

TOUCHTE CODJO Felix  
Promotion 2024  
Année universitaire : 2021-2022

Diplôme d'ingénieur Télécom Physique Strasbourg

Mémoire de stage de 1re année

## Caractérisation d'un scintillomètre

UNIVERSITE DE STRASBOURG

4 rue blaise Pascal 67081 STRASBOURG FRANCE

TAKAKURA Yoshitate

[y.takakura@unistra.fr](mailto:y.takakura@unistra.fr)

ICUBE - ÉQUIPE IMAGES - UMR 7357

300 bd Sébastien Brant 67412 ILLKIRCH FRANCE

ZALLAT Jihad

[jihad.zallat@unistra.fr](mailto:jihad.zallat@unistra.fr)



Du 4 au 26 juillet



# Avant-propos

Ce document est censé rendre compte du déroulement de mon stage de recherche, stage effectué en duo avec Anthony Decron. La rédaction de ce rapport n'a pas été aussi simple que prévue. J'ai beaucoup cherché avant de trouver la présente formule de rédaction.

En effet, j'ai été ébloui par la juxtaposition des mots « stage » et « recherche ». J'avais hâte de faire de la recherche car c'est vers elle que s'oriente mon projet d'avenir. Après avoir lutté, je me suis rendu compte que je ne détenais pas encore de connaissances suffisantes pour mener à bien une investigation scientifique. Je voulais tout comprendre de la documentation qui m'était confiée, sans pourtant y arriver. Avec du recul, je pense que cet entêtement a eu un effet nocif sur le travail de groupe que constituait ce stage. Concrètement, je pense que nous aurions pu être beaucoup plus efficace - voire même plus performant.

Le stage avait un aspect beaucoup plus pratique que théorique. Malheureusement, je ne l'ai compris que très tard. N'ayant fait que très peu de cours pratique avant mon admission à Télécom Physique Strasbourg, je ne m'y retrouvais donc pas. Ce qui m'importait, c'était l'interrogation des principes physico-mathématiques à l'origine des manipulations que nous avions à faire.

En somme, je n'ai pas pu me résoudre à mettre le bilan de mes recherches en annexe de ce document car j'ai passé la majeure partie de mon temps à essayer de les comprendre. Ce document n'est donc pas un strict compte-rendu du déroulé des opérations réalisées durant ce stage, chaque chapitre (sauf le premier) étant rédigé dans le format suivant : petite introduction + éléments de théorie ou recherches effectuées + manipulations effectuées.

# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	iii
<b>Résumé</b>	v
<b>Abstract</b>	vi
<b>1 Le laboratoire ICUBE</b>	1
1.1 L'institution ICUBE . . . . .	1
1.2 L'équipe TRIO . . . . .	3
<b>2 Scintillométrie</b>	4
2.1 Quelques éléments de théorie . . . . .	4
2.2 Manipulations effectuées . . . . .	7
<b>3 Image dehazing</b>	12
3.1 Quelques éléments de théorie . . . . .	12
3.2 Manipulations effectuées . . . . .	15
<b>Bibliographie</b>	17
<b>Table des figures</b>	18
<b>Index</b>	19

# Résumé

Au départ « Caractérisation d'un scintillomètre », le thème de mon stage a été entendu à la « télédétection ». Nous avons étudié deux méthodes de détermination à distance des propriétés physico-chimiques d'un milieu : la scintillométrie et l'imagerie. Ce document contient trois chapitres.

Le chapitre I présente l'établissement dans lequel j'ai effectué mon stage.

Le chapitre II est consacré à l'étude des scintillomètres. La scintillométrie est une science pluridisciplinaire : usant de la théorie de la turbulence atmosphérique et de l'optique, de l'électronique et du traitement du signal, son aspect pratique sert à la télédétection de terrain par le calcul de flux de chaleur [1]. Les scintillomètres sont très utilisés en géoscience dans l'optique de pouvoir quantifier précisément les échanges d'énergie et de matière entre la surface terrestre et l'atmosphère. Ces échanges régissent en effet une bonne partie du cycle hydrologique et du développement des végétations.

Le chapitre III est une introduction au traitement d'image. La méthode d'imagerie découle à la base d'une toute autre opération, celle consistant à fournir une meilleure version d'une image prise dans de faibles conditions de visibilité. Comment reconstruire l'image d'un objet telle qu'elle serait prise dans de grandes conditions de visibilité à partir d'une image prise à travers de la brume sera le principal objectif du chapitre. L'opération s'appelle *image dehazing*. La comparaison des images avant et après traitement permet par exemple d'obtenir des informations sur l'aérosol du milieu.

# Abstract

Our intership topic was "Characterisation of a scintillometer", then it has moved to "remote sensing". We studied two methods of remote determining of an environment's chemicophysical properties : scintillometry and imaging. This report contain two chapters.

Chapter I presents the institution in which I did my internship.

Chapter II exclusively talks about the study of scintillometers. Scintillometry is multidisciplinary science : using atmospheric turbulence theory and the optical, electronics and signal processing, its practical aspect is used for remote sensing in the field by calculating sensible heat fluxes [1]. Scintillometers are very used in geoscience with a view to being able to quantify energy and matter exchange between the Earth's surface and atmosphere, due to these exchanges govern a good part of the hydrological cycle and vegetation development.

Chapter III is an introduction to image processing. The imaging methodology is a byproduct of the enhancement operation of a picture taken in poor visibility condition. This chapter exclusively deals with image dehazing. In the comparison of these two pictures (before and after processing), the method yields information about the atmospheric particles (aerosol).

# Chapitre 1

## Le laboratoire ICUBE

C'est au sein du laboratoire ICUBE que j'ai effectué mon stage de première année. Ce chapitre a pour objectif de présenter le cadre de travail que constituait cette période d'étude. Les principales informations utilisées lors de la rédaction de cette partie ont été prises sur le officiel du laboratoire<sup>1</sup>. Je vous propose donc un petit retour rapide.

### 1.1 L'institution ICUBE

Le laboratoire ICUBE (pour « I » trois fois, donc III) est un acronyme désignant le laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie. Créé en 2013, il regroupe les forces de recherche du site universitaire de Strasbourg. C'est un formidable projet sous l'égide du CNRS , de l'Université de Strasbourg, de l'ENGees et de l'INSA de Strasbourg.

Le projet scientifique du laboratoire s'articule autour de 6 programmes de recherches transversaux :

- Imagerie et robotique médicales et chirurgicales (IRMC) ;
- Instrumentation, capteurs et analyse (InCA) ;
- Calcul scientifique (CS) ;
- Science des Données et Intelligence Artificielle (DSAI) ;
- Ingénierie des matériaux pour l'énergie et l'environnement (IMEE) ;
- Industrie du Futur et Usine Intelligente (IFUI) ;

Le laboratoire est multisite et est constitué de 4 départements répartis en 17 équipes de recherche (voir schéma page suivante, source : ICUBE).

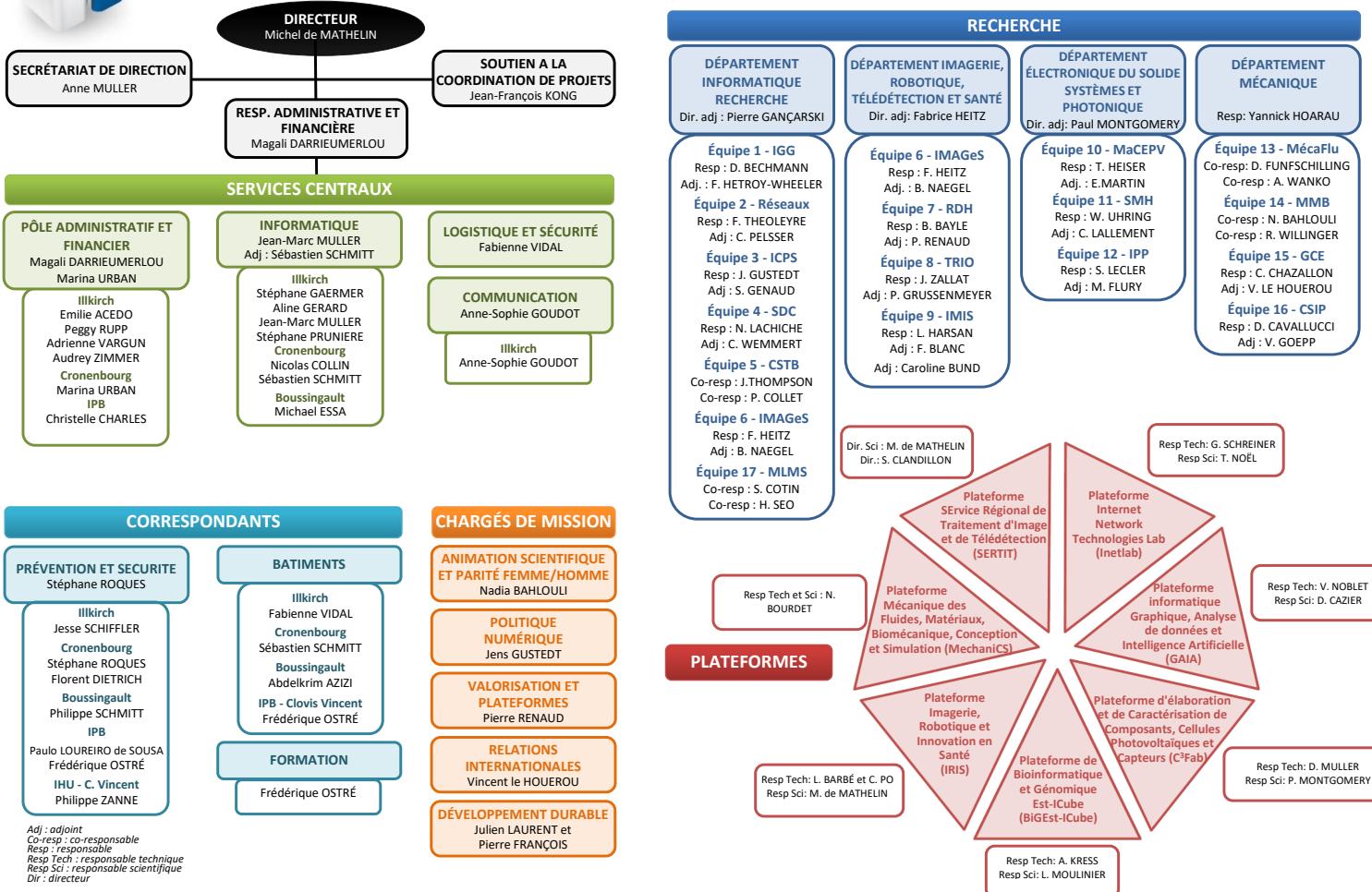
---

1. Vous pourrez toujours vous référer à : <https://icube.unistra.fr/>



## Organisation du laboratoire ICube

V29 - 05/2022



## 1.2 L'équipe TRIO

J'ai effectué mon stage au sein de l'équipe de recherche n°8 : TRIO, situé au sein de Télécom Physique Strasbourg. Monsieur Jihad ZALLAT, l'un de mes tuteurs de stage, en est le responsable. TRIO est un acronyme pour *Télédétection, Radiométrie et Imagerie Optique*. Les activités de cette équipe de recherche se concentre dans l'extraction de l'information physique contenue dans les signaux. Elle s'exprime à travers 4 thèmes de recherche : l'imagerie optique, l'observation de la terre, l'environnement en milieu urbain et la numérisation du patrimoine.

TRIO est composée de physiciens du domaine de l'observation de la Terre, de traiteurs d'images et de signaux, de climatologues et de spécialistes en photogrammétrie et modélisation 3D.

## Chapitre 2

# Scintillométrie

Les scintillomètres sont des instruments de mesure optique permettant de calculer les flux intégrés de chaleur sensible à partir des mesures de paramètres caractérisant l'intensité turbulente de l'atmosphère tels que le *paramètre de structure*<sup>1</sup> de l'indice de réfraction de l'air  $C_{n^2}$  [1]. De façon simplifiée, comme l'illustre la figure 2.1, les scintillomètres sont constitués d'un émetteur et d'un récepteur placés à plusieurs centaines de mètres. L'émetteur génère une onde lumineuse à partir d'une source et un système de focalisation par des miroirs, lentilles ou autres éléments optiques. Le récepteur consiste en un capteur qui enregistre les variations d'intensité de cette onde et les traduit en  $C_{n^2}$ . Selon la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell, les changements subis par l'onde incidente au niveau du récepteur sont dûs aux variations de l'indice de réfraction de l'air. De ce fait, un traitement utile du signal reçu permet de remonter aux variations de cette dernière. Autre exemple, le lien intime entre l'indice de réfraction de l'air et les conditions de température ( $T$ ), de pression ( $P$ ) et d'humidité ( $q$ ) permet d'autre part de dresser les profils de ces différentes grandeurs.

Il existe des instruments spécialisés permettant d'effectuer des mesures locales des différentes grandeurs physiques déjà citées, mais l'intérêt des scintillomètres est de pouvoir calculer des flux intégrés sur des distances allant de la centaine de mètres à la dizaine de kilomètres (grandes caractéristiques du scintillomètre que nous désignerons par l'expression *path length*). À titre d'exemple, le scintillomètre de type **LAS150** (*Large Aperture scintillometer 150*), utilisé durant ce stage, fourni par la compagnie **Kipp & Zonen**, possède un *path length* de 250 m à 4,5 km [2].

### 2.1 Quelques éléments de théorie

La scintillométrie repose sur la propagation d'ondes électromagnétiques en milieux turbulents. L'atmosphère terrestre, plus précisément, sa *couche*

---

1. Voir la sous partie consacrée à la théorie de la scintillométrie

$\lambda$  : longueur d'onde du faisceau d'émission

caractéristiques du milieu :  $n, T, P, q, c, \dots$

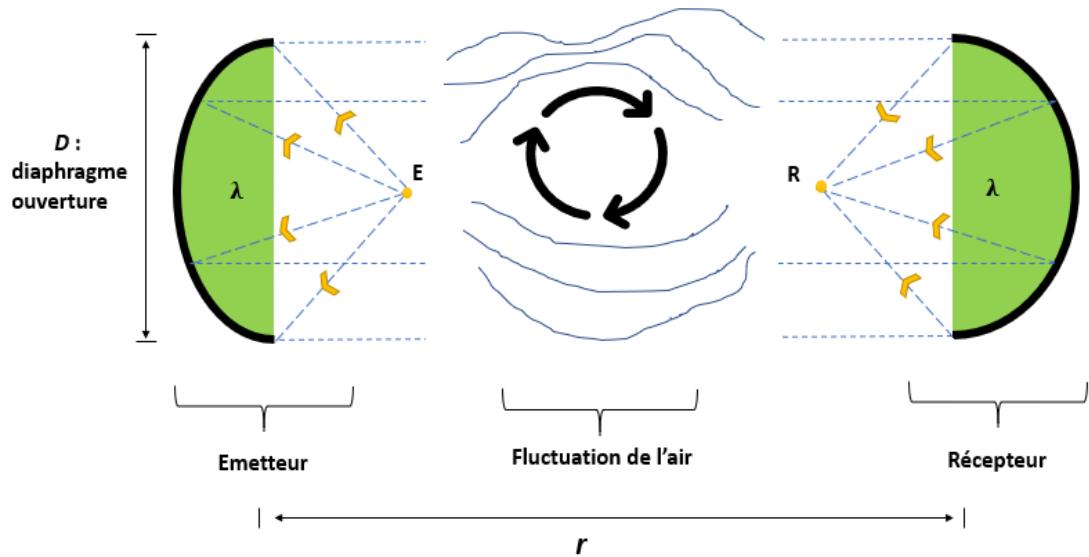


FIGURE 2.1 – Schéma de principe d'un scintillomètre



FIGURE 2.2 – Scintillomètre de type LAS de Kipp&Zonen

*limite atmosphérique* (CLA), est le siège d'un écoulement turbulent à la fois dynamique, produit par le cisaillement du vent au contact des obstacles de la surface, et thermique, engendré par les gradients de température [1]. Le mathématicien russe et soviétique, Andreï Nikolaïevitch Kolmogorov, propose en 1941 une représentation de la turbulence sous la forme d'une cascade de tourbillons de plus en plus petits, associés à des énergies cinétiques turbulentes décroissantes. Les gros tourbillons semblent fonctionner comme des dioptres qui dévient les rayons lumineux latéralement. Ceux de taille moyenne se comportent comme des lentilles convergentes ou divergentes (en fonction de la valeur de  $n$ ), alors que les plus petits ont un rôle diffractant [3]. En outre, la trajectoire de l'onde électromagnétique est aussi soumises à diverses autres modifications selon la composition chimique de l'atmosphère et la concentration des particules en suspension (diffusion, absorption,...).

Soit  $s$  une variable atmosphérique, par exemple  $n$ ,  $T$ ,  $P$ ,  $q$  ou  $c$  (concentration particulaire). Sa distribution spatio-temporelle en milieu turbulent est totalement aléatoire ; de ce fait, sa description fait appel à des notions statistiques. La *fonction de structure*  $D_{s^2}$  de la grandeur scalaire  $s$  est une notion statistique définie pour répondre à des conditions d'homogénéité et de stationnarité. Elle est définie par :

$$D_{s^2} = \overline{(s(\vec{r}_1) - s(\vec{r}_2))^2} \quad (2.1)$$

entre deux positions  $\vec{r}_1$  et  $\vec{r}_2$  d'un repère cartésien choisi, où  $\bar{x}$  désigne la valeur moyenne du scalaire  $x$ . L'homogénéité indique que  $D_{s^2}$  ne dépend que de la différence  $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$  alors que la stationnarité (temporelle) permet de s'affranchir de l'instant de mesure. Modulo des hypothèses d'isotropie, Kolmogorov et al. rendent  $D_{s^2} = D_{s^2}(r)$  dépendant uniquement de la distance  $r$  suivant une loi en  $r^{2/3}$ . Ils définissent ensuite le facteur de structure de la variable atmosphérique  $s$  comme étant le facteur de proportionnalité entre  $D_{s^2}(r)$  et  $r^{2/3}$  :

$$C_{s^2} = \frac{D_{s^2}}{r^{2/3}} = \frac{\overline{(s(\vec{r}_1) - s(\vec{r}_1 + \vec{r}))^2}}{r^{2/3}} \quad (2.2)$$

Le facteur de structure de l'indice de réfraction de l'air n'est donc qu'une notion statistique parmi tant d'autres. La technologie des scintillomètres de type LAS repose ensuite sur la relation (2.3) entre le  $C_{n^2}$  et la variance du logarithme de l'intensité lumineuse  $\sigma_{\ln(I)}^2$ , établie par Wang et al. en 1978 [1] [2] [4].

$$C_{n^2} = 1,12 \sigma_{\ln(I)}^2 D^{7/3} L^{-3} \quad (2.3)$$

où  $D$  désigne le diamètre du scintillomètre LAS et  $L$  ou  $r$  la distance entre émetteur et récepteur. La superposition des équations (2.2) et (2.3) montre bien que les valeurs du  $C_{n^2}$  fournie par les scintillomètres donnent une image des variations de  $n$  entre les deux bornes du scintillomètre.

## 2.2 Manipulations effectuées

Les deux premières semaines du stage portaient sur la prise en main d'un scintillomètre. Nous devions à l'aide du manuel d'instruction réussir à faire fonctionner correctement l'appareil. L'appareil en question était un scintillomètre de type LAS 150 fourni par Kipp&Zonen (figure 2.2).

Dès le début nous étions déjà confrontés à un problème. Le LAS150 de Kipp&Zonen est l'une des premières versions de scintillomètre mise sur le marché par l'entreprise en 2002. Depuis, elle a connu de nombreuses améliorations en passant par le LAS MkI et le LAS MkII ; ces nouvelles versions offrant particulièrement une meilleur expérience interface utilisateur. Malheureusement, la doc technique du LAS 150 n'est plus disponible sur le site web du commerçant. Nous avons fait la remarque aux tuteurs de stage et leur avons demandé s'il pouvait l'avoir dans leurs archives. En effet, l'appareil avait déjà été utilisé par une autre équipe de chercheur du laboratoire lors d'une réelle expérience de terrain, comme le témoigne l'enquête de la figure 2.3.

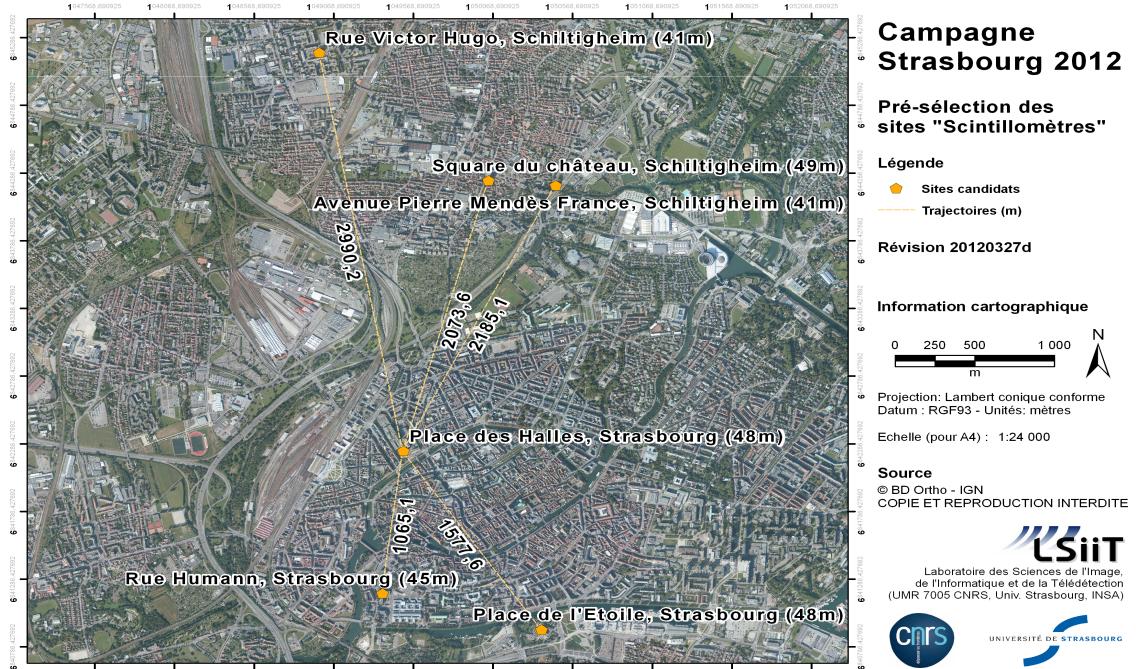


FIGURE 2.3 – Précédente utilisation des scintillomètres utilisés durant le stage

En attendant de mettre la main sur ce vieux manuel d'instruction, nous avions fait la mauvaise conjecture de prétendre que la mise en marche du LAS150 ne différerait pas de celle du LAS MkII. Cette erreur a failli compromettre le déroulant du stage, croyant que les appareils (émetteur et receveur)

n'étaient plus fonctionnels. Concrètement, nous n'arrivions pas à alimenter les appareils. Non seulement la *led power* de l'émetteur ne s'allumait pas, mais surtout nous ne visualisions pas le signal de la *led pulse* sur un oscilloscope (figure 2.4). D'où venait le problème ? Le problème venait essentiellement du câblage. La figure 2.5 montre bien que le code couleur des deux générations de scintillomètre ne sont pas les mêmes.

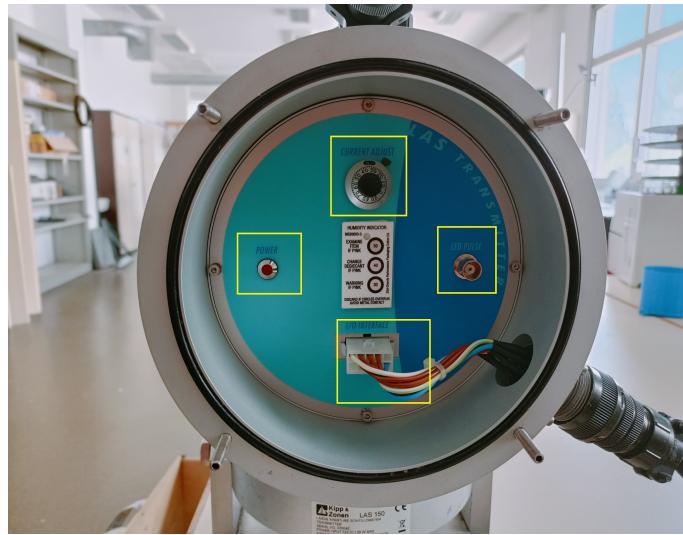


FIGURE 2.4 – Interface de l'émetteur

Une fois que nous avons réussi à alimenter les appareils, ayant la bonne documentation, nous avons suivi les instructions d'installation et de configuration des appareils. Mon camarade Anthony, ayant plus d'expérience que moi, se chargeait particulièrement de la bonne calibration des appareils. Pour une utilisation optimale des appareils, émetteur et receveur doivent être espacés d'au moins 250 mètres (voir page 12 du manuel d'instruction, ou annexe). Malheureusement, durant ce stage, nous n'avons pas eu les permissions et le terrain d'exploitation nécessaires pour effectuer des mesures valides. Nous avons toutefois tenté l'exploitation en laboratoire à moins de 10 mètres et au balcon à moins de 30 mètres.

Le *path length* réel ( $L$ ) ou le *transect* (i.e la distance entre émetteur et receveur) impose une valeur particulière (que nous devons régler) au *path length* inscrit sur le receveur par une formule indiquée dans le manuel d'instruction (*PotLAS*, [2, page 24]). Sachant  $D = 0,152\text{ m}$ , pour  $L \sim 20\text{ m}$ , nous devrions régler le *path length* à  $-43,39$ . Étant négatif, nous le prenions toujours égal à 0 – c'était donc une première anomalie.

Le *signal strength* du receveur était quasiment toujours à 100% (figure 2.6). Cela signifiait que l'appareil saturait. Par précaution, nous devions éviter les 100%. Pour ce faire, une solution consistait à réduire le *current adjust* (CA) de l'émetteur. Le souci, c'est que réduire le CA était nocif sur

**LAS MkII - Transmitter and receiver power connector and cable**

Pin number	Wire colour	Function	Value
1	red	instrument power +	12 VDC nominal (9.6 to 18 VDC)
2	orange	heater power +	12 VDC nominal (9.6 to 18 VDC)
3	brown	heater return -	0 V
4	black	instrument return -	0 V

**LAS 150 - Transmitter and receiver power connector and cable**

Pin designation (amphenol plug)	Color code	Transmitter unit
A	Blue	Power GND
B	Violet	Power 12 VDC, 0.5 A
C	Red	Thermistor $U_{TH\_T}$ (Hi)
D	Orange	7 kHz oscillator (Hi)
E	Yellow	LED pulse (Hi)
F	Black	Not connected
G	White	Heater, 12 VDC
H	Grey	Heater
I	Green	Signals GND (Lo)
J	Brown	Not connected

FIGURE 2.5 – Comparaison des connecteurs d’alimentations entre le LAS 150 et le LAS MkII

la qualité du signal émis. En visualisant le signal de sortir (le *led pulse*) de l’émetteur sur un oscilloscope, nous avons observé des *overshoots* (OV). Plus le CA est faible plus le signal émis est consumé au détriment de ces overshoots. Nous avons pensé de les supprimer à l’aide d’un filtre passe-bas mais le signal d’overshoot avait la même fréquence que le signal du *led pulse*. Ceci était donc une seconde anomalie. Nous avons ensuite effectué une série de mesure afin de quantifier ces overshoots. Nous avons obtenu les diagrammes de la figure 2.7.

Les mentions « sans masse » sur les relèves effectuées viennent du fait que nous avons légèrement réduit les overshoots en reliant la masse du scintillomètre à celui de l’oscilloscope, chose qui n’était pas évidente via le câble BNC. En effet, le signal du led pulse peut aussi être récupéré via le fil jaune du câble d’alimentation. Le ratio du signal utile sur l’overshoot justifie bien la proposition déjà énoncé plus haut que « plus le current adjust est faible plus le signal émis est consumé au détriment des overshoots. »

Malgré toutes ces anomalies, nous avons fait quelques acquisitions en extérieur (au balcon) sous un soleil éclatant (figure 2.8). Suivant la procédure indiquée dans le manuel d’instruction [2, page 27], Anthony a édité des VI Labview afin d’enregistrer les données perçues au niveau du receveur dans des fichiers et ensuite de calculer le  $C_{n^2}$ . Après un premier test, nous avons observé une perte en puissance du signal émis par le transmitter qui a for-

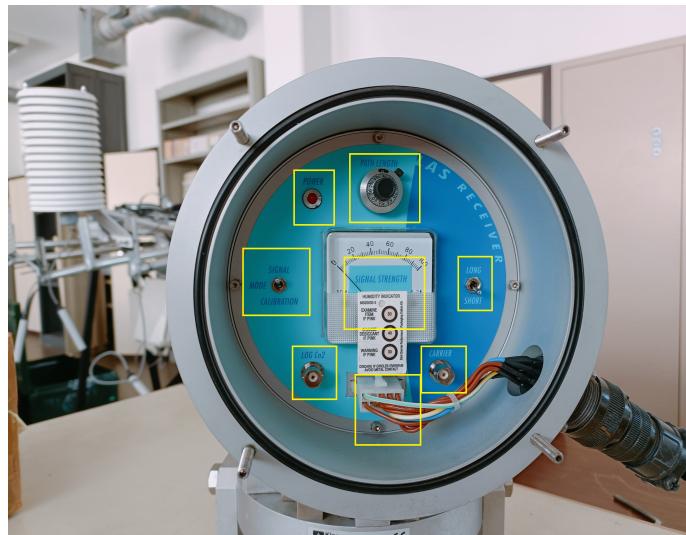


FIGURE 2.6 – Interface du receveur

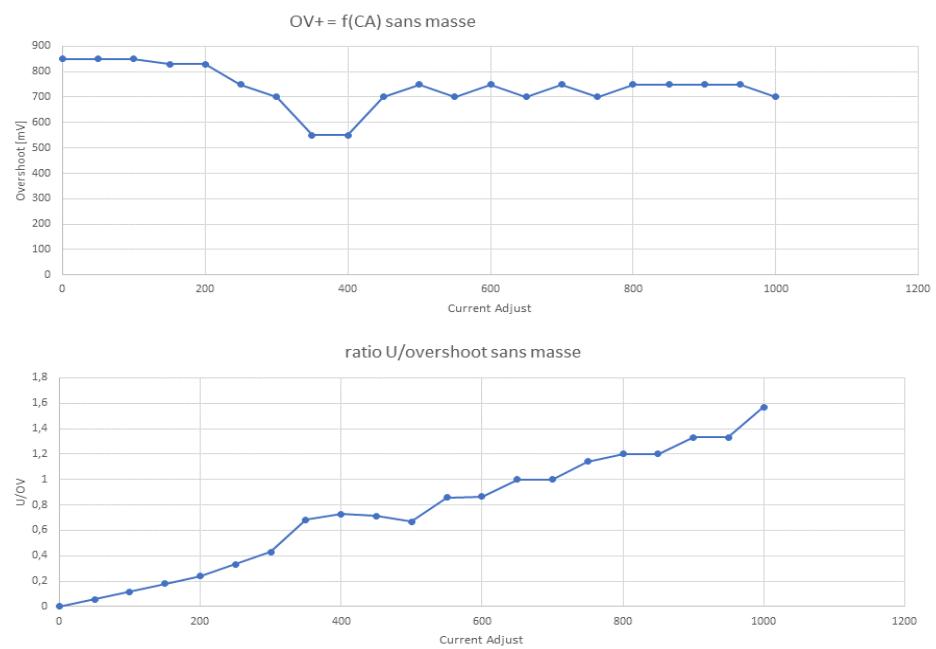


FIGURE 2.7 –  $U$  désigne le signal du led pulse,  $CA$  désigne le current adjust et  $OV+$  désigne l'overshoot

cément corrompu les calculs<sup>2</sup> du  $C_{n^2}$ . J'ai ensuite édité un VI Labview afin de suivre l'évolution du signal émis par le transmitter.

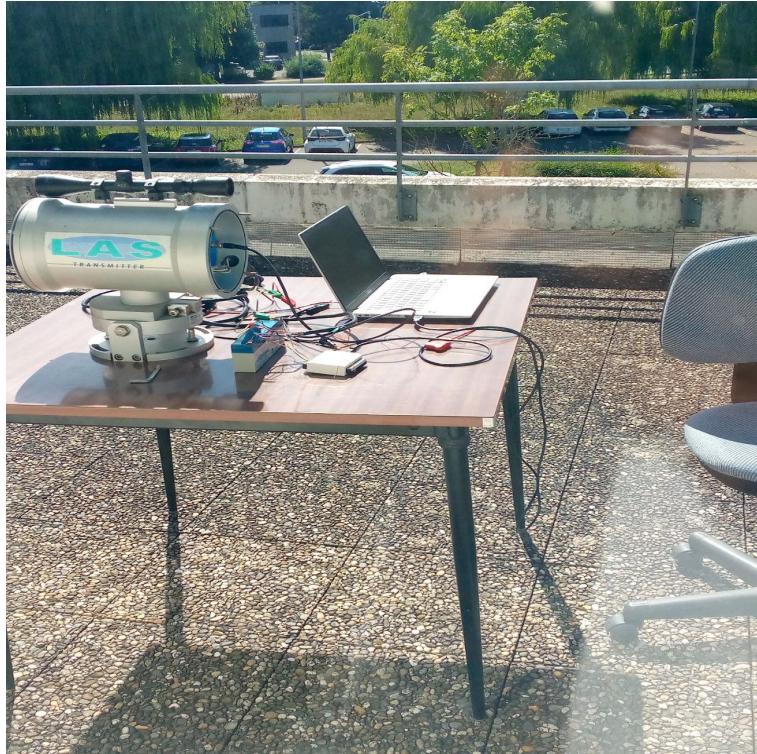


FIGURE 2.8 – Enregistrement du signal généré par l'émetteur durant les acquisitions

Afin d'obtenir plus d'informations sur les données collectées, je vous invite à lire le rapport d'Anthony<sup>3</sup>...

---

2. Calculs déjà corrompus par les anomalies citées !

3. Comme précisé dans l'avant-propos, je n'ai pas porté très grand intérêt aux manipulations. La théorie n'était pas assez bien assise à mon goût pour prétendre interpréter quelconques résultats

# Chapitre 3

## Image dehazing

Il existe plusieurs méthodes de reconstitution d'image. Celle que nous avons étudié se base sur la polarisation de la lumière et repose essentiellement sur les travaux de Yoav Y. Schechner et *al* [5]. Soit le schéma de principe de la figure 3.1. La théorie ondulatoire de la lumière nous apprend que les capteurs optiques tels que les appareils photo ne sont sensibles qu'à la valeur moyenne du carré du champ électromagnétique émis par un objet, c'est-à-dire son intensité ( $I$ ). Yoav Y. Schechner et *al* considèrent que la brume est constituée de particules dite d'atmopsphère en suspension et en grande quantité. Ils considèrent que l'image est « floue » car elle est la superposition de deux images, le *direct transmission* ( $D$ ) et l'*airlight* ( $A$ ). Le *direct transmission* est l'intensité qu'observerait le détecteur en l'absence de brume à la distance  $z$  alors que l'*airlight* coorespond à la lumière diffusée par les molécules de brume (Airlight). En d'autres termes,  $I = I_{total} = D + A$ .

### 3.1 Quelques éléments de théorie

Compte tenu de l'introduction, la problématique est la suivante : comment obtenir  $D$  à partir la seule connaissance de  $I^{total}$  ? Nous disposons ici d'une équation et de deux inconnus, c'est pratiquement impossible. C'est là tout l'intérêt des polariseurs. Les auteurs admettent que la lumière émise par l'objet ( $D$ ) est non polarisée ; et puisqu'elle n'admet pas de direction privilégiée, son intensité sera la même quelle que soit l'orientation  $\alpha$  du polariseur. À contrario, la lumière diffusée par les particules d'atmopsphère sera en partie polarisée. Dans le cas très particulier (très peu observable en réalité, ex. diffusion de Rayleigh) où l'*airlight* est totalement polarisée, un simple polariseur permet d'annuler la contribution de  $A$  à  $I^{total}$  et d'obtenir le résultat escompté. Malheureusement, en général, l'*airlight* n'ai jamais totalement polarisé. L'idée des auteurs est assez simple. Puisque  $I^{total} = A + D$  est une équation à deux inconnues, il suffit d'obtenir deux images indépendantes de la scène pour la résoudre.

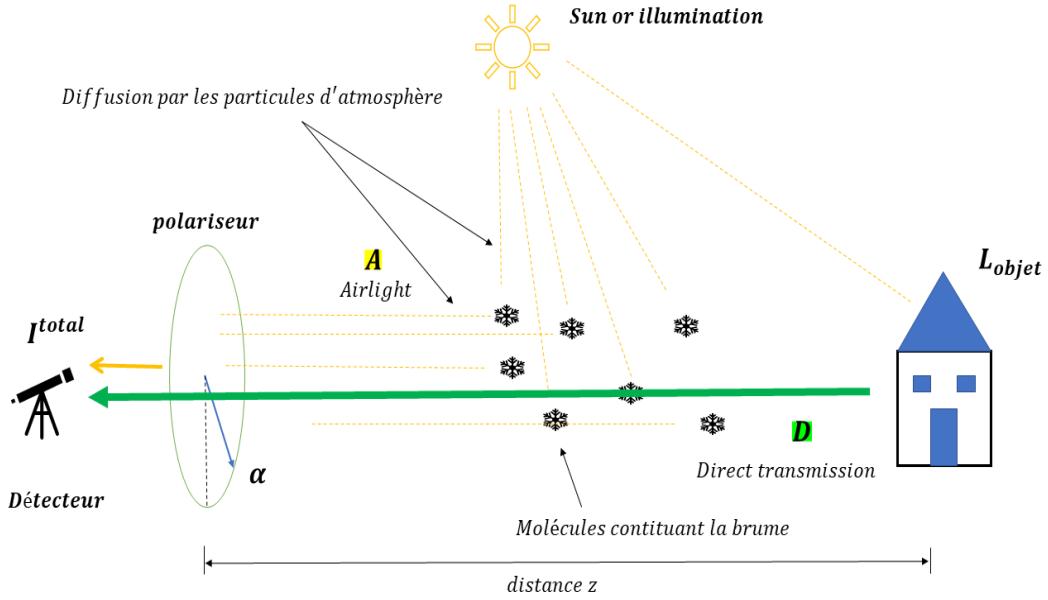


FIGURE 3.1 – Schéma de principe de l'*image dehazing* selon Yoav Y. Schechner et al

Nous devons pouvoir estimer le degré de polarisation de l'*airlight* car la méthode nécessite que sa polarisation partielle soit détectable par un capteur. En faisant varier l'angle du polariseur, nous sommes en mesure de déterminer les angles  $\theta^{\parallel}$  et  $\theta^{\perp}$  correspondant respectivement aux mesures minimale et maximale de  $A$ , image directe de  $I$  puisque la valeur de  $D$  ne change pas entre deux valeurs différentes de  $\alpha$ . On montre que  $\theta^{\parallel}$  et  $\theta^{\perp}$  sont perpendiculaires l'un de l'autre de sorte que on puisse faire les décompositions suivantes :

$$A = A^{\parallel} + A^{\perp} \quad (3.1)$$

$$I = I^{\parallel} + I^{\perp} \quad (3.2)$$

Le degré de polarisation de l'*airlight* est définie par :

$$p_A = \frac{A^{\perp} - A^{\parallel}}{A} = \frac{\Delta A}{A} \quad (3.3)$$

avec :

$$\Delta A = A^{\perp} - A^{\parallel}$$

Cette définition se généralise naturellement à  $I^{total}$ . La grandeur  $p_A$  s'interprète comme le paramètre de contrast. On déduit des équations (3.1) et (3.2) les relations suivantes :

$$I^{\parallel} = \frac{D}{2} + A^{\parallel} \quad (3.4)$$

$$I^{\perp} = \frac{D}{2} + A^{\perp} \quad (3.5)$$

D'où :

$$D = I^{total} - A \quad (3.6)$$

$$= I^{total} - \frac{\Delta A}{p_A} \quad (3.7)$$

$$D = I^{total} - \frac{\Delta I}{p_A} \quad (3.8)$$

Connaissant  $p_A$ , nous sommes en mesure de déterminer  $D$ . Toutefois,  $D$  n'est qu'un signal dégradé de  $L_{objet}$  suite à son atténuation et sa diffusion lors de la traversée des rayons lumineux. Les auteurs estiment que :

$$D = L_{objet}t(z) \quad (3.9)$$

$t(z)$  étant la transmittance. Elle a pour principale propriété d'être nulle à l'infinie. Si on note  $A_{\infty}$  le signal de l'airlight pour un objet situé à l'infini, ils assument que :

$$A = A_{\infty}(1 - t(z)) \quad (3.10)$$

De sorte que :

$$t(z) = 1 - \frac{A}{A_{\infty}} \quad (3.11)$$

Connaissant  $p_A$  et  $A_{\infty}$ , on obtient d'après (3.6) et (3.11) :

$$\boxed{L_{objet} = \frac{I^{total} - A}{1 - \frac{A}{A_{\infty}}}} \quad (3.12)$$

avec :

$$\boxed{A = \frac{\Delta A}{p_A}} \quad (3.13)$$

Il ne reste plus qu'à déterminer les paramètres caractéristiques du milieu diffusant  $A_{\infty}$  et  $p_A$ . Puisque :  $\lim_{z \rightarrow +\infty} D(z) = 0$  et  $I = A + D$ ,

$$\boxed{A_{\infty} = \lim_{z \rightarrow +\infty} A(z) = \lim_{z \rightarrow +\infty} I^{total}(z)} \quad (3.14)$$

Pour obtenir  $A_{\infty}$ , il suffit d'imager un objet à l'infini. Quant à  $p_A$ , nous devons introduire le *degré de polarisation de l'intensité totale*,  $p_I$  :

$$p_I = \frac{\Delta I}{I^{total}} = \frac{\Delta A}{I^{total}}$$

et lorsqu'on fait tendre  $z$  vers l'infini, on obtient :

$$\lim_{z \rightarrow +\infty} p_I(z) = \frac{\Delta A}{A_\infty} =: p_A \quad (3.15)$$

## 3.2 Manipulations effectuées

Lors d'expériences en laboratoire, nous avons simulé la brume par d'autres milieux diffusants (ex. un vaste volume d'eau dans lequel on insère une goutte de lait, figure 3.2). Dans ce type de milieu, la diffusion moléculaire est encore plus importante. Nous avons effectué quelques tests non concluants en procédant tels que décrit dans la section précédente. Toute la partie acquisition d'image a été faite par Anthony sous Labview à l'aide d'une caméra mise à notre disposition. Le traitement d'image correspondait au code MATLAB de la figure 3.3.

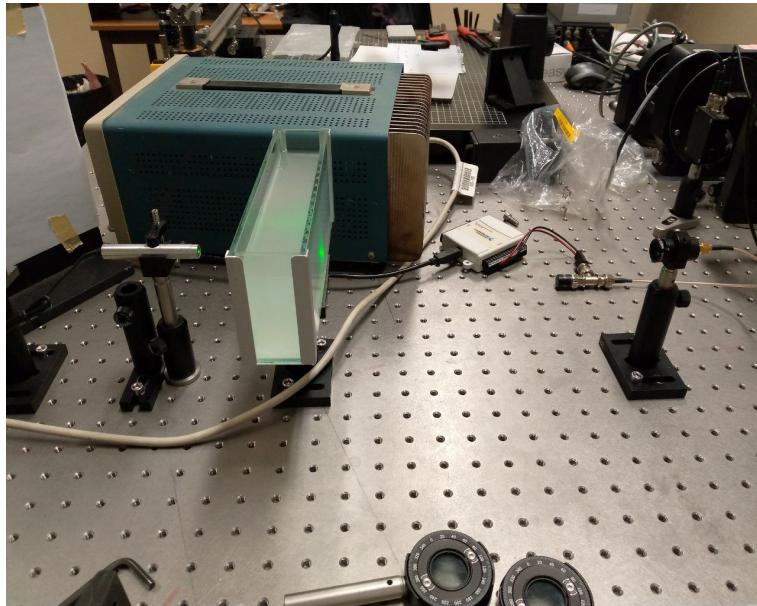


FIGURE 3.2 – Simulation de la brume : eau + goutte de lait

```

%% Step1 : determination of plane of incidence (P)

% I_min = I_t define theta_t (parallèle ou tangentiel) [ref. doc1/fig2]
% I_max = I_n define theta_n (normal)
% P is normal to vector ray defining theta_n (par rapport au centre du
% polariseur. Bien marquer le polariseur, ces paramètres dépendent de
% l'illumination
% I_t and I_n correspond to img_t ant img_n
I_t = imread('img_hazed_t.jpeg');
I_n = imread('img_hazed_n.jpeg'); %so ...
I_tot = imread('img_hazed.jpeg');

%% Step 2 : Determination of A_inf and p (by observing the horizon)
A_inf_t = imread('img_horizon_t.jpeg');
A_inf_n = imread('img_horizon_n.jpeg');
A_inf = imread('img_horizon.jpeg');%A_inf_t + A_inf_n;
p = (A_inf_n - A_inf_t)./A_inf;

%% Final Step (given p and A_inf ...)
A = (I_n - I_t)./p;
L_obj = (I_tot - A)./(1 - A./A_inf);

%% viewing of the dehazed image
figure(1);
imshow(L_obj);
imwrite(L_obj,'img_dehazed.jpg','jpeg');

```

FIGURE 3.3 – Code Matlab correspondant au traitement d’image

# Bibliographie

- [1] Pierre adrien SOLIGNAC. *Conception, Réalisation et Mise en œuvre d'un scintillomètre : Influence de la vapeur d'eau dans la bande 940nm.* PhD thesis, GEET, 09 Décembre 2009.
- [2] Kipp & Zonen. *LAS & X-LAS : Instruction Manual*, 2007.
- [3] OUATTARA Hamed. Estimation de l'évapotranspiration par la méthode de scintillométrie et la télédétection spatiale sur le piémont de l'atlas. Master's thesis, 19 Juillet 2017.
- [4] Kipp & Zonen. *LAS MkII : Instruction Manual*, 2015.
- [5] Yoav Y. Schechner, Srinivasa G. Narasimhan, and Shree K. Nayar. Polarization-based vision through haze. 20 Janvier, 2003.
- [6] Aubin ALLIES. *Estimation de l'évapotranspiration par télédétection spatiale en Afrique de l'Ouest : vers une meilleure connaissance de cette variable clé pour la région.* PhD thesis, GAIA, 23 Novembre 2018.
- [7] BAI Jie, LIU Shaomin, and MAO Defa. Area-averaged evapotranspiration fluxes measured from large aperture scintillometer in the hai river basin. Environmental Science, 2009.
- [8] John Chilleri, Brian Borchers, Sebastian Hendrickx-Rodriguez, and Jan Hendrickx. Calibration procedures for large aperture scintillometers. 2016.
- [9] Shuai Fang, XiuShan Xia, Xing Huo, and ChangWen Chen. Image dehazing using polarization effects of objects and airlight. 5 Août, 2014.

# Table des figures

2.1	Schéma de principe d'un scintillomètre . . . . .	5
2.2	Scintillomètre de type LAS de Kipp&Zonen . . . . .	5
2.3	Précédente utilisation des scintillomètres utilisés durant le stage	7
2.4	Interface de l'émetteur . . . . .	8
2.5	Comparaison des connecteurs d'alimentations entre le LAS 150 et le LAS MkII . . . . .	9
2.6	Interface du receveur . . . . .	10
2.7	$U$ désigne le signal du <i>led pulse</i> , $CA$ désigne le current adjust et $OV+$ désigne l'overshoot . . . . .	10
2.8	Enregistrement du signal généré par l'émetteur durant les acquisitions . . . . .	11
3.1	Schéma de principe de l' <i>image dehazing</i> selon Yoav Y. Schechner et al . . . . .	13
3.2	Simulation de la brume : eau + goutte de lait . . . . .	15
3.3	Code Matlab correspondant au traitement d'image . . . . .	16

# Index

airlight, 12  
couche limite atmophérique, 6  
current adjust, 8  
direct transmission, 12  
flux intégrés de chaleur sensible, 4  
fonction de structure, 6  
homogénéité, 6  
image dehazing, v  
led power, 8  
led pulse, 8  
milieu turbulent, 4  
onde, 4  
overshoots, 9  
paramètre de structure, 4  
path length, 4  
polarisation, 12  
scintillomètres, 4  
signal strength, 8  
stationnarité, 6  
transect, 8  
télédétection, v