloir s'affranchir du rayon **R2**.

1-1-b) seconde configuration du LIDAR à rétrodiffusion de type monostatique

Eliminer le rayon **R2** reste une manipulation difficile à réaliser, car tout matériel optique placé devant **R2** est détecté par l'acquisition. Ainsi, pour éliminer ce rayon on choisit de jouer sur la polarisation du faisceau laser. On remplace la lame semi-réfléchissante par un cube polariseur, on rajoute un polariseur entre le cube et le laser. Le polariseur est orienté de façon à ce que le cube renvoie la puissance laser vers la sortie du LIDAR. Une lame quart-d'onde orientée à -45° permet de récupérer le signal rétrodiffusé vers le capteur.

On réalise alors la configuration ci-dessous :

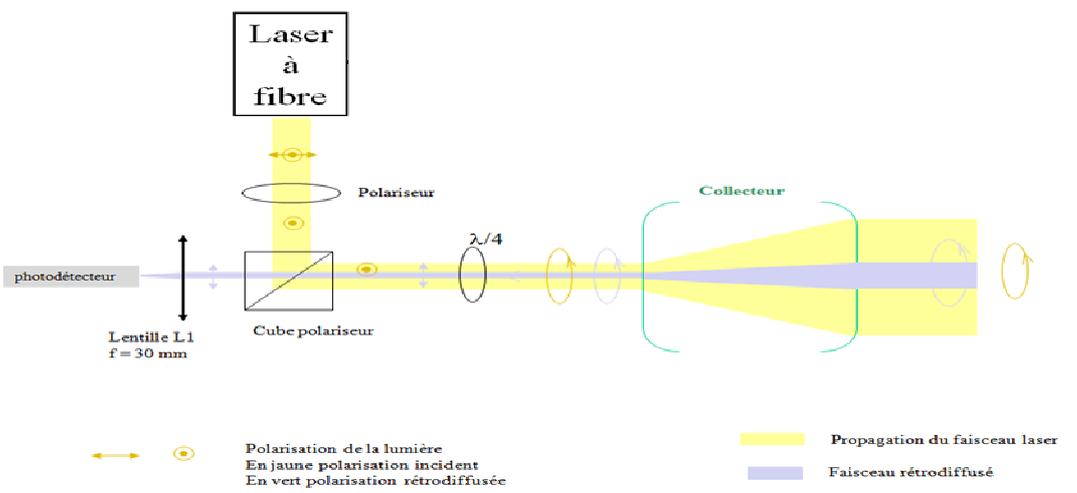


Schéma I-5: configuration du LIDAR à rétrodiffusion de type monostatique

Le laser émet un faisceau lumineux partiellement polarisé sur le polariseur. La sortie du polariseur est envoyée sur le cube qui transmet à la lame quart d'onde les rayons lumineux dont la polarisation est rectiligne. A la sortie de la lame, la polarisation du faisceau laser est changée en circulaire droite. Quand le faisceau de lumière rencontre des molécules, on supposera que la polarisation des rayons rétrodiffusés reste inchangée (ce qui est vrai pour des particules sphériques). Ainsi quand les rayons rétrodiffusés reviennent sur la lame quart d'onde, la polarisation résultante est une rectiligne qui a tourné de 90° . Ainsi l'intersection avec le cube polariseur renvoie le faisceau vers le système d'acquisition.

On oriente le prototype en direction des nuages et on observe à l'oscilloscope la décroissance du signal reçu par l'appareil en fonction du temps. Comme dans le paragraphe précédent, on calcul $L(z)$ et on recherche l'hyperbole qui se rapproche le plus du signal présentés respectivement les figures 6 et 7.

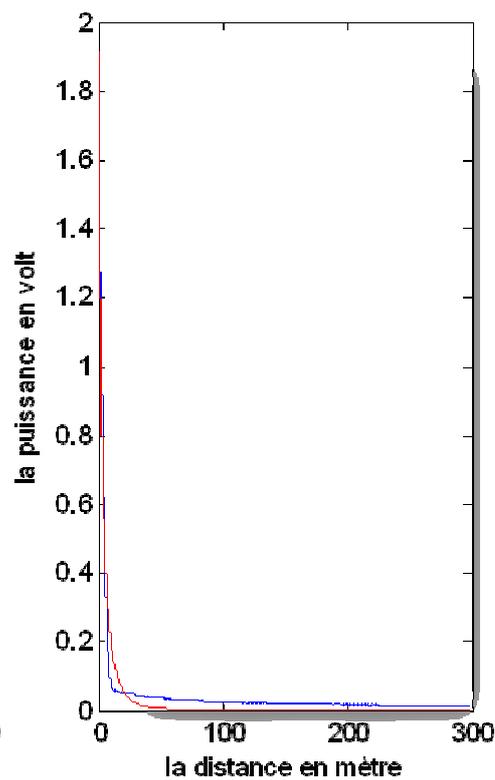
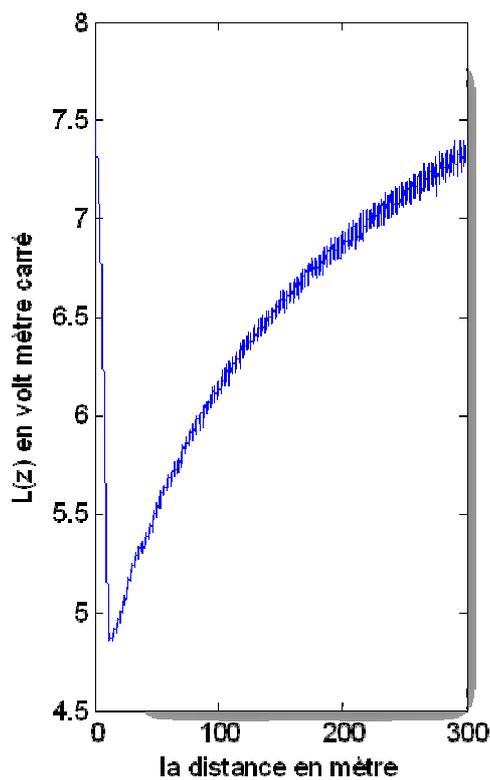


Figure I-6: Evolution de $L(z)$ en fonction de la distance Figure I-7: Comparaison des décroissances

Dans la figure I-6 le signal décroît rapidement dans les 13 premiers mètres, puis il augmente de 13 m à 1500 m. Ceci signifie que l'absorption tend à atténuer le signal dans les premiers mètres et il tend à amplifier le signal dès les mètres qui suivent. Cette courbe correspond à la théorie seulement dans les premiers mètres, elle montre que le signal reçu est susceptible de décrire l'atténuation du faisceau laser par les molécules de l'air que dans les treize premiers mètres. Quant à la figure I-7, l'hyperbole qui se rapproche le plus du signal décroît proportionnellement en $1/z^{3.18}$. Des deux figures on en déduit que le signal n'est pas uniquement la somme des rayons diffusés par les molécules de l'air, mais qu'il est la somme de différents échos. Deux hypothèses peuvent expliquer ces résultats, la séparation n'est pas parfaite, ce qui fait que l'on reçoit toujours une partie de R2, soit les lentilles réfléchissent vers l'acquisition une partie du rayon incident. Si l'une des deux hypothèses est vérifiée, retirer du signal l'écho non désiré en utilisant cette configuration reste très difficile à effectuer. Ainsi pour éviter les échos non désirés on choisit de changer de configuration et d'opter pour une configuration bistatique.

1-2 Le LIDAR à rétrodiffusion de type bistatique

Le LIDAR à rétrodiffusion de type bistatique est une configuration du LIDAR qui nous permet d'éliminer les échos non désirés. La disposition du système est présentée dans l'image ci-dessous.

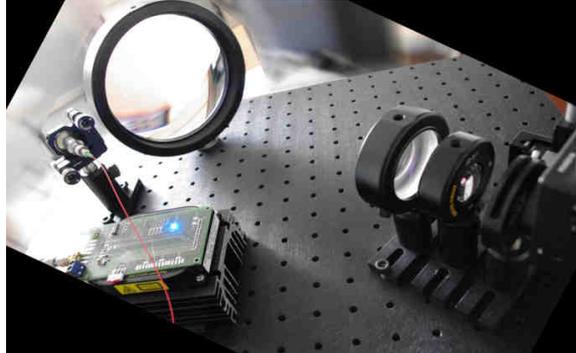


Image I-3: Configuration du LIDAR à rétrodiffusion de type bistatique

Le système d'émission et le collecteur sont placés côte à côte de sorte que leurs axes de visée soient parallèles et non confondus, de plus on rajoute un diaphragme devant le capteur pour réduire le bruit provenant des photons ambiants. L'inconvénient de cette configuration est que le recouvrement entre faisceau émis et reçu n'est plus optimal et intervient au bout de quelques mètres de distance contrairement à la configuration précédente. Il existe en effet une zone aveugle tant que le faisceau n'entre pas dans le champ de vue des lentilles et définit la distance pour laquelle le signal reçu par le LIDAR débute. Il doit être pris en compte dans les calculs de l'équation LIDAR.

On réalise alors le montage du prototype LIDAR et on vise l'immeuble positionné à 105 m utilisé comme référence dans le montage précédent. On récupère ainsi à l'oscilloscope la courbe qui suit.

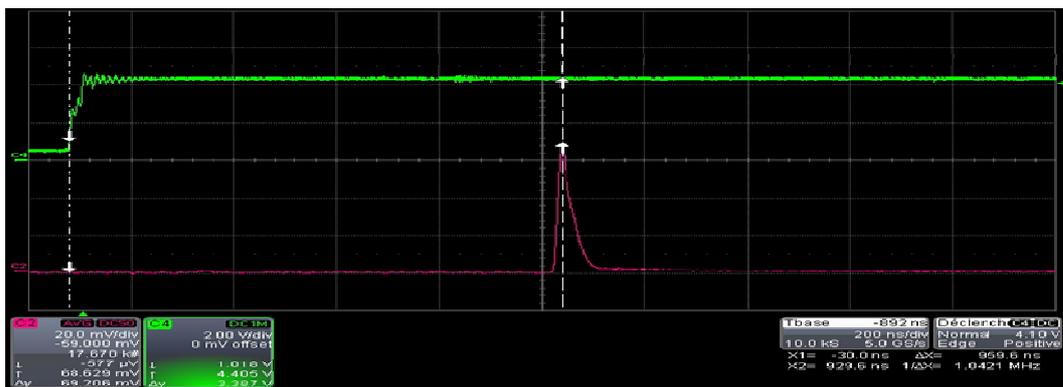


Image I-4: Photo de l'oscilloscope qui décrit le trigger et le signal reçu par le détecteur

En vert est présenté le trigger (signal de déclenchement de l'impulsion laser, donnant le top pour l'acquisition). Le front montant du trigger est positionné à 239 ns avant le début

du signal reçu par le détecteur. Cette valeur est à prendre en compte lors du calcul de la distance. En rouge est présenté le signal reçu par le détecteur. A 700,6 ns soit 105,09 m du début du signal, on retrouve une impulsion qui indique la présence de l'immeuble. Mais la partie du signal qui nous intéresse se trouve au début du signal. On constate dans les premiers mètres que le signal est presque nul.

Pour sortir le signal du bruit on réduit le nombre de volts par division au maximum. On obtient ainsi l'image ci-dessous.

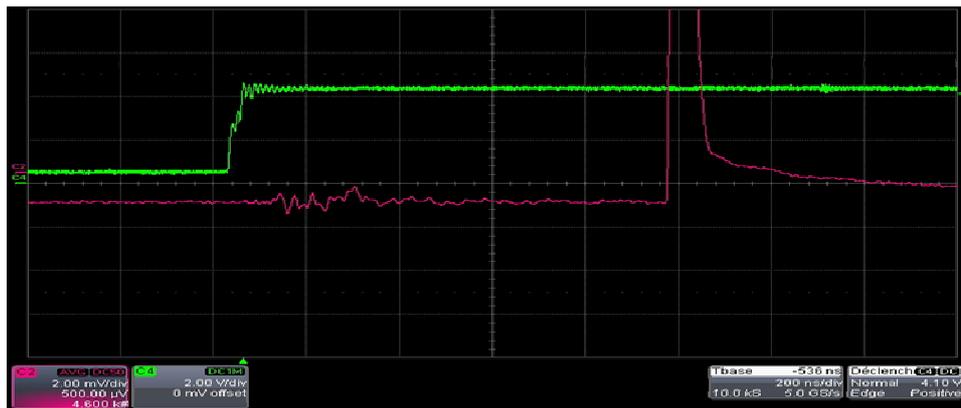


Image 5: zoom du signal reçu par le détecteur

Dans cette image, on constate que la courbe en rouge augmente légèrement à environ 239 ns du trigger. Sachant que la sortie du laser est positionnée de façon à ne plus avoir des échos non désirés, on en déduit que ces augmentations sont causées par la rétrodiffusion des molécules de l'air. L'augmentation de la courbe est assez grande pour nous laisser croire que le capteur détecte quelque chose dans les premiers mètres de la progression du signal, mais les variations sont si petites que l'on ne peut pas les exploiter. L'interprétation du signal reçu nous conduit à la conclusion suivante : bien que l'on ait réussi à supprimer les échos non désirés, le capteur utilisé n'est pas suffisamment sensible pour sortir du bruit un signal exploitable émanant de la diffusion des molécules de l'atmosphère.

La suite logique pour remédier à la sensibilité du détecteur est soit d'utiliser un détecteur plus sensible de type compteur de photons, soit utiliser une puissance de sortie du laser plus grande.

2) Utilisation d'un amplificateur optique à fibre

Afin de sortir du bruit l'information qui décrit l'atténuation des molécules de l'air, on choisit d'augmenter la puissance de sortie du LIDAR au lieu d'utiliser un détecteur plus sensible qui offrirait pourtant plus d'avantage. En effet, utiliser un détecteur plus sensible est un avantage pour notre prototype LIDAR, car il permet d'utiliser une source d'émission

avec une faible puissance de sortie, ce qui est préférable lors de manipulation sur le terrain. En revanche le budget et le temps attribués à ce projet ne nous ont pas permis d'acquérir un nouveau détecteur avant la fin de l'année.

2-1 utilisation d'un amplificateur de puissance

Aussi nous avons choisi d'utiliser un amplificateur à fibre de la faculté des sciences d'Angers sur notre laser à fibre. A la sortie de l'amplificateur, on obtient l'impulsion présentée en annexe figure A-3 dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau qui suit. Dans ce tableau on rajoute les caractéristiques du laser à fibre pour observer les changements apportés.

| | Laser à fibre | Après amplification |
|--|----------------------|----------------------------|
| Puissance moyenne P_m (en mw) | 200 | 1000 |
| Energie par impulsions E_{max} (en microJ) | 40.0 | 200.0 |
| Fréquence de répétition v (en Hz) | 5000.0 | 5000 |
| Puissance crête P_c en Kw | 1.0 | 2.67 |
| Largeur à mi-hauteur dt (en ns) | 30.0-40.0 | 75 |

Tableau 1: Caractéristiques des lasers utilisés

On constate que l'énergie est multipliée par cinq et que la largeur à mi-hauteur est quasiment doublée. Quant à la puissance crête, elle est quasiment multipliée par trois.

La sortie de l'amplificateur est alors utilisée en configuration bistatique. Elle remplace le laser à fibre et sa position est légèrement modifiée de sorte que l'on puisse modifier son orientation. De plus le prototype est monté sur un pied photo ce qui facilite son mouvement (transport et réglage de la visée).



Image I-6: Configuration du montage utilisé avec l'amplificateur

On oriente le prototype vers un immeuble et on aligne l'axe de visée des lentilles et celui du laser de façon à maximiser la collection de la réflexion émanant de l'immeuble. Cette procédure permet de confirmer que les deux axes se recouvrent et que le recouvrement se fait avant l'immeuble. En observant le signal reçu par le capteur à l'oscilloscope, on constate tout d'abord que le prototype effectue bien son rôle de télémètre. Par contre, on constate aussi que rien ne ressort du bruit avant le pic qui indique la présence de l'immeuble. On suppose alors que l'alignement des deux axes n'est pas optimal. En conséquence, on fait varier l'axe d'émission du laser. Ce qui n'a pour effet que de réduire la hauteur du pic qui indique la présence de l'immeuble. On en déduit alors que l'amplification n'est pas suffisante pour ressortir du bruit le signal qui décrit l'atténuation du laser par les molécules de l'atmosphère.

Pour avoir des résultats probants il faudra dans la suite utiliser un laser plus puissant que l'amplificateur.

2-2 utilisation du laser coherent vector

Dans cette partie, nous utilisons un Laser de prêt : le laser **coherent vector 1064-3000-30** que l'on appellera laser **CohV** dans la suite. Le laser **CohV** est un émetteur d'impulsion dont la fréquence de répétition des impulsions varie de 1kHz à 30kHz. La fréquence et la puissance de **CohV** sont couplées de façon à ce que l'énergie **E** n'excède pas **E_{max}=160 μJ**. On décide alors d'utiliser ce laser de façon à avoir l'énergie maximal **E_{max}**. Les caractéristiques de l'impulsion sont récapitulées dans le tableau ci-dessous. On rajoute à ce tableau les caractéristiques du laser à fibre et de la sortie de l'amplificateur pour observer les changements apportés.

| | Laser à fibre | Après amplification | CohVr |
|--|---------------|---------------------|-------------|
| Puissance moyenne Pm (en mw) | 200 | 10^3 | $1,60.10^3$ |
| Energie par impulsions E_{max} (en μ J) | 40.0 | 200.0 | 160.0 |
| Fréquence v (en Hz) | 5.10^3 | 5.10^3 | 1.10^3 |
| Puissance crête Pc en Kw | 1.0 | 2.67 | 16.0 |
| Largeur à mi-hauteur dt (en ns) | 40 | 75 | 10.0 |

Tableau I-2: Caractéristiques des trois lasers utilisés

Dans ce tableau on constate que bien que l'énergie par impulsion du laser CohV soit petite par rapport à celle de l'impulsion émanant de l'amplificateur présenté dans l'image A-1 en annexe, la puissance crête de CohV est quasiment quatre fois plus importante que celle de l'amplificateur et seize fois plus grande que le laser à fibre.

Le laser CohV est alors utilisé dans la configuration bistatique et il est positionné comme dans l'image qui suit.

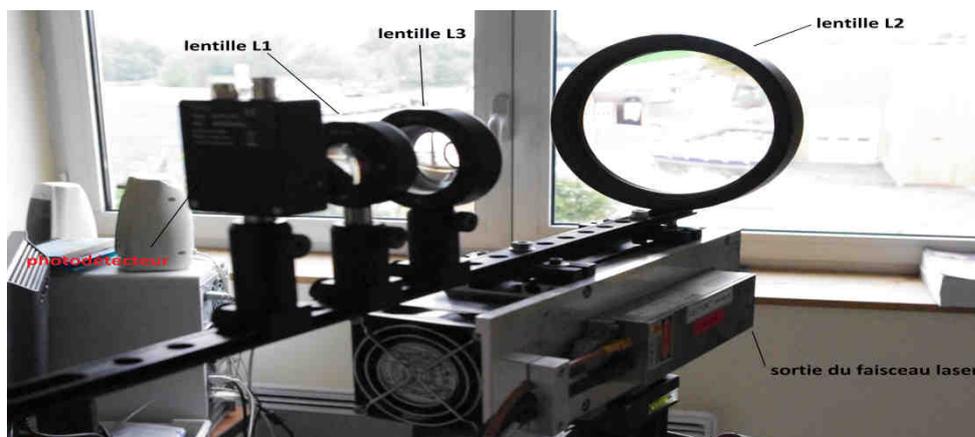


Image I-7: Configuration du montage avec le laser CohV

Afin de maximiser la détection, on optimise l'alignement entre le système de détection et celui d'émission sur le bâtiment situé à environ 105 m du système Lidar. Et pour finir on oriente le Lidar dans la direction des nuages et sur l'oscilloscope relié au photodétecteur, on observe la variation de la puissance collectée. Comme dans les autres montages, on constate qu'il n'y a aucune variation de la puissance. Le signal reste stable à une valeur proche de zéro ce qui correspond au bruit du détecteur.

On décide alors de revoir le système de lentilles qui sert de collecteur de lumière. On décide de retirer du montage la lentille L3 et l'on déplace la lentille L1 à 27 cm de L2. Cette configuration a pour but de réduire les pertes causées par la réflexion des rayons

rétrodiffusées sur les lentilles de collection. De plus, elle permet de réduire la tâche du signal rétrodiffusée sur le capteur. En effet, une des contraintes du capteur utilisé est la surface active réduite de la photodiode. Pour avoir une meilleure efficacité la surface de la tâche arrivant sur le détecteur doit être inférieure ou égale à la surface active de la photodiode, soit 200 μm .

On remplace alors le système de lentilles du prototype que l'on oriente dans la direction des nuages et on récupère à l'oscilloscope le signal qui suit.

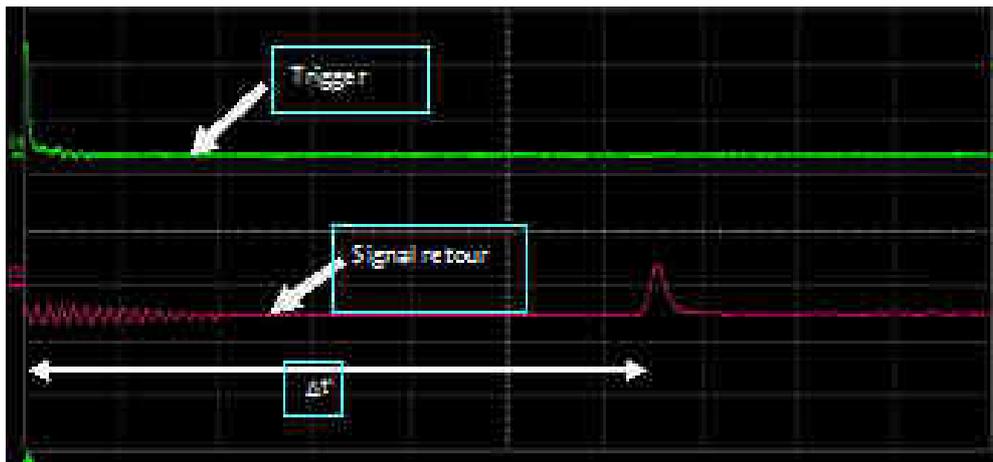


Image I-8: Echo de l'atmosphère en direction des nuages et le trigger

En vert est présenté le trigger et en rose le signal retour. On constate que le signal retour présente un pic très faible d'environ 1mV à $\Delta t' = 657$ ns avec $\Delta t'$ la différence de temps entre le front descendant du trigger et le pic de l'impulsion du signal retour. Sachant que l'on vise les nuages, on suppose que ce pic décrit l'atténuation de l'impulsion LIDAR par les molécules de l'air ! (enfin !)

Comme dans les paragraphes précédents, on calcul $L(z)$ que l'on trace en fonction de la distance que l'on initialise à la hauteur du maximale du pic du signal.

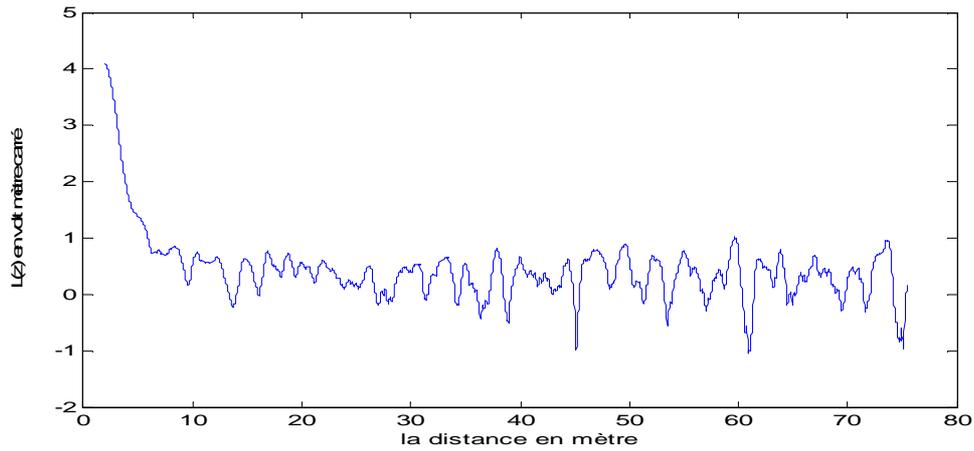


Figure 1-8: Evolution de $L(z)$ en fonction de la distance

Le signal est décroissant, on constate dans les premiers mètres que le signal est quasiment une droite décroissante ce qui correspondrait à la pente proportionnelle au coefficient d'extinction. Puis il oscille autour d'une valeur proche de zéro dans les mètres qui suivent ce qui correspond au bruit du détecteur.

Le résultat obtenu tend à se rapprocher de la théorie, mais pour confirmer notre interprétation on recherche dans Matlab l'hyperbole qui se rapproche le plus du signal.

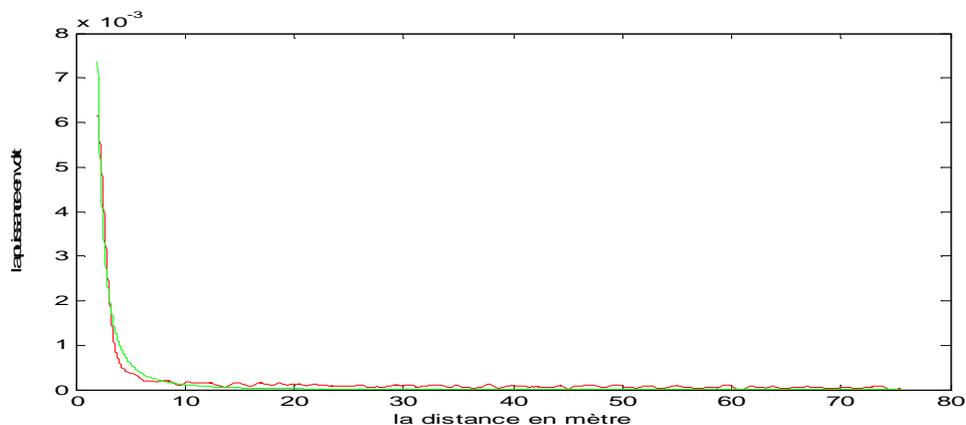


Figure 1-9: Comparaison de la courbe de du signal reçu par le détecteur à sa courbe de tendance

On constate dans cette figure que l'hyperbole en vert sur la figure qui se rapproche la plus proche du signal décroît proportionnellement à $1/z^{2.06}$. On déduit de ces deux courbes que le signal reçu décrit bien l'atténuation du faisceau laser par les molécules de l'atmosphère.

On calcul alors la distance de recouvrement théorique $D_{théo}$ de l'appareil, c'est à dire le recouvrement lorsque l'axe du collecteur est parallèle à l'axe de visée de l'émetteur. Et on obtient $D_{théo} = 28$ m.

On détermine alors la distance de recouvrement D_{exp} de l'appareil dans la configuration présentée.

$$D_{exp} = (\Delta t' - \Delta t) \cdot c / 2 \text{ soit } D_{exp} = 8.55 \text{ m}$$

On en déduit alors que l'axe du collecteur n'est pas parallèle à l'axe de visée de l'émetteur dans notre configuration. En effet pour ressortir du bruit la rétrodiffusion des molécules, on est obligé de faire se croiser les deux axes.

De cette étude, on conclut que la configuration utilisée nous permet de sortir du bruit le signal qui décrit l'atténuation de la puissance laser par les molécules de l'atmosphère. Le recouvrement du prototype se fait à 8,55m de l'appareil. En revanche le laser utilisé n'est pas assez puissant car il est encore nécessaire de faire se croiser l'axe du collecteur et l'axe de visée de l'émetteur pour avoir le signal recherché. De plus, la dernière modification apportée au montage remet en question les déductions faites sur la configuration bistatique utilisant l'amplificateur. Néanmoins on utilisera cette configuration pour réaliser nos premiers tests.

3) Etude de l'influence des aérosols sur le signal LIDAR

Pour étudier l'influence des aérosols sur le signal LIDAR, nous avons fabriqué des fumigènes de façon artisanale. Dans un terrain dégagé, on dispose, séparées les unes des autres trois cheminées contenant nos fumigènes. On oriente l'axe de visée du LIDAR en direction des sources de fumée, comme on peut le constater dans l'image qui suit.



Image 1-9: Configuration de la manipulation qui permet de tester les aérosols

On enregistre plusieurs signaux reçus par le LIDAR à un intervalle de temps fixé par l'oscilloscope. On obtient ainsi l'image ci-dessous traité sur Matlab pour avoir la distance par rapport à l'appareil.

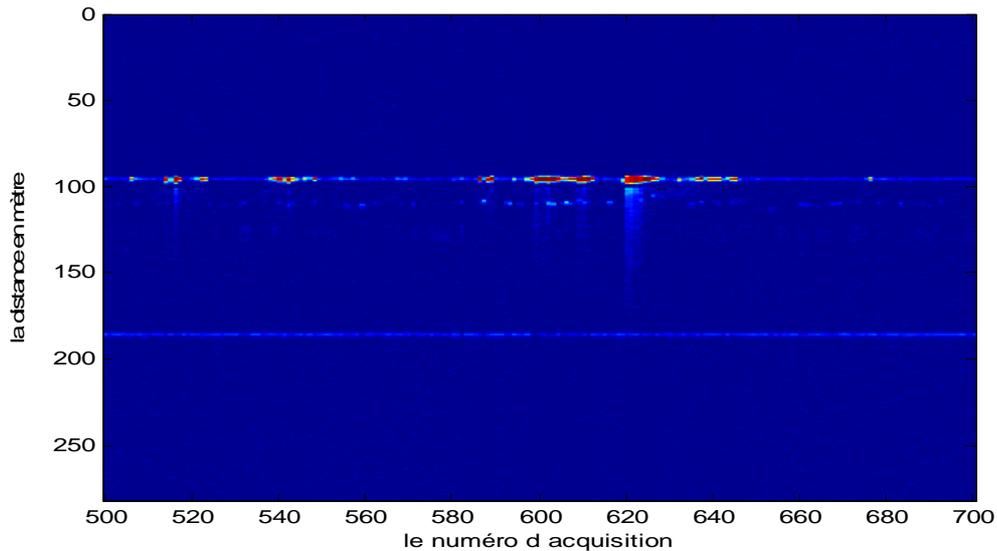


Image I-10: Evolution de la densité en aérosols en fonction du temps

On constate dans cette image qu'il y a des zones marquées qui indiquent une forte concentration de fumée dans l'atmosphère. En outre, on distingue cinq zones bien plus claires dans l'image. La première est la somme de la diffusion émanant des molécules de l'atmosphère et de fumée se rapprochant de la distance de recouvrement. La seconde à environ 101 m, la troisième à environ 108 m et la quatrième moins prononcée à environ 124 m correspondent respectivement à la diffusion des particules de fumée émanant de la première, la deuxième, et la troisième cheminée. Tandis que la dernière zone à environ 184 m correspond à la réflexion de l'impulsion laser sur les arbres au fond du terrain. Aussi, lorsqu'une zone est plus prononcée qu'une autre, cela signifie que la concentration de fumée y est plus importante.

On conclut de cette expérience que ce montage nous permet de détecter des aérosols, mais le signal reçu est si faible qu'il est nécessaire qu'ils soient en forte concentration dans l'atmosphère.

CONCLUSION

La théorie du LIDAR et les différentes manipulations réalisées nous permettent de conclure que déterminer l'évolution de la densité des aérosols dans l'atmosphère à l'aide d'un LIDAR à rétrodiffusion est complexe et nécessite un savoir faire. Le passage par différentes configurations nous a été nécessaire pour mieux comprendre le fonctionnement du système, voir les contraintes de chaque configuration et trouver la configuration qui permet de sortir du bruit le signal qui décrit la rétrodiffusion des molécules de l'air. En effet la configuration bistatique permet de retrouver ce signal, mais la faible sensibilité du détecteur nous a contraint à augmenter la puissance laser émise. Ainsi des améliorations du prototype LIDAR reste à faire d'une part pour amplifier la collection de la rétrodiffusion des molécules, d'autre part pour distinguer les aérosols par leurs tailles via l'inversion de l'équation LIDAR.

L'ERA a investi dans du matériel pour la conception des modules émission, détection et acquisition du LIDAR pour la mesure de pollution. La source est constituée d'un LASER fibré impulsionnel émettant dans l'infrarouge 1.5 μm pour assurer la sécurité oculaire. L'optique de détection collectant la rétrodiffusion de la lumière est basée sur le principe de la lunette de Galilée associée à une photodiode à avalanche. L'encapsulage du système est réalisé par le CECF d'Angers et sera livré courant septembre. De multiples tests ont été réalisés pour détecter le signal très faible de rétrodiffusion du faisceau laser dans l'atmosphère :

- En configuration monostatique (le chemin du LASER et du signal sont colinéaires), les échos sur les différents éléments optiques rendent difficile la détection du signal.
- En configuration bistatique, on détecte la rétrodiffusion sur une dizaine de mètres (ce qui reste peu et nécessite des capteurs plus sensibles tels les photomultiplicateurs) . Nous avons ensuite réalisé des tests avec une atmosphère enfumée. En utilisant des fumigènes, le système détecte la fumée à une cinquantaine de mètres. La difficulté reste d'évaluer la concentration des particules dans un tel dispositif et de connaître le seuil de détection.

Suite à une collaboration avec le LASIM, un nouveau système a été imaginé basé sur une source à 1064 nm et des photodiodes optimisées à cette longueur d'onde. Le matériel devrait arriver en début d'année prochaine et nous espérons pouvoir développer un premier prototype durant le premier semestre. Eventuellement, une perspective de mesure sur le terrain est envisagée si les tests effectués sont concluants.

BIBLIOGRAPHIE et SITOGRAPHIE

- [1] "Absorption and Scattering of Light by Small Particles" Craig F. Bohren and Donald Huffman, Editions Wiley Science - 1998.
- [2] Institut Géographique National.
[http://recherche.ing.fr/labos/larg/page.php?menu=En savoir plus](http://recherche.ing.fr/labos/larg/page.php?menu=En%20savoir%20plus)
- [3] "Stable analytical inversion solution for processing LIDAR returns" de James D. Klett, APPLIED OPTICS, vol.20, No.2, 1981
- [4] Brevet d'invention: LIDAR COMPACT , numéro de publication 2865545
- [5] Thèse: "Relations entre caractéristiques de la pollution particulaire et paramètres optiques dans les eaux résiduaires urbaines" Amélie MARECHAL, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes, 2000.
- [6] Thèse: "Télédétection Physique de l'atmosphère" par Jun Eduardo CUESTA, institut Pierre-Simon Laplace, 2006
- [7] Thèse: "Restitution de l'indice de réfraction complexe et de la granulométrie d'une population de particules sphériques à partir de l'indicatrice de diffusion de la lumière" de Christophe VERHAEGE, université Blaise PASCAL, 2008.
- [8] "Application of Elastic Lidar to PM₁₀ Emissions from Agricultural Nonpoint Sources" de Environmental science & technology volume 32, number 20, 1998
- [9] "Développement d'un imageur polarimétrique et applications" de V. BOUCHER et S. CEDRATI, rapport de recherche LCPC, 2007.
- [10] http://patrick.kohl.pagesperso-orange.fr/spectro_oem/spectro_oem_7.htm
- [11] http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/39/63/46/PDF/these_didier.pdf
- [12] http://fr.wikipedia.org/wiki/Diffusion_de_la_mati%C3%A8re
- [13] <http://environnement.doctissimo.fr/un-air-plus-pur/pollution-et-sante/Quels-effets-sur-la-sante-.html>

ANNEXE (figures, images et équations)

Figure A-1

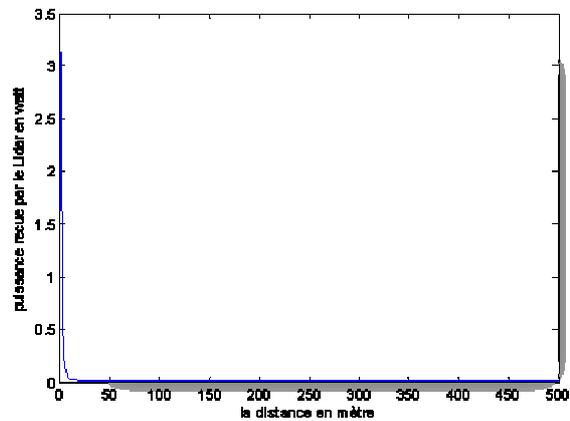


Figure A-1: évolution théorique de la puissance reçue par un LIDAR à rétrodiffusion

Figure A-2

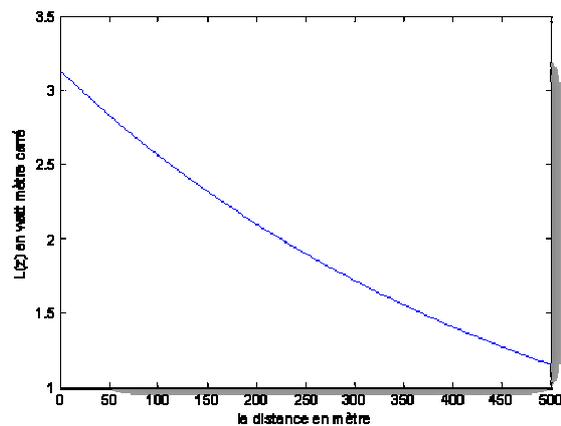


Figure A-2: évolution théorique de L(z) dont la dérivée donne le coefficient d'extinction

Equation A-1

Définition de la puissance crête

$$P(z) = \frac{E}{dt}$$

Avec : - E , l'énergie par impulsion.

- dt , la largeur temporelle à mi-hauteur.

Figure A-3:

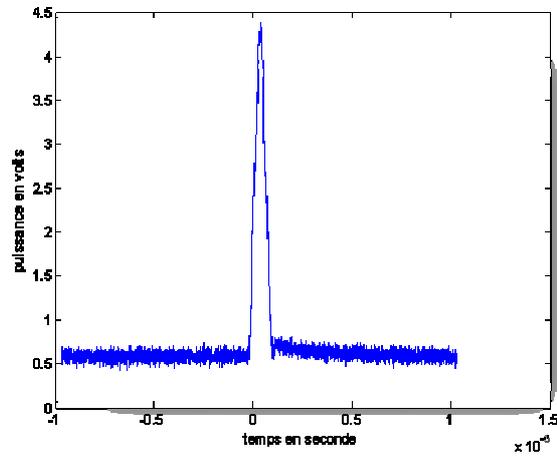


Figure A-2: Impulsion à la sortie de l'amplificateur

Image A-1:

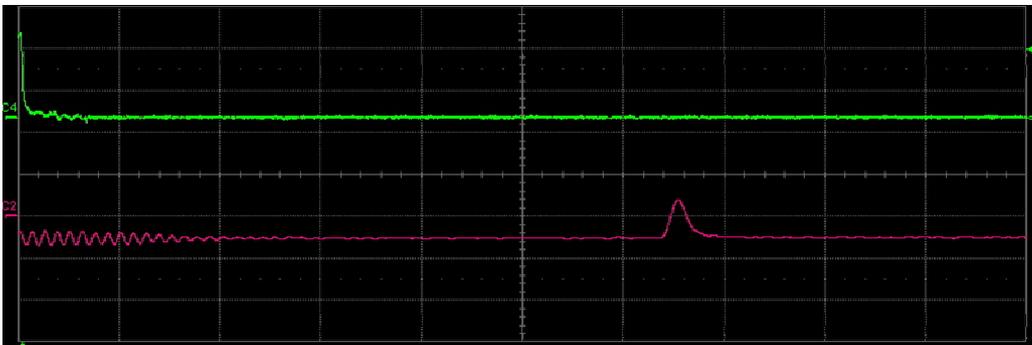


Image A-1: capture du trigger et du signal reçu par le capteur

On peut mesurer Δt , le délai entre le top de l'impulsion et le début de cette dernière. On obtient $\Delta t = 600$ ns soit 6 div de 100 ns présenté.

Calcul du recouvrement théorique

Avant de calculer le recouvrement on calcule la focale équivalente au système de lentilles. Soit $f_1 = 30$ mm et $f_2 = 300$ mm les focales respectives des lentilles L_1 et L_2 , la focale équivalente est définie telle que:

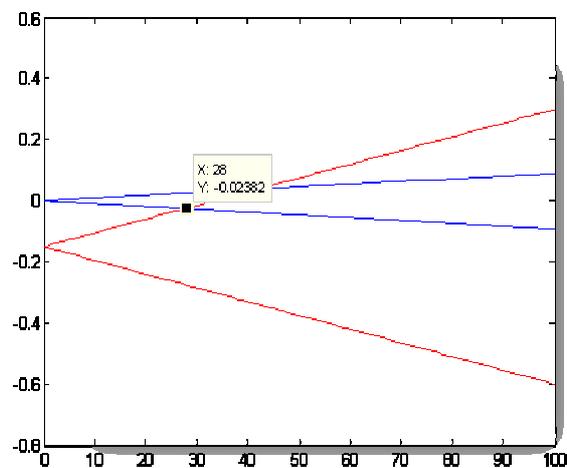
$$f_{eq} = -\frac{f_1 \cdot f_2}{\Delta}$$

Avec

$$\Delta = -f_1 + f_2 + e$$

e étant la distance séparant les deux lentilles.

On obtient ainsi $f_{eq} = 11\text{cm}$ en partant du centre de L_2 vers L_1 . Puis, dans Matlab on réalise le programme qui nous permet de tracer l'ouverture du système de lentille et du laser en fonction de la distance. On obtient le graphe ci-dessous:



Recouvrement du LIDAR à rétrodiffusion de type bistatique

En bleu l'ouverture du laser et en rouge l'ouverture des lentilles. On obtient $D_{théo} = 28\text{ m}$.

Rédacteur

V. Boucher

Directeur du Département Laboratoire et CECP d'Angers

P. Quilliou



**CETE de l'Ouest/Département Laboratoire et CECP d'Angers
(DLRCA)**

23 avenue de l'Amiral Chauvin

BP 20069

49136 Les PONTS DE CE Cedex

Tél : 02 41 79 13 00

Fax : 02 41 44 32 76

dlrca.cete-ouest@developpement-durable.gouv.fr

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