

Détection de particules fines par LIDAR



Historique des versions des documents

Version	Date	Commentaire
Version 1.0	18/11/2014	Rapport initial
Version 1.1	15/12/2014	Rapport final

Affaire suivie par :

- Vincent BOUCHER – Cerema / Direction territoriale Ouest

Département Laboratoire et CECP d'Angers – Groupe Exploitation et Sécurité Routières / Pôle VISION

mail – Tél : vincent.boucher@cerema.fr – 02 41 79 13 92

Rédacteur :

- Vincent BOUCHER – Cerema / Direction territoriale Ouest

Département Laboratoire et CECP d'Angers – Groupe Exploitation et Sécurité Routières / Pôle VISION

mail – Tél : vincent.boucher@cerema.fr – 02 41 79 13 92

Validation :

Date	Nom du valideur	Commentaire
16/12/2014	Florian GREFFIER	RAS
17/12/2014	Jean-Noël GAUDIN	RAS

Mots-clés : aérosols, particules fines, pollution, LIDAR, rétrodiffusion

Résumé

L'objectif de ces travaux est l'étude d'un dispositif permettant de réaliser simultanément et en temps réel des mesures de pollution et de paramètres du trafic. Le choix du système de mesure s'est porté sur un LIDAR à rétrodiffusion dont le principe est celui du radar où l'émetteur est un laser. On s'intéresse ici uniquement à l'aspect de mesure de particules. Le LIDAR à rétrodiffusion fonctionne à partir de la diffusion de la lumière par les particules en suspension dans l'air : l'interaction lumière-aérosols fournit des informations sur le type de particule et leur concentration. Après avoir modélisé optiquement le prototype, celui-ci est testé en extérieur et évalué lors d'expérimentations en bord de voie. Les données LIDAR sont enregistrées de manière synchrone avec des données météorologiques, de qualité de l'air et de trafic routier. Un modèle tenant compte de l'humidité relative permet de corriger les signaux de rétrodiffusion au cours de leur évolution sur une journée. Enfin, l'analyse des données échantillonnées à différentes fréquences montre les corrélations avec les mesures de PM_{2,5} (particules inférieures à 2,5 microns) et les difficultés pour accéder à des mesures quantitatives de pollution.

Sommaire

1. DIFFUSION DE LA LUMIERE PAR LES AEROSOLS	3
1.1 - LES AEROSOLS	3
1.2 - INTERACTION AEROSOLS - LUMIERE.....	3
1.2.1 - Atténuation par les aérosols.....	3
1.2.2 - Diffusion élastique par les aérosols	4
2. LE LIDAR A RETRODIFFUSION	6
2.1 - PRINCIPE DE DETECTION	6
2.2 - MODELISATION DU SIGNAL	7
2.3 - PROTOTYPE & MODELE OPTIQUE	9
2.3.1 - Recouvrement optique	10
2.3.2 - Recouvrement géométrique	11
3. MESURES IN SITU	15
3.1 - CONTRAINTES & CHOIX DU SITE	15
3.2 - DONNEES RECUEILLIES	16
3.2.1 - Expérimentations avec video.....	16
3.2.2 - Expérimentations avec radar.....	19
4. RESULTATS	21
4.1 - PARAMETRES INFLUANT SUR LE SIGNAL LIDAR	21
4.1.1 - Influence de l'humidité relative	21
4.1.2 - Influence d'autres aérosols.....	24
4.2 - MESURE DE LA RETRODIFFUSION & CORRELATION AVEC LE TRAFIC ROUTIER	27
4.2.1 - Résultats avec les données video.....	28
4.2.2 - Résultats avec les données radar	29
4.3 - MESURE DU DEGRÉ DE POLARISATION	33
4.3.1 - Mesures du 19 Mars 2014.....	34
4.3.2 - Mesures du 16 Avril 2014	35
4.3.3 - Mesures du 17 Avril 2014	35
5. CONCLUSION & DISCUSSION	36
6. BIBLIOGRAPHIE & SITOGRAPHIE.....	37

Introduction

Les aérosols jouent un rôle important dans les réactions photochimiques qui affectent la qualité de l'air. La santé humaine y est aussi sensible, notamment aux particules fines qui peuvent causer des problèmes respiratoires du fait de leur petite taille et de leur association avec des hydrocarbures polyaromatiques. L'étude de l'émission, du transport et des transformations des aérosols sont des points clés dans la compréhension de la physique/chimie de l'atmosphère, des modèles de climat et de pollution. Les PM10 (particules de taille inférieure à 10 microns) et les PM2,5 (particules de taille inférieure à 2,5 microns) sont de bons indicateurs des polluants émis par le trafic.

Forte de son expérience en mesure du trafic et en optique, l'ERA 17 d'Angers s'est ainsi intéressée à un système capable de mesurer à la fois les particules émises par le trafic ainsi que simultanément, le flot de véhicules lui-même. Après des recherches bibliographiques et la définition d'un cahier des charges, le LIDAR à rétrodiffusion s'est avéré prometteur. Ce genre de système 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). Il permet aussi d'établir des représentations en trois dimensions de la répartition des concentrations de particules le long d'axes de circulation.

Dans une première partie, nous rappellerons le comportement de la lumière en interaction avec les aérosols. On s'intéressera ensuite au principe de fonctionnement et à la composition du LIDAR à rétrodiffusion. Son modèle optique permettra de vérifier les caractéristiques de fonctionnement notamment en termes de distances de mesure. Nous expliciterons alors les contraintes liées aux mesures sur site ouvert ainsi que le choix de la disposition choisi. La troisième partie exposera l'ensemble des données recueillies lors de ces expérimentations : données lidar mais aussi données météorologiques, données issues d'associations de la qualité de l'air, données de trafic routier. L'agrégation de ces données et leur traitement feront l'objet de la quatrième partie : nous corrigerons les données de rétrodiffusion en fonction de l'humidité relative ainsi que l'influence d'autres aérosols comme les pollens. Des corrélations entre les données seront enfin réalisées pour évaluer la faisabilité de la mesure par cette technique.

1. Diffusion de la lumière par les aérosols

1.1 - 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.

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 chute 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, l'intensité des rayons lumineux incidents est modifiée selon les caractéristiques physico-chimiques de ces particules (comme la taille, l'indice de réfraction de la particule).

1.2 - Interaction aérosols - lumière

1.2.1 - Atténuation 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 au coefficient d'extinction α qui est la somme du coefficient d'absorption α_{abs} et celui de diffusion α_{diff} auquel nous nous intéressons ci-après.

1.2.2 - 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 ($\sigma_{diff,i}$) 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. L'étude théorique [1] a permis de montrer, dans la figure 1, comment se répartit l'intensité diffusée par un aérosol en fonction de la taille de ce dernier (on parle de fonction de phase). 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 à $\lambda=1,55\mu\text{m}$, $n'= 1,4$ et $n''= 0$.

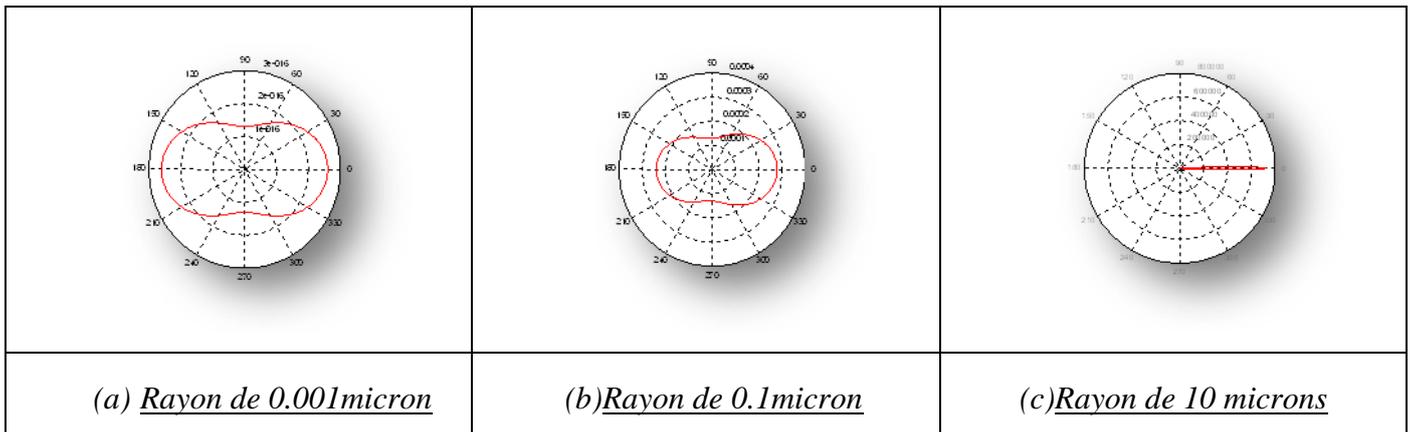


Figure 1 : Fonctions de phase selon le rayon de la particule diffusante.

Dans la figure 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 (cf figure 1-a)). En effet, la théorie de Mie montre que pour des particules de rayon inférieur à environ 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.

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.

2. Le LIDAR à rétrodiffusion

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 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 utilise la diffusion Raman pour caractériser les espèces chimiques rencontrées. Enfin, le LIDAR à rétrodiffusion utilise la diffusion de Mie pour mesurer à distance les propriétés de l'atmosphère. Généralement utilisé en météorologie, il sert dans cette étude à déterminer la concentration et la répartition des aérosols dans l'air et notamment à proximité de voies de circulation.

2.1 - Principe de détection

Le principe de fonctionnement du LIDAR à rétrodiffusion est présenté dans la figure 2. Un système d'émission envoie sous forme d'impulsions 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 et est définie à l'aide de l'équation (E3).

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

Où c est la vitesse de la lumière.

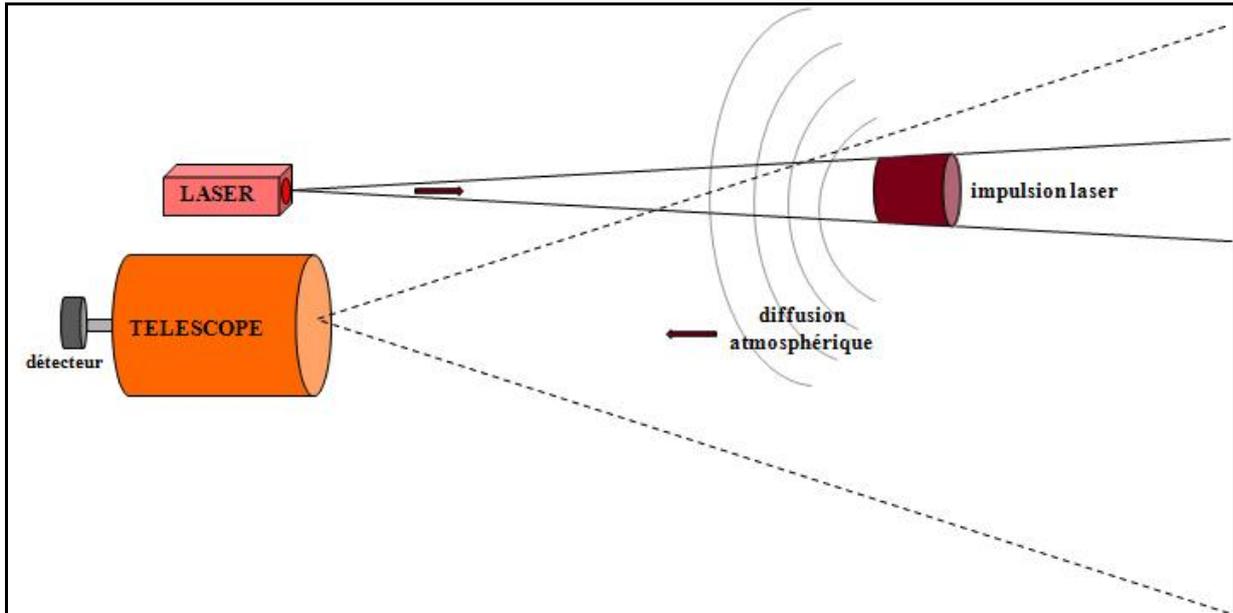


Figure 2 : Principe de la télédétection par LIDAR

La distance z entre l'aérosol mesuré et le LIDAR peut être déduite directement à partir du temps de vol t de l'impulsion (le temps que met l'impulsion pour parcourir l'aller retour LIDAR-Aérosol). On peut retrouver la distance z à l'aide de l'équation (E4) :

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

Le signal récupéré par le détecteur contient la rétrodiffusion du faisceau laser sur les composants moléculaires de l'atmosphère (N_2, O_2) et sur les aérosols présents dans celle-ci. Pour extraire des informations relatives aux aérosols (taille, nombre), il est nécessaire de s'intéresser à l'équation LIDAR qui explicite le signal reçu en fonction des paramètres optiques du milieu liés aux aérosols et à leur répartition.

2.2 - Modélisation du signal

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:

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

Avec $P(z)$ la puissance reçue par le LIDAR en fonction de la distance z .

- P_0 puissance de l'impulsion.

- $\beta(z)$ le coefficient de rétrodiffusion des particules diffusantes.
- $\int_0^z \alpha(z') \cdot dz'$, représente l'épaisseur optique qui traduit l'atténuation due à l'atmosphère.
- k est une constante qui dépend de la composition du système.

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 les deux paramètres recherchés sont $\beta(z)$ et $\alpha(z)$. Ils représentent la rétrodiffusion du milieu (atmosphère + aérosols) et son absorption le long du trajet de l'impulsion lumineuse. Sous certaines hypothèses simplificatrices (homogénéité de la diffusion par tranche d'atmosphère), il est possible de remonter à l'inconnue $\alpha(z)$. On réécrit l'équation (E5) telle que:

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

K est la constante du système proportionnelle à P_0 . Une méthode simple pour inverser l'équation LIDAR consiste à prendre le log de S_0 dans 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 $L(z)$ rapport à z :

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

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

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

On déduit de cette équation que le coefficient d'absorption est lié à la dérivée de $L(z)$. On peut alors en déduire $\beta(z)$ en présumant du rapport entre diffusion et absorption. Reste ensuite à faire le lien entre propriétés optiques (absorption, diffusion) et propriétés physiques (nombre, taille, indice de réfraction) voire chimiques (composition des aérosols). Ceci peut se faire par modélisation et optimisation sur les mesures expérimentales ou encore en utilisant des mesures complémentaires en longueur d'onde et/ou en polarisation. On s'intéressera ici uniquement à la méthode simple (pour ne pas dire simpliste) démontrant la faisabilité de la mesure de α , β et ses corrélations possibles avec le trafic routier. Il existe cependant des techniques de résolution de l'équation LIDAR beaucoup plus générales et complexes, notamment la méthode d'inversion de Klett [2].

2.3 - Prototype & modèle optique

Notre 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 MINILITE de longueur d'onde **1,06 μm** qui délivre des impulsions à la fréquence **$f = 10 \text{ Hz}$** avec une énergie par impulsion **$E = 30 \text{ mJ}$** pour une largeur à mi-hauteur de l'impulsion **$dt = 5 \text{ ns}$** soit une puissance **$P = 6 \text{ MW}$** pour un diamètre de faisceau de **$d = 3 \text{ mm}$** . La densité d'énergie du laser vaut **0.5 J/cm^2** (à savoir pour utiliser des optiques résistantes à ce flux). La résolution du système est idéalement **$\Delta z = c \cdot dt / 2 = 0.75 \text{ m}$** mais va aussi dépendre de la fréquence d'échantillonnage du signal. Un agrandisseur x10 à la sortie du laser permet d'augmenter le diamètre du faisceau et de réduire sa divergence initiale (**$\theta = 4.5 \text{ mrad}$**).

Généralement positionné près du système d'émission, on trouve le système de collection de la lumière. Il est composé ici d'un télescope (diamètre de **203 mm**) qui permet de focaliser les rayons rétrodiffusés en direction d'un capteur. Enfin, la détection se fait par une photodiode à avalanche en silicium (LICEL) de diamètre **d 1 mm**. Elle est sensible aux longueurs d'ondes comprises entre **400 et 1150 nm**. On utilise un filtre interférentiel pour ne détecter que la rétrodiffusion provenant du laser. Pour la longueur d'onde **$\lambda = 1,06 \mu\text{m}$** , la sensibilité du détecteur est de **$55 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$** et le gain du détecteur est de l'ordre de 10^3 (selon la tension appliquée au détecteur). La bande passante du détecteur est **DC - 10 MHz** et son impédance de sortie est de **50 Ω** .

Le montage est représenté dans la figure suivante illustré d'une photo.

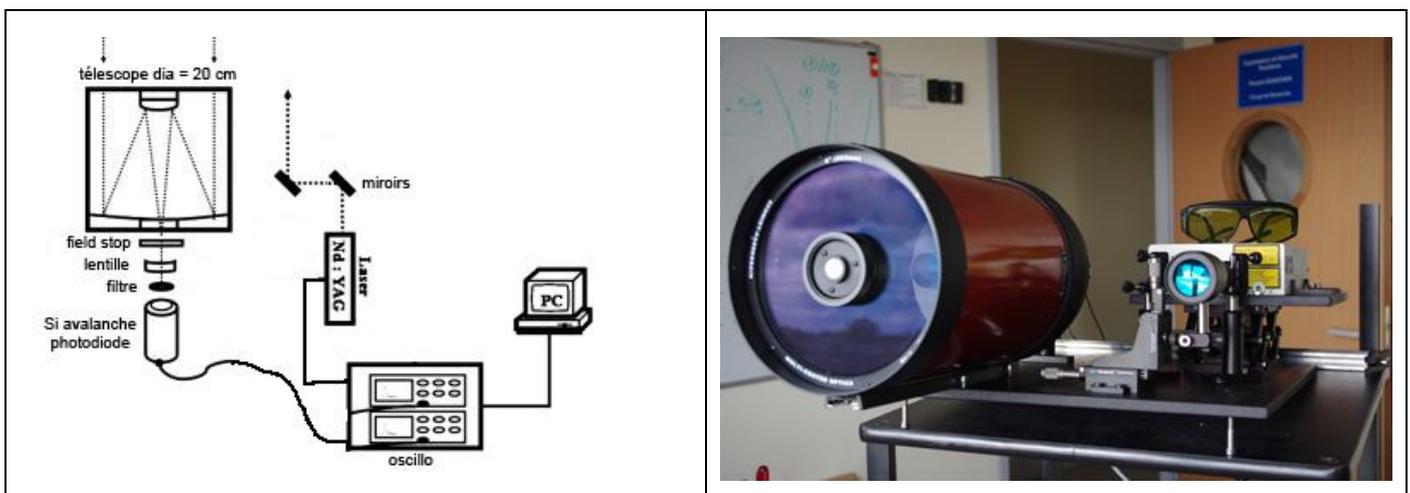


Figure 3 : Schéma et illustration du LIDAR prototype.

Une fois le prototype développé, il est nécessaire de modéliser l'ensemble de la chaîne émission – réception pour connaître le domaine de mesure du système. Pour cela, on calcule le recouvrement du système c'est à dire, la zone spatiale où le télescope 'voit' l'impulsion laser. Il existe en effet une zone aveugle sur les premiers mètres liée à la géométrie (on parlera de recouvrement géométrique) et à l'imagerie du système (on parlera de recouvrement optique).

2.3.1 - Recouvrement optique

Le recouvrement optique est lié au fait que l'image du faisceau laser ne se projète pas identiquement sur le capteur au cours de sa propagation. Il dépend de la distance de mise au point du télescope. Sur les premiers mètres de propagation, l'image du faisceau est floue et de taille supérieure au capteur. C'est la même chose lorsqu'on observe les étoiles (mise au point l'infini), on ne distingue pas le miroir secondaire du télescope. Ceci se modélise en utilisant les lois de l'optique géométrique (formule de conjugaison et matrices abcd) et en calculant la taille de l'image au cours de la propagation. La figure suivante présente le recouvrement optique avec les paramètres de notre système.

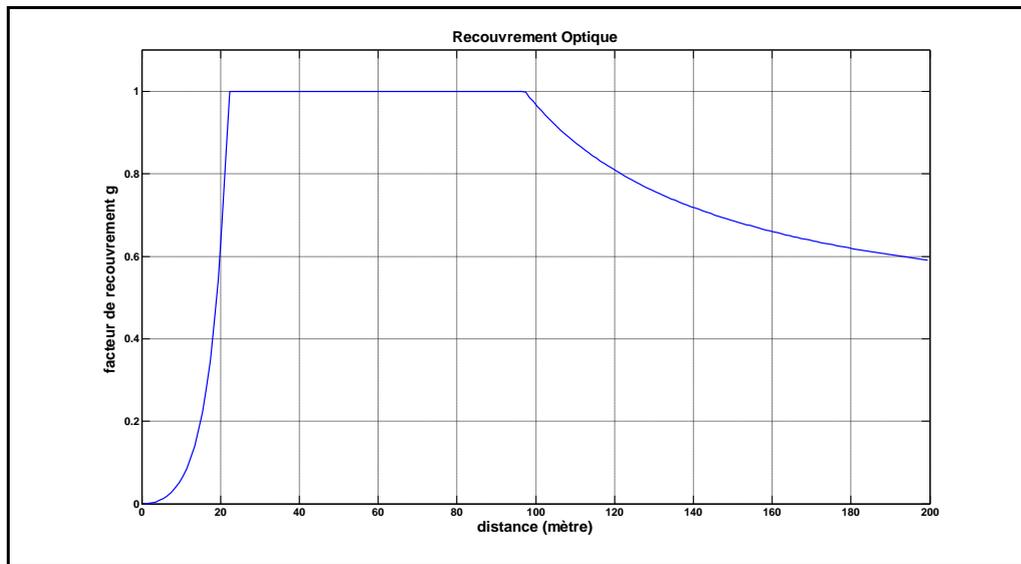


Figure 4 : Recouvrement optique du système.

Le facteur de recouvrement optique atteint la valeur 1 à 22 mètres du système et commence à décroître à partir de 96 mètres.

2.3.2 - Recouvrement géométrique

Le recouvrement géométrique se traduit par la zone spatiale commune couverte par le faisceau laser et le champ de vue du télescope. La figure suivante présente le recouvrement du faisceau laser (en vert) et du champ du télescope pour les différents cas possibles.

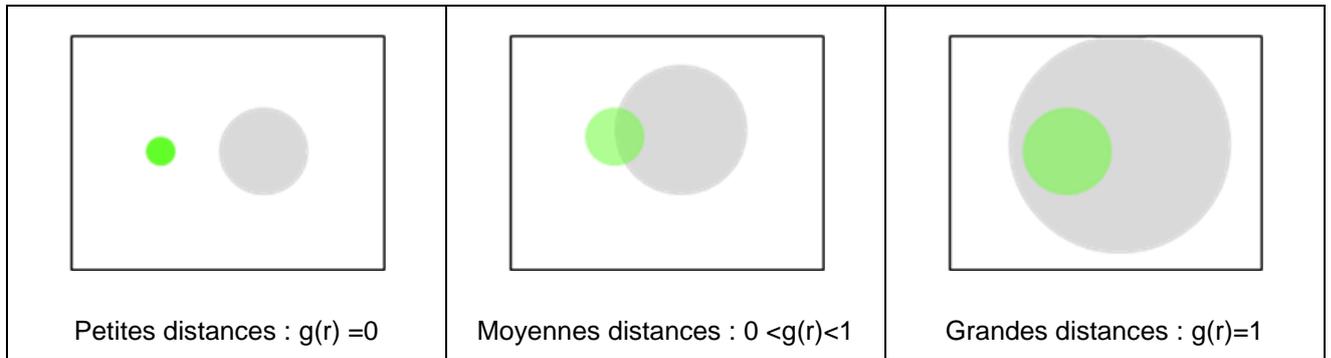


Figure 5 : Recouvrement du faisceau laser et du champ du télescope selon la distance de propagation.

La fonction de recouvrement à moyenne distance est donnée par l'intersection de deux cercles de rayons r , et R séparés par une distance d :

$$g(r) = r^2 \cos^{-1}\left(\frac{d^2 + r^2 - R^2}{2dr}\right) + R^2 \cos^{-1}\left(\frac{d^2 + R^2 - r^2}{2dR}\right) - 1/2\sqrt{(-d+r+R)(d+r-R)(d-r+R)(d+r+R)}$$

La figure suivante présente le recouvrement géométrique avec les paramètres de notre système.

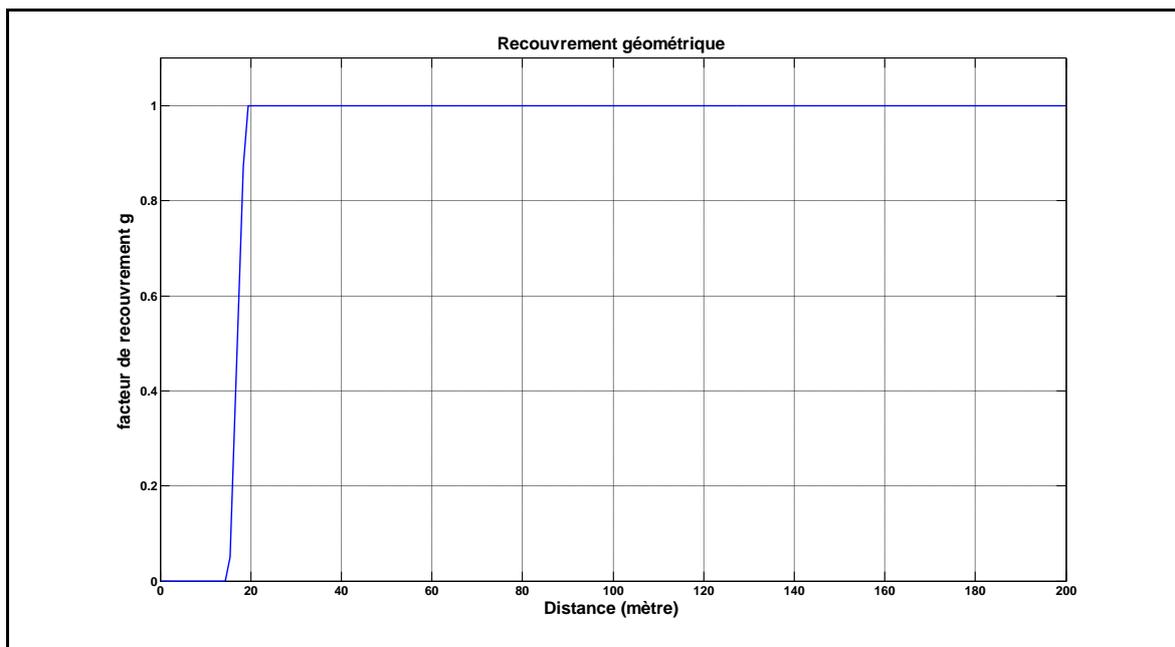


Figure 6 : Recouvrement géométrique du système.

Le recouvrement géométrique est maximal au delà d'une distance de 19 mètres. Le facteur de recouvrement total est le produit des deux recouvrements précédents, optique et géométrique. Il est donné par le graphe suivant et permet de conclure que la zone aveugle pour notre système est située entre 0 et 22 mètres. On pourra réaliser des mesures entre 22 et 96 mètres sans apporter de correction. Au delà, le facteur de recouvrement sera à prendre en compte. Ces résultats correspondent au cahier des charges du système dédié à faire des mesures de particules à l'échelle d'une voie de circulation (initialement prévu entre 0 et 100 m).

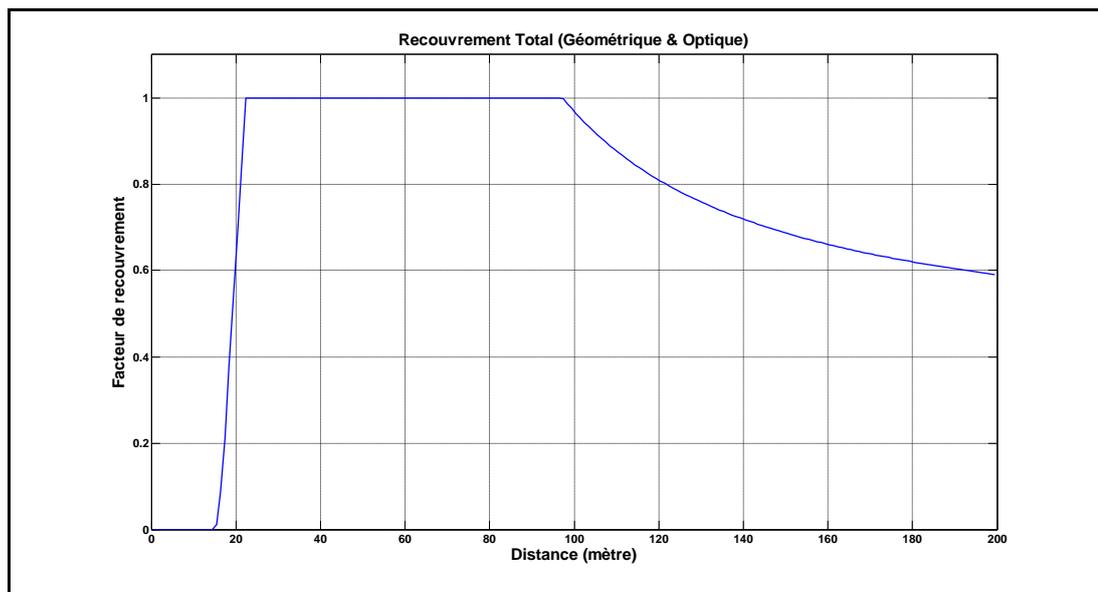


Figure 7 : Recouvrement total du système.

La figure suivante présente un exemple de signal mesuré par le détecteur qui confirme ce résultat avec un maximum de signal autour de 20 mètres. Le premier pic correspond à un signal parasite issu de l'électronique de déclenchement du laser. A 100 mètres, le signal est encore au dessus du bruit du capteur et pourra être utilisé jusqu'à 150 mètres si besoin.

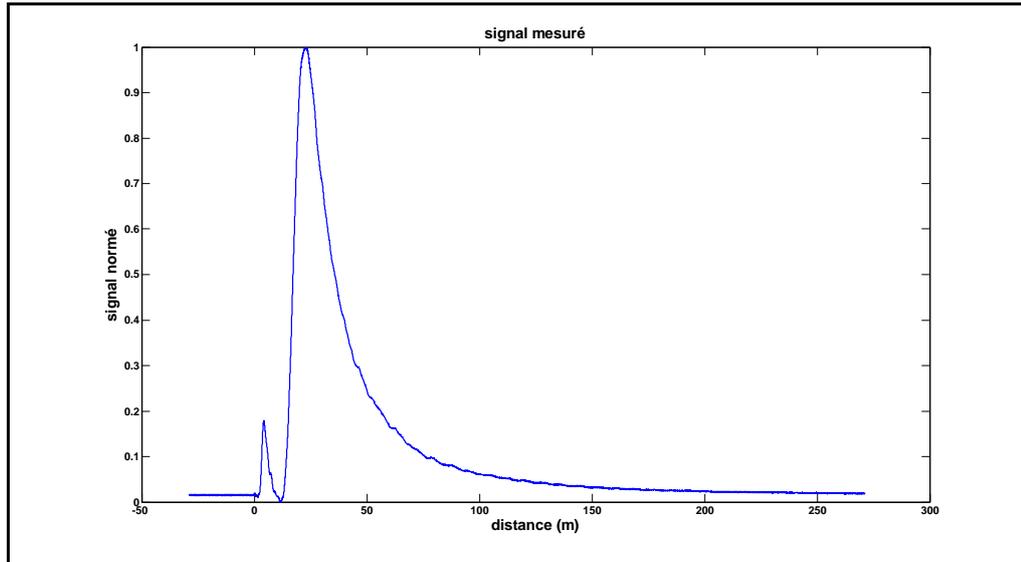


Figure 8 : Exemple de signal mesuré

Les premières expérimentations ont eu lieu par la fenêtre de notre bâtiment et ont consisté à enregistrer le signal pendant une heure à raison d'une mesure toutes les 12 secondes. Les figures suivantes présentent l'évolution du signal au cours de l'heure écoulée ainsi qu'un traitement de correction en distance consistant à enlever la décroissance naturelle en $1/d^2$. Le signal est alors dit 'range corrected'.

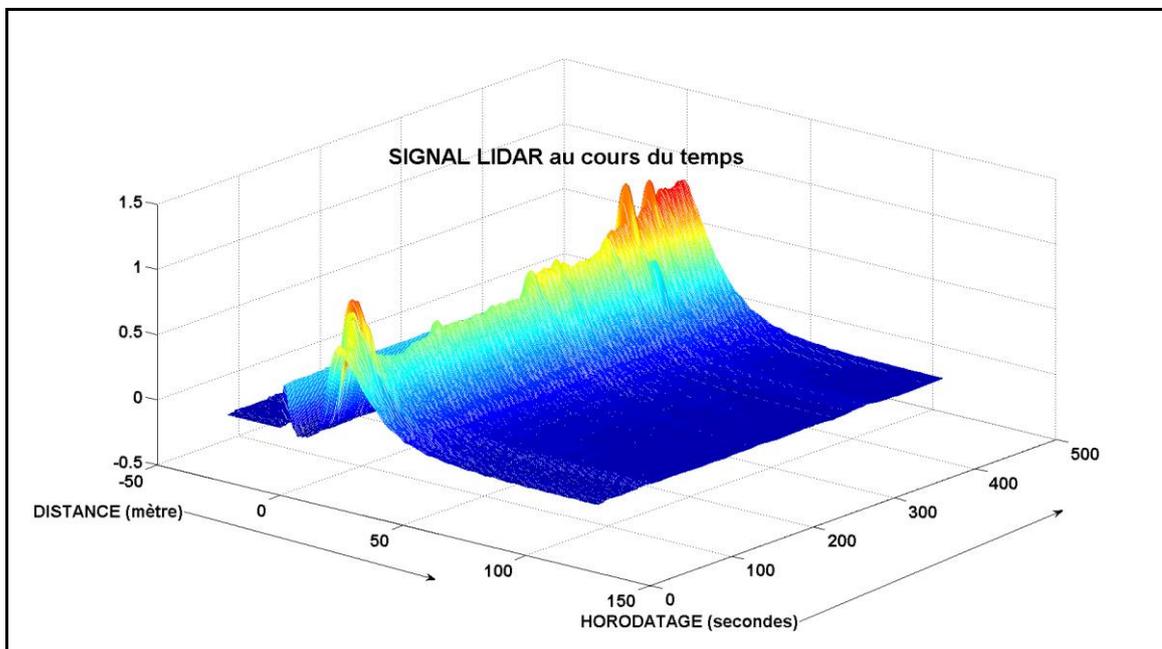


Figure 9 : Evolution du signal au cours d'une heure.

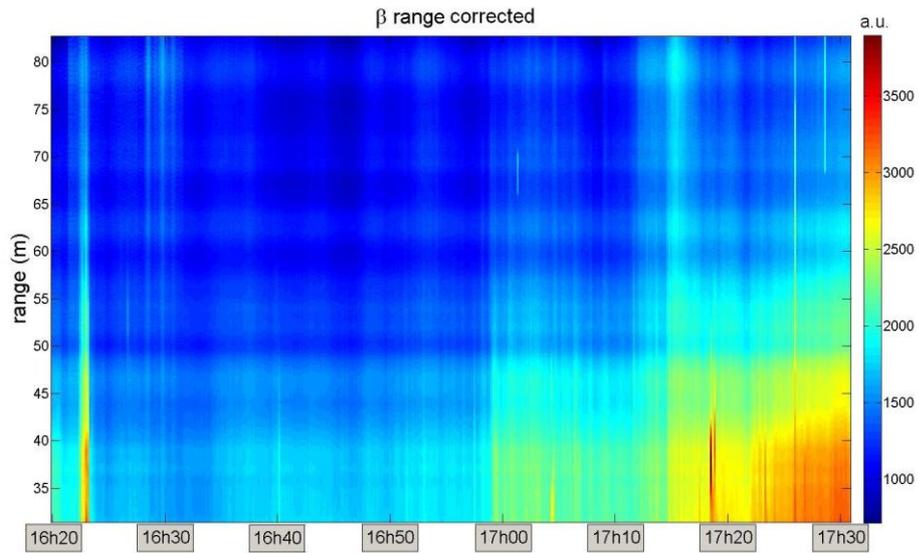


Figure 10 : Evolution du coefficient β au cours d'une heure.

L'évolution du coefficient β de rétrodiffusion traduit la présence de particules diffusantes dans l'atmosphère traversée par le faisceau laser. En revanche, ces informations sont partielles car si on peut estimer que le système est sensible à des particules entre 1 et 100 microns (la diffusion de Mie étant prépondérante), il est impossible ici d'en connaître précisément le diamètre ni le nombre. La puissance du signal dépendant en outre de la météorologie, il sera nécessaire par la suite d'obtenir des données météo synchrones avec nos acquisitions : notamment humidité relative, température, direction et force du vent.

3. Mesures in situ

3.1 - Contraintes & choix du site

Bien qu'étant dédié à être transportable en bord de voie, le prototype actuel n'est pas autonome énergétiquement parlant. La première contrainte à la réalisation d'une expérimentation est de disposer d'une source électrique suffisamment puissante. En effet, nous avons estimé la consommation globale du système (laser, capteurs, oscillo, PC, écran) à 1600W.

Une seconde contrainte est liée à la densité de trafic souhaitée. Pour se donner toutes les chances de voir des fluctuations de signal dues à des émissions de particules par le trafic, nous souhaitons avoir un trafic pendulaire assez intense. Une rocade ou une 2 x 2 voies aux abords d'une agglomération semble une bonne candidate.

Une station météorologique doit aussi être adjointe à l'expérimentation pour étudier et corriger le cas échéant, les influences des paramètres météo sur le signal lidar. Enfin, il est souhaitable de ne pas perturber le trafic et donc de ne pas être à vue du conducteur ou le moins possible. Ceci est d'autant plus vrai que le système utilise un laser infrarouge et que pour des raisons de sécurité évidentes, le faisceau devra passer largement au dessus du flot de véhicules.

L'ensemble de ces contraintes nous a conduit à choisir un lieu d'expérimentation sur le site du laboratoire disposant d'une source d'énergie, d'une station météo, et assez en retrait de la route pour ne pas perturber le trafic. La voie de circulation en question est une 2 x 2 avec un trafic relativement important aux heures de pointe (VLA = 70km/h). La figure suivante présente la configuration du lieu ainsi que la disposition du matériel.



Figure 11 : Site d'expérimentation

3.2 - Données recueillies

3.2.1 - Expérimentations avec video

L'expérimentation a eu lieu le 19 mars 2014 de 9h30 à 18h30. Le trafic a été mesuré par video à l'aide d'un caméscope filmant la route à partir du site d'expérimentation. Le traitement video consiste à définir une zone de passage de véhicules dans l'image puis à scruter image par image les variations à l'intérieur de cette zone. Au dessus d'un certain seuil, on comptabilise la variation comme un passage de véhicule. On ne s'est pas attaché ici à différencier les poids-lourds des véhicules légers. En fonction des masquages des véhicules et des fausses détections, on estime la précision de mesure du trafic à 10%. Les résultats sont présentés dans la figure suivante:

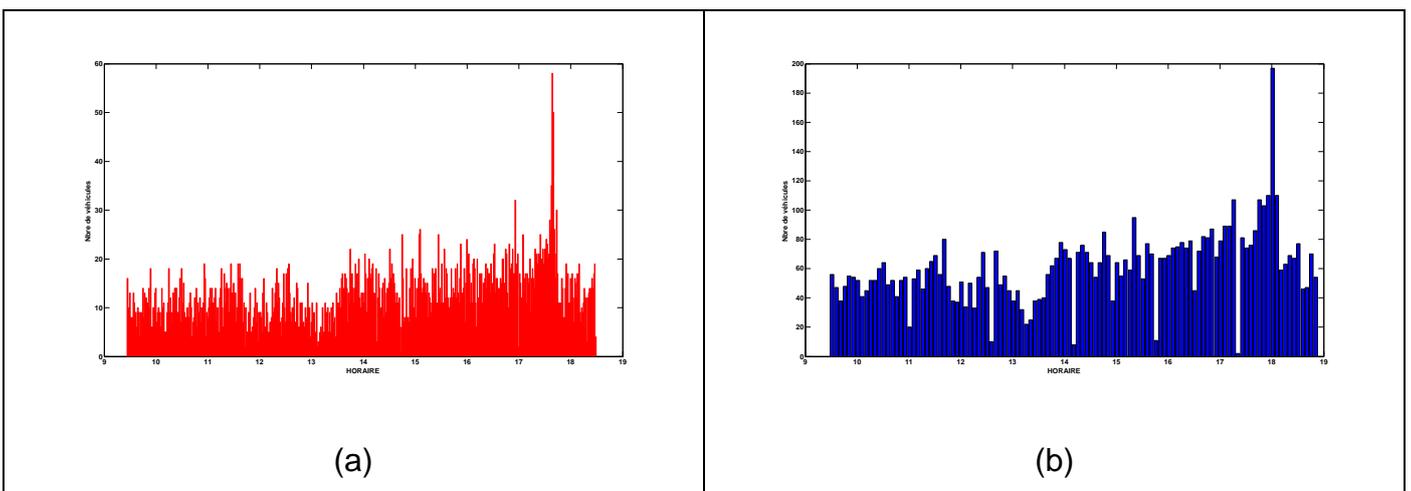


Figure 12 : Trafic routier échantillonné à 1 minute (a) et 5 minutes (b)

D'après ces données, le trafic varie entre 400 véhicules /heure en fin de matinée et 1000 véhicules / heure aux heures de pointe. L'objectif est maintenant de relier ces données à des mesures lidar de particules en tenant compte de l'influence de la météo.

Les données météorologiques ont été enregistrées par une station météo installée sur le site. Elle délivre toutes les 5 minutes, les données suivantes : rayonnement solaire, température, humidité relative, direction et vitesse du vent. Ces données sont représentées sur les figures suivantes.

Des données de l'Association de la qualité de l'air (Air Pays de la Loire [3]) ont été récupérée concernant les PM10. Pour la ville d'Angers, il existe 7 stations de mesure de la qualité de l'air mais une seule (Angers Beaux-Arts) est équipée pour la mesure des PM10 et PM2,5. Ces données sont échantillonnées tous les quarts d'heure, ce sont des moyennes horaires (glissantes) calculées au 1/4 d'heure échu.

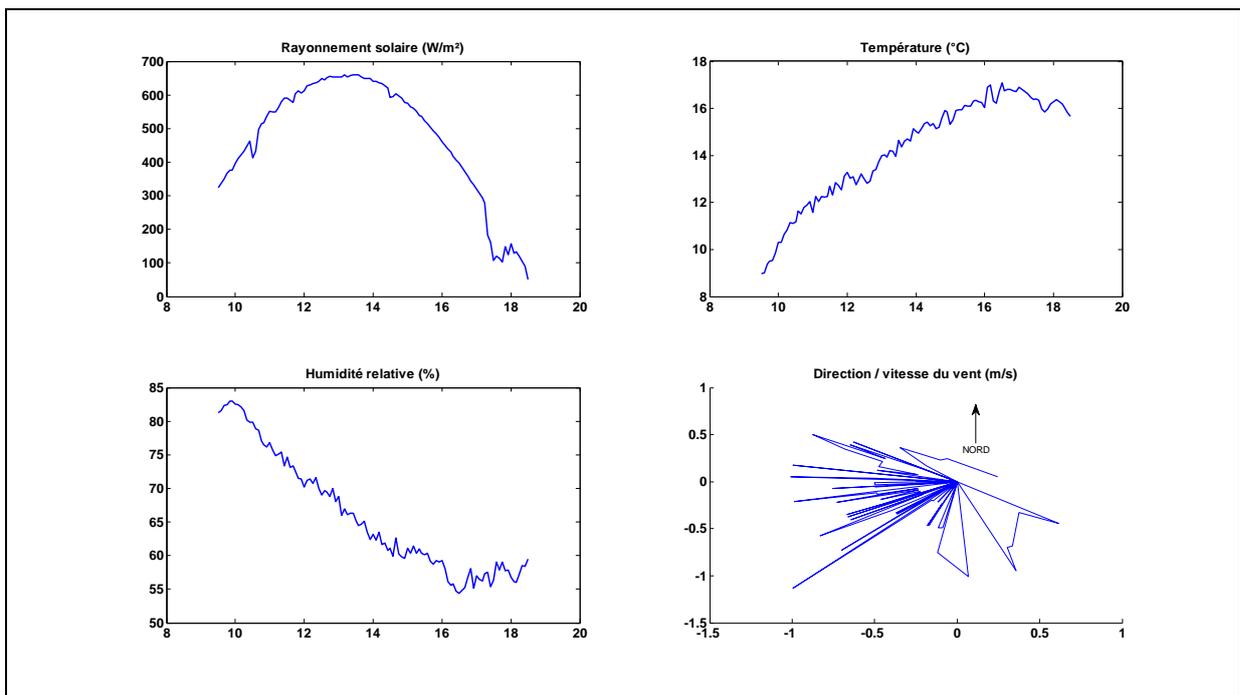


Figure 13 : Données météo du 19 mars 2014



Figure 14 : Mesures PM2,5 & PM10(µg.m⁻³) Angers Beaux-Arts du 19 mars 2014

Le LIDAR quant à lui, délivre une mesure de rétrodiffusion toutes les 12 secondes. Le laser étant cadencé à 10 Hz, la mesure finale est constituée de la moyenne de 100 tirs laser. La figure suivante présente les données échantillonnées de 12 secondes à une heure.

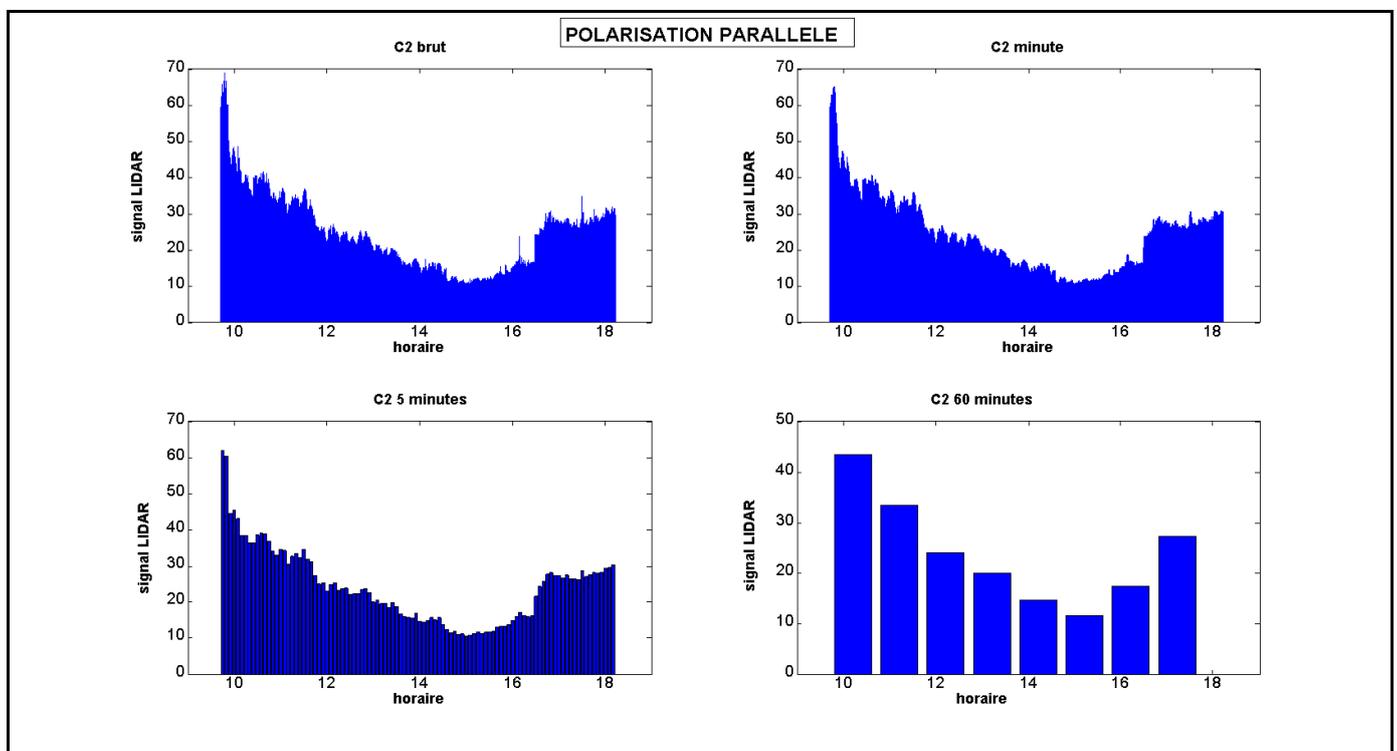


Figure 15 : Mesures LIDAR en polarisation parallèle au laser échantillonnées à 12s, 1 minute, 5 minutes et 60 minutes.

3.2.2 - Expérimentations avec radar

Les expérimentations ont eu lieu les 16 & 17 avril 2014 de 8h30 à 18h30. La mesure de trafic a cette fois été réalisée par un système radar, Viking de la société Sferiel.



Figure 16 : Capteur de trafic Viking

Ce capteur mesure la vitesse des véhicules et propose une catégorie (VL / PL). Là encore, nous nous intéresserons seulement au débit de véhicules au cours de l'expérimentation. Si ce capteur permet une bien meilleure précision que la video, une source d'erreur peut intervenir : les véhicules légers (VL) se suivant de trop près seront comptabilisés comme des poids-lourds (PL) engendrant une erreur sur le débit. Mais nous estimons l'erreur sur la mesure du débit inférieure à 5%.

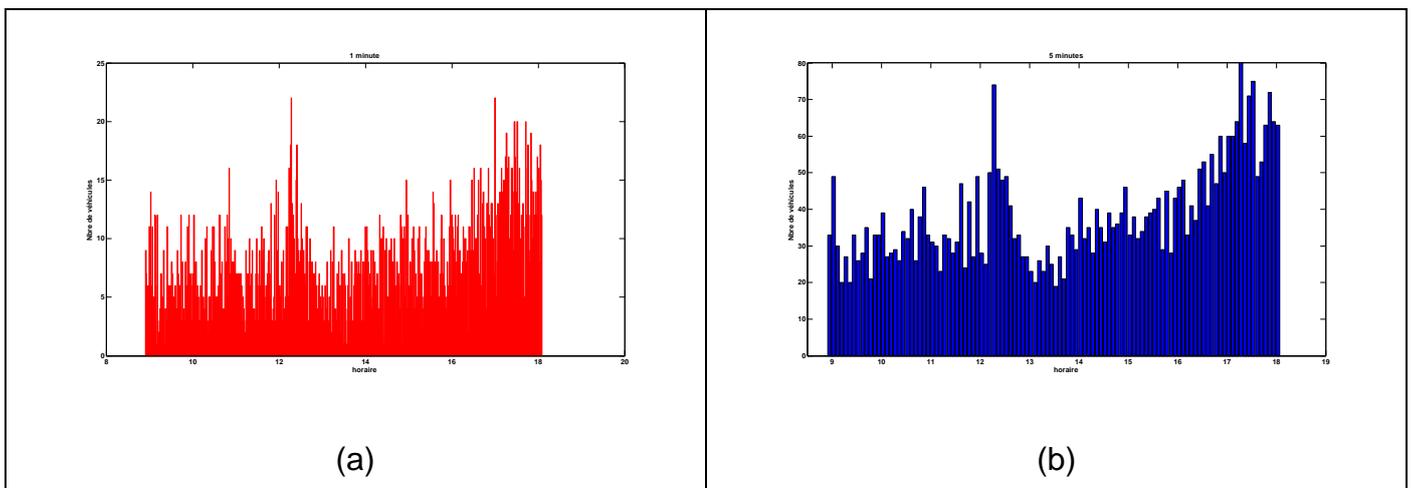


Figure 17 : Trafic routier échantillonné à 1 minute (a) et 5 minutes (b)

Les données météorologiques ont été enregistrées sur le même site et les données de pollution (Air PdL) ont été récupérées pour ces deux jours consécutifs.

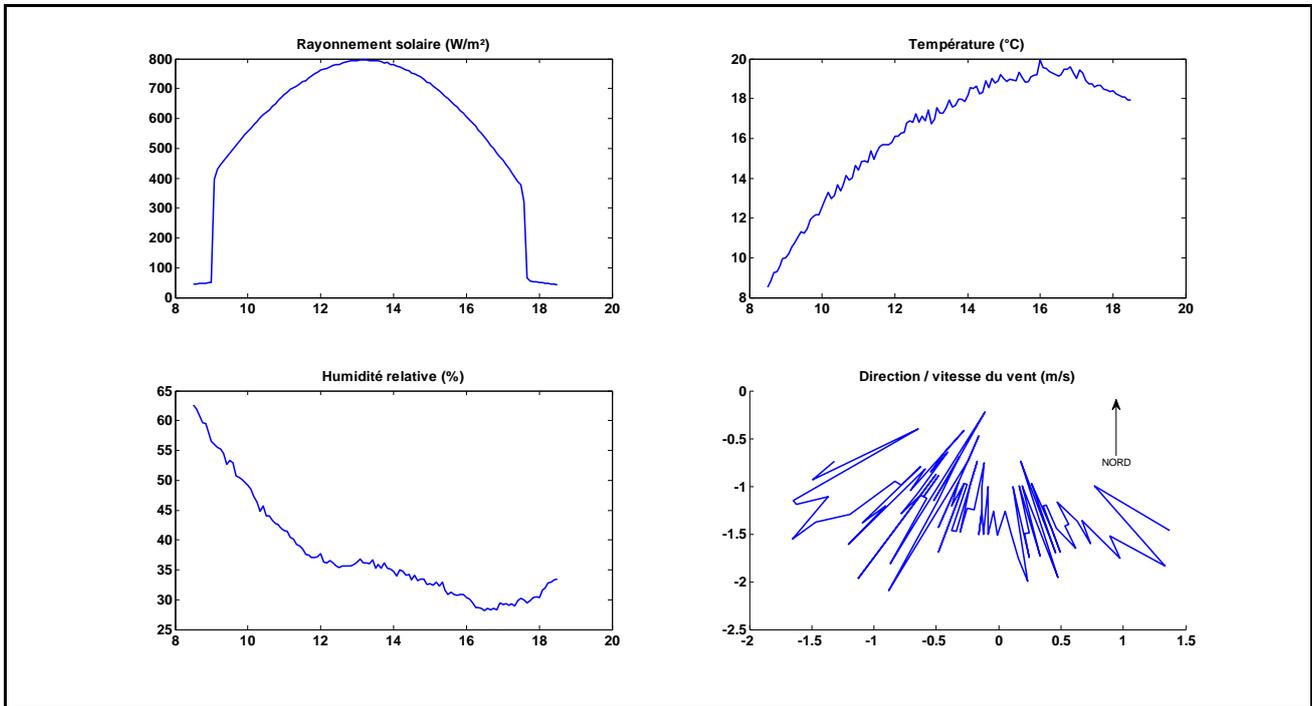


Figure 18 : Données météo du 16 avril 2014

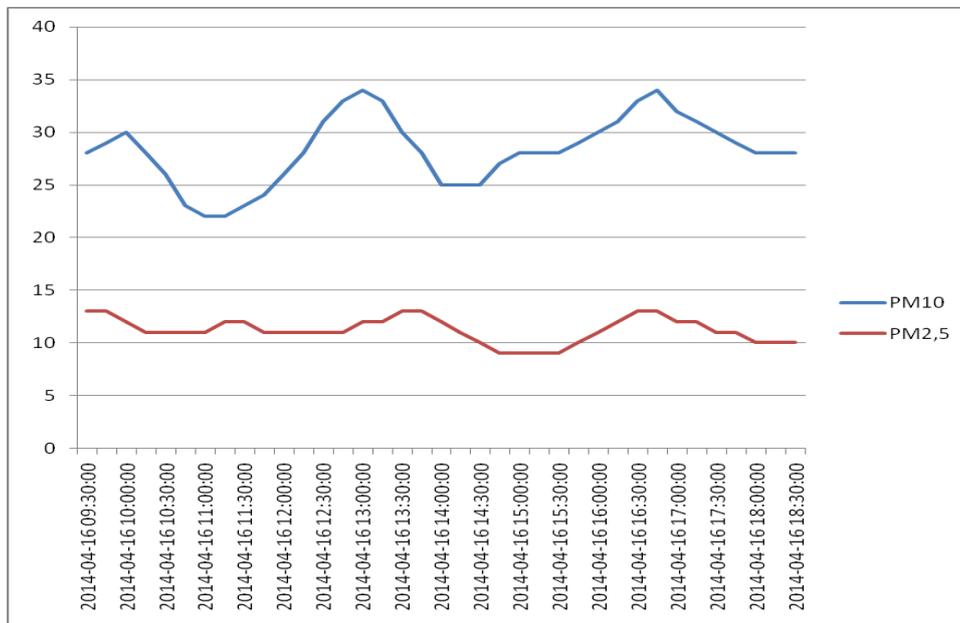


Figure 19 : Mesures PM 2,5 & PM 10($\mu\text{g.m}^{-3}$) Angers Beaux-Arts du 16 avril 2014

La figure suivante présente l'évolution du signal LIDAR échantillonné de 12 secondes à une heure au cours de la journée du 16 avril 2014.

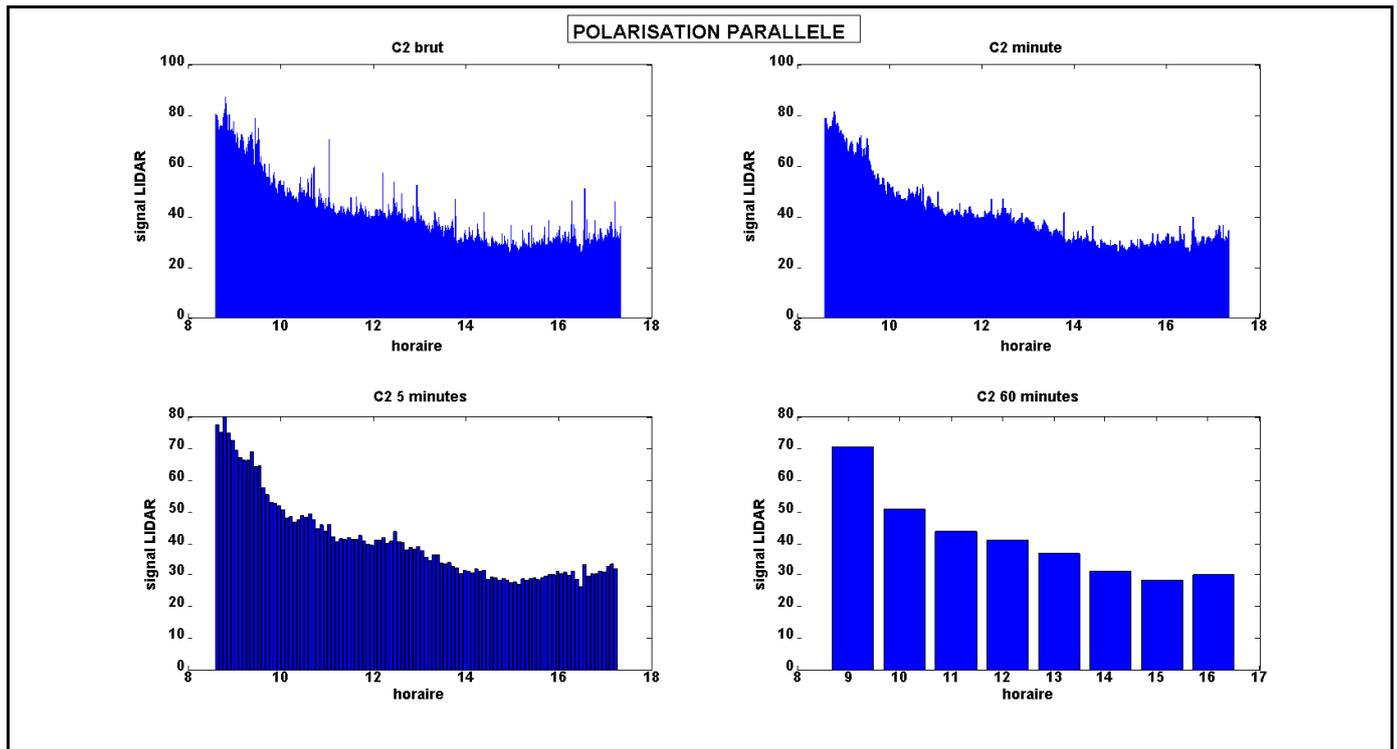


Figure 20 : Mesures LIDAR en polarisation parallèle au laser échantillonnées à 12s, 1 minute, 5 minutes et 60 minutes.

4. Résultats

4.1 - Paramètres influant sur le signal lidar

A première vue, les signaux enregistrés par le lidar ne suivent pas l'évolution du trafic. Cependant quelques éléments perturbateurs sont à prendre en compte avant de tenter une comparaison : tout d'abord l'humidité relative qui traduit la quantité de molécules d'eau dans l'atmosphère. Celles-ci contribuent à augmenter la rétrodiffusion de façon non négligeable. D'autre part, nous avons remarqué des signaux particuliers très perturbés, notamment lors de la session d'avril, qui nous laissent penser que des pollens issus d'arbres environnants ont pu perturber les mesures.

4.1.1 - Influence de l'humidité relative

Quand l'humidité relative (RH) augmente, la vapeur d'eau se condense sur des particules en suspension dans l'atmosphère. Cette condensation augmente la taille des aérosols ainsi que leur indice optique de réfraction. Cela a pour effet de modifier l'absorption et la diffusion de la lumière de ces aérosols 'hydratés'. Shettle and Fenn [4] donnent des tables des changements de

taille et d'indice dus à l'hydratation en utilisant les travaux de Hänel [5]. Nous avons repris ces tables en utilisant le modèle d'aérosols urbain défini dans [4] (voir figure suivante) pour calculer l'évolution du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité relative. Ceci va permettre de corriger le signal LIDAR brut en fonction de l'humidité relative enregistrée par la station météo.

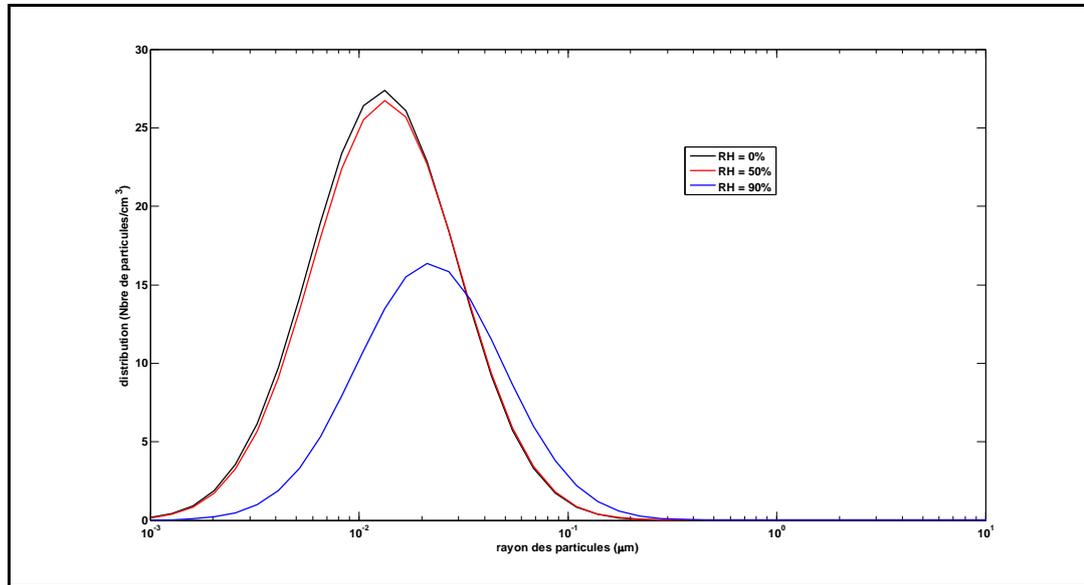


Figure 21: Evolution de la taille des particules en fonction de l'humidité relative.

Une fois connues les évolutions de la taille et de l'indice de réfraction en fonction de l'humidité relative, il est possible de calculer l'évolution du coefficient de rétrodiffusion β en fonction de l'humidité relative. En effet, les paramètres influents sur la rétrodiffusion sont le paramètre de taille (rapport entre la taille de la particule et la longueur d'onde), l'indice de réfraction et la distribution en taille. En appliquant la théorie de la diffusion de Mie avec tous ces paramètres fluctuant au gré de l'humidité relative, on accède au coefficient β de rétrodiffusion présenté dans la figure suivante.

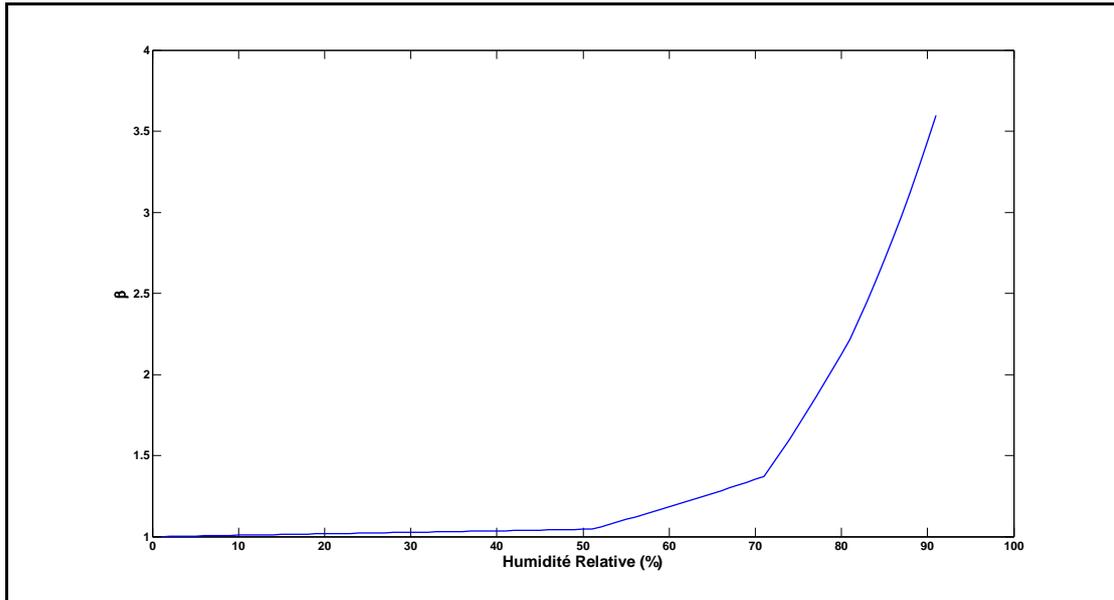


Figure 22: Evolution du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité relative.

Les figures suivantes présentes les signaux LIDAR corrigés en fonction des données d'humidité relative enregistrées au cours du 19 mars et 16 avril 2014.

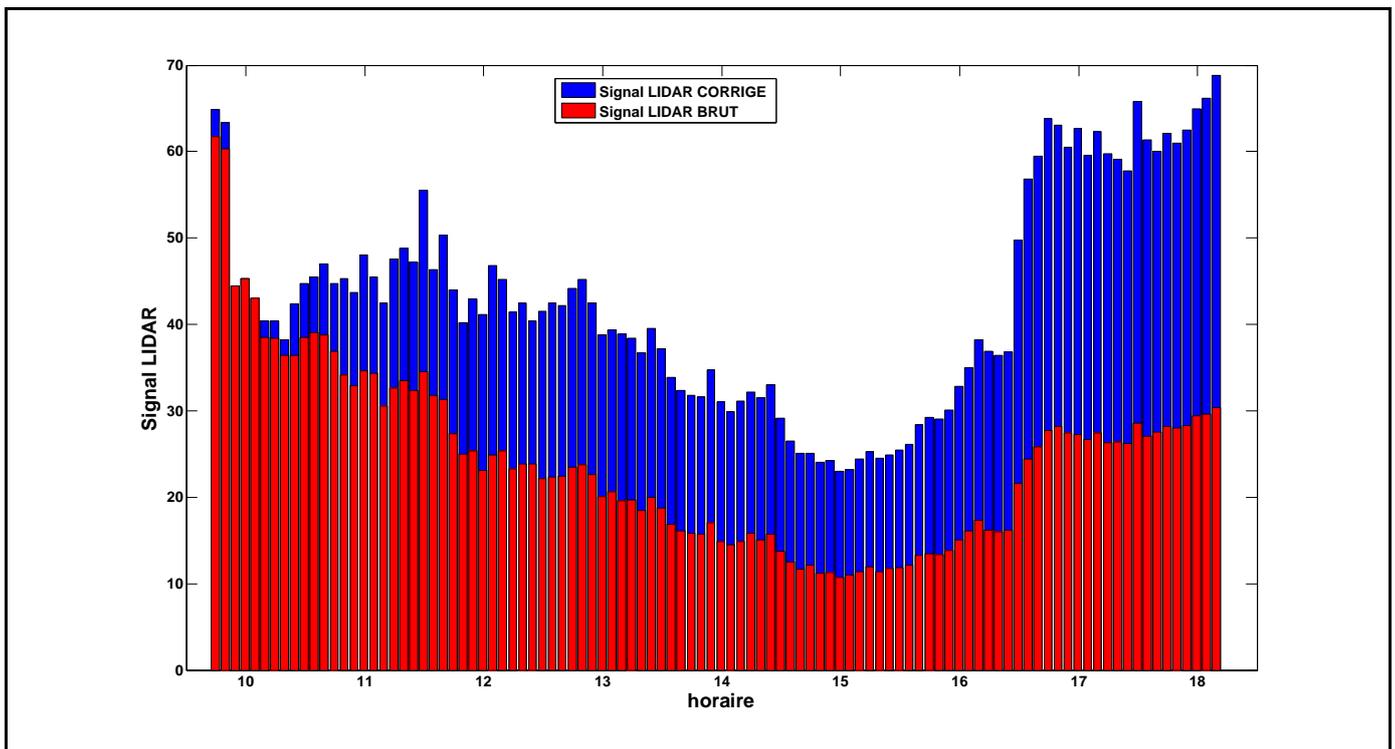


Figure 23: Signal LIDAR du 19 mars 2014 corrigé en fonction de l'humidité relative.

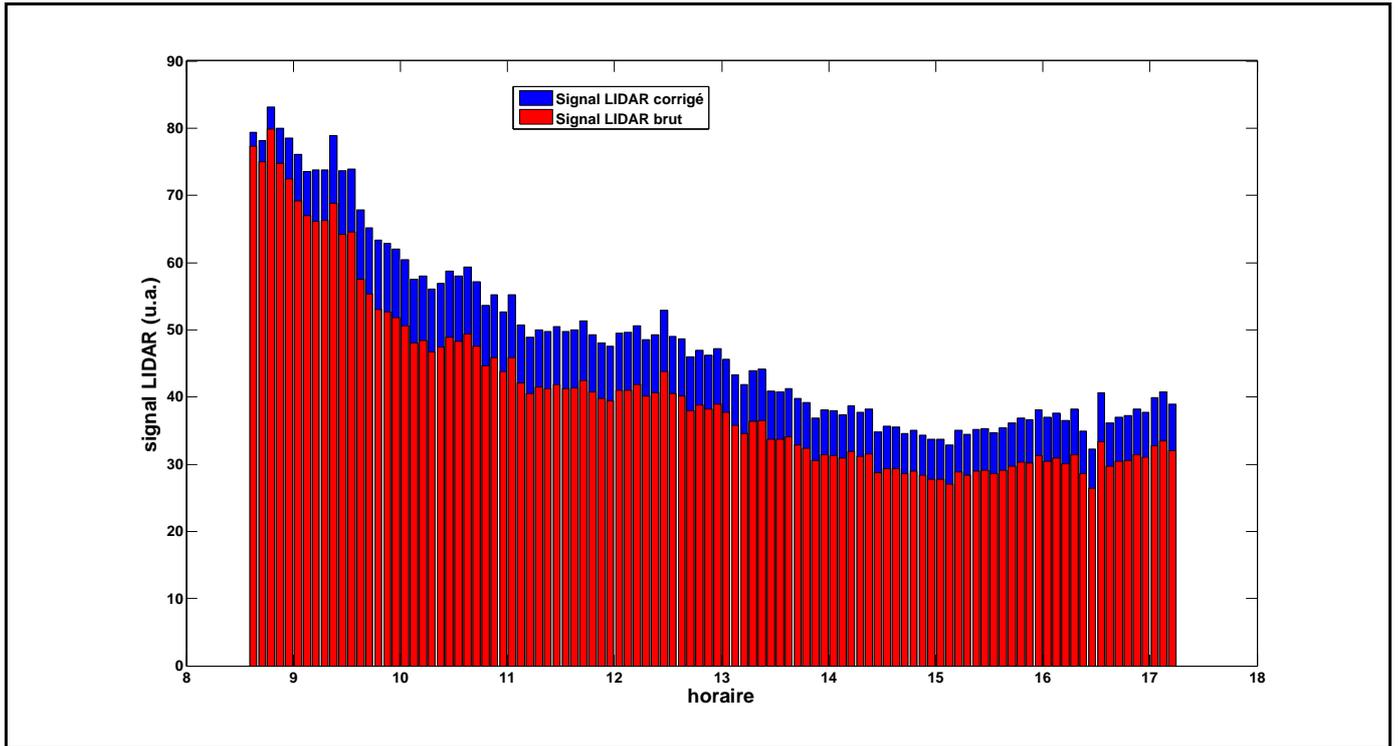


Figure 24: Signal LIDAR du 16 avril 2014 corrigé en fonction de l'humidité relative.

L'humidité relative étant moins importante lors des expérimentations d'avril, la correction apportée ne change que peu l'évolution du signal au cours de la journée.

4.1.2 - Influence d'autres aérosols

Les signaux typiques mesurés par la photodiode à avalanche et moyennés par l'oscilloscope ont été présentés sur la figure 8. Au cours du 17 avril, nous avons remarqué certains signaux très perturbés comparativement aux signaux classiques tels que le présente la figure suivante.

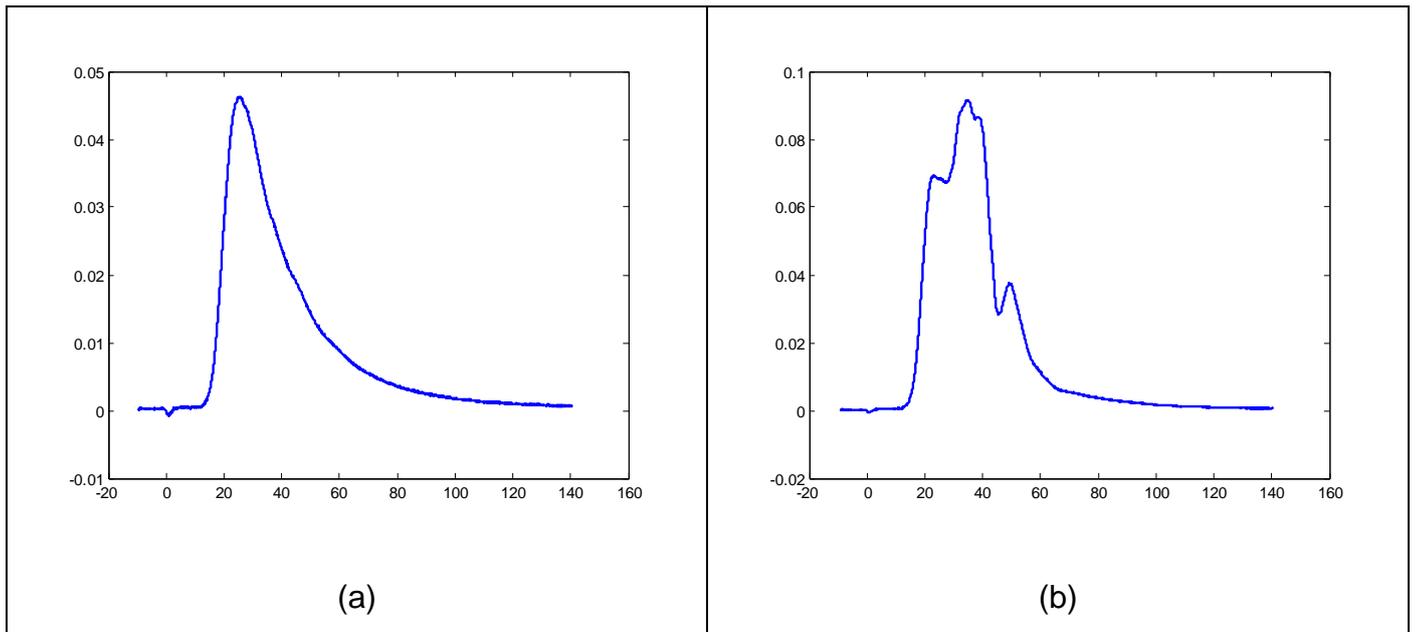


Figure 25: Signal LIDAR 'propre' (a) et perturbé (b).

Ces signaux étaient relativement transitoires et semblaient apparaître aléatoirement. Après réflexions, nous avons suspecté les arbres environnants de répandre des pollens qui, portés par le vent, se retrouveraient dans le faisceau laser. Mais la taille de ces pollens est-elle dans la gamme de 1 à 100 μm des particules que nous sommes capable de détecter? Les arbres les plus proches étaient des frênes. Le Réseau National de Surveillance Aérobiologique (RNSA [6]) recense des données allergopolliniques sur toute la France, ainsi nous pu trouver des données 2013 à Angers concernant les pollens issus des frênes présentées dans la figure ci-après. Ces mesures sont réalisées par la méthode Hirst à l'aide d'un capteur positionné sur le toit de l'hôtel de ville d'Angers.

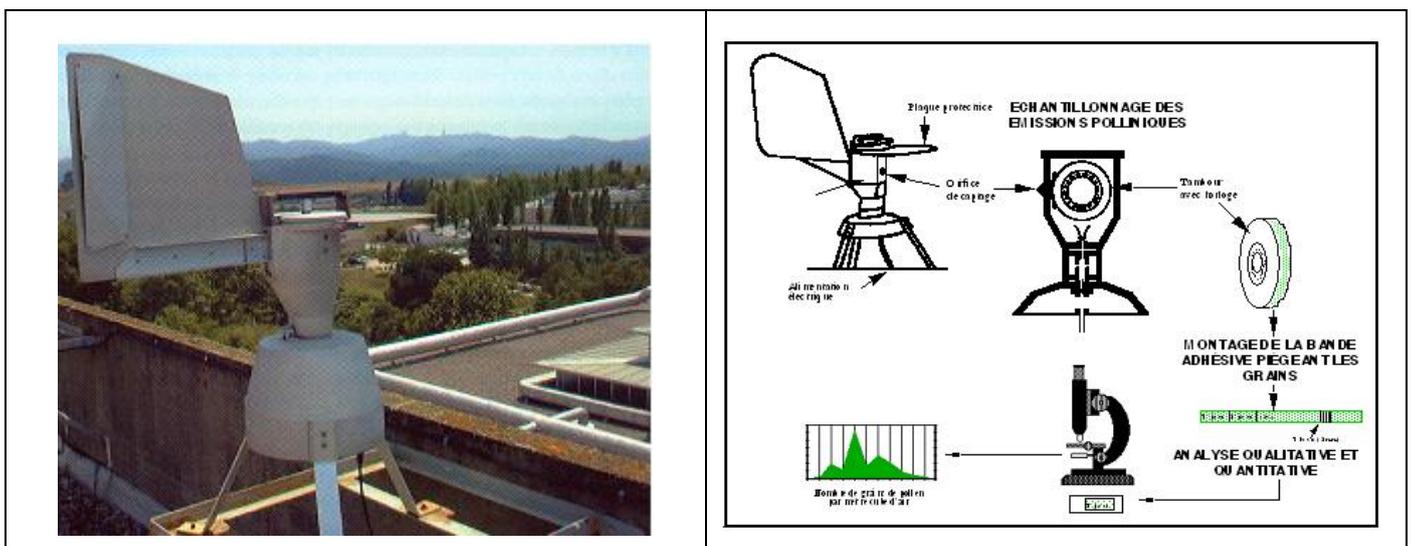


Figure 26: Capteur à pollens par la méthode Hirst.

L'appareil de Hirst est une pompe électrique montée sur une girouette qui prélève par une buse un volume d'air constant. Les particules ainsi aspirées sont piégées sur une lame de microscope enduite de vaseline qui défile verticalement à raison de 2mm / heure.

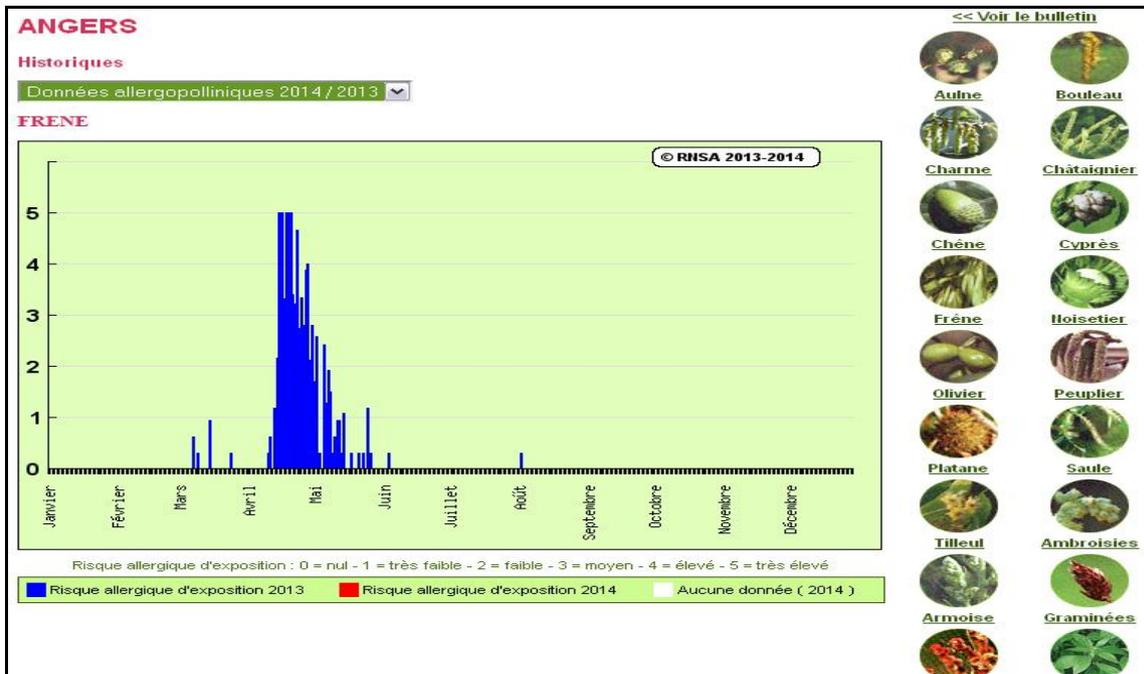


Figure 27: Risques dus aux pollens de frênes à Angers en 2013.

La période maximale de dissémination des pollens de frêne correspond à nos dates d'expérimentation si on se réfère à des données de l'an passé. La piste des pollens semble la bonne, reste à savoir si la taille des pollens correspond. Après quelques recherches sur l'observation des pollens, leur taille varie entre 30 et 50 μm selon les espèces (cf figure suivante). Ainsi cette piste était la bonne et la seule solution pour se prémunir de ces perturbations a été de supprimer les signaux correspondant.



Figure 28: pollen de frêne.

4.2 - Mesure de la rétrodiffusion & corrélation avec le trafic routier

L'équation LIDAR (E5) permet de remonter (à une constante près) au coefficient de rétrodiffusion β à partir du signal enregistré par le capteur. En corrigeant le signal en distance, c'est à dire en le multipliant par la distance au carré et en supposant que l'absorption atmosphérique est constante sur la distance de mesure (inférieure à 100 mètres), on obtient :

$$S' = P(z) \cdot z^2 = K \cdot \beta(z) \cdot e^{(-2\alpha z)} \quad (\text{E10})$$

En ajustant l'exponentielle décroissante c'est-à-dire le paramètre α sur les signaux, on peut alors aboutir au signal S , une grandeur directement proportionnelle à β :

$$S = P(z) \cdot z^2 \cdot e^{(2\alpha z)} = K \cdot \beta(z) \quad (\text{E11})$$

Il est donc possible d'accéder à une valeur du coefficient de rétrodiffusion $\beta(z)$ sur toute la gamme de distances valides (de 20 à 90m). Cependant pour comparer avec les données de trafic, on affichera par la suite un scalaire, une valeur cumulée sur toutes les distances. Ceci permet d'obtenir le même nombre de données pour le signal lidar que pour le trafic et d'utiliser un coefficient de corrélation comme mesure objective de comparaison des signaux. Les résultats issus des expérimentations de mars et avril sont présentés dans les figures suivantes. Chacun des signaux est normé par sa valeur maximale pour obtenir des résultats entre 0 et 1 et être visuellement comparables.

4.2.1 - Résultats avec les données video

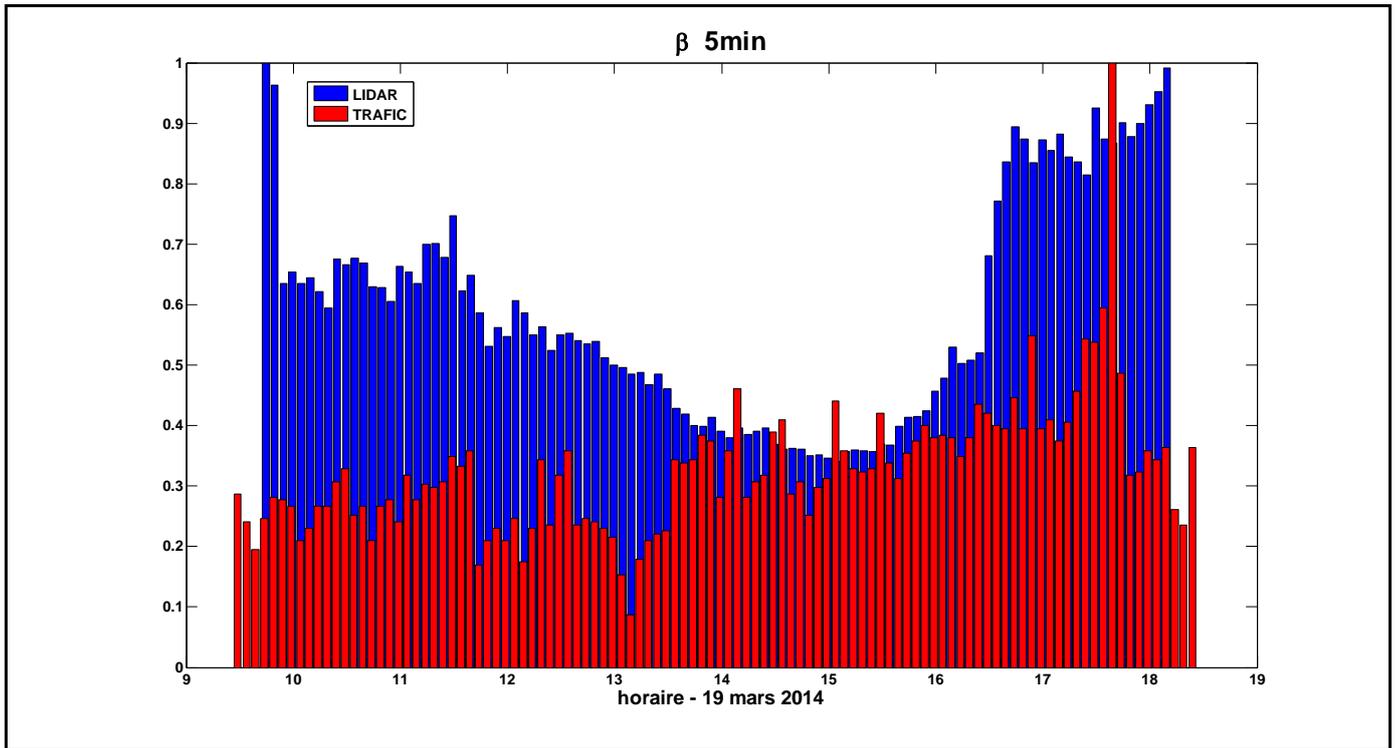


Figure 29: Comparaison trafic – lidar pour le 19 mars 2014 échantillonné à 5 minutes ($R = 0.31$)

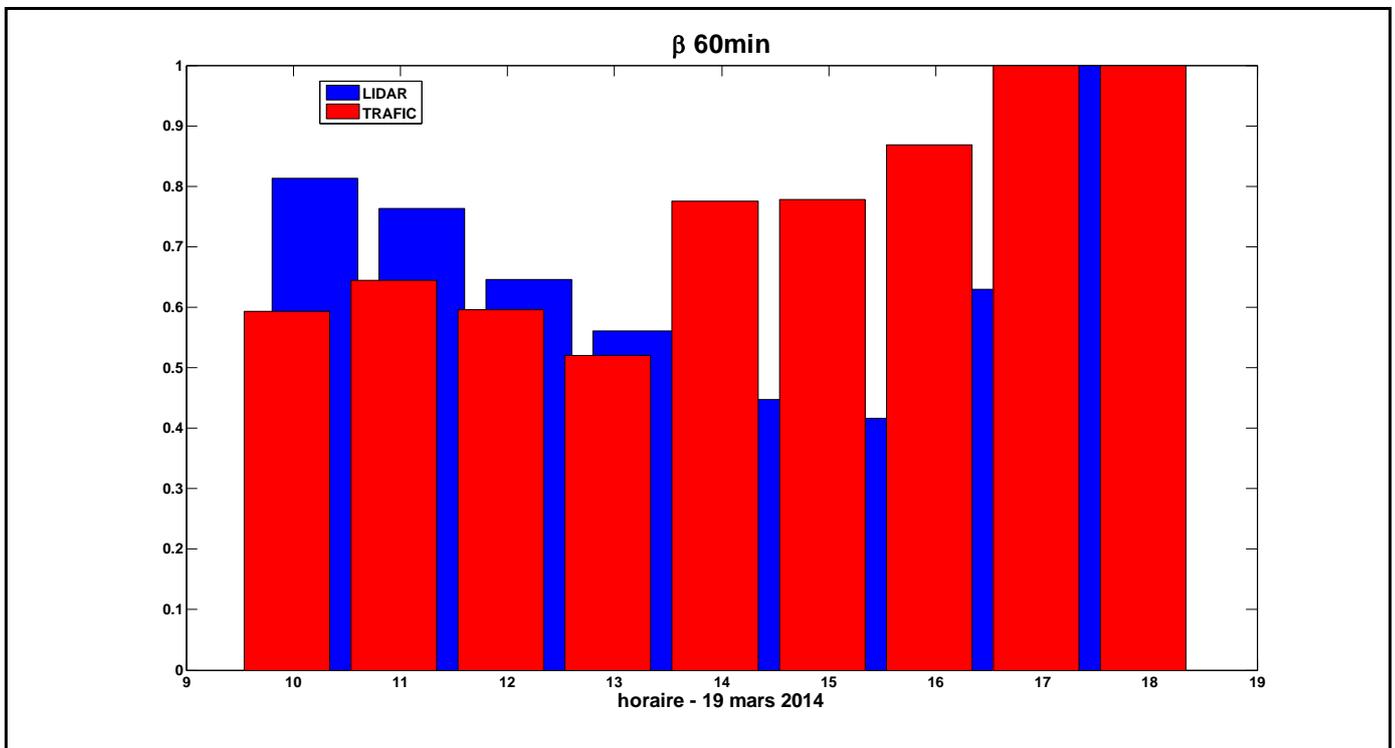


Figure 30: Comparaison trafic – lidar pour le 19 mars 2014 échantillonné à 60 minutes ($R = 0.27$)

Les coefficients de corrélation de l'ordre de 0.3 démontrent la faible relation entre les deux mesures. Des corrélations ont aussi été calculées avec les données de mesure de la qualité de l'air (PM10 et PM 2,5) . L'ensemble de ces résultats sont compilés dans le tableau suivant:

Coef de corrélation	Trafic 5 min	Trafic 60 min	PM10	PM2,5
$\beta_{//}$	0.31	0.27	0.17	0.22

Tableau 1: Coefficients de corrélation des données LIDAR , trafic et pollution pour le 19 Mars 2014.

4.2.2 - Résultats avec les données radar

Données du 16 Avril 2014

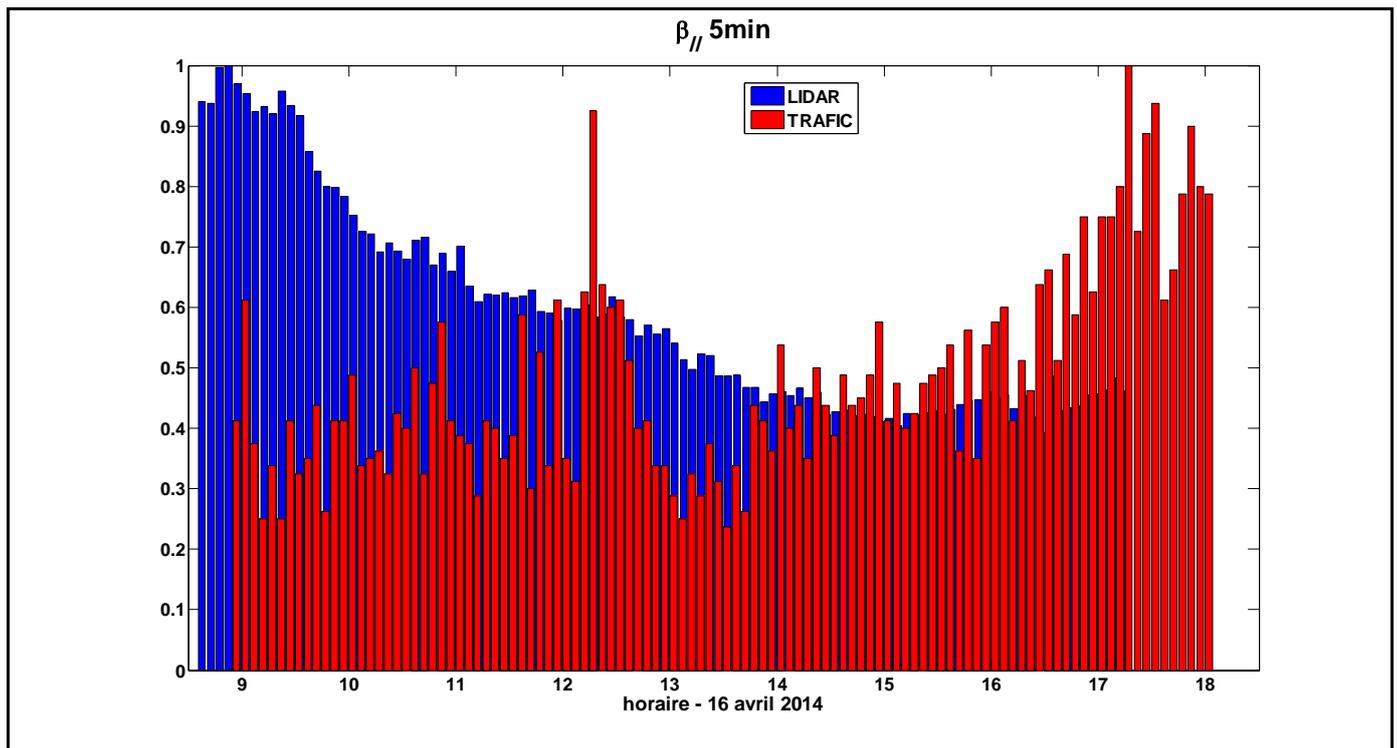


Figure 31: Comparaison trafic – lidar pour le 16 avril 2014 échantillonné à 5 minutes (R = 0.43)

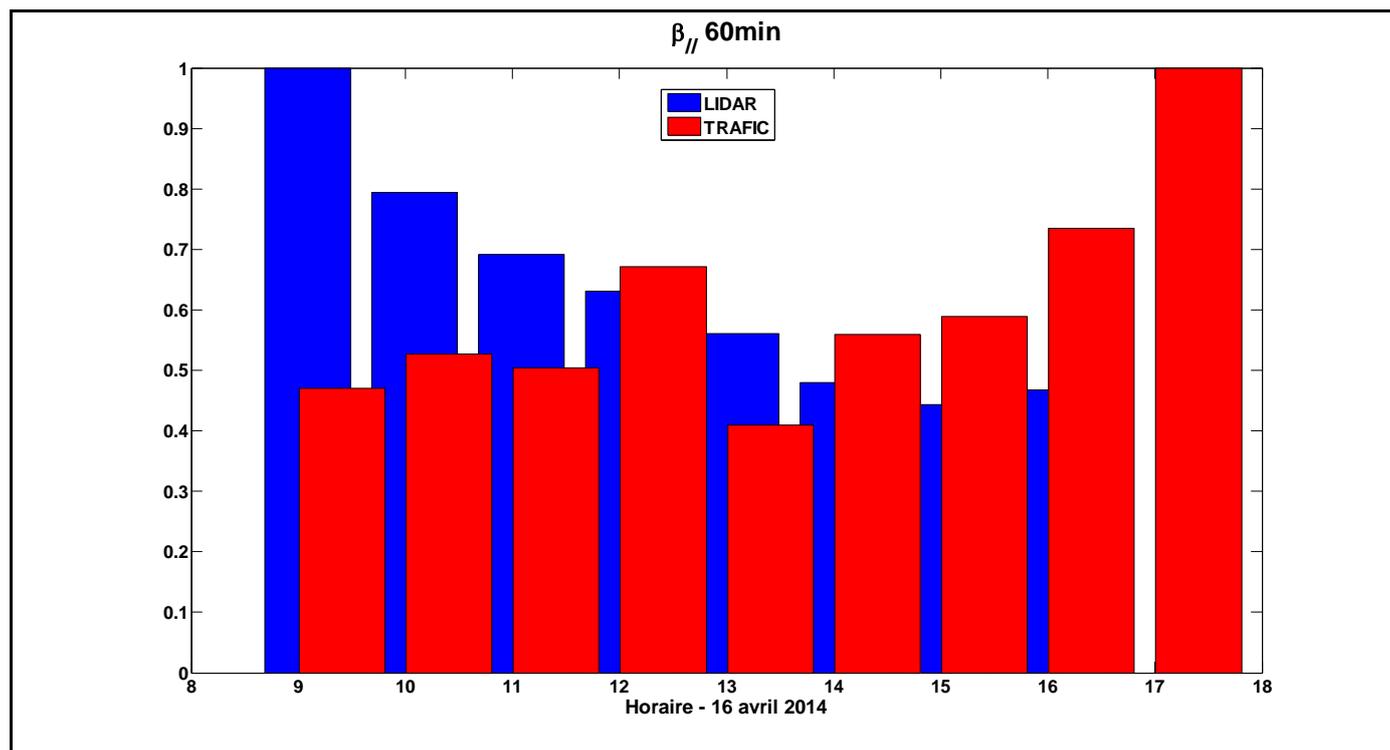


Figure 32: Comparaison trafic – lidar pour le 16 avril 2014 échantillonné à 60 minutes ($R = 0.46$)

Coef de corrélation	Trafic 5 min	Trafic 60 min	PM10	PM2,5
$\beta_{//}$	0.43	0.46	0.36	0.24

Tableau 2: Coefficients de corrélation des données LIDAR , trafic et pollution pour le 16 Avril 2014.

Données du 17 Avril 2014

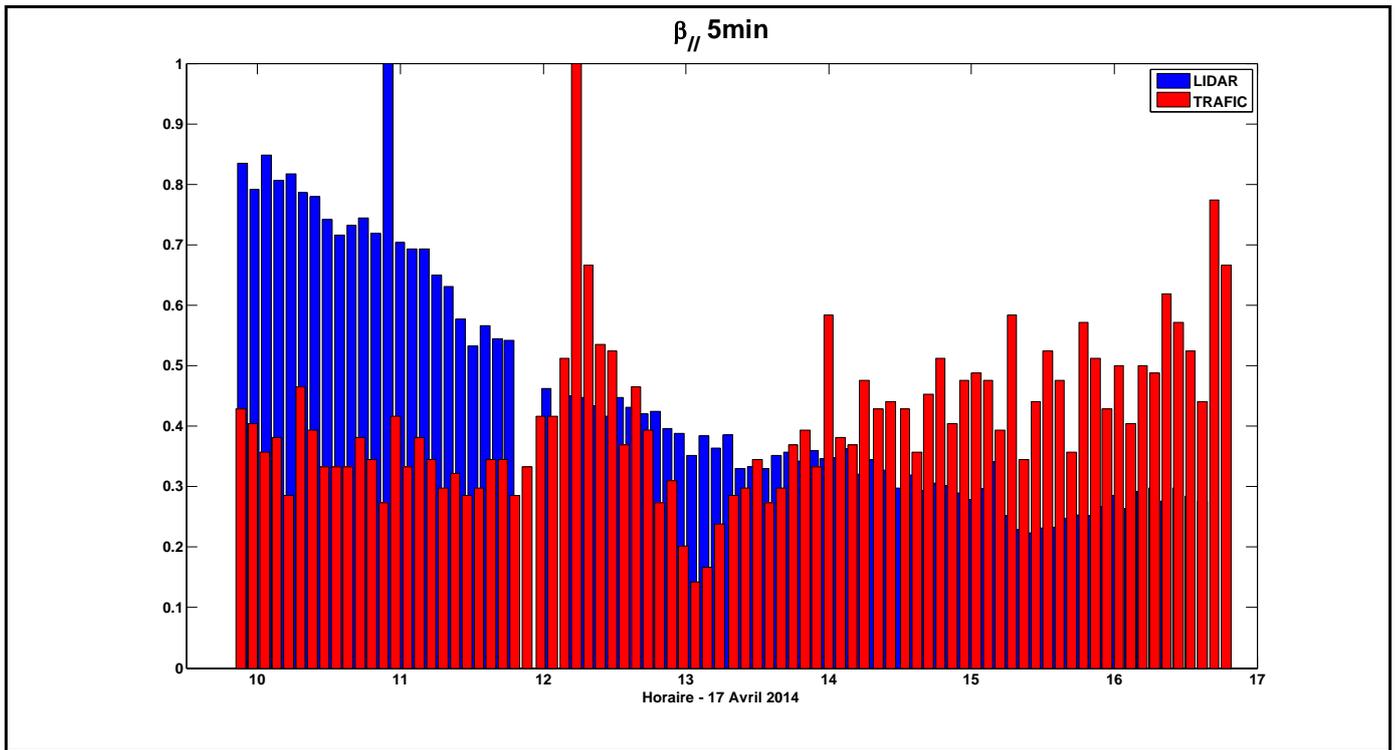


Figure 33: Comparaison trafic – lidar pour le 17 avril 2014 échantillonné à 5 minutes (R = 0.29)

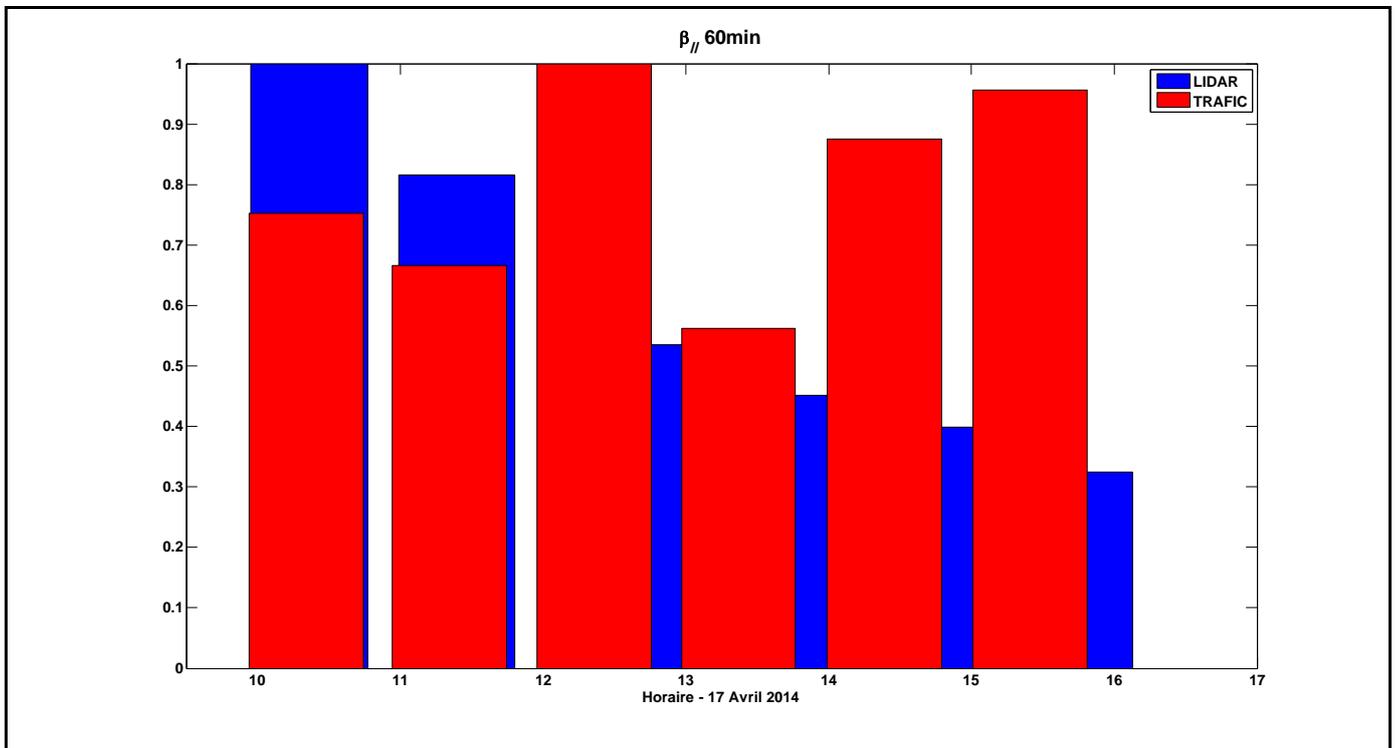


Figure 34: Comparaison trafic – lidar pour le 17 avril 2014 échantillonné à 60 minutes (R = 0.37)

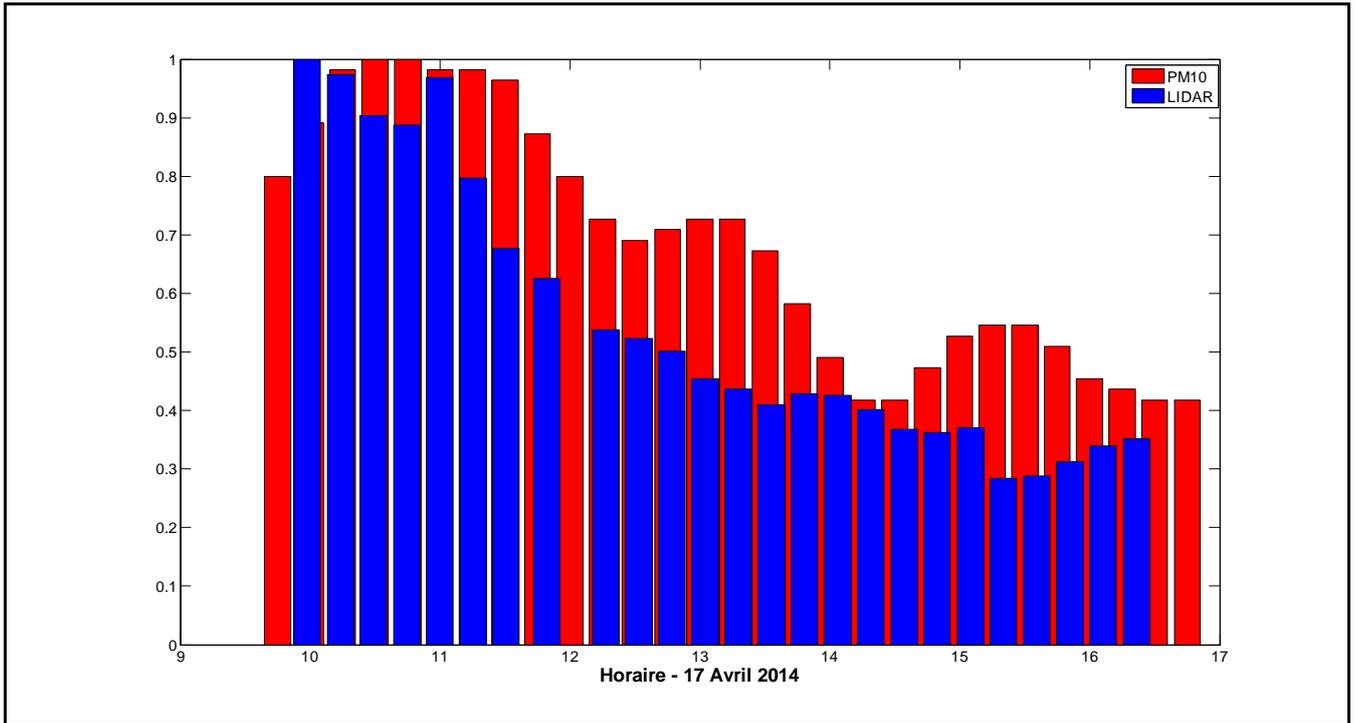


Figure 35: Comparaison PM10 – lidar pour le 17 avril 2014 échantillonné à 15 minutes (R = 0.90)

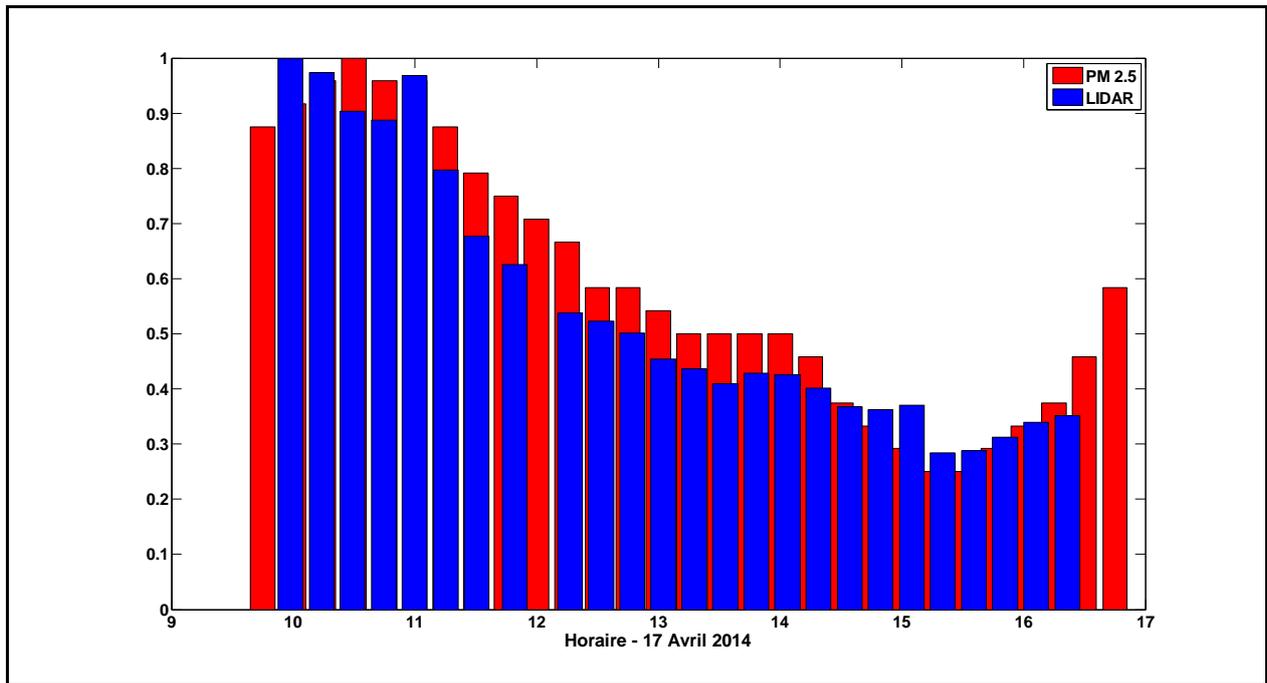


Figure 36: Comparaison PM2,5 – lidar pour le 17 avril 2014 échantillonné à 15 minutes (R = 0.96)

Coef de corrélation	Trafic 5 min	Trafic 60 min	PM10	PM2,5
$\beta_{//}$	0.29	0.37	0.89	0.96

Tableau 3: Coefficients de corrélation des données LIDAR , trafic et pollution pour le 17 Avril 2014.

Les corrélations entre le signal lidar et les PM10 et surtout PM2.5 sont remarquables. Qu'y avait-il ce jour là de favorable? Le vent était plus faible que lors des expérimentations précédentes (0.78 m/s en moyenne orienté Nord-Est). Un fort taux de PM2.5 matinal (cf figure suivante). De toutes ces données, on peut supposer que le LIDAR mesure un fond de particules présentes dans l'air, modulé localement par la météorologie (RH et vent) et le trafic dans une moindre mesure.

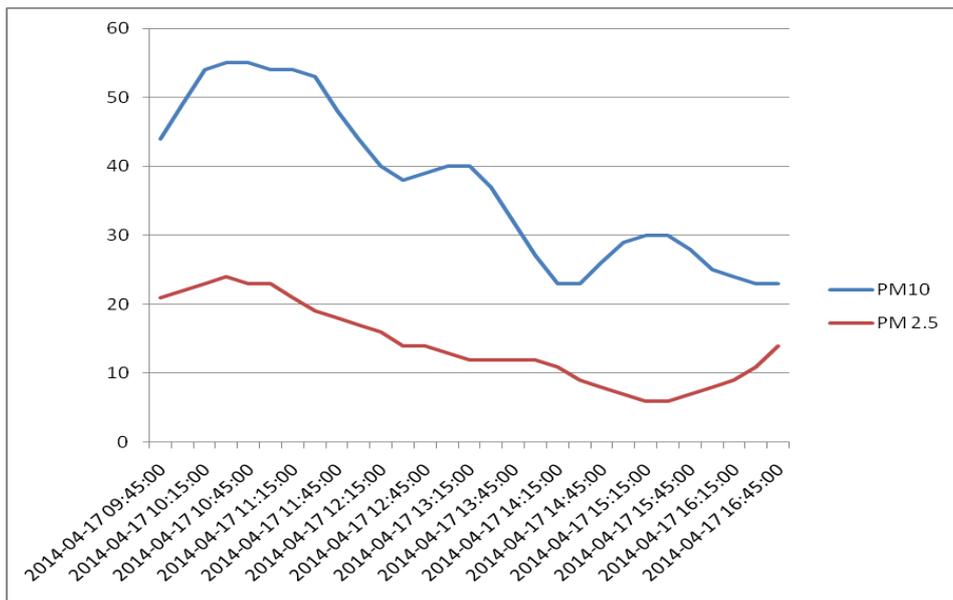


Figure 37: Mesures PM10 et PM 2,5 pour le 17 avril 2014 (en µg/m³)

4.3 - Mesure du degré de polarisation

Le système de détection a été complété par une analyse en polarisation en insérant un cube séparateur sur le faisceau de rétrodiffusion (cf figure ci-après). Deux capteurs identiques sont alors utilisés et on accède à deux signaux : Un signal rétrodiffusé dont la polarisation est parallèle à l'impulsion laser. Cette rétrodiffusion provient de particules sphériques qui ne changent pas la polarisation de l'intensité rétrodiffusée. Un signal dont la polarisation est croisée qui correspondent à des particules asphériques qui diffusent une polarisation aléatoire.

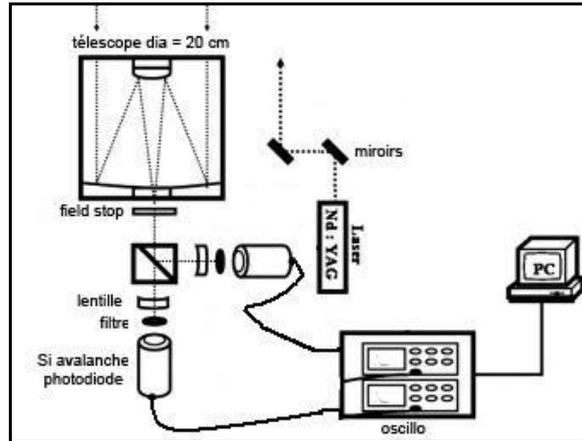


Figure 38: LIDAR avec analyse en polarisation

On peut donc réitérer l'ensemble des analyses faites précédemment en utilisant le signal dont la polarisation est croisée. Par souci de compacité, les résultats sont compilés dans le tableau suivant (β_{\perp}) en complément des mesures précédentes ($\beta_{//}$). L'analyse s'est aussi portée sur le degré de polarisation du signal, c'est à dire sur le rapport des 2 polarisations (σ).

4.3.1 - Mesures du 19 Mars 2014

Coef de corrélation	Trafic 5 min	Trafic 60 min	PM10	PM2,5
$\beta_{//}$	0.31	0.27	0.17	0.22
β_{\perp}	0.56	0.74	0.05	0.31
σ (degré de polarisation)	0.63	0.93	0.34	0.30

Tableau 4: Coefficients de corrélation des données LIDAR, trafic et pollution pour le 19 Mars 2014.

La valeur qui ressort est la corrélation entre le degré de polarisation et le trafic échantillonné toutes les heures. Cependant au regard de la valeurs à 5 minutes et des incertitudes de mesures liées à la video, cette valeur ne parait pas représentative.

4.3.2 - Mesures du 16 Avril 2014

Coef de corrélation	Trafic 5 min	Trafic 60 min	PM10	PM2,5
$\beta_{//}$	0.43	0.46	0.36	0.24
β_{\perp}	0.24	0.25	0.03	0.41
σ (degré de polarisation)	0.43	0.52	0.53	0.08

Tableau 5: Coefficients de corrélation des données LIDAR , trafic et pollution pour le 16 Avril 2014.

La meilleure configuration semble être là encore la mesure du degré de polarisation.

4.3.3 - Mesures du 17 Avril 2014

Coef de corrélation	Trafic 5 min	Trafic 60 min	PM10	PM2,5
$\beta_{//}$	0.29	0.37	0.89	0.96
β_{\perp}	0.28	0.36	0.90	0.96
σ (degré de polarisation)	0.25	0.31	0.87	0.93

Tableau 6: Coefficients de corrélation des données LIDAR , trafic et pollution pour le 17 Avril 2014.

Ici les corrélations les meilleures sont obtenues avec les données de pollution. Le trafic, quant à lui, n'a que peu d'influence quel que soit le signal mesuré.

5. Conclusion & discussion

Nous avons tout d'abord rappelé l'interaction qui existe entre les aérosols et la lumière, pour comprendre ensuite le principe de détection du LIDAR. La théorie montre que, sous certaines hypothèses simplificatrices, on peut remonter aux propriétés optiques (de diffusion et d'absorption) du milieu traversé par l'impulsion laser. L'étude a ensuite porté sur le développement du LIDAR proprement dit et sur sa modélisation pour confirmer les caractéristiques définies dans le cahier des charges. Les expérimentations menées en bord de voie débouchent sur de nombreuses données (lidar, trafic, météo, qualité de l'air) que l'on a agrégées en échantillonnant à différents pas temporels puis corrélées. Si certaines corrélations sont présentes entre les données, elles ne sont pas répétables d'une expérimentation à l'autre et c'est là une première difficulté : les fluctuations du signal rétrodiffusé sont liés vraisemblablement à une combinaison de plusieurs paramètres (trafic, météo, fond de pollution) qui varient au cours de la journée et a fortiori d'un jour à l'autre. Cependant nous avons pu modéliser l'influence de l'humidité relative permettant d'apporter une correction aux données enregistrées. Il serait nécessaire de faire de même pour chaque paramètre influant – le vent étant probablement le plus difficile à intégrer. Un second verrou lié à la mesure elle-même est l'impossibilité de remonter à des données quantitatives autant sur la taille que sur le nombre de particules. En effet, une valeur d'absorption et de diffusion peut être le résultat d'une infinité de combinaisons entre la distribution en taille des particules et leurs indices de réfraction. Pour accéder à des données quantitatives telles que les mesurent les capteurs de pollution, l'analyse en polarisation n'est pas suffisante et il est nécessaire de multiplier les mesures en utilisant de multiples longueurs d'onde. Dans ce cas, la complexité et le coût du système deviennent rédhibitoires. Ainsi s'il possède des avantages indéniables de portabilité et de mesure 3D sans contact, le LIDAR à rétrodiffusion mono longueur d'onde ne saurait suffire pour déterminer précisément la pollution imputable au seul trafic routier.

6. Bibliographie & sitographie

- [1] "Absorption and Scattering of Light by Small Particles" Craig F. Bohren and Donald Huffman, Editions Wiley Science – 1998
- [2] "Stable analytical inversion solution for processing LIDAR returns" James D. Klett, APPLIED OPTICS, vol.20,No.2, 1981
- [3] <http://www.airpl.org/>
- [4] "Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties", E. P. Shettle and R. W. Fenn, AFGL-TR 79-0214, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA, 1979.
- [5] "The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air", G. Hänel, in Advances in Geophysics, 19:73-188. Edited by H. E. Landsberg and J. Van Mieghem, Academic Press, New York, 1976.
- [6] <http://www.pollens.fr>

Connaissance et prévention des risques – Développement des infrastructures – Énergie et climat – Gestion du patrimoine d'infrastructures –
Impacts sur la santé – Mobilités et transports – Territoires durables et ressources naturelles – Ville et bâtiments durables

*Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.
En cas de reproduction partielle, l'accord préalable de l'auteur devra être demandé.*

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction territoriale Ouest : MAN – 9 rue Viviani – BP 46223 – 44262 Nantes cedex – Tél : +33(0)2 40 12 83 01

Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

Établissement public : Siret 130 018 310 00 222 www.cerema.fr